




Artículo de divulgación

Celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) y estrategias MPPT para sistemas agrícolas autónomos

Plant microbial fuel cells (PMFCs) and MPPT strategies for autonomous agricultural systems

Francia Paulette Valencia Tobías ¹ , Marco Antonio Merino Treviño ^{1,*} , Sathish-Kumar Kamaraj ¹ 

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;

fvalenciat2300@alumno.ipn.mx; mmerino@ipn.mx; skamaraj@ipn.mx

* Autor para correspondencia: mmerino@ipn.mx skamaraj@ipn.mx

Recibido:

19/05/2026

Aceptado:

23/06/2026

Publicado:

24/06/2026

RESUMEN

La agricultura moderna enfrenta importantes desafíos relacionados con la disponibilidad de agua, el uso eficiente de recursos y la necesidad de implementar sistemas de monitoreo capaces de operar de manera continua en campo. En este contexto, las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC, por sus siglas en inglés) han surgido como una alternativa innovadora para generar pequeñas cantidades de bioelectricidad aprovechando procesos naturales que ocurren entre las raíces de las plantas y los microorganismos presentes en el suelo. Este trabajo presenta de manera accesible el funcionamiento de las PMFC y su posible aplicación en agricultura inteligente, especialmente en sistemas de monitoreo ambiental, sensores agrícolas y plataformas autónomas de bajo consumo energético. Asimismo, se describen algunas estrategias utilizadas para mejorar el aprovechamiento de la energía generada, como los sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés), así como el potencial de especies vegetales adaptadas a ambientes áridos, como el nopal, para aplicaciones bioenergéticas sostenibles. Finalmente, se discuten los principales retos tecnológicos y las perspectivas futuras de estas tecnologías dentro del desarrollo de sistemas agrícolas más eficientes, sostenibles y compatibles con las necesidades energéticas del campo.

Palabras clave: Bioelectricidad, energías renovables, sensores agrícolas, monitoreo ambiental, sistemas autónomos.

ABSTRACT

Modern agriculture faces significant challenges related to water availability, efficient resource management, and the need to implement monitoring systems capable of operating continuously under field conditions. In this context, Plant Microbial Fuel Cells (PMFC) have emerged as an innovative alternative for generating small amounts of bioelectricity by harnessing natural processes occurring between plant roots and soil microorganisms. This work presents, in an accessible manner, the operating principles of PMFCs and their



potential applications in smart agriculture, particularly in environmental monitoring systems, agricultural sensors, and low-power autonomous platforms. In addition, several strategies used to improve the utilization of the generated energy are described, including Maximum Power Point Tracking (MPPT) systems, as well as the potential of plant species adapted to arid environments, such as cactus pear (*Opuntia* spp.), for sustainable bioenergy applications. Finally, the main technological challenges and future perspectives of these technologies are discussed within the development of more efficient, sustainable agricultural systems compatible with the energy demands of modern farming.

Keywords: Bioelectricity, renewable energy, agricultural sensors, environmental monitoring, autonomous systems.

INTRODUCCIÓN

La agricultura enfrenta actualmente importantes desafíos asociados con el cambio climático, la escasez de agua y la necesidad de producir alimentos de manera más eficiente y sostenible. Frente a este escenario, la agricultura de precisión ha incorporado tecnologías digitales capaces de monitorear variables ambientales en tiempo real, permitiendo optimizar el uso de recursos como agua, fertilizantes y energía.

Sin embargo, uno de los principales retos para la implementación de estas tecnologías continúa siendo el suministro energético de los dispositivos electrónicos utilizados en zonas agrícolas. En regiones rurales o semiáridas, el acceso a redes eléctricas puede ser limitado, mientras que el uso de baterías convencionales implica costos de mantenimiento, reemplazo periódico y generación de residuos.

Ante esta problemática, en años recientes ha surgido el interés por desarrollar tecnologías bioelectroquímicas capaces de generar electricidad a partir de procesos naturales. Entre ellas destacan las celdas de combustible microbianas de plantas, conocidas como Plant Microbial Fuel Cells (PMFC), las cuales aprovechan la interacción entre las raíces de las plantas, los microorganismos presentes en la rizosfera y materiales conductores para producir bioelectricidad de manera continua, generando típicamente voltajes en el intervalo de aproximadamente 0.2 a 1.0 V por unidad, y densidades de potencia del orden de algunos a decenas de mW m^{-2} , dependiendo de la especie vegetal, las condiciones del suelo y la configuración del sistema (Rabaey y Verstraete, 2005; Strik et al., 2008).

A diferencia de otras tecnologías de generación energética, las PMFC permiten obtener energía directamente del entorno natural sin afectar el crecimiento de las plantas. Esta característica ha despertado interés para aplicaciones relacionadas con agricultura inteligente, redes de sensores inalámbricos y sistemas autónomos de monitoreo ambiental, especialmente en regiones con disponibilidad limitada de recursos energéticos (Timmers et al., 2012).

LA NATURALEZA COMO FUENTE DE ENERGÍA

La naturaleza ha inspirado durante siglos el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de energía. Fuentes renovables como el viento, el agua y la radiación solar han permitido generar electricidad de manera más sostenible; sin embargo, en años recientes también ha surgido interés por aprovechar procesos biológicos capaces de producir bioelectricidad.

Algunos microorganismos presentes en el suelo participan en procesos metabólicos asociados con la degradación de materia orgánica. Durante estas reacciones biológicas, ciertas bacterias poseen la capacidad de liberar electrones que pueden ser aprovechados mediante materiales conductores (Rabaey y Verstraete, 2005).

Posteriormente, diversos estudios demostraron que las plantas también podían participar indirectamente en la generación de bioelectricidad. Durante la fotosíntesis, una parte de los compuestos orgánicos producidos por las plantas es liberada al suelo a través de las raíces en forma de exudados radiculares. En la rizosfera, los microorganismos degradan estos compuestos y liberan



electrones que pueden ser captados mediante electrodos adecuados (Borker, 2024).

La interacción entre plantas, microorganismos y materiales conductores permitió el desarrollo de las PMFC, una tecnología bioelectroquímica con potencial para generar pequeñas cantidades de electricidad de manera continua a partir de procesos naturales (M. Helder et al., 2012). Debido a que el proceso aprovecha compuestos liberados naturalmente por las raíces, la producción de bioelectricidad puede realizarse simultáneamente con el desarrollo vegetal, sin afectar de manera importante el crecimiento de las plantas bajo condiciones normales de operación (Marjolein Helder et al., 2012).

¿QUÉ SON LAS PMFC?

Las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) son sistemas bioelectroquímicos que aprovechan la relación entre las raíces, los microorganismos del suelo y los electrodos para generar pequeñas cantidades de electricidad. A diferencia de las celdas microbianas convencionales, las PMFC no dependen de una alimentación externa constante de materia orgánica, ya que las propias plantas liberan compuestos hacia la rizosfera que pueden ser utilizados por bacterias electrogénicas (Borker et al., 2018).

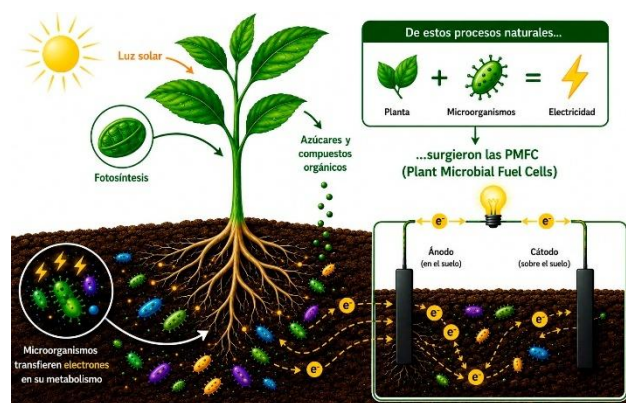


Figura 1. Ejemplo de cómo las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo pueden participar en la generación natural de pequeñas cantidades de electricidad mediante sistemas PMFC.

En una configuración básica, el ánodo se coloca cerca de la zona radicular para captar los electrones generados durante la actividad microbiana, mientras que el cátodo

permite completar el circuito electroquímico. De esta manera, los electrones circulan por un circuito externo y pueden ser aprovechados como energía eléctrica de baja potencia. Dependiendo de la aplicación, esta energía también puede almacenarse temporalmente en dispositivos como capacitores o baterías recargables diseñadas para sistemas de bajo consumo. Aunque la producción energética suele ser limitada, estos sistemas han mostrado potencial para alimentar dispositivos de ultra-bajo consumo y sensores ambientales en zonas con acceso restringido a electricidad (Ballestas et al., 2024; Regmi, Nguyen y Sapkota, 2024).

Además de producir bioelectricidad, las PMFC se han estudiado como herramientas para biorremediación, biosensado, monitoreo de salud vegetal y agricultura de precisión. Esta versatilidad las convierte en una tecnología emergente con interés tanto ambiental como agrícola, especialmente cuando se busca combinar generación energética, monitoreo del cultivo y aprovechamiento sostenible del suelo (Mohanakrishna et al., 2026).

AGRICULTURA INTELIGENTE Y APLICACIONES AGRÍCOLAS

La agricultura inteligente integra sensores, redes inalámbricas y plataformas digitales para monitorear variables agrícolas en tiempo real, permitiendo optimizar el uso de agua, fertilizantes y recursos energéticos. Estas tecnologías ayudan a optimizar la productividad y sostenibilidad de los cultivos.



Figura 2. Representación conceptual de un sistema de agricultura inteligente basado en sensores e Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) para el monitoreo

en tiempo real de variables agrícolas como humedad, temperatura y condiciones del suelo.

Para que estas tecnologías puedan operar de manera continua en campo, es necesario contar con fuentes energéticas sostenibles y de bajo mantenimiento. La generación de bioelectricidad en las PMFC está influenciada por factores abióticos como la humedad, la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes en el suelo, por lo que la producción energética puede variar a lo largo del tiempo; sin embargo, bajo condiciones favorables, el proceso puede mantenerse de manera continua gracias a la actividad conjunta de las plantas y los microorganismos presentes en la rizosfera (Timmers et al., 2010). En regiones rurales o de difícil acceso, el reemplazo frecuente de baterías puede incrementar los costos operativos, por lo que las PMFC han comenzado a estudiarse como fuentes energéticas complementarias para dispositivos agrícolas de ultra-bajo consumo, generalmente con requerimientos energéticos del orden de miliwatts o incluso microwatts (Shanmugavel, Solorza-Feria y Kamaraj, 2024).

Una de las aplicaciones más relevantes corresponde al monitoreo de humedad del suelo. Sensores alimentados parcialmente mediante bioelectricidad podrían ayudar a determinar el momento adecuado para el riego, favoreciendo un uso más eficiente del agua. Asimismo, las PMFC han mostrado potencial para integrarse en plataformas IoT agrícolas capaces de transmitir información ambiental hacia estaciones remotas utilizando sistemas inalámbricos de bajo consumo energético (Osorio de la Rosa et al., 2023). Además de sensores de humedad y temperatura, estas tecnologías podrían contribuir al funcionamiento de nodos de comunicación inalámbrica, estaciones meteorológicas compactas, sistemas de adquisición de datos y plataformas IoT destinadas al monitoreo agrícola remoto.

En este contexto, los sistemas de recolección de energía (*energy harvesting*) han despertado interés debido a su capacidad para alimentar sensores de manera autónoma mediante energía obtenida del entorno. Estas tecnologías buscan reducir la dependencia de baterías convencionales y mantener operaciones continuas de monitoreo en aplicaciones ambientales y agrícolas (Choi et al., 2024). De manera similar, estudios recientes demostraron que sistemas microbianos de suelo pueden

alimentar sensores autónomos durante largos periodos sin necesidad de fuentes externas de energía, evidenciando el potencial de estas tecnologías para aplicaciones agrícolas sostenibles (Kim et al., 2026).

De igual manera, algunas investigaciones exploran el uso de PMFC como biosensores capaces de monitorear el estado fisiológico de las plantas y las condiciones electroquímicas del suelo en tiempo real (Doglioni, Nardello y Brunelli, 2024). Además de generar bioelectricidad, las PMFC representan una alternativa compatible con el desarrollo de agricultura protegida y producción sostenible, ya que permiten producir biomasa y energía simultáneamente mediante procesos naturales asociados con la actividad biológica de la rizosfera (De Schamphelaire et al., 2008).

EL POTENCIAL DEL NOPAL EN SISTEMAS BIOENERGÉTICOS

México posee una amplia diversidad de especies vegetales con potencial para aplicaciones bioenergéticas. Entre ellas destaca el nopal (*Opuntia* spp.), una planta ampliamente distribuida en regiones áridas y semiáridas del país. Además de su importancia cultural y alimentaria, el nopal representa una alternativa de interés para el desarrollo de tecnologías agrícolas sostenibles debido a su capacidad de adaptación a condiciones extremas de temperatura y baja disponibilidad de agua (Brugellis et al., 2024).

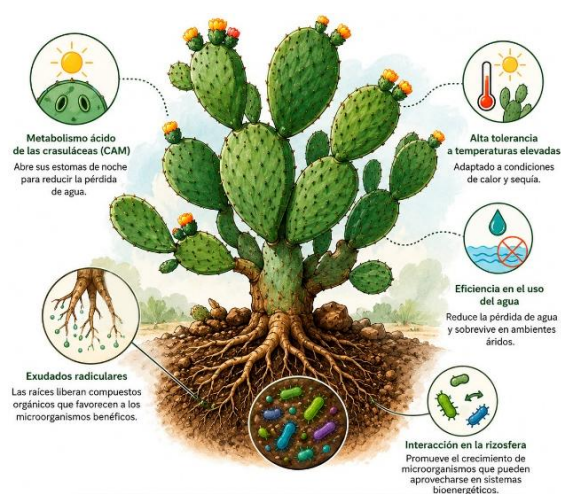


Figura 3. Características fisiológicas y biológicas del nopal (*Opuntia* spp.) con potencial para aplicaciones bioenergéticas, destacando su metabolismo CAM,

tolerancia a ambientes áridos, eficiencia en el uso del agua e interacción con microorganismos presentes en la rizosfera.

Una de las principales características fisiológicas del nopal es su metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM), el cual permite reducir la pérdida de agua y mantener actividad metabólica bajo temperaturas elevadas y condiciones de baja disponibilidad hídrica. Estas propiedades han despertado interés para el desarrollo de sistemas PMFC en ambientes donde otras especies vegetales presentan dificultades de adaptación (Hartzell, Bartlett y Porporato, 2018).

Además de su tolerancia ambiental, las especies del género *Opuntia* generan exudados radiculares capaces de favorecer la actividad microbiana en la rizosfera. Esta interacción entre raíces y microorganismos puede contribuir al proceso de flujo de electrones y, en consecuencia, a la generación de bioelectricidad en sistemas PMFC (Apollon et al., 2021).

Diversos estudios realizados en ambientes semiáridos han demostrado que algunas especies de *Opuntia* pueden producir bioelectricidad de manera continua durante largos periodos de operación. En particular, *Opuntia albicarpa* y *Opuntia ficus-indica* han mostrado resultados prometedores tanto en generación energética como en adaptación a condiciones de baja humedad, lo que evidencia el potencial del nopal para apoyar sistemas de monitoreo agrícola autónomo y tecnologías de agricultura inteligente en zonas rurales con acceso limitado a fuentes convencionales de energía (Apollon et al., 2020).

RETOS Y PROSPECTIVAS FUTURAS

A pesar de los avances recientes, las PMFC todavía enfrentan importantes desafíos tecnológicos. Una de las principales limitaciones continúa siendo la baja densidad de potencia generada, ya que el rendimiento del sistema puede variar dependiendo de factores ambientales como la humedad del suelo, la temperatura y la actividad microbiana. Asimismo, existen dificultades relacionadas con la estabilidad a largo plazo de los electrodos y el bajo voltaje producido, lo que limita su implementación en aplicaciones agrícolas con mayores requerimientos energéticos (Yeo et al., 2018).



Figura 4. Representación conceptual del uso de bioelectricidad generada por PMFC junto con inteligencia artificial y estrategias de optimización energética para el desarrollo de sistemas agrícolas autónomos.

En este contexto, una de las estrategias más prometedoras corresponde a los sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia o Maximum Power Point Tracking (MPPT). Debido a que las PMFC generan voltajes bajos y variables, influenciados por las condiciones ambientales y biológicas del sistema, una parte de la energía disponible puede desaprovecharse durante su transferencia hacia dispositivos electrónicos. Los sistemas MPPT utilizan algoritmos capaces de identificar automáticamente el punto donde la PMFC puede entregar la mayor potencia posible, permitiendo mejorar el aprovechamiento de la bioelectricidad generada y favorecer su integración con sensores, sistemas de monitoreo y otras tecnologías agrícolas de bajo consumo energético (Asnil et al., 2025).

Además, el desarrollo de dispositivos electrónicos de ultra-bajo consumo y sistemas de adquisición de datos ha permitido optimizar el uso de la bioelectricidad producida por las PMFC. Algunas plataformas recientes permiten monitorear múltiples sistemas PMFC en campo mediante herramientas digitales de bajo costo y transmisión remota de información (Maldonado Ruelas et al., 2024).

Diversas investigaciones han demostrado que los algoritmos MPPT pueden incrementar la eficiencia energética y reducir pérdidas asociadas con fluctuaciones del sistema. Asimismo, herramientas basadas en algoritmos adaptativos e inteligencia artificial han mostrado mejoras en estabilidad y aprovechamiento energético de estos sistemas, contribuyendo al monitoreo

predictivo y a la optimización de sensores agrícolas dentro de plataformas de agricultura inteligente (Fan y Feng, 2020; Preethiraj y J, 2024).

En el futuro, tecnologías basadas en bioelectricidad podrían permitir cultivos capaces de alimentar parcialmente sus propios sistemas de monitoreo ambiental, favoreciendo el desarrollo de plataformas agrícolas más autónomas y sostenibles.

CONCLUSIONES

Las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) representan una alternativa emergente dentro del desarrollo de tecnologías sostenibles orientadas a la agricultura inteligente. Su capacidad para generar pequeñas cantidades de bioelectricidad a partir de procesos naturales asociados con la actividad biológica del suelo ha despertado interés en aplicaciones relacionadas con monitoreo ambiental, sensores agrícolas y sistemas autónomos de bajo consumo energético.

Aunque actualmente las PMFC todavía presentan limitaciones relacionadas con la baja densidad de potencia y las variaciones propias de las condiciones ambientales, los avances recientes en materiales, dispositivos electrónicos de ultra-bajo consumo y estrategias de optimización energética han permitido ampliar su potencial de aplicación en entornos agrícolas reales.

Asimismo, la integración de herramientas como IoT, sistemas de recolección de energía e inteligencia artificial podría contribuir al desarrollo de plataformas agrícolas más eficientes, autónomas y sostenibles. En este contexto, especies vegetales adaptadas a ambientes áridos, como el nopal (*Opuntia* spp.), representan una alternativa particularmente atractiva para futuras aplicaciones bioenergéticas en regiones semiáridas.

Aunque estas tecnologías aún se encuentran en etapas de investigación y desarrollo, las PMFC muestran un panorama prometedor para combinar generación energética, monitoreo agrícola y aprovechamiento sostenible de recursos naturales. En el futuro, este tipo de sistemas podría permitir cultivos capaces de alimentar parcialmente sus propios sensores y plataformas de monitoreo ambiental, favoreciendo una agricultura más eficiente y en mayor armonía con el medio ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Unidad Altamira (CICATA Altamira) del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo académico y las facilidades brindadas para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, se agradece al Dr. Marco Antonio Merino Treviño y al Dr. Sathish-Kumar Kamaraj por su orientación, asesoría y valiosas contribuciones durante el desarrollo de la investigación.

Literatura citada

- Apollon, W. *et al.* (2020) “Impact of *Opuntia* species plant bio-battery in a semi-arid environment: Demonstration of their applications”, *Applied Energy*, 279, p. 115788. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.115788>
- Apollon, W. *et al.* (2021) “Progress and recent trends in photosynthetic assisted microbial fuel cells: A review”, *Biomass and Bioenergy*, 148, p. 106028. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106028>
- Asnil, A. *et al.* (2025) “Enhanced incremental conductance MPPT method for maximizing photovoltaic power generation”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 16(4), pp. 2757–2767. <https://doi.org/10.11591/IJPEDS.V16.I4.PP2757-2767>
- Ballestas, E.R. *et al.* (2024) “Power generation potential of plant microbial fuel cells as a renewable energy source”, *Renewable Energy*, 221, p. 119799. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2023.119799>
- Borker, M. *et al.* (2018) “Sustainable bioelectricity generation from living plants”, *Microbial Biotechnology*, 1, pp. 399–412. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6847-8_17/TABLES/3
- Borker, M.M. (2024) “Configurations of Plant-Based Microbial Fuel Cell System and Its Impact on Power Density”, *Photosynthesis-Assisted Energy Generation: From Fundamentals to Lab Scale and In-Field Applications*, pp. 77–86.



<https://doi.org/10.1002/9781394172337.CH4;JOURNAL:JOURNAL:BOOKS;ISSUE:ISSUE:DOI>

- Brugellis, I. *et al.* (2024) “Plant Microbial Fuel Cells in a botanical perspective: Nomenclatural constraints and new insights on plant traits potentially affecting bioelectrical performance”, *Helicon*, 10(19), p. e38733. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E38733>
- Choi, H. *et al.* (2024) “A Current Development of Energy Harvesting Systems for Energy-Independent Bioimplantable Biosensors”, *Small*, 20(43), p. 2403899. <https://doi.org/10.1002/SMLL.202403899;WGROU P:STRING:PUBLICATION>
- Dogliani, M., Nardello, M. y Brunelli, D. (2024) “Plant Microbial Fuel Cells: Energy Sources and Biosensors for battery-Free Smart Agriculture”, *IEEE Transactions on AgriFood Electronics*, 2(2), pp. 460–470. <https://doi.org/10.1109/TAFE.2024.3417644>
- Fan, L.P. y Feng, X. (2020) “Q-Learning based Maximum Power Point Tracking Control for Microbial Fuel Cell”, *International Journal of Electrochemical Science*, 15(10), pp. 9917–9932. <https://doi.org/10.20964/2020.10.63>
- Hartzell, S., Bartlett, M.S. y Porporato, A. (2018) “Unified representation of the C3, C4, and CAM photosynthetic pathways with the Photo3 model”, *Ecological Modelling*, 384, pp. 173–187. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2018.06.012>
- Helder, M. *et al.* (2012) “New plant-growth medium for increased power output of the Plant-Microbial Fuel Cell”, *Bioresource Technology*, 104, pp. 417–423. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.11.005>
- Helder, Marjolein *et al.* (2012) “The flat-plate plant-microbial fuel cell: the effect of a new design on internal resistances”, *Biotechnology for Biofuels* 2012 5:1, 5(1), pp. 70-. <https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-70>
- Kim, M. *et al.* (2026) “Development of a self-powered soil sensor using soil microbial fuel cells for power autonomous sensors for smart agriculture”, *Journal of Power Sources*, 666, p. 239198. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2025.239198>
- Maldonado Ruelas, V.A. *et al.* (2024) “Low Power Voltage Acquisition System for Photosynthesis-Based Microbial Fuel Cells”, *Photosynthesis-Assisted Energy Generation: From Fundamentals to Lab Scale and In-Field Applications*, pp. 221–237. <https://doi.org/10.1002/9781394172337.ch10>
- Mohanakrishna, G. *et al.* (2026) “Plant microbial fuel cells: A self-sustaining bioelectrochemical technology addressing sustainable development goals (SDGs) through bioelectricity production”, *Bioresource Technology*, 446, p. 134076. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2026.134076>
- Osorio de la Rosa, E. *et al.* (2023) “Plant microbial fuel cells as a bioenergy source used in precision beekeeping”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, p. 103499. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2023.103499>
- Preethiraj, P.M. y J, B.E. (2024) “Maximum power point tracking in fuel cells an AI controller based on metaheuristic optimisation”, *Scientific Reports* 2024 14:1, 14(1), pp. 31955-. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83453-w>
- Rabaey, K. y Verstraete, W. (2005) “Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation”, *Trends in Biotechnology*, 23(6), pp. 291–298. <https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2005.04.008>
- Regmi, R., Nguyen, V. y Sapkota, R. (2024) “Plant-Based-Microbial Fuel Cells for Bioremediation, Biosensing, and Plant Health Monitoring”, *Photosynthesis-Assisted Energy Generation: From Fundamentals to Lab Scale and In-Field Applications*, pp. 241–259. <https://doi.org/10.1002/9781394172337.CH11;JOURNAL:JOURNAL:BOOKS;ISSUE:ISSUE:DOI>
- De Schamphelaire, L. *et al.* (2008) “Microbial Fuel Cells Generating Electricity from Rhizodeposits of Rice Plants”, *Environmental Science and Technology*, 42(8), pp. 3053–3058. <https://doi.org/10.1021/ES071938W>



Shanmugavel, D., Solorza-Feria, O. y Kamaraj, S.K. (2024) “Agriculture-based Crop in PMFCs for the Futuristic Sustainable Protected Agriculture”, *Photosynthesis-Assisted Energy Generation: From Fundamentals to Lab Scale and In-Field Applications*, pp. 337–356. <https://doi.org/10.1002/9781394172337.CH15;CTYPE:STRING:BOOK>

Strik, D.P.B.T.B. *et al.* (2008) “Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell”, *International Journal of Energy Research*, 32(9), pp. 870–876. <https://doi.org/10.1002/ER.1397;JOURNAL:JOURNAL:1099114X;ISSUE:ISSUE:DOI>

Timmers, R.A. *et al.* (2010) “Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*”, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86(3), p. 973. <https://doi.org/10.1007/S00253-010-2440-7>

Timmers, R.A. *et al.* (2012) “Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell”, *Applied microbiology and biotechnology*, 94(2), pp. 537–548. <https://doi.org/10.1007/S00253-012-3894-6>

Yeo, J. *et al.* (2018) “Practical Maximum-Power Extraction in Single Microbial Fuel Cell by Effective Delivery through Power Management System”, *Energies 2018, Vol. 11, Page 2312*, 11(9), p. 2312. <https://doi.org/10.3390/EN11092312>

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.

