

Artículo de divulgación

Bacterias electrogénicas: Potencial para la generación de energía limpia y la sostenibilidad agrícola en México

Electrogenic bacteria: Potential for clean energy generation and agricultural sustainability in Mexico

Adriana Montiel García ¹ , Sathish-Kumar Kamaraj ^{1*} , Jaime Lam Arriaga ² , Leticia Chávez Olivares ¹ , Gabriel Guillén Gómez ¹ , Edna Carina de la Cruz Terrazas ³ 

¹ Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Instituto Politécnico Nacional (IPN), Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira km 14.5, C. Manzano, Industrial Altamira, Altamira 89600, México

² Secretaría de Educación Pública (SEP), Ciudad de México, México.

³ SECIHTI IPN CICATA Unidad Altamira, Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira km 14.5, C. Manzano, Industrial Altamira, Altamira 89600, México

* Autor para correspondencia: skamaraj@ipn.mx; sathish.bot@gmail.com

Recibido:

15/02/2026

Aceptado:

5/04/2026

Publicado:

1/05/2026

RESUMEN

Las bacterias electrogénicas representan un avance clave en la generación de energía renovable, al producir electricidad directamente desde sus procesos metabólicos en celdas de combustible microbianas (CCM). En un contexto de cambio climático y contaminación ambiental, su importancia radica en ofrecer soluciones sostenibles, especialmente para el sector primario, afectado por la degradación de suelos y aguas que amenaza la producción alimentaria. Estas bacterias realizan la transferencia extracelular de electrones (EET) con alta eficiencia, convirtiendo hasta el 50% de la energía orgánica en electricidad, presentando eficiencias de conversión comparables o superiores a algunos sistemas energéticos convencionales. Entre las especies más electrogénicas destacan *Shewanella oneidensis* y *Geobacter sulfurreducens*. Recientes descubrimientos, como la enzima Huc (identificada hasta 2023), permiten extraer hidrógeno atmosférico para alimentarlas. Históricamente, la electricidad microbiana se remonta a 1911 con Potter, evolucionando hasta prototipos actuales. En México, destacan biobaterías basadas en nopal para zonas semiáridas, generando hasta 285.12 julios con materiales naturales. Sus aplicaciones prácticas incluyen tratamiento de aguas residuales (reduciendo hasta 50% la DQO), biorremediación de metales pesados y recuperación de nutrientes como estruvita. Se hipotetiza su integración en sistemas agrícolas para reducir la dependencia de combustibles fósiles, promoviendo granjas autosuficientes energéticamente. En conclusión, las bacterias electrogénicas fusionan biología, ecología y tecnología, ofreciendo un potencial transformador para el desarrollo rural sostenible, mitigando impactos ambientales y fomentando prácticas agrícolas resilientes.



Palabras clave: bacterias electrogénicas; energía renovable; tratamiento de aguas residuales; biorremediación; celdas de combustible microbianas; nopal; sostenibilidad agrícola; transferencia extracelular de electrones; *Geobacter*; *Shewanella*.

ABSTRACT

Electrogenic bacteria represent a key advance in renewable energy generation, producing electricity directly from their metabolic processes (MFCs-microbial fuel cells). In the context of climate change and environmental pollution, their importance lies in offering sustainable solutions, especially for the primary sector, which is affected by soil and water degradation that threatens food production. These bacteria perform extracellular electron transfer (EET) with high efficiency, converting up to 50% of organic energy into electricity and exhibiting conversion efficiencies comparable to or even higher than some conventional energy systems. Among the most electrogenic species are *Shewanella oneidensis* and *Geobacter sulfurreducens*. Recent discoveries, such as the Huc enzyme (identified in 2023), allow for the extraction of atmospheric hydrogen to power them. Historically, microbial electricity dates to 1911 with Potter, evolving to current prototypes. In Mexico, biobatteries based on prickly pear cactus stand out for semi-arid zones, generating up to 285.12 joules with natural materials. Their practical applications include wastewater treatment (reducing COD by up to 50%), bioremediation of heavy metals, and recovery of nutrients such as struvite. Their integration into agricultural systems is hypothesized to reduce dependence on fossil fuels, promoting energy self-sufficient farms. In conclusion, electrogenic bacteria merge biology, ecology, and technology, offering transformative potential for sustainable rural development, mitigating environmental impacts, and fostering resilient agricultural practices.

Keywords: electrogenic bacteria; renewable energy; wastewater treatment; bioremediation; microbial fuel cells; nopal; agricultural sustainability; extracellular electron transfer; *Geobacter*; *Shewanella*.

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de cambio climático, degradación ambiental y creciente demanda energética, la búsqueda de fuentes de energía renovables y sostenibles se ha convertido en una prioridad global.

De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el sector AFOLU (Agriculture, Forestry and Other Land Use) contribuye aproximadamente con el 24% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (estimaciones basadas en datos de 2010) (IPCC, 2014). Esta situación evidencia la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y

reducir el impacto ambiental. En consecuencia, las bacterias electrogénicas aparecen como una alternativa innovadora dentro del campo de bioelectroquímica. Estos microorganismos poseen la capacidad de transferir electrones hacia electrodos externos, lo que permite generar electricidad a partir de materia orgánica. Más allá de representar una alternativa limpia a los combustibles fósiles, estos sistemas ofrecen beneficios ambientales adicionales, como el tratamiento de aguas residuales, la recuperación de nutrientes y la biorremediación de contaminantes. En el ámbito agrícola, estas tecnologías presentan un potencial interesante porque permiten aprovechar residuos orgánicos generados en actividades agropecuarias para producir energía y reducir impactos ambientales.



Además, su aplicación puede contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles, especialmente en regiones donde el acceso a la infraestructura energética o de saneamiento es limitado.

La motivación de este artículo radica en la necesidad de divulgar el conocimiento científico de manera accesible para comunidades rurales, donde la implementación de tecnologías sostenibles puede convertirse en un motor de desarrollo económico y ecológico. Su importancia se justifica en el potencial que tienen estas bacterias de solucionar problemáticas locales en México, como el tratamiento de aguas residuales en zonas agrícolas semiáridas. Asimismo, recursos regionales como el nopal (*Opuntia spp.*) podrían emplearse como sustratos orgánicos en prototipos de sistemas bioelectroquímicos. El alcance de este trabajo comprende una revisión de los mecanismos biológicos que permiten la generación de electricidad por bacterias electrogénicas, así como sus posibles aplicaciones en el sector agrícola y ambiental. No obstante, también se reconocen algunas limitaciones actuales, como los desafíos asociados a la escalabilidad tecnológica y a los costos iniciales de implementación, los cuales aún representan barreras para su adaptación a gran escala.

Este trabajo parte de la hipótesis de que las bacterias electrogénicas pueden contribuir a mejorar la eficiencia energética en sistemas agrícolas, reducir la huella de carbono y fortalecer la resiliencia al cambio climático. El objetivo fundamental es presentar un trabajo de síntesis de la información disponible, ofreciendo un panorama general del tema y abriendo la puerta a futuras investigaciones. Para ello, se revisan contribuciones fundamentales en el área, como los estudios de Derek R. Lovley (2012) sobre electromicrobiología, así como investigaciones recientes (2023-2025) relacionadas con nuevos mecanismos metabólicos, incluyendo el papel de la enzima "Huc" (Grinter et al., 2023), por mencionar solamente algunos ejemplos. Además, el artículo acopia aspectos clave de la historia del tema desde los experimentos de Potter en 1911 hasta las aplicaciones actuales en la biorremediación. En conjunto, este panorama muestra cómo la curiosidad científica ha permitido transformar procesos naturales en herramientas tecnológicas, capaces de contribuir al desarrollo de modelos agrícolas más sostenibles y resilientes. Esta introducción sirve como punto de partida para profundizar en los mecanismos y

aplicaciones que podrían convertir a las bacterias electrogénicas en una herramienta prometedora para la agricultura en el futuro.

BACTERIAS ELECTROGÉNICAS COMO FUENTE DE ENERGÍA

El uso de bacterias electrogénicas como fuente de energía renovable ha captado la atención del mundo científico en las últimas décadas, a raíz de los avances en bioelectroquímica y microbiología ambiental. Para valorar su potencial, resulta fundamental comenzar por los aspectos más básicos: conocer sus mecanismos de funcionamiento, los tipos de bacterias involucradas, los compuestos orgánicos involucrados y los ámbitos en los que puede aplicarse. En este sentido, los ecosistemas naturales y los sistemas agrícolas representan escenarios de gran interés para el estudio y aplicaciones de estos microorganismos. Los suelos y residuos orgánicos generados en las actividades agrícolas contribuyen a crear ambientes ricos en materia orgánica y en diversidad microbiana, condiciones que favorecen el desarrollo de bacterias capaces de participar en procesos bioelectroquímicos. Esto abre la posibilidad de aprovechar dichos recursos para generar energía y, al mismo tiempo, contribuir al manejo sostenible de los residuos y al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles.

GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD EN CELDAS DE COMBUSTIBLE MICROBIANAS

Las bacterias electrogénicas suelen vivir en ambientes anaeróbicos, es decir, en lugares donde el oxígeno es escaso o inexistente. En estas condiciones, los microorganismos utilizan aceptores de electrones para completar su metabolismo, como minerales, materiales metálicos o electrodos artificiales. Este proceso se conoce como transferencia extracelular de electrones (EET por sus siglas en inglés) y constituye el mecanismo fundamental mediante el cual estas bacterias pueden generar electricidad. Existen dos formas principales de EET: transferencia directa e indirecta. En la transferencia directa, las bacterias utilizan estructuras especializadas para transportar electrones hacia superficies externas. Entre estas estructuras se



encuentran los pili conductores o nanocables biológicos, formados por fibras proteicas conductoras ricas en citocromos, proteínas que contienen hierro y permiten la conducción electrónica. Por ejemplo, *Geobacter sulfurreducens* desarrolla una elevada capacidad conductiva al formar biofilms densos sobre electrodos. En estos biofilms, los pili funcionan como "cables eléctricos" naturales, permitiendo el transporte de electrones a lo largo de micrómetros con conductividades comparables a algunos materiales sintéticos (Reguera et al., 2005). Gracias a esta estrategia metabólica, estas bacterias pueden sobrevivir en ambientes con sedimentos profundos o suelos contaminados, transformando la oxidación de compuestos orgánicos hacia el medio externo en un flujo de electrones que puede ser aprovechado como electricidad.

Por otro lado, la EET indirecta involucra la secreción de mediadores solubles que transportan electrones entre la célula y el electrodo, como flavinas o fenazinas, que actúan como "transportadores electrónicos" o electron shuttles entre la célula y el electrodo externo. Un organismo modelo en este tipo de mecanismos es *Shewanella oneidensis*, que secreta flavinas capaces de transferir electrones al medio externo. Aunque este mecanismo ofrece mayor flexibilidad metabólica, generalmente presenta menor eficiencia energética debido a las pérdidas asociadas a la difusión de los mediadores (Marsili et al., 2008). En celdas de combustible microbianas (CCM), estas bacterias se adhieren al ánodo, donde oxidan sustratos como glucosa, acetato o residuos agrícolas. Durante este proceso se generan protones (H^+), electrones (e^-) y dióxido de carbono (CO_2). Los electrones fluyen a través de un circuito externo hacia el cátodo, generando corriente eléctrica. Finalmente, en el cátodo los electrones reaccionan con oxígeno y protones para formar agua.

Un ejemplo simplificado de este proceso puede representarse mediante la reacción de oxidación de la sacarosa (Logan et al., 2006):



(Logan et al., 2006). Factores operativos como pH (óptimo entre 6-9 en el ánodo), temperatura (30-45°C) y tasa de carga orgánica influyen directamente en la eficiencia. Temperaturas elevadas aceleran la cinética metabólica, pero incrementan costos operativos. Estudios recientes indican que bacterias comunes como

Escherichia coli pueden inducir procesos de EET bajo condiciones de estrés ambiental, liberando electrones para su supervivencia (Jahnke et al., 2021). Además, en comunidades microbianas mixtas, ocurre transferencia inter-especies, donde una bacteria oxida sustratos y otra reduce aceptores, potenciando la eficiencia global del sistema. Desde el punto de vista energético, la eficiencia teórica de conversión en celdas de combustible microbianas puede alcanzar valores cercanos al 50%, superiores a los de muchos sistemas fotovoltaicos convencionales (Pant et al., 2010). No obstante, la potencia generada actualmente suele ser baja, generalmente del orden de miliwatts por metro cuadrado, impulsando investigaciones enfocadas en optimizar los materiales de los electrodos empleando recubrimientos conductivos, grafito modificado o materiales basados en carbono.

TIPOS DE BACTERIAS ELECTROGÉNICAS Y SU DIVERSIDAD

La diversidad de bacterias electrogénicas incluye microorganismos capaces de adaptarse a ambientes muy variados, desde sedimentos contaminados y suelos agrícolas hasta microbiomas asociados a organismos vivos. Esta diversidad metabólica explica el creciente interés por su aplicación en sistemas bioelectroquímicos y en procesos de recuperación ambiental. Entre las especies más estudiadas se encuentra *Geobacter sulfurreducens*, aislada de lodos industriales. Esta bacteria destaca por su capacidad para generar altas densidades de corriente en CCM, que pueden alcanzar valores cercanos a 3 A/m². Esta eficiencia se debe principalmente a la presencia de pili conductores o nanocables biológicos, que facilitan la formación de biofilms electroactivos altamente eficientes sobre los electrodos (Reguera et al., 2006). Otra especie relevante es *Geobacter metallireducens*, que además de participar en procesos de transferencia de electrones puede oxidar compuestos aromáticos tóxicos, como el benceno, integrando procesos de biorremediación con generación energética. (Lovley et al., 1993). Estas especies son ideales para aplicaciones agrícolas en suelos contaminados por pesticidas o fertilizantes.

Por su parte, *Shewanella oneidensis* destaca por su versatilidad metabólica. Este microorganismo puede utilizar diferentes aceptores de electrones, como óxidos



de hierro o magnesio, y emplea mediadores solubles para realizar la transferencia extracelular de electrones. Además, su tolerancia a variaciones térmicas la hace adecuada para sensores ambientales y sistemas bioelectroquímicos aplicados a entornos agrícolas. (Fredrickson et al., 2008). Otras bacterias también presentan propiedades electroactivas destacables. Por ejemplo, *Rhodospseudomonas palustris*, que combina fotosíntesis con EET, lo que permite aprovechar la energía solar y la materia orgánica simultáneamente, una característica importante para su integración en sistemas agrícolas sostenibles (Bose et al., 2014). Asimismo, algunos microorganismos en condiciones extremas como *Pyrococcus furiosus* generan corriente eléctrica a 100°C, lo que abre posibilidades en procesos agroindustriales que operan a altas temperaturas (Lipscomb et al., 2011). En estudios recientes se ha demostrado que ciertas bacterias asociadas al microbioma, como *Listeria monocytogenes*, poseen mecanismos de EET. Aunque se trata de un microorganismo patógeno y no se considera para aplicaciones agrícolas, su estudio permite comprender mejor estos procesos metabólicos y sugiere que la transferencia electrónica podría ser más ampliamente distribuida entre las bacterias de lo que se pensaba. (Light et al., 2018).

Las bacterias rara vez actúan de forma aislada, en muchos sistemas bioelectroquímicos se desarrollan consorcios microbianos complejos, frecuentemente denominados por grupos como Proteobacteria y Pseudomonas, dentro de estas comunidades, especies como *Thiobacillus sp.* pueden participar en procesos como la reducción de nitratos, lo que contribuye a aumentar la estabilidad y eficiencia de los sistemas en ambientes variables, como suelos agrícolas sometidos a fertilización (Ishii et al., 2013). Esta diversidad permite adaptaciones específicas, desde desechos agroindustriales hasta suelos salinos, fomentando comunidades mixtas para mayor eficiencia y resiliencia de los sistemas bioelectroquímicos.

APLICACIONES PRÁCTICAS EN AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE

Las aplicaciones de bacterias electrogénicas trascienden la generación energética, impactando directamente la agricultura sostenible. En los últimos años, estos

microorganismos han demostrado un gran potencial para contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles y tecnologías ambientales innovadoras. Una de las aplicaciones más estudiadas es el tratamiento de aguas residuales mediante CCM. En estos sistemas, las bacterias degradan compuestos orgánicos presentes en el agua mientras transfieren electrones hacia un electrodo, produciendo electricidad. Este proceso permite reducir significativamente la contaminación del agua, reduciendo hasta el 50% de la demanda química de oxígeno (DQO) y disminuyendo los costos de operación en plantas de tratamiento, especialmente en comunidades rurales (Du et al., 2007). Diversos estudios piloto han demostrado ser viables utilizando CCM para el tratamiento de aguas residuales domésticas o agrícolas hacia 2030 (Aelterman et al., 2006). En México, investigaciones desarrolladas por el Grupo Nexus Sustentable CICATA-IPN han explorado la aplicación de estas tecnologías en regiones semiáridas. En estos estudios se han construido prototipos de celdas microbianas empleando varillas cerámicas y biomasa de nopal (*Opuntia albicarpa*) como sustrato, logrando generar 285.12 julios de energía en condiciones experimentales. Estos resultados sugieren que la tecnología podría adaptarse a granjas o comunidades rurales con recursos limitados, donde los residuos agrícolas pueden convertirse en una fuente alternativa de energía. (Figura 1) (Apollon et al., 2020).

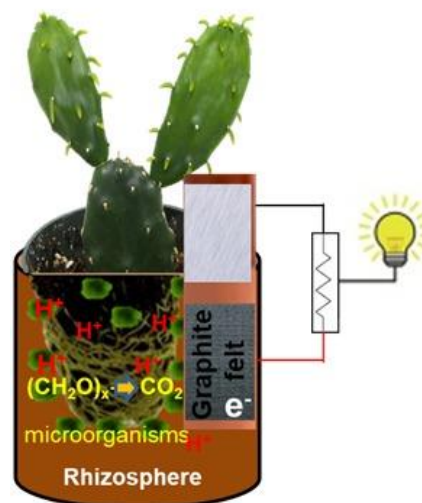


Figura 1. Biobatería para generación de energía con nopal. Fuente: Grupo Nexus Sustentable CICATA-IPN Altamira.

Otra línea de investigación se centra en la CCM que permiten producir biohidrógeno a partir de materia orgánica. En estos sistemas, los microorganismos facilitan reacciones electroquímicas alcanzando eficiencias cercanas al 60% en la conversión de CO₂ en compuestos orgánicos como el acetato, complementando las fuentes de energía renovables (Liu et al., 2005). Las bacterias electrogénicas también han demostrado ser útiles en procesos de biorremediación. En suelos o aguas contaminadas, estos microorganismos permiten reducir metales pesados, como el cobre, transformándolos a formas inertes mientras generan corriente eléctrica. Este proceso puede facilitar la recuperación de suelos contaminados por actividades de minería o por el uso intensivo de fertilizantes (Nancharaiah et al., 2015). Otra aplicación es el desarrollo de biosensores basados en CCM, capaces de medir en tiempo real parámetros como la demanda biológica de oxígeno (DBO) en cuerpos de agua (Kim et al., 2007). Estos dispositivos podrían utilizarse en el monitoreo de la calidad de agua destinada al riego agrícola, permitiendo detectar cambios en la carga orgánica de forma rápida y económica.

En agricultura directa, se han desarrollado sistemas conocidos como celdas de combustible microbianas vegetales (PMFC por sus siglas en inglés), en los cuales las raíces de las plantas liberan compuestos orgánicos que sirven como fuente de energía para las bacterias electrogénicas. De esta forma, es posible generar energía *in situ* en el suelo de cultivos vivos, como arroz o maíz, sin afectar el crecimiento de las plantas (Strik et al., 2008). Se han propuesto prototipos construidos con materiales naturales o de bajo costo, como barro, madera o papel (Figura 2), lo que permite desarrollar sistemas accesibles para comunidades rurales (Montes-Ochoa et al., 2025) (Sathish-Kumar et al., 2017). Además de estas aplicaciones, investigaciones recientes exploran el uso de sistemas bioelectroquímicos para remover antibióticos presentes en residuos ganaderos, recuperar nutrientes como nitrógeno o fósforo en forma de estruvita para fertilizantes, o incluso realizar procesos de desalinización mediante celdas de desalación microbiana (MDC por sus siglas en inglés) para producir agua potable en zonas áridas. Asimismo, los avances en electrosíntesis microbiana abren la posibilidad de convertir CO₂ en compuestos útiles, como combustibles o productos químicos de valor agregado. En suelos, la bioelectrorremediación degrada contaminantes usando comunidades microbianas nativas mientras que facilita

procesos de transferencia de electrones que favorecen la recuperación del ecosistema. En un futuro, estas tecnologías podrían aplicarse en diversos escenarios, desde sistemas cerrados de reciclaje de recursos en misiones espaciales hasta aplicaciones industriales desarrolladas por empresas emergentes, como JSP Enviro en India, orientadas al tratamiento de efluentes textiles (2025).



Figura 2. Prototipos con materiales naturales (barro, madera, papel). Fuente: Grupo Nexus Sustentable CICATA-IPN Altamira.

DESAFÍOS Y OPTIMIZACIONES

A pesar del potencial de las CCM, aún existen diversos desafíos que limitan su aplicación a gran escala. Uno de ellos es la baja densidad de potencia, que suele encontrarse en el orden de los miliwatts/m², lo que dificulta su escalamiento industrial (Logan y Regan, 2006). Otro factor es el costo de los materiales utilizados en los electrodos, particularmente en el cátodo, donde se emplean catalizadores basados en platino. Una alternativa es el uso del electrodo de grafito modificado o materiales basados en carbono, que permiten mejorar la conductividad y reducir los costos del sistema (Wei et al., 2011). La estabilidad de los biofilms microbianos también representa un reto importante. Factores como cambios de pH, temperatura o la presencia de contaminantes pueden afectar el crecimiento y la actividad metabólica de las bacterias electrogénicas. Para superar estas limitaciones, algunos estudios han propuesto estrategias de ingeniería genética orientadas a mejorar la capacidad de transferencia de electrones y la tolerancia de los microorganismos a condiciones adversas (Yang et al., 2012). Otras investigaciones de optimización tecnológica han utilizado polímeros

basados en osmio para mejorar los procesos de electrocatálisis (Kavanagh y Leech, 2013) y membranas de intercambio protónico como *Nafion* para la separación de reacciones, mientras que líquidos iónicos emergentes se investigan como alternativas para optimizar la conductividad y la estabilidad de los sistemas bioelectroquímicos. Cuando estos sistemas se escalan a piloto, aparecen otros desafíos operativos, como la formación de incrustaciones en los electrodos, que pueden reducir la eficiencia del sistema. Para mitigar estos problemas, se ha propuesto el diseño de reactores con configuraciones de flujo ascendente, que facilitan la circulación del sustrato y reducen la acumulación de depósitos. La integración de herramientas de inteligencia artificial y monitoreo digital podría permitir el control en tiempo real de parámetros operativos, como pH, carga orgánica, optimizando el rendimiento de las celdas microbianas (Siegert et al., 2015). Para el 2030 se estima que los sistemas basados en CCM podrían contribuir al tratamiento de hasta el 20% de las aguas residuales a nivel global, generando cantidades significativas de energía a escala de gigawatts (Rozendal et al., 2008). De acuerdo con reportes de mercado recientes, el mercado global de CCM se estimó en 300 millones de USD en 2024 y podría superar los 1.2 mil millones de USD hacia 2033, con una tasa de crecimiento anual cercana al 17.5% (Verified Market Reports, 2024). Este crecimiento está impulsado por la necesidad de soluciones sostenibles para el tratamiento de residuos y la generación de energía renovable.

Los valores de eficiencia y densidad de corriente presentados en la Tabla 1 corresponden a resultados reportados en distintos estudios y pueden variar según las condiciones operativas del sistema, como el tipo de sustrato, el diseño del reactor, pH y la temperatura.

Tabla 1. Comparación de eficiencia en CCM con diferentes sustratos. Fuente: Logan et al. (2006); Pant et al. (2010); Apollon et al. (2020)

Sustrato	η (%)	j (A/m ²)	Condiciones principales	Aplicación Agrícola
Acetato	50	3	pH 6.5–7.5; 25–30 °C, reactor batch; electrodos de carbono	Tratamiento de desechos orgánicos
Aguas residuales	40	2	COD 200–1000 mg/L; pH ~7–8; 20–30 °C; reactor de una o dos cámaras	Limpieza de efluentes ganaderos

Nopal (<i>Opuntia</i>)	55	2.5	P-MFC; ánodo de rizosfera; cátodo aire; 18–35 °C	Biobaterías en zonas semiáridas
--------------------------	----	-----	--	---------------------------------

CONCLUSIONES

Las bacterias electrogénicas sintetizan el ingenio natural para transformar residuos orgánicos en energía limpia, mediante sistemas bioelectroquímicos como las CCM. Diversos estudios han demostrado su capacidad para generar electricidad a partir de materia orgánica, al mismo tiempo que contribuyen al tratamiento de aguas residuales, la recuperación de nutrientes y la biorremediación de contaminantes. En el contexto agrícola, estas tecnologías podrían aprovechar residuos agroindustriales y biomasa vegetal para producir energía y reducir impactos ambientales. No obstante, su aplicación a gran escala aún presenta desafíos importantes. La baja densidad de potencia, los costos asociados a algunos materiales de los electrodos y las dificultades para mantener la estabilidad de las comunidades microbianas en condiciones variables representan limitaciones que actualmente restringen su implementación industrial. A pesar de estas limitaciones, el desarrollo continuo de nuevos materiales, estrategias de optimización microbiológica y diseños de reactores más eficientes podría favorecer la consolidación de estas tecnologías a mediano plazo. En este sentido, las bacterias electrogénicas constituyen una línea de investigación interdisciplinaria con potencial para contribuir en el desarrollo de sistemas agrícolas más sostenibles, resilientes y energéticamente eficientes.

Agradecimientos

Se agradece al Grupo Nexus Sustentable CICATA-IPN Altamira por proporcionar datos prácticos y prototipos, así como a instituciones como IPN por apoyo en investigación en SIP- 20240941, 20253452 y 20260802.

Literatura citada

- Aelterman, P.; Rabaey, K.; Clauwaert, P.; Verstraete, W. (2006) Microbial fuel cells for wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 54(8), 9–15. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.702>
- Apollon, W.; Kamaraj, S-K.; Silos-Espino, H.; Perales-Segovia, C.; Valera-Montero, L.; Maldonado-Ruelas, V.; Vázquez-Gutierrez, M.; Ortiz-Medina, R.; Flores-Benitez, S.; Gómez-Leyva, J. (2020) Impact of



- Opuntia species plant bio-battery in a semi-arid environment: Demonstration of their applications. *Applied Energy*, 279, 115788. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115788>
- Bose, A.; Gardel, E.J.; Vidoudez, C.; Parra, E.A.; Girguis, P.R. (2014) Electron uptake by iron-oxidizing phototrophic bacteria. *Nature Communications*, 5, 3391. <https://doi.org/10.1038/ncomms4391>
- Du, Z.; Li, H.; Gu, T. (2007) A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25(5), 464-482. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.05.004>
- Fredrickson, J.K.; Romine, M.F.; Beliaev, A.S.; Auchtung, J.M.; Driscoll, M.E.; Gardner, T.S.; Nealon, K.H.; Osterman, A.L.; Pinchuk, G.; Reed, J.L.; Rodionov, D.A.; Rodrigues, J.L.M.; Saffarini, D.A.; Serres, M.H.; Spormann, A.M.; Zhulin, I.B.; Tiedje, J.M. (2008) Towards environmental systems biology of *Shewanella*. *Nature Reviews Microbiology*, 6(8), 592-603. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1947>
- Grinter, R.; Kropp, A.; Venugopal, H.; Senger, M.; Badley, J.; Cabotaje, P.R.; Jia, R.; Duan, Z.; Huang, P.; Stripp, S.T.; Barlow, C.K.; Belousoff, M.; Shafaat, H.S.; Cook, G.M.; Schittenhelm, R.B.; Khalid, S.; Berggren, G.; Greening, C.; (2023) Structural basis for bacterial energy extraction from atmospheric hydrogen. *Nature*, 615(7954), 541-547. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05781-7>
- IPCC, 2014: Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de Redacción Principal, RK Pachauri y LA Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 151 págs.
- Ishii, S.; Suzuki, S.; Norden-Krichmar, T.M.; Tenney, A.; Chain, P.S.; Scholz, M.B.; Nealon, K. H.; Bretschger, O. (2013) A novel metatranscriptomic approach to identify gene expression dynamics during extracellular electron transfer. *Nature Communications*, 4, 1601. <https://doi.org/10.1038/ncomms2615>
- Jahnke, J.P.; Sarkes, D.A.; Liba, J.L.; Sumner, J.J.; Stratis-Cullum, D.N. (2021) Improved Microbial Fuel Cell Performance by Engineering *E. coli* for Enhanced Affinity to Gold. *Energies* (Basel) 14(17), 5389. <https://doi.org/10.3390/en1417538>
- Kavanagh, P.; Leech, D. (2013) Mediated electron transfer in fuel cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 15(13), 4859-4869. <https://doi.org/10.1039/C3CP44617D>
- Kim, B.H.; Chang, I.S.; Gadd, G.M. (2007) Challenges in microbial fuel cell development and operation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 76(3), 485-494. <https://doi.org/10.1007/s00253-007-1027-4>
- Light, S.H.; Su, L.; Rivera-Lugo, R.; Cornejo, J.A.; Louie, A.; Iavarone, A.T.; Ajo-Franklin, C. M.; Portnoy, D.A. (2018) A flavin-based extracellular electron transfer mechanism in diverse Gram-positive bacteria. *Nature*, 562(7725), 140-144. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0498-z>
- Lipscomb, G.L.; Stirrett, K.; Schut, G.J.; Yang, F.; Jenney, F.E.; Scott, R.A.; Adams, M.W.W.; Westpheling, J. (2011) Natural Competence in the Hyperthermophilic Archaeon *Pyrococcus furiosus* Facilitates Genetic Manipulation: Construction of Markerless Deletions of Genes Encoding the Two Cytoplasmic Hydrogenases. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(7), 2232-2238. <https://doi.org/10.1128/AEM.02624-10>
- Liu, H.; Grot, S.; Logan, B.E. (2005) Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environmental Science & Technology*, 39(11), 4317-4320. <https://doi.org/10.1021/es050244p>
- Logan, B.E.; Regan, J.M. (2006) Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends in Microbiology*, 14(12), 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2006.10.003>
- Logan, B.E.; Hamelers, B.; Rozendal, R.; Schröder, U.; Keller, J.; Freguia, S.; Aelterman, P.; Verstraete, W.; Rabaey, K. (2006) Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181-5192. <https://doi.org/10.1021/es0605016>
- Lovley, D.R. (2012) Electromicrobiology. *Annual Review of Microbiology*, 66, 391-409. DOI: 10.1146/annurev-micro-092611-150104
- Lovley, D.R.; Giovannoni, S.J.; White, D.C.; Champine, J.E.; Phillips, E.J.; Gorby, Y.A.; Goodwin, S. (1993) *Rhodospseudomonas palustris* gen. nov. sp. nov., a microorganism capable of coupling the complete



- oxidation of organic compounds to the reduction of iron and other metals. *Archives of Microbiology*, 159(4), 336-344. <https://doi.org/10.1007/BF00290916>
- Marsili, E.; Baron, D.B.; Shikhare, I.D.; Coursolle, D.; Gralnick, J.A.; Bond, D.R. (2008) Shewanella secretes flavins that mediate extracellular electron transfer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(10), 3968-3973. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710525105>
- Montes-Ochoa, Á.R.; Kamaraj, S.K.; Apollon, W. Selvaraj, V.; Alvarez-Gallegos, A.; Sánchez-Cárdenas, M.; Sánchez-Olmos, L.; Thirumurugan, A. (2025) Sustainable reutilization of MnO₂ from disposable alkaline batteries for microbial fuel cell applications. *Next Energy*, 8, 100311. <https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100311>
- Nancharaiah, Y.V.; Venkata Mohan, S.; Lens, P.N.L. (2015) Metals removal and recovery in bioelectrochemical systems: A review. *Bioresource Technology*, 195, 102-14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.06.058>
- Pant, D.; Van Bogaert, G.; Diels, L.; Vanbroekhoven, K. (2010) A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533-1543. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.017>
- Reguera, G.; McCarthy, K.D.; Mehta, T.; Nicoll, J.S.; Tuominen, M.T.; Lovley, D.R. (2005) Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature*, 435(7045), 1098-1101. DOI: 10.1038/nature03661
- Reguera, G.; Nevin, K.P.; Nicoll, J.S.; Covalla, S.F.; Woodard, T.L.; Lovley, D.R. (2006) Biofilm and nanowire production leads to increased current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(11), 7345-7348. <https://doi.org/10.1128/AEM.01444-06>
- Rozendal, R.A.; Hamelers, H.V.; Rabaey, K.; Keller, J.; Buisman, C.J. (2008) Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends in Biotechnology*, 26(8), 450-459. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.04.008>
- Rozendal, R.A.; Hamelers, H.V.; Molenkamp, R.J.; Buisman, C.J. (2007) Performance of single chamber biocatalyzed electrolysis with different types of ion exchange membranes. *Water Research*, 41(9), 1984-1994. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.019>
- Sathish-Kumar, K.; Vignesh, V.; Caballero-Briones, F. (2017) Sustainable Power Production from Plant-Mediated Microbial Fuel Cells. In: Dhanarajan, A. (eds), *Sustainable Agriculture towards Food Security*. Singapore: Springer Singapore, 2017, 85-107. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6647-4_6
- Siegert, M.; Yates, M.D.; Call, D.F.; Zhu, X.; Spormann, A.; Logan, B.E. (2014) Comparison of Nonprecious Metal Cathode Materials for Methane Production by Electromethanogenesis. *Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(4), 910-917. <https://doi.org/10.1021/sc400520x>
- Strik, D.P.; Hamelers, H.V.; Snel, J.F.; Buisman, C.J. (2008) Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 32(9), 870-876. <https://doi.org/10.1002/er.1397>
- Tender, L.M.; Gray, S.A.; Groveman, E.; Lowy, D.A.; Kauffman, P.; Melhado, J.; Tyce, R.C.; Flynn, D.; Petrecca, R.; Dobarro, J. (2008) The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply: powering a meteorological buoy. *Journal of Power Sources*, 179(2), 571-575. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.12.123>
- Verified Market Reports. (2024). *Microbial Fuel Cell Market Size and Forecast*.
- Wei, J.; Liang, P.; Huang, X. (2011) Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 102(20), 9335-9344. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.019>
- Yang, Y.; Xu, M.; Guo, J.; Sun, G. (2012) Bacterial extracellular electron transfer in bioelectrochemical systems. *Process Biochemistry*, 47(12), 1707-1714. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2012.07.032>
- Zhang, F.; Jacobson, K.S.; Torres, P.; He, Z.; Nealsen, K.H. (2010) Effects of anolyte recirculation rates and catholytes on electricity generation in a microbial fuel cell. *Energy & Environmental Science*, 3(9), 1347-1352. <https://doi.org/10.1039/C001201G>

Aviso legal/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son exclusivamente de los autores y colaboradores, y no de Agraria ni de sus editores. Agraria y sus editores no se responsabilizan de ningún daño a personas o bienes que resulte de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido.

