REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Periocidad trimestral, Volumen 3, Numero 1, Años (2026), Pag. 916 - 942

Recibido: 2026-01-24

Aceptado: 2026-03-06

Publicado: 2026-03-18

Bioelectricidad en plantas vivas: revisión teórica de las celdas de combustible microbianas vegetales, sus mecanismos bioelectroquímicos y desafíos tecnológicos

Bioelectricity in Living Plants: A Theoretical Review of Plant Microbial Fuel Cells, Their Bioelectrochemical Mechanisms, and Technological Challenges

Autores

Roberto Vladimir Coca-Flores[1]
Ingeniero Agrónomo
https://orcid.org/0009-0004-7102-586X
coca.roberto@usfx.bo
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX)
Sucre – Bolivia

Jenny Zarate-Vargas[2]
Docente investigadora de energías alternativas y sistemas energéticos https://orcid.org/0000-0002-6204-045X zarate.vargas@usfx.bo
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX)
Sucre – Bolivia

Arnulfo Borges-Huanca[3]
Investigador en tecnologías ambientales
https://orcid.org/0009-0003-7087-2349
borges.arnulfo@usfx.bo
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX)
Sucre – Bolivia

Rosario Elvira Osorio-Zamora[4]
[4]Docente universitaria especializada en gestión ambiental y sostenibilidad https://orcid.org/0009-0009-8454-5692
osorio.rosario@usfx.bo
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX)
Sucre – Bolivia

Ramiro Orellana-Flores[5]
Docente investigador en microbiología ambiental y biotecnología
https://orcid.org/0009-0000-0183-382X
orellana.ramiro@usfx.bo
Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca (USFX)
Sucre - Bolivia

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Resumen

La búsqueda de fuentes energéticas sostenibles constituye uno de los principales desafíos científicos y tecnológicos del siglo XXI. En este contexto, los sistemas bioelectroquímicos basados en organismos vivos han despertado un creciente interés debido a su capacidad para transformar procesos biológicos naturales en energía eléctrica aprovechable. Entre estas alternativas emergentes destacan las celdas de combustible microbianas asociadas a plantas vivas, conocidas como *Plant Microbial Fuel Cells* (PMFC), sistemas que utilizan las interacciones metabólicas entre las raíces vegetales, los microorganismos presentes en la rizosfera y los procesos de transferencia extracelular de electrones para generar bioelectricidad. El presente estudio desarrolla una revisión teórica del estado actual del conocimiento sobre la producción de bioelectricidad en plantas vivas mediante sistemas PMFC. Se examinan los fundamentos bioquímicos y electroquímicos que sustentan estos dispositivos, con especial atención a los mecanismos de transferencia extracelular de electrones que permiten el flujo de cargas desde los microorganismos electroactivos hacia los electrodos del sistema. Asimismo, se analizan los principales avances experimentales reportados en la literatura científica reciente, junto con los factores biológicos, fisicoquímicos y tecnológicos que influyen en el rendimiento energético de estos sistemas bioelectroquímicos. La revisión también identifica las limitaciones técnicas que actualmente restringen la escalabilidad y aplicación práctica de esta tecnología, entre ellas la baja densidad de potencia generada, la complejidad de las interacciones microbianas en la rizosfera y los desafíos asociados al diseño de electrodos y materiales conductores compatibles con sistemas vivos. Finalmente, se discuten las perspectivas futuras de investigación orientadas al desarrollo de soluciones bioenergéticas sostenibles basadas en la integración de procesos biológicos naturales con tecnologías electroquímicas emergentes.

Palabras clave: Bioelectricidad; Energía renovable; Celdas de combustible microbianas; Fisiología vegetal; Bioelectroquímica.

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Abstract

The search for sustainable energy sources has become one of the most significant scientific and technological challenges of the twenty-first century. Within this context, bioelectrochemical systems based on living organisms have attracted increasing attention because of their ability to convert natural biological processes into usable electrical energy. Among these emerging approaches, Plant Microbial Fuel Cells (PMFCs) represent a promising technology that exploits the metabolic interactions between plant roots, microorganisms inhabiting the rhizosphere, and extracellular electron transfer processes to generate bioelectricity. This study presents a theoretical review of the current state of knowledge regarding bioelectricity production in living plants through PMFC systems. The analysis examines the biochemical and electrochemical foundations that support these devices, with particular emphasis on extracellular electron transfer mechanisms that enable electron flow from electroactive microorganisms toward the system's electrodes. In addition, the review evaluates recent experimental advances reported in the scientific literature and discusses the biological, physicochemical, and technological factors that influence the energy performance of these bioelectrochemical systems. Furthermore, the study identifies the main technical limitations that currently constrain the scalability and practical application of this technology, including the relatively low power density produced, the complexity of microbial interactions within the rhizosphere, and the challenges associated with designing electrodes and conductive materials compatible with living plant systems. Finally, future research perspectives are discussed, highlighting the potential development of sustainable bioenergy solutions based on the integration of natural biological processes with emerging electrochemical technologies.

Keywords: Bioelectricity; Renewable energy; Microbial fuel cells; Plant physiology; Bioelectrochemistry.

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Introducción

Durante las últimas décadas, el incremento sostenido de la demanda energética mundial y los impactos ambientales derivados del uso intensivo de combustibles fósiles han impulsado la búsqueda de fuentes alternativas de energía que sean ambientalmente sostenibles. Diversas estrategias tecnológicas se han orientado hacia el aprovechamiento de recursos renovables capaces de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y, al mismo tiempo, garantizar sistemas energéticos más resilientes. En este escenario, las tecnologías bioenergéticas han adquirido una relevancia creciente al explorar el potencial de los organismos vivos para transformar procesos metabólicos naturales en formas útiles de energía (Logan, 2008; Rabaey & Verstraete, 2005).

Entre las alternativas emergentes dentro de este campo se encuentran los sistemas bioelectroquímicos que utilizan microorganismos para generar corriente eléctrica. Las denominadas celdas de combustible microbianas (*Microbial Fuel Cells*, MFC) constituyen un ejemplo representativo de esta tecnología, ya que aprovechan la actividad metabólica de bacterias electroactivas capaces de transferir electrones hacia electrodos externos durante la degradación de compuestos orgánicos. Este proceso permite convertir la energía química contenida en la materia orgánica en energía eléctrica, lo que ha despertado un considerable interés en la investigación científica y tecnológica relacionada con la producción de bioelectricidad (Logan et al., 2006; Lovley, 2006).

Una variante particularmente innovadora de estos sistemas corresponde a las celdas de combustible microbianas asociadas a plantas vivas, conocidas como *Plant Microbial Fuel Cells* (PMFC). En estos dispositivos, las plantas desempeñan un papel fundamental al liberar compuestos orgánicos a través de sus raíces como parte de los procesos fisiológicos normales de crecimiento. Estos compuestos, conocidos como exudados radiculares, sirven como sustrato para comunidades microbianas presentes en la rizosfera. Durante la degradación microbiana de dichos compuestos se liberan electrones que pueden ser capturados por electrodos insertados en el suelo, lo que permite la generación de corriente eléctrica sin interferir significativamente con el desarrollo de la planta (Strik et al., 2008; Helder et al., 2012).

El funcionamiento de estos sistemas se basa en procesos de transferencia extracelular de electrones (*Extracellular Electron Transfer*, EET), mediante los cuales ciertos microorganismos electroactivos transportan electrones desde sus rutas metabólicas internas hacia superficies conductoras externas. Este transporte puede ocurrir a través de diferentes mecanismos, entre ellos el contacto directo con el electrodo, el uso de estructuras filamentosas conductoras o la mediación de compuestos redox solubles que facilitan el movimiento de electrones entre las células microbianas y los materiales conductores. Estos procesos bioelectroquímicos permiten establecer un flujo continuo de electrones que se traduce en la generación de corriente eléctrica dentro del sistema (Lovley, 2008; Logan, 2008).

ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

A pesar de los avances experimentales registrados durante los últimos años, el desarrollo de sistemas PMFC todavía enfrenta importantes desafíos científicos y tecnológicos. La densidad de potencia generada suele ser relativamente baja en comparación con otras tecnologías energéticas, y el rendimiento del sistema depende de múltiples factores relacionados con la fisiología vegetal, la diversidad microbiana de la rizosfera, las características fisicoquímicas del suelo y el diseño de los electrodos utilizados. Asimismo, las complejas interacciones ecológicas que ocurren en el microambiente radicular dificultan la predicción y optimización del comportamiento electroquímico del sistema (Helder et al., 2012; Timmers et al., 2013).

En este contexto, resulta necesario integrar y analizar de manera sistemática el conocimiento científico disponible sobre los mecanismos que intervienen en la producción de bioelectricidad en plantas vivas. Una revisión teórica permite identificar los principales avances alcanzados en este campo, así como las limitaciones actuales que condicionan su aplicación a mayor escala.

En consecuencia, el objetivo del presente estudio es analizar el estado actual del conocimiento científico sobre la generación de bioelectricidad en plantas vivas mediante sistemas de celdas de combustible microbianas vegetales (PMFC), examinando sus fundamentos bioelectroquímicos, los mecanismos de transferencia extracelular de electrones involucrados y los principales desafíos tecnológicos que condicionan su desarrollo y aplicación futura.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Bases fisiológicas de la conversión bioenergética vegetal

La generación de bioelectricidad en sistemas planta–microorganismo se sustenta en la integración funcional entre la fotosíntesis, la rizodeposición y la actividad metabólica microbiana. La fotosíntesis constituye el punto de partida energético del sistema, al transformar energía luminosa en compuestos orgánicos reducidos transportados hacia los tejidos subterráneos (Blankenship, 2021; Johnson, 2017; Allakhverdiev et al., 2023). Una fracción del carbono fijado es liberado hacia la rizósfera mediante exudación radicular en forma de azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos y compuestos fenólicos, configurando un microambiente altamente dinámico desde el punto de vista bioquímico (Strik et al., 2008; Mutuma et al., 2021).

Diversos estudios han demostrado que entre el 5 % y el 21 % del carbono fijado puede ser liberado al suelo dependiendo de la especie vegetal y las condiciones ambientales (Zhu et al., 2010). Esta rizodeposición constituye la base energética para comunidades microbianas heterotróficas, algunas de las cuales poseen capacidad electroactiva.

Transferencia extracelular de electrones (EET)

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

El mecanismo central que permite la conversión de energía química en electricidad es la transferencia extracelular de electrones (Extracellular Electron Transfer, EET). Este proceso ha sido ampliamente estudiado en celdas de combustible microbianas y se fundamenta en la capacidad de ciertos microorganismos para transferir electrones generados en su metabolismo respiratorio hacia aceptores externos insolubles, incluyendo electrodos conductores (Lovley, 2005; Logan et al., 2006; Richter et al., 2016).

Existen dos rutas principales de EET:

1. **Transferencia directa**, mediante citocromos tipo c localizados en la membrana externa y estructuras filamentosas conductoras denominadas nanocables microbianos.

2. **Transferencia mediada**, esta se produce gracias a compuestos redox solubles, como fenazinas y flavinas, que operan en el medio como transportadores electrónicos externos (Ieropoulos et al., 2022).

Dentro de este ecosistema, ciertos géneros bacterianos, entre los que sobresalen *Geobacter* y *Shewanella*, han evidenciado una eficiencia coulómbica superior en diversos sistemas bioelectroquímicos; dicho rendimiento se debe, fundamentalmente, a una arquitectura molecular altamente especializada que les permite optimizar la conducción de electrones (Lovley, 2005; Logan et al., 2006). En el contexto vegetal, estas bacterias colonizan la rizósfera y forman biopelículas conductoras sobre la superficie del ánodo.

Integración planta–microorganismo–electrodo

En las Plant Microbial Fuel Cells (PMFC), el ánodo se ubica en una zona relativamente anaerobia próxima a las raíces, donde recibe electrones derivados de la oxidación microbiana de exudados. El cátodo, situado en una zona oxigenada, permite la reducción del oxígeno y el cierre del circuito eléctrico (Strik et al., 2008; Santoro et al., 2022). La diferencia de potencial generada depende de la actividad metabólica microbiana, la conductividad del sustrato y la eficiencia de la interfaz electroquímica.

Investigaciones recientes destacan que la eficiencia del sistema está condicionada por la estructura tridimensional del electrodo, el área superficial disponible para colonización microbiana y la resistencia interna del sistema (Huang et al., 2023; Yong et al., 2020). La implementación de óxidos de grafeno, nanotubos de carbono y diversos materiales carbonosos de alta porosidad ha probado ser una estrategia eficaz para elevar la densidad de potencia. Este incremento se sustenta en la capacidad de dichos materiales para optimizar el flujo de electrones, logrando así una mitigación sustancial de las pérdidas óhmicas dentro del sistema. No obstante, incluso en configuraciones optimizadas, la densidad de potencia obtenida en condiciones naturales permanece en rangos de microvatios a milivatios por metro cuadrado (Santoro et al., 2022; Mutuma et al., 2021).

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Este límite responde tanto a restricciones biofísicas en la producción de exudados como a ineficiencias en la competencia microbiana y en la transferencia electrónica.

Sistemas biofotovoltaicos y captura directa de electrones fotosintéticos

Como una vía alternativa de alto interés, los sistemas biofotovoltaicos (BPV) se perfilan hacia la captura directa de electrones vinculados estrechamente a la cadena fotosintética (Choi et al., 2022). En este esquema, los organismos fotosintéticos entran en contacto con superficies conductoras diseñadas para recibir la carga electrónica proveniente de los fotosistemas I o II. No obstante, el éxito de esta interacción choca con una barrera física crítica: tanto las paredes celulares como las membranas tilacoidales actúan como obstáculos estructurales que restringen severamente la fluidez de la transferencia electrónica directa hacia el electrodo.

En consecuencia, la mayoría de los sistemas biofotovoltaicos operativos se han desarrollado con cianobacterias o microalgas debido a su menor complejidad estructural en comparación con tejidos vegetales superiores (Choi et al., 2022). Esto evidencia que la bioelectricidad vegetal directa aún enfrenta limitaciones tecnológicas relevantes.

Fundamentos científicos y tecnológicos

El análisis de los estudios seleccionados evidencia que la generación de electricidad en sistemas basados en plantas vivas depende de la interacción funcional entre procesos fotosintéticos, metabolismo radicular y actividad microbiana de la rizósfera. La fotosíntesis constituye el punto de partida energético del sistema al transformar energía luminosa en compuestos orgánicos reducidos transportados hacia los tejidos subterráneos (Blankenship, 2021; Johnson, 2017). Diversos trabajos coinciden en que una fracción del carbono fijado es liberado por las raíces en forma de exudados orgánicos azúcares, ácidos orgánicos y aminoácidos mediante el proceso de rizodeposición, generando un microambiente metabólicamente activo en el suelo (Strik et al., 2008; Mutuma et al., 2021).

Los estudios revisados señalan que estos compuestos actúan como sustrato energético para comunidades microbianas electroactivas. Durante su respiración anaerobia o microaerobia, dichos microorganismos oxidan los compuestos liberados por la planta, generando electrones y protones transferibles hacia aceptores externos cuando existe un electrodo conductor en contacto con la zona radicular (Lovley, 2005; Santoro et al., 2022). De esta manera, el flujo electrónico biológico puede ser capturado en forma de corriente eléctrica continua.

A nivel biofísico, la energía luminosa es absorbida por los fotosistemas II y I durante la fase fotoquímica, produciendo ATP y NADPH necesarios para la fijación de CO_2 en el ciclo de Calvin–Benson (Johnson, 2017; Blankenship, 2021). Sin embargo, la bioelectricidad vegetal no se origina por extracción directa de electrones desde la

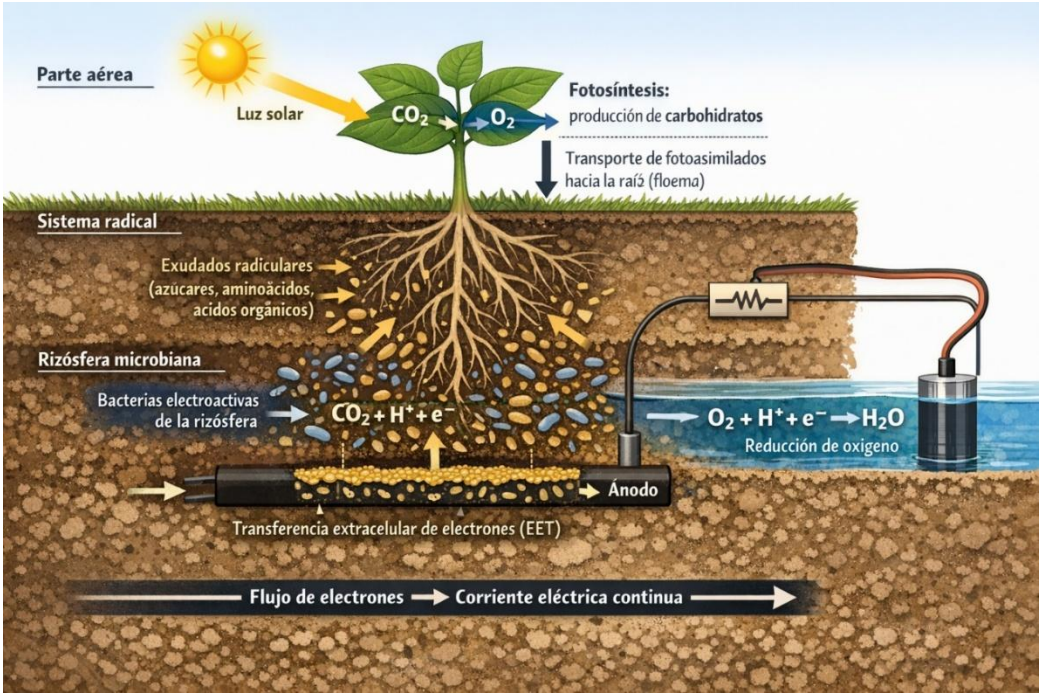
REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

clorofila, sino por la producción constante de compuestos orgánicos que alimentan el metabolismo microbiano de la rizósfera. En consecuencia, la planta actúa como generador primario de sustrato energético, mientras que los microorganismos funcionan como mediadores electroquímicos del sistema (Mutuma et al., 2021).

La transferencia de electrones desde los microorganismos hacia los electrodos ocurre mediante mecanismos de transferencia extracelular de electrones (Extracellular Electron Transfer, EET). Se describen dos rutas principales: transferencia directa a través de citocromos de membrana y nanocables bacterianos conductores, y transferencia mediada mediante compuestos redox solubles como flavinas y fenazinas (Lovley, 2005; Richter et al., 2016; Ieropoulos et al., 2022). Bacterias de los géneros *Geobacter* y *Shewanella* son reportadas de forma recurrente debido a su capacidad para formar biopelículas conductoras sobre superficies de electrodos y facilitar el transporte electrónico (Lovley, 2005; Richter et al., 2016).

En dispositivos tipo Plant Microbial Fuel Cell (PMFC), el ánodo se sitúa en la zona radicular anaerobia donde recibe electrones provenientes de la oxidación microbiana, mientras el cátodo se localiza en una zona oxigenada que actúa como aceptor final de electrones, generando una diferencia de potencial aprovechable en un circuito externo (Strik et al., 2008; Santoro et al., 2022). Investigaciones recientes indican que la eficiencia del sistema depende de la conductividad del electrodo, la proximidad a las raíces, la estructura de la biopelícula microbiana y la disponibilidad de oxígeno en el cátodo (Mutuma et al., 2021).

Figura 1.
Modelo conceptual del funcionamiento de una Plant Microbial Fuel Cell (PMFC).



REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Nota. Figura elaborada por los autores con base en Strik et al. (2008), Mutuma et al. (2021) y Santoro et al. (2022).

La fotosíntesis vegetal produce compuestos orgánicos que son liberados por las raíces como exudados radiculares. Los microorganismos electroactivos de la rizósfera oxidan estos compuestos y transfieren electrones al ánodo mediante mecanismos de transferencia extracelular de electrones, generando corriente eléctrica a través de un circuito externo hasta el cátodo, donde ocurre la reducción de oxígeno.

En esta misma línea, diversas investigaciones subrayan cómo el empleo de materiales con propiedades avanzadas resulta determinante para potenciar el rendimiento eléctrico de los sistemas. Esta literatura técnica pone de manifiesto que la evolución en la arquitectura de los componentes no es solo una mejora cosmética, sino un factor crítico para maximizar la captura y conducción de energía en interfaces biotecnológicas. Electrodos basados en materiales carbonosos porosos, nanotubos de carbono y óxidos de grafeno incrementan el área superficial disponible para colonización microbiana y reducen la resistencia interna del sistema, elevando la densidad de potencia generada (Huang et al., 2023; Santoro et al., 2022). Pese a tales saltos cualitativos, la realidad operativa en entornos naturales sigue arrojando cifras modestas, lo que confirma que el verdadero nudo gordiano de esta tecnología reside en la ineficiencia de la interfaz donde convergen planta, microorganismo y electrodo (Mutuma et al., 2021). Este punto de contacto crítico se mantiene como el principal escollo técnico, sugiriendo que, mientras no logremos optimizar la transferencia en ese microentorno, el rendimiento global del sistema seguirá comprometido. En conjunto, la evidencia científica indica que la bioelectricidad vegetal no proviene directamente del proceso fotoquímico de la fotosíntesis, sino de una cadena metabólica integrada en la cual la planta suministra carbono reducido, los microorganismos realizan la oxidación y el sistema electroquímico captura los electrones liberados. Desde esta perspectiva, las plantas no funcionan como generadores eléctricos directos, sino como proveedores biológicos continuos de energía química transformable en electricidad mediante mediación microbiana (Strik et al., 2008; Santoro et al., 2022).

Enfoques tecnológicos para la generación de bioelectricidad vegetal

La literatura especializada identifica dos enfoques tecnológicos principales en la generación de electricidad a partir de organismos fotosintéticos superiores: (i) las Plant Microbial Fuel Cells (PMFC) y (ii) los sistemas biofotovoltaicos (BPV). Ambos comparten el uso de plantas como fuente primaria de energía solar convertida en energía química, pero difieren sustancialmente en el mecanismo de captación electrónica y en su grado de madurez tecnológica (Strik et al., 2008; Santoro et al., 2022).

1. Plant Microbial Fuel Cells (PMFC)

Las PMFC constituyen la tecnología más consolidada experimentalmente. En estos dispositivos, la electricidad se genera a partir de la oxidación microbiana de compuestos

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

orgánicos liberados por las raíces hacia la rizósfera. El ánodo se sitúa en una zona anaerobia próxima a las raíces, mientras que el cátodo se ubica en una región oxigenada, permitiendo el cierre del circuito eléctrico (Strik et al., 2008; Mutuma et al., 2021).

Estudios comparativos han demostrado que la densidad de potencia en PMFC depende de múltiples factores interrelacionados:

- Especie vegetal y tasa de exudación radicular
- Conductividad eléctrica del suelo
- Estructura y composición del electrodo
- Eficiencia coulómbica microbiana
- Distancia entre raíces y ánodo

(Logan et al., 2006; Lovley, 2005; Santoro et al., 2022).

Los valores reportados en condiciones naturales suelen oscilar entre $\mu W \cdot m^{-2}$ y algunos $mW \cdot m^{-2}$, dependiendo del diseño experimental (Mutuma et al., 2021). Aunque estas magnitudes son bajas en comparación con tecnologías fotovoltaicas convencionales, presentan la ventaja de una producción continua y biológicamente autosostenida.

El desarrollo reciente de materiales avanzados ha permitido mejoras incrementales. Electrodos basados en grafeno, nanotubos de carbono y materiales carbonosos tridimensionales incrementan el área superficial efectiva, favorecen la formación de biopelículas electroactivas y reducen la resistencia interna del sistema (Huang et al., 2023; Yong et al., 2020; Santoro et al., 2022). Sin embargo, el costo de estos materiales aún representa una barrera para aplicaciones a gran escala.

2. Sistemas biofotovoltaicos (BPV)

En contraste, los sistemas biofotovoltaicos buscan captar electrones más directamente asociados a la cadena de transporte fotosintética. Estos dispositivos establecen interfaces fotoelectroquímicas entre organismos fotosintéticos y materiales conductores capaces de aceptar electrones derivados del fotosistema I o II (Choi et al., 2022).

El mayor obstáculo que presentan las plantas superiores reside en su propia arquitectura celular; específicamente, las paredes celulares y las membranas tilacoidales operan como muros físicos que merman la fluidez de la transferencia electrónica directa. Esta restricción estructural explica por qué el grueso de las investigaciones biofotovoltaicas con mejores resultados se ha volcado hacia el uso de microalgas y cianobacterias (Choi et al., 2022; Zapién-Rodríguez & Solorio de Jesús, 2019). Si bien en el laboratorio los sistemas BPV logran emitir respuestas fotoeléctricas casi instantáneas bajo entornos

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

monitorizados, su talón de Aquiles sigue siendo la estabilidad operativa prolongada y la caída en picado del rendimiento cuando se exponen a las variables impredecibles del campo abierto.

Avances recientes en eficiencia bioelectroquímica, microbiología rizosférica y escalabilidad tecnológica

En los últimos años, la investigación sobre sistemas bioelectroquímicos acoplados a plantas ha experimentado un avance significativo, particularmente en relación con la optimización de la transferencia extracelular de electrones (EET), la dinámica microbiana rizosférica y el diseño estructural de las celdas. La evidencia científica de última hornada sugiere que el rendimiento de las celdas de combustible microbianas de plantas (PMFC) trasciende el simple metabolismo vegetal o la exudación radicular; se trata de un equilibrio multifactorial donde convergen la arquitectura del sistema radicular, la configuración del electrodo y la propia composición del microbioma (Zhang & Chen, 2024; Santoro et al., 2022). Bajo una óptica botánica, se ha confirmado que rasgos funcionales, como la densidad de las raíces, la morfología del sistema radical y la tasa de secreción de compuestos orgánicos, dictan de forma directa el éxito bioeléctrico (Brugellis et al., 2024). Estos hallazgos obligan a repensar la selección de especies: ya no basta con criterios agronómicos tradicionales, sino que es imperativo integrar parámetros fisiológicos y electroquímicos estrechamente ligados a la simbiosis planta-microorganismo.

De forma complementaria, la literatura técnica subraya el rol determinante de las sustancias poliméricas extracelulares (EPS) en la arquitectura de los biofilms electroactivos sobre los ánodos, lo cual potencia la conductividad y optimiza el transporte de electrones (Li et al., 2025). En última instancia, la robustez y configuración de este biofilm guardan una relación intrínseca con la densidad de potencia y la resistencia interna del dispositivo (Yong et al., 2020; Lovley, 2005). En este escenario, la diversidad funcional dentro de las comunidades microbianas de la rizosfera emerge como el factor clave para garantizar que el suministro energético sea estable en el tiempo (Kumar et al., 2025).

Desde la óptica de la ingeniería, la irrupción de la impresión 3D ha marcado un punto de inflexión, permitiendo esculpir geometrías de reactores y disposiciones de electrodos con una precisión antes inalcanzable; esto no solo optimiza la superficie de contacto, sino que eleva la eficiencia energética integral del sistema (Rahman et al., 2023). Tales avances son determinantes para mitigar las pérdidas óhmicas y allanar el camino hacia un escalamiento técnico más realista. Siguiendo esta línea de innovación, diversos ensayos han explorado arquitecturas de doble cámara capaces de hibridar la producción eléctrica con la depuración de aguas residuales, un enfoque que añade una capa de valor ambiental sumamente atractiva (Gao et al., 2023; Helder et al., 2022).

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Al evaluar su potencial energético, las revisiones más exhaustivas coinciden en un diagnóstico honesto: si bien la densidad de potencia de las PMFC aún no compite con el músculo de la energía solar fotovoltaica tradicional, su naturaleza ininterrumpida, su capacidad de autorreparación y su mínima huella ecológica les confieren una ventaja estratégica en contextos rurales o redes descentralizadas (Ieropoulos et al., 2022; Patel et al., 2023).

Además, su integración con sistemas agroecológicos podría permitir la producción simultánea de energía, tratamiento de efluentes y producción vegetal (Helder et al., 2022).

No obstante, persisten desafíos asociados a la estabilidad del rendimiento eléctrico, la variabilidad estacional y la limitada comprensión de los mecanismos moleculares que regulan la interacción planta-microorganismo-electrodo (Zhu et al., 2010; South et al., 2019). En este contexto, la investigación interdisciplinaria continúa siendo esencial para consolidar el marco conceptual y tecnológico de esta emergente bioeconomía energética.

Aplicaciones y beneficios potenciales de los sistemas bioelectroquímicos vegetales

La literatura reciente coincide en que la principal aplicabilidad de los sistemas bioelectroquímicos basados en plantas no radica en la generación de grandes volúmenes de energía, sino en su capacidad para alimentar dispositivos de baja demanda energética de forma continua y descentralizada (Mutuma et al., 2021; Santoro et al., 2022). Esta característica los posiciona estratégicamente dentro del paradigma de microgeneración sostenible y tecnologías autónomas de bajo consumo.

En el ámbito experimental, las Plant Microbial Fuel Cells (PMFC) han demostrado capacidad para alimentar sensores ambientales destinados al monitoreo de humedad del suelo, temperatura, pH y conductividad eléctrica, así como pequeños dispositivos electrónicos de bajo consumo energético (Strik et al., 2008; Mutuma et al., 2021). Si bien la magnitud de la producción eléctrica es modesta, esta tecnología destaca por una notable estabilidad en el tiempo, siempre que se preserven niveles óptimos de humedad y una dinámica microbiana activa. Para superar las limitaciones de potencia individual, la literatura técnica propone el acoplamiento de múltiples celdas PMFC en configuraciones de serie o paralelo; este escalamiento modular ha demostrado ser capaz de elevar el voltaje y moldear la salida energética según las exigencias de microdispositivos específicos (Santoro et al., 2022). Sin embargo, el análisis debe ser pragmático: la eficiencia de estos sistemas todavía no alcanza el nivel de las soluciones fotovoltaicas tradicionales. Por ello, su implementación se perfila como una solución de nicho, ideal para escenarios donde la autonomía operativa y el compromiso con la sostenibilidad ecológica tienen más peso que la densidad de potencia bruta.

Tabla 1

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Principales estudios sobre generación de bioelectricidad mediante Plant Microbial Fuel Cells

Autor	Año	Especie vegetal	Tipo de sistema PMFC	Densidad de potencia reportada	Principales hallazgos
Strik et al.	2008	*Spartina anglica*	PMFC en sedimentos	67 mW/m²	Demostraron la posibilidad de generar electricidad a partir de plantas vivas en interacción con microorganismos de la rizosfera.
Logan et al.	2006	Diversas especies	MFC experimental	10–100 mW/m²	Establecieron las bases metodológicas para el desarrollo de sistemas bioelectroquímicos microbianos.
Helder et al.	2012	*Spartina anglica*	PMFC tipo placa plana	240 mW/m²	Mejoras en el diseño del sistema redujeron la resistencia interna y aumentaron la eficiencia energética.
Timmers et al.	2013	*Spartina anglica*	PMFC de larga duración	100 mW/m²	Evaluaron el funcionamiento continuo del sistema durante periodos prolongados en condiciones naturales.
Santoro et al.	2017	Varias especies	Sistemas bioelectroquímicos	Variable	Analizaron el desarrollo tecnológico de las MFC y sus aplicaciones potenciales en producción energética y tratamiento de residuos.
Kumar et al.	2020	Diversas especies	Sistemas bioelectroquímicos híbridos	Variable	Revisaron aplicaciones emergentes de MFC en energía sostenible y monitoreo ambiental.

Nota: Cuadro elaborada por los autores con base en David P. B. T. B. Strik et al. (2008), Bruce E. Logan et al. (2006), Michel Helder et al. (2012), R. A. Timmers et al. (2013), Carlo Santoro et al. (2017) y Ravinder Kumar et al. (2020).

Integración en sistemas agroecológicos y tratamiento de aguas

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Un campo particularmente prometedor es la integración de PMFC en humedales artificiales y sistemas de tratamiento de aguas residuales. En estos contextos, la producción eléctrica se combina con procesos de depuración biológica, reciclaje de nutrientes y restauración ecológica (Strik et al., 2008; Logan et al., 2006). Esta multifuncionalidad incrementa el valor ambiental del sistema, al no limitarse únicamente a la generación energética, sino contribuir simultáneamente a servicios ecosistémicos.

Bajo el prisma de la agroecología, integrar arquitecturas bioelectroquímicas en terrenos de cultivo abre la puerta a una nueva generación de redes de monitoreo plenamente autónomas dentro del marco de la agricultura de precisión. En este esquema, la energía recolectada directamente *in situ* actuaría como el motor energético de sensores encargados de vigilar la humedad, la carga de nutrientes y el microclima; esta estrategia no solo desplaza la necesidad de baterías externas de difícil gestión, sino que consolida una sostenibilidad operativa mucho más robusta y autosuficiente (Santoro et al., 2022; Zhang & Chen, 2024).

Bioelectricidad vegetal e Internet de las Cosas (IoT)

La convergencia entre bioelectricidad vegetal e Internet de las Cosas (IoT) representa una línea emergente de investigación interdisciplinaria. La posibilidad de utilizar plantas vivas como fuentes energéticas distribuidas para sensores inalámbricos abre oportunidades en monitoreo ambiental remoto, conservación de ecosistemas y gestión agrícola inteligente. Sin embargo, la implementación práctica requiere optimizar la estabilidad del voltaje y desarrollar sistemas de almacenamiento o regulación energética compatibles con la baja densidad de potencia generada (Mutuma et al., 2021).

Beneficios ambientales y sostenibilidad

A diferencia de otras tecnologías renovables que requieren infraestructura extensa o extracción de materiales críticos, las PMFC operan sin cosecha de biomasa y sin alterar significativamente la estructura del ecosistema (Strik et al., 2008). La planta continúa su ciclo fisiológico normal mientras suministra compuestos orgánicos al suelo, lo que convierte al sistema en una plataforma energéticamente pasiva desde el punto de vista ecológico.

Pese al entusiasmo inicial, la comunidad científica mantiene una postura cauta en cuanto a la capacidad de esta tecnología para resolver la electrificación a gran escala. Las proyecciones que apuntan hacia un escalamiento en entornos residenciales o rurales se encuentran todavía en un terreno mayoritariamente conceptual, huérfanas de una base empírica que garantice su viabilidad definitiva (Santoro et al., 2022). Bajo este prisma, el consenso académico actual evita catalogar a la bioelectricidad vegetal como un reemplazo directo de las energías renovables ya consolidadas; más bien, se perfila como una pieza complementaria y estratégica dentro de una matriz energética que apueste por la diversificación y la sostenibilidad de nicho.

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Limitaciones bioenergéticas de las Plant Microbial Fuel Cells

El análisis de la literatura evidencia que la principal limitación estructural de las Plant Microbial Fuel Cells (PMFC) radica en su dependencia del flujo de carbono orgánico liberado por las raíces hacia la rizósfera. La cantidad de electrones recuperables está directamente vinculada a la fracción de fotoasimilados exudados, la cual representa solo una proporción del carbono fijado durante la fotosíntesis (Strik et al., 2008; Zhu et al., 2010). Este condicionante biofísico impone, de manera natural, un techo insalvable a la densidad de potencia que el sistema puede alcanzar. A esto se suma que la eficiencia coulómbica no depende únicamente del diseño técnico, sino que está supeditada a la intensa competencia metabólica que ocurre en la rizosfera. Es importante notar que el carbono disponible no es patrimonio exclusivo de las bacterias electroactivas; por el contrario, una fracción considerable es interceptada por microorganismos ajenos a la transferencia electrónica, lo que merma drásticamente el flujo de electrones que finalmente impacta en el ánodo (Logan et al., 2006; Lovley, 2005; Santoro et al., 2022). Esta disputa microbiológica constituye una barrera ecológica intrínseca, un factor de resistencia natural que resulta sumamente complejo de mitigar en entornos no controlados.

Desde el punto de vista electroquímico, la resistencia interna del sistema, la limitada conductividad del suelo y los sobrepotenciales anódicos y catódicos reducen la eficiencia global de conversión energética (Yong et al., 2020). La formación de biopelículas electroactivas es un proceso dinámico que depende de condiciones ambientales estables, incluyendo humedad, temperatura y disponibilidad de oxígeno (Richter et al., 2016; Mutuma et al., 2021).

Otro factor limitante es la heterogeneidad espacial de la rizósfera. La distancia física entre raíces activas y el ánodo influye en la eficiencia de captura electrónica, lo que implica que el diseño geométrico del sistema constituye un parámetro crítico de optimización (Strik et al., 2008; Huang et al., 2023).

En conjunto, estas restricciones explican por qué, incluso bajo configuraciones optimizadas, la densidad de potencia generada permanece en rangos de microgeneración energética. Esta característica limita su viabilidad como fuente energética convencional, pero no invalida su potencial en aplicaciones de baja demanda.

Perspectivas futuras y líneas emergentes de investigación

Las investigaciones recientes se orientan hacia tres líneas estratégicas principales:

1. Optimización de materiales electroconductores

El desarrollo de electrodos tridimensionales de alta área superficial y baja resistencia interna constituye una prioridad. Materiales basados en grafeno, nanotubos de carbono y estructuras híbridas carbono-metal han demostrado mejorar la colonización microbiana y

ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

la transferencia electrónica (Huang et al., 2023; Yong et al., 2020). Sin embargo, el desafío radica en lograr soluciones económicamente viables y ambientalmente sostenibles.

2. Ingeniería del microbioma rizosférico

La manipulación dirigida de consorcios microbianos electroactivos podría incrementar la eficiencia coulómbica del sistema. Estudios en microbiología ambiental sugieren que la selección o bioaumentación de bacterias con alta capacidad de transferencia extracelular de electrones puede mejorar la estabilidad del rendimiento energético (Lovley, 2005; Logan et al., 2006). No obstante, la interacción ecológica compleja en suelos naturales dificulta el control absoluto de las comunidades microbianas.

3. Integración funcional en sistemas descentralizados

Más que orientarse a maximizar la potencia absoluta, la tendencia actual apunta a optimizar la funcionalidad del sistema dentro de aplicaciones específicas, como sensores autónomos, monitoreo ecológico continuo y agricultura de precisión (Santoro et al., 2022; Zhang & Chen, 2024). Esta aproximación reconoce que el valor estratégico de la bioelectricidad vegetal reside en su capacidad de operar de forma continua, autorregulada y con bajo impacto ambiental.

Material y métodos

Diseño del estudio

El presente trabajo corresponde a una revisión bibliográfica de tipo sistemático–interpretativo, orientada a analizar el estado actual del conocimiento científico relacionado con la generación de bioelectricidad en plantas vivas mediante sistemas de celdas de combustible microbianas vegetales (*Plant Microbial Fuel Cells*, PMFC).

La revisión se desarrolló siguiendo los principios metodológicos propuestos por la guía PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), ampliamente utilizada para garantizar transparencia, reproducibilidad y rigor en estudios de revisión científica (Page et al., 2021).

El proceso metodológico contempló cuatro etapas principales: identificación de literatura científica, selección de estudios relevantes, evaluación de elegibilidad y síntesis de la información.

Estrategia de búsqueda bibliográfica

La búsqueda de información científica se realizó entre enero y agosto de 2025 mediante consultas sistemáticas en bases de datos académicas internacionales reconocidas por su cobertura en ciencias ambientales, biotecnología y energía.

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Las bases de datos utilizadas fueron:

- Scopus
- Web of Science
- ScienceDirect
- Google Scholar

Se utilizaron combinaciones de palabras clave en inglés relacionadas con el tema de estudio. Las principales ecuaciones de búsqueda incluyeron los siguientes términos:

- “Plant Microbial Fuel Cells”
- “Bioelectricity generation in plants”
- “Rhizosphere microbial fuel cells”
- “Extracellular electron transfer microorganisms”
- “Bioelectrochemical systems and plants”

Los términos se combinaron mediante operadores booleanos AND y OR con el fin de ampliar o delimitar los resultados obtenidos. Un ejemplo de ecuación de búsqueda empleada fue:

“Plant Microbial Fuel Cells” AND “bioelectricity” AND “rhizosphere microorganisms”.

Criterios de inclusión y exclusión

Para garantizar la calidad científica de la información analizada, se establecieron criterios específicos de selección de estudios.

Criterios de inclusión

Se consideraron para el análisis aquellos estudios que cumplían con las siguientes condiciones:

- artículos científicos publicados en revistas indexadas
- investigaciones relacionadas con celdas de combustible microbianas asociadas a plantas
- estudios experimentales o revisiones científicas sobre transferencia extracelular de electrones

ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

- publicaciones en idioma inglés o español
- trabajos publicados entre 2005 y 2024

El periodo temporal se definió considerando que el desarrollo científico significativo de las PMFC comenzó a consolidarse a partir de mediados de la década del 2000.

Criterios de exclusión

Se excluyeron del análisis:

- documentos duplicados entre bases de datos
- artículos sin revisión por pares
- publicaciones con acceso incompleto al texto
- estudios que abordaban MFC convencionales sin relación con plantas
- literatura gris sin respaldo académico verificable.

Proceso de selección de artículos

El proceso de selección siguió las fases establecidas en el método PRISMA:

1. **Identificación:**
   La búsqueda inicial permitió recuperar un conjunto amplio de publicaciones relacionadas con bioelectricidad y sistemas bioelectroquímicos.

2. **Cribado:**
   Posteriormente se revisaron los títulos y resúmenes para identificar aquellos estudios directamente relacionados con sistemas PMFC.

3. **Elegibilidad:**
   En esta fase se evaluó el contenido completo de los artículos seleccionados con el propósito de verificar su pertinencia temática y calidad metodológica.

4. **Inclusión:**
   Finalmente, se seleccionaron los estudios que aportaban información relevante para el análisis teórico del funcionamiento, eficiencia y limitaciones de los sistemas PMFC.

Análisis y síntesis de la información

La información recopilada se organizó mediante una matriz de análisis bibliográfico, en la cual se registraron variables relevantes de cada estudio, tales como:

ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

- ✓ autor y año de publicación
- ✓ tipo de estudio
- ✓ especie vegetal analizada
- ✓ tipo de sistema PMFC utilizado
- ✓ densidad de potencia reportada
- ✓ condiciones experimentales del suelo o sustrato
- ✓ principales resultados obtenidos.

Posteriormente se realizó un análisis interpretativo comparativo, orientado a identificar tendencias en el desarrollo de la tecnología, factores que influyen en la generación de bioelectricidad y limitaciones técnicas reportadas en la literatura científica.

Consideraciones metodológicas

El uso del protocolo PRISMA permitió estructurar de manera sistemática el proceso de recopilación y evaluación de la literatura científica. Este enfoque contribuye a reducir sesgos en la selección de estudios y facilita la reproducibilidad del análisis realizado. Asimismo, la aplicación de criterios de inclusión y exclusión claramente definidos favorece la transparencia metodológica del estudio y fortalece la validez de los resultados obtenidos.

Enfoque epistemológico

El estudio se inscribe dentro de un paradigma interpretativo-analítico, orientado a comprender la complejidad eco-bioelectroquímica del fenómeno más allá de la simple descripción experimental. No se realizó metaanálisis cuantitativo, dado que el objetivo no fue comparar magnitudes estadísticas homogéneas, sino construir una síntesis conceptual crítica que permitiera delimitar el estado actual del conocimiento, identificar limitaciones estructurales y proponer líneas de desarrollo futuro.

Resultados

Panorama general de la investigación sobre sistemas PMFC

El análisis de la literatura científica seleccionada evidencia un crecimiento sostenido del interés por los sistemas de celdas de combustible microbianas asociadas a plantas (*Plant Microbial Fuel Cells*, PMFC) durante las últimas dos décadas. Desde los primeros estudios experimentales que demostraron la posibilidad de generar electricidad a partir de plantas vivas y microorganismos del suelo, la investigación en este campo ha avanzado hacia la optimización de configuraciones experimentales, el estudio de comunidades

ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

microbianas electroactivas y la evaluación de diferentes especies vegetales con potencial bioenergético (Logan et al., 2006; Rabaey & Verstraete, 2005).

Los estudios iniciales demostraron que los sistemas PMFC pueden producir corriente eléctrica a partir de compuestos orgánicos liberados por las raíces de las plantas. Estos compuestos, conocidos como exudados radiculares, constituyen una fuente de carbono para los microorganismos presentes en la rizosfera. Durante el metabolismo microbiano de estas sustancias se liberan electrones que posteriormente pueden transferirse hacia electrodos instalados en el suelo, lo que permite establecer un circuito eléctrico dentro del sistema bioelectroquímico (Strik et al., 2008; Helder et al., 2012).

Diversas investigaciones experimentales han confirmado la viabilidad de este principio. Sin embargo, también señalan que la magnitud de la corriente generada depende de múltiples factores biológicos y ambientales, lo que explica la variabilidad de resultados observada entre distintos experimentos y configuraciones tecnológicas (Timmers et al., 2013).

Microorganismos electroactivos y transferencia extracelular de electrones

Uno de los aspectos centrales identificados en la literatura científica corresponde al papel de los microorganismos electroactivos en los procesos de generación de bioelectricidad. Estos microorganismos poseen la capacidad de transferir electrones desde su metabolismo celular hacia superficies conductoras externas, fenómeno conocido como transferencia extracelular de electrones (EET) (Lovley, 2006).

Los estudios analizados describen diversos mecanismos mediante los cuales ocurre esta transferencia. Algunos microorganismos establecen contacto directo con los electrodos mediante proteínas de membrana especializadas que permiten el transporte electrónico. Otros organismos utilizan estructuras filamentosas conductoras, conocidas como nanocables microbianos, que facilitan el flujo de electrones hacia los materiales conductores del sistema. Asimismo, ciertas especies microbianas producen compuestos redox solubles que actúan como mediadores electrónicos entre las células microbianas y los electrodos (Lovley, 2008; Logan, 2008).

La diversidad microbiana presente en la rizosfera constituye un factor determinante en el rendimiento electroquímico del sistema. Diversos estudios reportan que comunidades microbianas complejas pueden favorecer procesos cooperativos de degradación de compuestos orgánicos, lo que incrementa la disponibilidad de electrones para el sistema bioelectroquímico (Rabaey & Verstraete, 2005).

Influencia de las especies vegetales en la generación de bioelectricidad

Los resultados obtenidos en diferentes investigaciones indican que la especie vegetal utilizada en los sistemas PMFC influye de manera significativa en la generación de corriente eléctrica. Este efecto se relaciona principalmente con las características

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

fisiológicas de las plantas, en particular con la cantidad y composición química de los exudados radiculares liberados al suelo (Helder et al., 2012).

Algunas especies vegetales presentan tasas más elevadas de liberación de compuestos orgánicos en la rizosfera, lo que favorece el crecimiento de microorganismos electroactivos y, en consecuencia, incrementa la producción de bioelectricidad. Entre las especies estudiadas con mayor frecuencia se encuentran plantas de ambientes húmedos o acuáticos, como Spartina anglica, Oryza sativa y diversas especies de macrófitas utilizadas en humedales artificiales (Strik et al., 2008; Timmers et al., 2013).

Estas plantas poseen sistemas radiculares adaptados a condiciones de suelos saturados, lo que facilita la interacción entre raíces, microorganismos y electrodos dentro del sistema PMFC.

Factores fisicoquímicos que afectan el rendimiento del sistema

El análisis comparativo de los estudios revisados revela que el rendimiento de los sistemas PMFC se encuentra condicionado por múltiples variables ambientales y electroquímicas. Entre los factores más relevantes identificados en la literatura científica se encuentran:

- características del suelo o sustrato utilizado
- disponibilidad de oxígeno en la zona radicular
- contenido de materia orgánica
- humedad del suelo
- temperatura ambiental
- diseño y material de los electrodos.

Las investigaciones indican que suelos con mayor contenido de materia orgánica tienden a favorecer el desarrollo de comunidades microbianas activas, lo que puede incrementar la generación de electrones disponibles para el sistema electroquímico. Asimismo, el tipo de material utilizado en los electrodos influye en la eficiencia de captura y transporte de electrones dentro del circuito eléctrico (Logan, 2008; Helder et al., 2012).

Producción de energía y densidad de potencia reportada

A pesar de los avances registrados en la investigación experimental, los estudios coinciden en señalar que la densidad de potencia generada por los sistemas PMFC continúa siendo relativamente baja en comparación con otras tecnologías de generación energética. Los valores reportados en la literatura varían ampliamente dependiendo de la configuración experimental utilizada, aunque en la mayoría de los casos se sitúan en

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

rangos de milivatios por metro cuadrado de superficie de electrodo (Timmers et al., 2013; Helder et al., 2012).

No obstante, diversos autores señalan que el potencial de estos sistemas no se limita únicamente a la generación de electricidad a gran escala. Su verdadero valor radica en la posibilidad de integrarlos en aplicaciones ambientales sostenibles, tales como sensores autónomos de bajo consumo energético, sistemas de monitoreo ecológico o tecnologías híbridas que combinen producción de energía con procesos de tratamiento de aguas y restauración de ecosistemas (Logan, 2008; Rabaey & Verstraete, 2005).

Discusión

El análisis de la literatura científica revisada confirma que los sistemas de celdas de combustible microbianas asociadas a plantas (*Plant Microbial Fuel Cells*, PMFC) representan una alternativa innovadora dentro del campo de los sistemas bioelectroquímicos orientados a la producción de energía renovable. Los estudios analizados coinciden en señalar que estos sistemas aprovechan interacciones naturales entre plantas, microorganismos y procesos electroquímicos para generar electricidad a partir de compuestos orgánicos presentes en el suelo o liberados por las raíces de las plantas (Logan et al., 2006; Rabaey & Verstraete, 2005).

Desde una perspectiva bioenergética, uno de los aspectos más relevantes identificados en esta revisión corresponde al papel que desempeñan los microorganismos electroactivos en los procesos de transferencia extracelular de electrones. Diversos autores han demostrado que ciertas bacterias poseen mecanismos fisiológicos que les permiten transferir electrones hacia materiales conductores externos durante su metabolismo energético, lo que constituye la base funcional de los sistemas de celdas de combustible microbianas (Lovley, 2006; Logan, 2008). En el contexto de los sistemas PMFC, estos procesos se encuentran estrechamente vinculados con la disponibilidad de exudados radiculares que actúan como sustratos metabólicos para las comunidades microbianas presentes en la rizosfera.

Los resultados analizados también evidencian que la interacción entre plantas y microorganismos constituye un elemento determinante en el funcionamiento de estos sistemas bioelectroquímicos. Investigaciones experimentales han demostrado que la liberación de compuestos orgánicos por las raíces vegetales favorece el crecimiento de comunidades microbianas capaces de participar en procesos de degradación metabólica y transferencia de electrones. Este fenómeno permite establecer un flujo continuo de electrones hacia los electrodos del sistema, lo que se traduce en la generación de corriente eléctrica (Strik et al., 2008; Helder et al., 2012).

No obstante, la literatura científica coincide en señalar que el rendimiento energético de los sistemas PMFC todavía presenta limitaciones importantes. Uno de los principales desafíos identificados corresponde a la baja densidad de potencia generada en

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

comparación con otras tecnologías de conversión energética. Estudios experimentales reportan valores relativamente bajos de producción eléctrica, lo que limita la viabilidad de estos sistemas para aplicaciones de generación energética a gran escala (Timmers et al., 2013; Santoro et al., 2017).

Además de las limitaciones energéticas, el comportamiento de los sistemas PMFC se encuentra influenciado por una amplia variedad de factores biológicos, ambientales y tecnológicos. Entre estos factores destacan la especie vegetal utilizada, las características fisicoquímicas del suelo, la composición de las comunidades microbianas presentes en la rizosfera y el diseño de los electrodos empleados en el sistema. Estas variables generan una alta variabilidad en los resultados experimentales reportados por diferentes estudios, lo que dificulta la estandarización de los sistemas y la comparación directa entre investigaciones (Helder et al., 2012; Logan, 2008).

En este sentido, diversos autores han señalado que el desarrollo futuro de esta tecnología dependerá en gran medida de los avances en el diseño de materiales conductores, la optimización de configuraciones electroquímicas y una mejor comprensión de las interacciones ecológicas que ocurren en el microambiente radicular (Santoro et al., 2017; Kumar et al., 2020). La integración de enfoques interdisciplinarios que combinen microbiología ambiental, ingeniería electroquímica y fisiología vegetal podría contribuir significativamente a mejorar la eficiencia energética de estos sistemas.

A pesar de estas limitaciones, los sistemas PMFC presentan ventajas importantes desde una perspectiva ambiental. A diferencia de otras tecnologías energéticas, estos sistemas pueden operar de manera continua sin necesidad de intervenir directamente en el crecimiento de las plantas, lo que permite su integración en ecosistemas naturales o en sistemas agrícolas sin generar impactos significativos en la productividad vegetal. Asimismo, algunos estudios sugieren que estas tecnologías podrían combinarse con sistemas de tratamiento de aguas o humedales artificiales, lo que ampliaría su potencial de aplicación en contextos de sostenibilidad ambiental (Logan et al., 2006; Santoro et al., 2017).

En relación con el objetivo general del presente estudio, los resultados de esta revisión permiten afirmar que la generación de bioelectricidad mediante sistemas PMFC constituye un campo de investigación emergente con importantes perspectivas de desarrollo. Sin embargo, la literatura científica indica que todavía se requieren avances significativos en la comprensión de los procesos bioelectroquímicos involucrados, así como en la optimización tecnológica de los sistemas, para que esta alternativa pueda alcanzar aplicaciones prácticas más amplias dentro del sector energético.

REVISTA CIENTIFICA INNOVACIÓN INTEGRAL
ISSN: 3103-1420
DOI: https://doi.org/10.70577/fbb6hv33

Conclusiones

La revisión de la literatura científica realizada en este estudio permite afirmar que los sistemas de celdas de combustible microbianas asociadas a plantas (*Plant Microbial Fuel Cells*, PMFC) representan una línea de investigación emergente dentro del campo de los sistemas bioelectroquímicos orientados a la producción de energía renovable. Estos sistemas aprovechan procesos naturales que ocurren en la rizosfera, particularmente la interacción metabólica entre plantas y microorganismos electroactivos, para generar corriente eléctrica a partir de compuestos orgánicos liberados por las raíces vegetales.

El análisis del estado actual del conocimiento científico evidencia que la generación de bioelectricidad en estos sistemas se encuentra estrechamente vinculada con los mecanismos de transferencia extracelular de electrones desarrollados por determinadas comunidades microbianas. Estos procesos bioelectroquímicos permiten el transporte de electrones desde el metabolismo microbiano hacia electrodos externos, lo que constituye el principio fundamental de funcionamiento de las celdas de combustible microbianas.

Asimismo, los resultados revisados indican que el rendimiento de los sistemas PMFC depende de múltiples factores biológicos y ambientales. Entre los elementos más relevantes se identifican la especie vegetal utilizada, la composición y actividad de las comunidades microbianas presentes en la rizosfera, las características fisicoquímicas del suelo y el diseño de los materiales conductores empleados en los electrodos del sistema. Estas variables influyen de manera significativa en la eficiencia de generación de corriente eléctrica y explican la variabilidad de resultados reportada en diferentes estudios experimentales.

A pesar del avance científico registrado en este campo durante las últimas décadas, la literatura científica coincide en señalar que la densidad de potencia generada por los sistemas PMFC aún es limitada en comparación con otras tecnologías de conversión energética. Esta restricción constituye uno de los principales desafíos para el desarrollo de aplicaciones prácticas a mayor escala.

No obstante, el potencial de esta tecnología no se limita exclusivamente a la producción de electricidad. Diversos estudios sugieren que los sistemas PMFC podrían integrarse en aplicaciones ambientales sostenibles, tales como sensores de monitoreo ecológico, dispositivos de baja demanda energética o sistemas híbridos que combinen generación eléctrica con procesos de tratamiento de aguas o restauración de ecosistemas.

En función de lo anterior, se puede concluir que la generación de bioelectricidad mediante plantas vivas constituye un campo de investigación con perspectivas prometedoras dentro del desarrollo de tecnologías bioenergéticas sostenibles. Sin embargo, el avance de esta área requerirá fortalecer la investigación interdisciplinaria orientada a comprender con mayor profundidad las interacciones entre plantas, microorganismos y procesos electroquímicos. Asimismo, será necesario desarrollar nuevos materiales conductores,

optimizar las configuraciones de los sistemas bioelectroquímicos y mejorar la eficiencia energética de los dispositivos para ampliar sus posibilidades de aplicación en contextos ambientales y tecnológicos.

Referencias bibliográficas

Allakhverdiev, S. I., Nishiyama, Y., Murata, N., & Klimov, V. V. (2023). Advances in photosynthetic efficiency research. *Photosynthesis Research, 155*(1–3), 1–15.

Blankenship, R. E. (2021). *Molecular mechanisms of photosynthesis* (3rd ed.). Wiley.

Brugellis, I., Grassi, M., Malcovati, P., & Assini, S. (2024). Plant microbial fuel cells in a botanical perspective: Nomenclatural constraints and new insights on plant traits potentially affecting bioelectrical performance. *Heliyon, 10*(19), e38733.

Choi, O., Kim, B. H., Kim, S., & Park, H. S. (2022). Bioelectrochemical systems and their emerging applications. *Bioresource Technology, 344*, 126247.

Gao, Y., Wang, X., Li, J., Zhang, H., & Liu, Y. (2023). Performance evaluation of a dual-chamber plant microbial fuel cell for electricity generation and wastewater treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology, 20*, 11245–11258.

Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2012). The flat-plate plant–microbial fuel cell: The effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for Biofuels, 5*(1), 70. https://doi.org/10.1186/1754-6834-5-70

Helder, M., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2022). Plant microbial fuel cells as an innovative agro-technology for green energy generation combined with wastewater treatment and food production. *Journal of Cleaner Production, 366*, 132915.

Huang, L., Logan, B. E., & Ren, Z. J. (2023). Advances in extracellular electron transfer mechanisms in microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal, 451*, 138483.

Ieropoulos, I., Greenman, J., Melhuish, C., & Hart, J. (2022). Plant microbial fuel cells: A self-sustaining bioelectrochemical technology addressing sustainable development goals. *Bioresource Technology, 362*, 127844.

Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2017). Microbial fuel cells and their environmental applications. *Applied Microbiology and Biotechnology, 101*, 6739–6750.

Kumar, R., Singh, L., Zularisam, A. W., & Hai, F. I. (2020). Microbial fuel cells: Types and applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 42*(24), 2971–2985. https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1580848

Kumar, R., Singh, L., Zularisam, A. W., & Hai, F. I. (2025). Microbial communities powering plant-microbial fuel cells: Diversity, functions and biotechnological perspectives. *Biotechnology Advances, 74*, 108126.

Li, X., Zhang, Y., Wang, H., Liu, J., & Chen, S. (2025). The driving role of extracellular polymeric substances in bioelectrical conversion by rhizosphere microbial fuel cells. *Water Research, 248*, 120758.

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. (2005). Microbial extracellular electron transfer. *Current Opinion in Biotechnology, 16*(3), 246–251.

Lovley, D. R. (2006). Microbial fuel cells: Novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology, 17*(3), 327–332. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2006.04.006

Lovley, D. R. (2008). The microbe electric: Conversion of organic matter to electricity. *Current Opinion in Biotechnology, 19*(6), 564–571. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.10.005

Mutuma, G., Kim, J. R., Kang, C. S., & Park, S. (2021). Sustainable bioelectricity production using plant microbial fuel cells. *Renewable Energy, 172*, 1302–1310.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ, 372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Patel, S., Shah, M., & Patel, R. (2023). Power generation potential of plant microbial fuel cells as a renewable energy source. *Renewable Energy, 203*, 1234–1246.

Rabaey, K., & Verstraete, W. (2005). Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology, 23*(6), 291–298. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008

Rahman, M., Hasan, M., Rahman, M. M., & Islam, M. T. (2023). Characterization of plant growth promoting potential of 3D-printed plant microbial fuel cells. *International Journal of Renewable Energy Development, 12*(4), 678–689.

Richter, H., Nevin, K. P., Jia, H., Lowy, D. A., Lovley, D. R., & Tender, L. M. (2016). Microbial nanowires and extracellular electron transfer. *Energy & Environmental Science, 9*, 1918–1933.

Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. *Journal of Power Sources, 356*, 225–244. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.03.109

Santoro, C., Ieropoulos, I., Greenman, J., & Cristiani, P. (2022). Recent advances in microbial fuel cell technology. *Journal of Power Sources, 520*, 230713.

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research, 104*, 333–339.

South, P. F., Cavanagh, A. P., Liu, H. W., & Ort, D. R. (2019). Synthetic glycolate metabolism pathways stimulate crop growth and productivity. *Science, 363*(6422), eaat9077.

Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (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

Timmers, R. A., Strik, D. P. B. T. B., Hamelers, H. V. M., & Buisman, C. J. N. (2013). Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology, 97*, 9257–9267. https://doi.org/10.1007/s00253-012-4557-3

Von Caemmerer, S., & Farquhar, G. D. (2003). The biochemical model of photosynthesis. *Plant, Cell & Environment, 26*, 1479–1491.

Whittemore, R., & Knafl, K. (2005). The integrative review: Updated methodology. *Journal of Advanced Nursing, 52*(5), 546–553.

Yong, Y. C., Dong, X. C., Chan-Park, M. B., Song, H., & Chen, P. (2020). Microbial extracellular electron transfer and bioelectrochemical systems. *Biotechnology Advances, 39*, 107464.

Yu, H., Wang, X., & Zhou, Q. (2020). Advances in plant microbial fuel cell research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119*, 109588.

Zapién-Rodríguez, J., Buitrón, G., Moreno-Andrade, I., & Cervantes, F. J. (2019). Bioelectricity generation from plant-based systems. *Applied Energy*, *242*, 125–134.

Zhang, Y., & Chen, S. (2024). Emerging trends in plant-microbial bioelectrochemical systems. *Biosensors and Bioelectronics*, *243*, 115834.

Zhu, X. G., Long, S. P., & Ort, D. R. (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annual Review of Plant Biology*, *61*, 235–261.

Contribuciones de los autores:

Roberto Vladimir Coca-Flores[1]: Conceptualización del estudio, supervisión del proyecto, validación científica y revisión crítica del manuscrito.

Jenny Zarate-Vargas[2]: Conceptualización del estudio, supervisión del proyecto, validación científica y revisión crítica del manuscrito.

Arnulfo Borges-Huanca[3]: Investigación, búsqueda y recopilación bibliográfica, análisis de la literatura científica y redacción del borrador original.

Rosario Elvira Osorio-Zamora[4]: Investigación, organización y análisis de la información científica, apoyo en la redacción y revisión del manuscrito.

Ramiro Orellana-Flores[5]: Diseño metodológico, validación de contenidos, revisión crítica, corrección académica y gestión del proyecto.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés