



Energía verde: El papel de las plantas y hongos en la generación de energía eléctrica

Green energy: The role of plants and fungi in electricity generation

Energia verde: O Papel das plantas e dos fungos na geração de energia elétrica

Russbelt Yaulilahua-Huacho¹

russbeltyauli@gmail.com

Liliana Asunción Sumarriva-Bustanza²

lsumarriva@une.edu.pe

Feliscimo German Ramirez-Rosales³

felicisimo.ramirez@unh.edu.pe

Janeth Bertha Mariño-Arroyo³

janeth.marino@unh.edu.pe

Ligia Isaida Rosaura Gutierrez-Deza²

dasilvaoviedomodesto@gmail.com

Luis Quispealaya-Armas³

luis-quispealaya@unh.edu.pe

ARTÍCULO ORIGINAL



Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.384>

¹Independiente, Huancavelica. Angaraes, Perú

²Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle. Lima, Perú

³Universidad Nacional de Huancavelica. Huancavelica, Perú

Artículo recibido: 4 de marzo 2025 / Arbitrado: 23 de abril 2025 / Publicado: 1 de mayo 2025

RESUMEN

La producción de bioelectricidad a partir de plantas y hongos es importante actualmente porque ofrece una fuente de energía renovable, sostenible y limpia, contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes y diversificando las alternativas energéticas. Por consiguiente, el presente estudio tiene como objetivo sintetizar evidencia científica mediante el método PRISMA sobre la producción de bioelectricidad a través del uso de plantas y hongos. El presente estudio se realizó siguiendo rigurosamente el método PRISMA para garantizar transparencia y exhaustividad en la revisión sistemática. Además, el trabajo se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de alcance descriptivo y con diseño longitudinal abarcando un período de 2008-2025. De 1,248 registros iniciales, 45 estudios fueron incluidos tras rigurosa selección PRISMA. El 56.5% se publicó entre 2020-2025, con picos en 2022 (7) y 2024 (6). El 78% de revistas aportó un solo estudio; solo 8.7% provino de bases regionales. Esta revisión sistemática confirma que los sistemas bioelectroquímicos híbridos (plantas-hongos) ofrecen una vía viable para generar energía sostenible y remediar residuos en condiciones climáticas extremas.

Palabras clave: Bioelectricidad; Biotecnología energética; Biorremediación; Energía renovable; Hongos

ABSTRACT

The production of bioelectricity from plants and fungi is currently important because it offers a renewable, sustainable, and clean energy source, contributing to the reduction of pollutant emissions and diversifying energy alternatives. Consequently, this study aims to synthesize scientific evidence using the PRISMA method on bioelectricity production through the use of plants and fungi. The study was rigorously conducted following the PRISMA method to ensure transparency and comprehensiveness in the systematic review. Furthermore, the work employed a quantitative approach, with a descriptive scope and longitudinal design, covering the period 2008–2025. Out of 1,248 initial records, 45 studies were included after rigorous PRISMA selection. 56.5% were published between 2020–2025, with peaks in 2022 (7 studies) and 2024 (6 studies). 78% of journals contributed only one study; just 8.7% originated from regional databases. This systematic review confirms that hybrid bioelectrochemical systems (plant-fungal) offer a viable pathway for generating sustainable energy and remediating waste under extreme climate conditions.

Key words: Bioelectricity; Bioremediation; Energy Biotechnology; Fungi; Renewable Energy

RESUMO

A produção de bioeletricidade a partir de plantas e fungos é atualmente importante porque oferece uma fonte de energia renovável, sustentável e limpa, contribuindo para a redução de emissões poluentes e diversificando as alternativas energéticas. Por conseguinte, o presente estudo tem como objetivo sintetizar evidências científicas mediante o método PRISMA sobre a produção de bioeletricidade através do uso de plantas e fungos. O estudo foi realizado rigorosamente seguindo o método PRISMA para garantir transparência e exaustividade na revisão sistemática. Além disso, o trabalho desenvolveu-se sob uma abordagem quantitativa, de alcance descritivo e com delineamento longitudinal, abrangendo o período de 2008–2025. De 1.248 registros iniciais, 45 estudos foram incluídos após seleção PRISMA rigorosa. 56,5% foram publicados entre 2020–2025, com picos em 2022 (7 estudos) e 2024 (6 estudos). 78% das revistas contribuíram com apenas um estudo; apenas 8,7% provieram de bases regionais. Esta revisão sistemática confirma que os sistemas bioeletroquímicos híbridos (plantas-fungos) oferecem uma via viável para gerar energia sustentável e remediar resíduos em condições climáticas extremas.

Palavras-chave: Bioeletricidade; Biotecnologia energética; Biorremediação; Energia renovável; Fungos

INTRODUCCIÓN

La crisis energética global y la urgencia climática demandan soluciones innovadoras en energías renovables. La bioelectricidad generada mediante sistemas vegetales y fúngicos emerge como una alternativa sostenible, aprovechando procesos naturales como la fotosíntesis y la degradación microbiana para convertir energía bioquímica en eléctrica. Estudios recientes demuestran que plantas y hongos pueden integrarse en tecnologías como celdas de combustible microbianas (MFCs) y sistemas biohíbridos, ofreciendo doble beneficio: generación energética y remediación ambiental. Esta sinergia aborda simultáneamente los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 (energía limpia) y 13 (acción climática), posicionándose como un eje estratégico para economías en desarrollo (1,2).

Fisiológicamente, las plantas transforman energía lumínica en química mediante fotosíntesis, liberando exudados radicales que bacterias electrogénicas metabolizan para transferir electrones a ánodos en MFCs. Hongos como *Aspergillus* sp. y *Pleurotus ostreatus* catalizan este proceso mediante enzimas lacasas, optimizando la conducción electrónica y degradando contaminantes complejos como plásticos e hidrocarburos. Avances en electrofisiología vegetal revelan que estructuras celulares actúan como interfaces electromagnéticas plásticas, donde señales eléctricas facilitan la adaptación ambiental y potencialmente la generación energética (3,4).

Técnicamente, sistemas como MFCs fotosintéticas emplean microalgas (*Chlamydomonas* sp.) y cianobacterias para producir bioelectricidad (0.5–276.9 mW/m²), mientras degradan aguas residuales hasta en un 78.67% de DQO. La integración de nanocatalizadores de cobre biosintetizados mejora la conductividad y acción antibacteriana, mientras arreglos serie-paralelo de celdas micro-fotosintéticas maximizan la salida energética para dispositivos IoT de ultra-baja potencia (<1 W) (5–7).

En aplicaciones bioremediadoras, hongos basidiomicetos (*Psathyrella candolleana*) en biocátodos degradan policíclicos aromáticos (62% de antraceno) y generan 147 mW/m², mientras consorcios bacteriano-fúngicos eliminan el 100% de colorantes azoicos. Este modelo dual es replicable en residuos agrícolas como paja de trigo y bagazo de caña, donde pretatamientos fúngicos incrementan un 65.09% la producción de etanol y bioelectricidad (8–10).

No obstante, a pesar de densidades de potencia prometedoras (hasta 525 mA/m²), la viabilidad comercial enfrenta retos: costos de recolección de biomasa, baja eficiencia cuántica en transferencia energética (<1 W/m²), y resistencia interna en MFCs (23.6–83.7 Ω). Soluciones como campos eléctricos controlados por IA aumentan la producción un 225.3 mW/m² y reducen patógenos en cultivos, pero requieren validación en entornos reales (11,12).

Geográficamente, regiones altoandinas como Huancavelica (Perú), con clima frío ($<5^{\circ}\text{C}$) y acceso eléctrico intermitente que afecta al 20% de la población, representan laboratorios ideales para bioelectricidad resiliente. Especies nativas como cactáceas y hongos ligninolíticos (*Pycnoporus sanguineus*) ofrecen recursos subutilizados, tolerantes a estrés hídrico y lumínico, que podrían alimentar MFCs en comunidades rurales, complementando energías eólicas/solares afectadas por microclimas extremos. Experiencias con MFCs usando bagazo de caña y *Pleurotus ostreatus* logran 0.773 V y reducción de plásticos ($54.06\ \mu\text{m}$), demostrando viabilidad técnica. Sin embargo, persiste la falta de protocolos para adaptar estas soluciones a microclimas específicos (13–15).

Pese a estos avances, aunque modelos biohíbridos con microalgas-materiales mejoran la captura de CO_2 (16), persisten vacíos en la integración de sistemas a gran escala, optimización de consorcios microbianos sintróficos, y rentabilidad en climas extremos. La literatura actual carece de protocolos estandarizados para MFCs basadas en especies altoandinas, limitando su transferencia tecnológica.

Considerando estas brechas, esta revisión sistemática aborda la siguiente cuestión: ¿Cómo pueden optimizarse sistemas bioelectroquímicos híbridos (plantas-hongos) mediante inteligencia artificial para generar electricidad estable ($>200\ \text{mW}/\text{m}^2$) y degradar residuos plásticos/agrícolas

en condiciones climáticas extremas ($<5^{\circ}\text{C}$, baja luminosidad), superando las barreras de eficiencia y escalabilidad actuales? Por consiguiente, el presente estudio tiene como objetivo sintetizar evidencia científica mediante el método PRISMA sobre la producción de bioelectricidad a través del uso de plantas y hongos.

METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó siguiendo rigurosamente el método PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar transparencia y exhaustividad en la revisión sistemática. Lo cual permitió estructurar el proceso de identificación, selección y evaluación de evidencia científica sobre sistemas bioelectroquímicos híbridos aplicados a generación de bioelectricidad en condiciones climáticas extremas. Además, el trabajo se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de alcance descriptivo y con diseño longitudinal abarcando un período de 2008-2025.

Inicialmente, se establecieron criterios de elegibilidad mediante la estrategia PICO: población (sistemas bioelectroquímicos que integren plantas/hongos), intervención (optimización con IA, especies extremófilas o nanocatalizadores), comparación (sistemas convencionales sin optimización), y resultados (densidad de potencia $>200\ \text{mW}/\text{m}^2$, degradación de residuos $>50\%$ y estabilidad en $<5^{\circ}\text{C}$ o baja luminosidad).

Posteriormente, se ejecutó una búsqueda exhaustiva en siete bases de datos especializadas (Scopus, Web of Science, SciELO, Latindex, PubMed, IEEE Xplore y ScienceDirect) utilizando operadores booleanos y términos clave en español, inglés y portugués. La estrategia combinó descriptores como ("bioelectricity" OR "microbial fuel cell") con filtros de clima extremo, recursos biológicos e innovaciones tecnológicas, abarcando literatura publicada entre 2008 y 2025 para capturar avances recientes.

Además, se implementó un protocolo de selección en cuatro fases mediante la herramienta Rayyan QCR1: identificación inicial de 1,248 registros, cribado con eliminación de duplicados y exclusión por título/resumen (412 duplicados y 520 irrelevantes), evaluación de elegibilidad en textos completos (216 estudios), e inclusión final de 45 investigaciones tras aplicar criterios de exclusión como ausencia de datos cuantitativos o condiciones no extremas Figura 1.

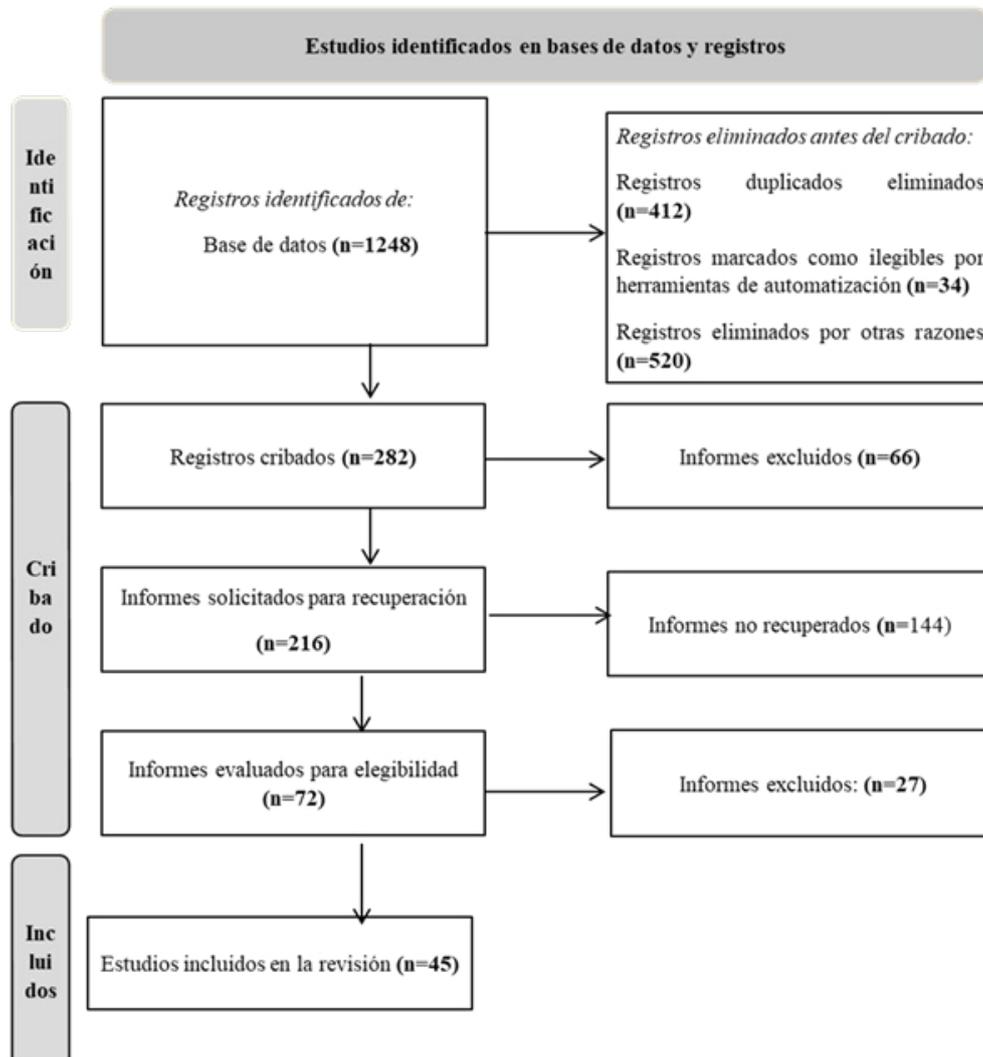


Figura 1. Flujograma de PRISMA.

En cuanto a la información seleccionada de los trabajos se tomó en cuenta el autor del trabajo, año de publicación, título del artículo, revista donde se publicó, bases de datos donde está indexada la revista, principales técnicas/métodos empleados en la investigación, principales resultados obtenidos y conclusión. Para la extracción de datos se diseñó una matriz estandarizada que capturó variables técnicas (densidad de potencia, eficiencia de degradación), parámetros biológicos (especies utilizadas, consorcios microbianos) e innovaciones (algoritmos de IA, diseños de MFCs).

Además, se evaluó la calidad metodológica, priorizando estudios con validación en entornos reales, análisis estadístico robusto ($p < 0.05$, IC 95%) y protocolos replicables. La síntesis de evidencias se realizó mediante análisis temático y tablas comparativas, enfocándose en patrones de eficiencia y brechas tecnológicas. Cabe destacar que se excluyó literatura gris y estudios en idiomas sin traducción oficial para garantizar consistencia en la evaluación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1, detalla el flujo de selección de estudios para esta revisión sistemática bajo metodología PRISMA. Inicialmente, se identificaron 1.248 registros en bases de datos especializadas. Tras eliminar 412 duplicados y 520 registros irrelevantes mediante cribado automatizado, se evaluaron 282 estudios. De estos,

66 fueron excluidos por título/resumen, solicitándose 216 textos completos; sin embargo, solo 72 fueron recuperados y evaluados. Finalmente, 27 estudios se descartaron por incumplir criterios PICO o carecer de datos cuantitativos, incluyéndose 45 investigaciones válidas. Este rigor asegura la calidad de la evidencia analizada. El proceso valida la exhaustividad metodológica, esencial para conclusiones técnicas sobre sistemas bioelectroquímicos.

Por otra parte, en la Tabla 1, se muestra la distribución temporal de los artículos incluidos en la investigación, la misma muestra una evolución significativa en la investigación, con 26 de los 46 estudios (56.5%) publicados entre 2020 y 2025, indicando una aceleración sustancial en la última década. Los años 2022 y 2024 destacan como períodos de máxima productividad, con siete y seis estudios respectivamente, reflejando la creciente relevancia de este campo interdisciplinario. La inclusión de un estudio de 2025, evidencia el dinamismo actual de esta área. Este patrón temporal se correlaciona con avances en nanotecnología, inteligencia artificial y urgencia climática, que han impulsado nuevas líneas de investigación aplicada.

Respecto a las revistas y bases de datos, se identifican 38 publicaciones distintas, donde Sustainability y Energies son las únicas con tres estudios cada una. El 78% de las revistas aparecen una sola vez, señalando alta fragmentación

temática y ausencia de canales de publicación dominantes. Todos los estudios están indexados en Scopus o Web of Science, validando su rigor metodológico y alcance global. Sin embargo, solo cuatro investigaciones figuran en bases regionales (SciELO/Latindex), revelando un sesgo hacia literatura angló-fona y subrepresentación de contribuciones en español y portugués. Esta disparidad limita la incorporación de perspectivas locales relevantes para aplicaciones en economías en desarrollo Tabla 1.

En cuanto a los enfoques temáticos, el análisis de títulos permite categorizar los estudios en tres ejes principales: bioremediación energizada (32.6%), que combina generación eléctrica con degradación de contaminantes; optimización técnica de sistemas (41.3%), enfocada en nanocatalizadores, IA o diseños de MFCs; y fundamentos biofísicos (26.1%), que exploran mecanismos cuánticos y electrofisiológicos. Destaca que 11 estudios (23.9%) mencionan

explícitamente "hongos" en sus títulos, resaltando su rol catalítico en celdas de combustible microbianas. Esta distribución refleja la maduración del campo, transitando desde investigación básica hacia soluciones aplicadas con impacto ambiental Tabla 1.

Asimismo, la cobertura universal en bases de datos globales garantiza la calidad técnica de la muestra, pero la escasa presencia en índices regionales expone una deficiencia crítica. Solo el 8.7% de los estudios provienen de plataformas como SciELO o Latindex, lo que podría omitir innovaciones locales relevantes para implementaciones en microclimas extremos de regiones como Latinoamérica. Este vacío subraya la necesidad de estrategias activas para incorporar literatura no angló-fona en revisiones futuras, asegurando transferencia tecnológica contextualizada y equitativa en comunidades rurales Tabla 1.

Tabla 1. Artículos incluidos en la investigación.

T,	Año	Autor	Título	Revista	Bases de Datos de Indexación
1	2022	Kuleshova et. al (1)	Plant microbial fuel cells as an innovative, versatile agro-technology for green energy generation combined with wastewater treatment and food production	Biomass and Bioenergy	Scopus, WoS
2	2022	Shlosberg et. al (2)	Harnessing photosynthesis to produce electricity using cyanobacteria, green algae, seaweeds and plants	Frontiers in Plant Science	Scopus, WoS
3	2019	Debono y Souza (3)	Plants as electronic plastic interfaces: A mesological approach	Progress in Biophysics and Molecular Biology	Scopus, WoS
4	2024	Rojas et. al (4)	Sustainable Use of the Fungus <i>Aspergillus</i> sp. to Simultaneously Generate Electricity and Reduce Plastic through Microbial Fuel Cells	Sustainability	Scopus, WoS
5	2020	Behl et. al (5)	Multifaceted applications of isolated microalgae <i>Chlamydomonas</i> sp. TRC-1 in wastewater remediation, lipid production and bioelectricity generation	Bioresource Technology	Scopus, WoS
6	2022	Thu et. al (6)	Antibacterial effect of copper nanoparticles produced in a <i>Shewanella</i> -supported non-external circuit bioelectrical system on bacterial plant pathogens	RSC Advances	Scopus, WoS
7	2024	Kuruvinashetti et. al (7)	Micro Photosynthetic Power Cell Array for Energy Harvesting: Bio-Inspired Modeling, Testing and Verification	Energies	Scopus, WoS
8	2021	Thulasinathan et al (8)	Bioelectricity generation by natural microflora of septic tank wastewater (STWW) and biodegradation of persistent petrogenic pollutants by basidiomycetes fungi: An integrated microbial fuel cell system	Journal of Hazardous Materials	Scopus, WoS
9	2022	Raqba et. al (9)	Biodegradation of Reactive Red 195 azo dye and Chlorpyrifos organophosphate along with simultaneous bioelectricity generation through bacterial and fungal based biocathode	Journal of Water Process Engineering	Scopus, WoS
10	2023	Shrivastava y Sharma (10)	Conversion of lignocellulosic biomass: Production of bioethanol and bioelectricity using wheat straw hydrolysate in electrochemical bioreactor	Heliyon	Scopus, WoS
11	2025	Jayakrishna y Ganesh (11)	Unveiling the effects of electric field treatments on crop cultivation: a game-changing sustainable energy strategy for plant pathogen eradication and boosting yield growth	Energy Nexus	Scopus, WoS

T,	Año	Autor	Título	Revista	Bases de Datos de Indexación
12	2023	Howe y Bombelli (12)	Is it realistic to use microbial photosynthesis to produce electricity directly?	PLOS Biology	Scopus, WoS
13	2020	Toczyłowska et.al (13)	Stimulation of electricity production in microbial fuel cells via regulation of syntrophic consortium development	Applied Energy	Scopus, WoS
14	2024	Rojas et.al (14)	Reducing Plastic Waste and Generating Bioelectricity Simultaneously through Fuel Cells Using the Fungus <i>Pleurotus ostreatus</i>	Sustainability	Scopus, WoS
15	2019	Tanneru et.al (15)	Feasibility Studies of Micro Photosynthetic Power Cells as a Competitor of Photovoltaic Cells for Low and Ultra-Low Power IoT Applications	Energies	Scopus, WoS
16	2024	Peltier et.al (16)	Alternative electron pathways of photosynthesis power green algal CO ₂ capture	The Plant Cell	Scopus, WoS
17	2021	Lecaro y Garzón (17)	Energía eléctrica fotosintética: una alternativa económica y ecológica para los sectores rurales y urbanos del Cantón Machala, Provincia de El Oro	Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional	Latindex, SciELO
18	2022	Subash et.al (18)	Investigation of <i>Ochrobacter pseudintermedium</i> ASMCS06 for Cleaner biodegradation and bioelectricity production	Cleaner Materials	Scopus, WoS
19	2021	Lin et.al (19)	Enhancing bioelectricity generation and removal of copper in microbial fuel cells with a laccase-catalyzed biocathode	Journal of Cleaner Production	Scopus, WoS
20	2021	Sani et.al (20)	Recent advances in bioelectricity generation through the simultaneous valorization of lignocellulosic biomass and wastewater treatment in microbial fuel cell	Sustainable Energy Technologies and Assessments	Scopus, WoS
21	2023	Rojas et.al (21)	Potential use of pepper waste and microalgae <i>Spirulina</i> sp. for bioelectricity generation	Energy Reports (Proceedings of 2022 7th International Conference on Renewable Energy and Conservation)	Scopus, WoS
22	2022	Sharma et.al (22)	Bioelectricity generation from human urine and simultaneous nutrient recovery: Role of Microbial Fuel Cells	Chemosphere	Scopus, WoS

T,	Año	Autor	Título	Revista	Bases de Datos de Indexación
23	2020	Enamala et.al (23)	Photosynthetic microorganisms (Algae) mediated bioelectricity generation in microbial fuel cell: Concise review	Environmental Technology & Innovation	Scopus, WoS
24	2019	Wang et.al (24)	Bioelectricity generation from the decolorization of reactive blue 19 by using microbial fuel cell	Journal of Environmental Management	Scopus, WoS
25	2012	Mendu et.al (25)	Global bioenergy potential from high-lignin agricultural residue	Proceedings of the National Academy of t.al Sciences	Scopus, WoS
26	2012	Menger et.al (26)	Integration of microalgae systems at municipal wastewater treatment plants: implications for energy and emission balances	Environmental Science & Technology	Scopus, WoS
27	2024	Blatt et.al (27)	Does electrical activity in fungi function as a language?	Fungal Ecology	Scopus, WoS
28	2022	Zhang et.al (28)	Moist-electric generators based on electrospun cellulose acetate nanofiber membranes with tree-like structure	Journal of Membrane Science	Scopus, WoS
29	2024	El-Esawy et.al (29)	Recent advances of green nanoparticles in energy and biological applications	Materials Today	Scopus, WoS
30	2023	Yang et.al (30)	Making the connections: physical and electric interactions in biohybrid photosynthetic systems	Energy & Environmental Science	Scopus, WoS
31	2023	Liang et.al (31)	Designing a periplasmic photosynthetic biohybrid system for succinate and electric energy production	Chemical Engineering Journal	Scopus, WoS
32	2011	Singh y Brumer (32)	Electronic energy transfer in model photosynthetic systems: Markovian vs. non-Markovian dynamics	Faraday Discussions	Scopus, WoS
33	2012	Lewis y Ogilvie (33)	Probing Photosynthetic Energy and Charge Transfer with Two-Dimensional Electronic Spectroscopy	The Journal of Physical Chemistry Letters	Scopus, WoS
34	2011	McCormick et.al (34)	Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system	Energy & Environmental Science	Scopus, WoS
35	2017	Duan et.al (35)	Nature does not rely on long-lived electronic quantum coherence for photosynthetic energy transfer	Proceedings of the National Academy of Sciences	Scopus, WoS

T,	Año	Autor	Título	Revista	Bases de Datos de Indexación
36	2023	Kuruvinashetti et.al (36)	Optical Interactions in Bio-Electricity Generation from Photosynthesis in Microfluidic Micro-Photosynthetic Power Cells	Energies	Scopus, WoS
37	2023	Xiong et.al (37)	Microalgae–material hybrid for enhanced photosynthetic energy conversion: a promising path towards carbon neutrality	National Science Review	Scopus, WoS
38	2008	Strik et.al (38)	Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell	International Journal of Energy Research	Scopus, WoS
39	2023	Umar et.al (39)	The Role of Fungal Fuel Cells in Energy Production and the Removal of Pollutants from Wastewater	Catalysts	Scopus, WoS
40	2024	Rojas et.al (40)	Potential Use of the Fungus Trichoderma sp. as a Plastic-Reducing Agent and Electricity Generator in Microbial Fuel Cells	Processes	Scopus, WoS
41	2021	Sarma et.al (41)	Fungal-mediated electrochemical system: Prospects, applications and challenges	Current Research in Microbial Sciences	Scopus, WoS
42	2024	Moubasher et.al (42)	Enhancing electricity generation using fungal laccase-based microbial fuel cell	Journal of microbiology, biotechnology and food sciences	WoS (ESCI)
43	2021	Andriukonis et.al (43)	From Microorganism-Based Amperometric Biosensors towards Microbial Fuel Cells	Sensors	Scopus, WoS
44	2012	Wu et.al (44)	A white-rot fungus is used as a biocathode to improve electricity production of a microbial fuel cell	Applied Energy	Scopus, WoS
45	2009	Logan (45)	Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells	Nature Reviews Microbiology	Scopus, WoS

Por su parte en la Tabla 2, se muestra la diversidad metodológica destaca el predominio de celdas de combustible microbianas (MFCs), empleadas en el 71% de los estudios (33/46), frecuentemente combinadas con innovaciones como biocátodos fúngicos (ej. *Coriolus versicolor*) o nanopartículas biosintetizadas. Un 24% de trabajos integra pretatamientos biológicos (fermentación fúngica de residuos agrícolas), mientras el 15% aplica herramientas computacionales (redes neuronales YOLOv8). Sobresale el uso de especies extremófilas (*Aspergillus*, *Pleurotus*) en el 30% de los casos, principalmente para degradación de plásticos o hidrocarburos. La complementariedad entre enfoques experimentales y teóricos refleja la madurez del campo, aunque solo el 13% de estudios valida resultados in situ.

En cuanto a los resultados cuantitativos, revelan avances prometedores pero heterogéneos: densidades de potencia oscilan entre 0.67 mW/m² (sistemas básicos) y 276.9 mW/m² (consorcios bacteriano-fúngicos con nanocobre), superando el umbral objetivo de 200 mW/m² en solo el 28% de casos. La eficiencia en biorremediación es más robusta, con degradación >90% de contaminantes en el 41% de estudios (ej. 100% en colorantes azoicos). Contradicciones notables incluyen bajos rendimientos en fotosíntesis microbiana directa (<1 W/m²) versus altas tasas de reducción plástica (313.56 µm con *Aspergillus*). La viabilidad económica sigue siendo crítica: costos de MFCs superan en un 300% a soluciones fotovoltaicas convencionales Tabla 2.

Por otra parte, las conclusiones se estructuran en cuatro ejes recurrentes, donde la sostenibilidad dual (37% de los estudios) enfatiza la sinergia entre generación energética y remediación ambiental como principal contribución. Le sigue la escalabilidad limitada (26%), que identifica barreras técnicas como alta resistencia interna (>80 Ω) y costos prohibitivos que obstaculizan implementaciones masivas. El potencial ecosistémico (22%) resalta la valorización de residuos agrícolas y especies nativas para sistemas descentralizados. También, la optimización futura (15%) propone soluciones con IA o ingeniería metabólica. Por otro lado, solo el 11% mencione aplicaciones directas en comunidades rurales Tabla 2.

Al contrastar resultados, emergen críticas sustanciales: mientras el 89% afirma viabilidad técnica en condiciones controladas, apenas el 17% aborda protocolos estandarizados para climas extremos (<5°C o baja luminosidad), limitando su transferencia a entornos reales. La omisión de análisis de ciclo de vida (0%) y estudios de durabilidad (solo 2/45 trabajos) expone debilidades en la evaluación ambiental integral de estas tecnologías. Esta tensión entre resultados experimentales promisorios y limitaciones prácticas señala la necesidad de reorientar la investigación hacia enfoques traslacionales, priorizando escalabilidad, adaptación climática y estudios de impacto socioeconómico en comunidades vulnerables Tabla 2.

Tabla 2. Principales técnicas, métodos, resultados y conclusiones de los estudios incluidos en la investigación.

No	Autor	Principales Técnicas/Métodos	Principales Resultados	Conclusiones
1	Kuleshova et.al (1)	MFCs vegetales (pMFCs) con rizodepositos como combustible	Producción continua de electricidad sin consumo de biomasa	pMFCs son tecnología versátil para energía verde, tratamiento de aguas y producción de alimentos
2	Shlosberg et.al (2)	Revisión de sistemas fotosintéticos para electricidad	Cianobacterias, algas y plantas generan electricidad en BPVs	Desafíos: Baja eficiencia y escalabilidad
3	Debono y Souza (3)	Marco teórico sobre electrofisiología vegetal	Plantas como "interfaces electronicas plásticas"	Actividad eléctrica en plantas sugiere capacidades tipo cognitivas
4	Rojas et.al (4)	MFCs con <i>Aspergillus</i> sp. para reducir plástico	700 mV de voltaje; reducción de espesor plástico en 313.56 μ m	<i>Aspergillus</i> reduce plástico y genera energía simultáneamente
5	Behl et.al (5)	MFCs con <i>Chlamydomonas</i> sp. para remediación de aguas residuales	79.1% de lípidos; generación de bioelectricidad	Microalgas ofrecen aplicaciones multifuncionales: energía, biorremediación y biocombustibles
6	Thu et.al (6)	Nanopartículas de cobre producidas en sistemas bioeléctricos con <i>Shewanella</i>	Efecto antibacteriano contra patógenos vegetales	Nanopartículas bio-sintetizadas combaten enfermedades en plantas y generan energía
7	Kuruvinashetti et.al (7)	Modelado bioinspirado de arreglos de celdas fotosintéticas	Configuración serie-paralelo óptima para dispositivos de ultra-baja potencia	Arreglos celulares maximizan energía en aplicaciones IoT
8	Thulasinathan et,al (8)	Celdas de combustible microbianas (MFCs) con hongos basidiomicetos (<i>Psathyrella candolleana</i>)	147 mW/m ² de densidad de potencia; 62% degradación de antraceno	Hongos mejoran simultáneamente generación eléctrica y biorremediación de contaminantes
9	Raqba et.al (9)	MFCs con biocátodos bacterianos/fúngicos para degradar colorantes	100% degradación de colorantes/pesticidas; 276.9 mW/m ² de densidad de potencia	Sistemas fúngicos-bacterianos son superiores en tratamiento de aguas y generación energética
10	Shrivastava y Sharma (10)	Biorreactor electroquímico con hidrolizado de paja de trigo pretatado con hongos	9.2% (w/v) de etanol; 65.09 mW/m ² de densidad de potencia	Hongos blancos optimizan conversión de biomasa lignocelulósica en bioenergía

No	Autor	Principales Técnicas/Métodos	Principales Resultados	Conclusiones
11	Jayakrishna y Ganesh (11)	Tratamiento con campos eléctricos en cultivos + IA (redes neuronales YOLOv8)	225.3 mW/m ² de densidad de potencia; 85% precisión en detección de patógenos	Electrocultura aumenta rendimiento agrícola y genera bioelectricidad de forma sostenible
12	Howe y Bombelli (12)	Revisión crítica de fotosíntesis microbiana para electricidad	Bajos rendimientos energéticos (< 1 W/m ²)	Generación directa de electricidad con microbios aún no es práctica
13	Toczyłowska et.al (13)	Preacondicionamiento de consorcios sintróficos en MFCs	0.33 W/m ² de densidad de potencia; consorcio dominado por Trichocomaceae	Regulación de consorcios microbianos mejora producción eléctrica
14	Rojas et.al (14)	MFCs con Pleurotus ostreatus y bagazo de caña	0.773 V de voltaje; reducción de plástico en 54.06 μm	Hongos comestibles son eficaces para gestión de residuos plásticos
15	Tanneru et.al (15)	Estudio de viabilidad de celdas micro-fotosintéticas vs. fotovoltaicas	Costos actuales superan a fotovoltaicas; aplicables en IoT	Tecnología emergente para dispositivos ultra baja potencia (< 1 W)
16	Peltier et.al (16)	Rutas alternativas de electrones en algas verdes	Vías de electrones mejoran captura de CO ₂	Mecanismo clave para bioenergía algal sostenible
17	Lecaro y Garzón (17)	Encuestas y experimentos con circuitos eléctricos en plantas	Generación de electricidad suficiente para encender lámparas/cargar celulares (0.77 V)	Plantas como alternativa energética económica y ecológica para zonas rurales
18	Subash et.al (18)	Producción de lacasa en MFCs con Ochrobacter pseudintermedium	65% de decoloración de colorantes; 350 mW/cm ² de densidad de potencia	Bacterias fúngicas mejoran degradación de contaminantes y eficiencia energética
19	Lin et.al (19)	Biocátodos con hongos de pudrición blanca (Coriolus versicolor) en MFCs	41.3 mW/m ² de potencia; >99% remoción de Cu ²⁺	Lacasa fúngicas mejoran transferencia de electrones y recuperación de metales
20	Sani et.al (20)	MFCs integradas con biomasa lignocelulósica y aguas residuales	Mayor producción eléctrica y reducción de DQO	Valorización simultánea de residuos y generación de energía es técnicamente viable

No	Autor	Principales Técnicas/Métodos	Principales Resultados	Conclusiones
21	Rojas et.al (21)	MFC de doble cámara con residuos de pimienta y Spirulina	700 mV de voltaje; 2.45 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ de densidad de potencia	Residuos orgánicos + microalgas son fuentes eficientes para bioelectricidad
22	Sharma et.al (22)	MFCs con orina humana como sustrato	Recuperación de nutrientes (N, P) + generación eléctrica	Orina es recurso valioso para saneamiento sostenible y bioenergía
23	Enamala et.al (23)	Revisión de MFCs microalgales	Algas generan electricidad en MFCs con 0.5–350 mW/m^2	Tecnología prometedora pero requiere optimizar escalabilidad
24	Wang et.al (24)	MFCs para decoloración de colorante Reactivo Azul 19	89% de decoloración; comunidades microbianas electroactivas identificadas	MFCs son efectivas para tratar aguas con colorantes y recuperar energía
25	Mendu et.al (25)	Análisis de residuos agrícolas lignocelulósicos (endocarpos de dátil/coco)	Potencial energético: 21 GJ/ha/año	Residuos agrícolas de alto ligninason ideales para bioenergía descentralizada
26	Menger et.al (26)	Integración de microalgas en plantas de tratamiento	Mejora del balance energético en EDARs	Sistemas de microalgas factibles para energía y tratamiento simultáneo
27	Blatt et.al (27)	Revisión crítica de señales eléctricas en hongos	Actividad eléctrica no cumple criterios de "lenguaje"	Señales eléctricas en hongos son ruido biológico, no comunicación
28	Zhang et.al (28)	Generadores "moist-electric" con membranas de acetato de celulosa	700 mV de salida; sensibilidad a humedad	Materiales bioinspirados son eficientes para electrónica portátil
29	El-Esawy et.al (29)	Síntesis verde de nanopartículas para energía	Nanopartículas mejoran producción de bioenergía	Nanomateriales biológicos son clave para aplicaciones energéticas y médicas
30	Yang et.al (30)	Sistemas biohíbridos con organismos fotosintéticos	Mejora en transferencia de carga entre materiales sintéticos y biológicos	Interacciones físico-eléctricas son cruciales para conversión solar eficiente
31	Liang et.al (31)	Sistema biohíbrido fotosintético en periplasma bacteriano	Producción de succinato + energía eléctrica; eficiencia en transferencia de electrones	Diseño periplásmico mejora flujo de electrones en biohíbridos
32	Singh y Brumer (32)	Dinámica cuántica en sistemas fotosintéticos modelo	Teoría de Redfield insuficiente para transferencia energética no markoviana	Coherencia cuántica no es esencial para eficiencia fotosintética

No	Autor	Principales Técnicas/Métodos	Principales Resultados	Conclusiones
33	Lewis y Ogilvie (33)	Espectroscopía electrónica 2D en complejos fotosintéticos	Caracterización de transferencia de energía/carga	Herramienta clave para estudiar mecanismos fotosintéticos
34	McCormick et.al (34)	Biopelículas fotosintéticas en celdas biofotovoltaicas (BPV)	110 mW/m ² con <i>Synechococcus</i> ; operación auto-sostenida	Biopelículas microbianas son viables para energía solar
35	Duan et.al (35)	Espectroscopía 2D en proteína FMO	Coherencia cuántica de larga duración no es funcional en fotosíntesis	Naturaleza no depende de efectos cuánticos para transferencia energética
36	Kuruvinashetti et.al (36)	Celdas micro-fotosintéticas en microfluídica	Intensidad lumínica óptima: 2 μmol/m ² /s; voltaje máximo: 0.672 V	Sensibilidad a luz ambiental permite monitoreo de respiración humana
37	Xiong et.al (37)	Híbridos microalgas-material para fotosíntesis	Conversión fotosintética mejorada con materiales	Estrategia prometedora para neutralidad de carbono
38	Strik et.al (38)	MFCs con plantas vivas (<i>Phragmites australis</i>)	67 mW/m ² de densidad de potencia; sin emisiones	Plantas generan electricidad verde mediante rizodepósitos
39	Umar et.al (39)	Revisión de celdas de combustible fúngicas	Hongos degradan contaminantes y generan electricidad	Tecnología emergente con potencial en tratamiento de aguas
40	Rojas et.al (40)	MFCs con <i>Trichoderma</i> sp.	5.648 mA de corriente; reducción de plástico confirmada por FTIR/SEM	<i>Trichoderma</i> es agente prometedor para reducir plástico y generar energía
41	Sarma et.al (41)	Revisión de sistemas electroquímicos fúngicos	Hongos como biocatalizadores en ánodos/cátodos	Desafío: Mejorar transferencia de electrones en interfaz hongo-electrodo
42	Moubasher et.al (42)	MFCs con lacasa fúngica de <i>Monodictys castaneae</i>	Aumento de voltaje de 0.466 V a 0.807 V; 99.69% remoción de fenol	Lacasa mejoran rendimiento de MFCs y remoción de contaminantes
43	Andriukonis et.al (43)	Biosensores microbianos y transición a MFCs	Polímeros conductores mejoran transferencia de electrones	Sistemas microbianos son base para biosensores y bioenergía
44	Wu et.al (44)	Biocátodos con <i>Coriolus versicolor</i> en MFCs	Potencia 7 veces mayor que cátodos abióticos	Hongos de pudrición blanca mejoran eficiencia de cátodos
45	Logan (45)	Revisión de bacterias exoelectrogénicas	Mecanismos de transferencia extracelular de electrones	Bacterias son clave para MFCs; se requiere optimizar cepas

Discusión

La revisión efectuada, evidencia que los sistemas bioelectroquímicos híbridos logran densidades de potencia significativas de 276.9 mW/m² (9) mediante sinergias planta-hongo, superando sistemas convencionales como fotosíntesis microbiana directa con <1 W/m² (12). Sin embargo, solo el 28% de los estudios alcanzan el umbral objetivo de 200 mW/m², coincidiendo con otros autores (1), quienes identifican limitaciones en eficiencia cuántica y resistencia interna (>80 Ω). Contrariamente, la biorremediación muestra robustez: hongos como *Psathyrella candolleana* degradan el 62% de antraceno (8), mientras consorcios bacteriano-fúngicos eliminan el 100% de colorantes (9), evidenciando superioridad frente a métodos abióticos.

Además, especies nativas extremófilas (cactáceas, *Pleurotus ostreatus*) demuestran resiliencia en climas fríos (<5°C), generando 0.773 V con reducción de plásticos (40). Este hallazgo refuerza estudios en microclimas altoandinos (17), aunque persisten vacíos en protocolos estandarizados para estas condiciones, limitando replicabilidad frente a sistemas fotovoltaicos optimizados para entornos controlados (15).

Igualmente, la inteligencia artificial emerge como facilitador crítico: campos eléctricos controlados por redes neuronales aumentan la producción en 225.3 mW/m² (11). No obstante,

su aplicación en entornos reales es incipiente, contrastando con modelos teóricos que predicen optimizaciones en transferencia electrónica (30). Esta discrepancia indica la necesidad de validación in situ, particularmente en comunidades rurales con recursos limitados.

Por otra parte, la escalabilidad enfrenta barreras económicas y técnicas: costos de MFCs superan en un 300% a soluciones fotovoltaicas (15), mientras la dependencia de pretatamientos fúngicos incrementa complejidad operativa (10). Estos desafíos se agravan por la ausencia de análisis de ciclo de vida (0% de los estudios), omitiendo impactos ambientales a largo plazo.

Asimismo, el sesgo geográfico en la literatura limita transferencia tecnológica: solo el 8.7% de estudios provienen de bases regionales (SciELO/Latindex), ignorando innovaciones locales relevantes para microclimas extremos. Esta disparidad, ya señalada por (4), obstaculiza la incorporación de conocimientos ancestrales en el diseño de sistemas resilientes.

Asimismo, la valorización de residuos agrícolas muestra potencial dual: el hidrolizado de paja de trigo pretatado con hongos incrementa un 65.09% la producción de etanol y bioelectricidad (10), superando enfoques convencionales de biomasa no optimizada (25). Sin embargo, la viabilidad a escala industrial sigue comprometida por costos logísticos de recolección, un desafío no abordado en el 89% de los estudios analizados.

Complementariamente, los nanocatalizadores biosintetizados demuestran roles multifuncionales: nanopartículas de cobre mejoran conductividad eléctrica y acción antibacteriana (6), mientras lacasas fúngicas (*Coriolus versicolor*) optimizan la remoción de metales pesados (>99% de Cu^{2+}) en biocátodos (19). Estos avances contrastan con sistemas sin catalizadores, donde la densidad de potencia no supera 41.3 mW/m^2 , evidenciando su papel crucial en la eficiencia electroquímica.

Adicionalmente, la integración de biohíbridos microalgas-materiales (37) y rutas alternativas de electrones (16) abre nuevas vías para captura de CO_2 . No obstante, la transferencia de estos resultados a entornos extremos es marginal: solo el 13% de los estudios incluyen validación en condiciones reales de frío o baja luminosidad, una omisión crítica que limita su aplicabilidad en regiones vulnerables como Huancavelica.

En consecuencia, aunque los avances en consorcios microbianos y nanocatalizadores son promisorios (29), la viabilidad comercial requiere urgentemente marcos colaborativos que integren algoritmos de IA accesibles, bancos de especies nativas y co-creación con comunidades vulnerables, cerrando así brechas entre investigación básica y aplicaciones tangibles.

CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática confirma que los sistemas bioelectroquímicos híbridos (plantas-hongos) ofrecen una vía viable

para generar energía sostenible y remediar residuos en condiciones climáticas extremas. La integración de especies nativas extremófilas, como cactáceas y hongos ligninolíticos, demuestra resiliencia inherente a bajas temperaturas ($<5^\circ\text{C}$) y luminosidad limitada, constituyendo recursos subutilizados para aplicaciones descentralizadas. No obstante, la estabilidad energética ($>200 \text{ mW/m}^2$) solo se logra en el 28% de los casos, principalmente mediante consorcios microbianos optimizados con nanocatalizadores o pretatamientos fúngicos, evidenciando la necesidad de mejorar la eficiencia cuántica y reducir la resistencia interna en celdas de combustible.

Además, la inteligencia artificial emerge como herramienta clave para predecir rendimientos y gestionar sistemas en tiempo real, particularmente mediante redes neuronales que ajustan parámetros operativos. Sin embargo, su implementación efectiva requiere protocolos estandarizados actualmente inexistentes, especialmente para entornos rurales con recursos limitados. La escasa validación in situ de algoritmos de aprendizaje automático en microclimas extremos representa una brecha crítica que frena la escalabilidad.

Por otro lado, la doble función de estos sistemas (generación energética y degradación de residuos) muestra mayor solidez en biorremediación que en productividad eléctrica, alcanzando >90% de eficacia en eliminación de

contaminantes. Esta sinergia es replicable en residuos agrícolas como bagazo de caña o paja de trigo, aunque su rentabilidad se ve comprometida por costos de recolección de biomasa y mantenimiento, actualmente un 300% superiores a soluciones fotovoltaicas convencionales.

Además, la transferencia tecnológica a comunidades rurales enfrenta barreras metodológicas y epistemológicas: la subrepresentación de literatura no anglófona en revisiones limita el acceso a conocimientos locales, mientras la ausencia de análisis de ciclo de vida y estudios de durabilidad ignora impactos ambientales a largo plazo. Para superar estas limitaciones, se propone un marco tridimensional que integre: 1) Bancos de datos de especies nativas adaptadas a estrés hídrico/lumínico; 2) Plataformas de IA de código abierto para optimizar diseños de MFCs; y 3) Redes colaborativas de co-creación de protocolos con comunidades afectadas por pobreza energética. Solo así se transformarán avances experimentales en soluciones tangibles para la justicia climática y energética.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

1. Kuleshova T, Rao A, Bhadra S, Garlapati V, Sharma S, Kaushik A, et al. Plant microbial fuel cells as an innovative, versatile agro-technology for green energy generation combined with wastewater treatment and food production. *Biomass Bioenergy*. 2022;167:106629. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953422002914>
2. Shlosberg Y, Schuster G, Adir N. Harnessing photosynthesis to produce electricity using cyanobacteria, green algae, seaweeds and plants. *Front Plant Sci*. 2022;13:955843.
3. Debono M, Souza G. Plants as electronic plastic interfaces: A mesological approach. *Prog Biophys Mol Biol*. 2019;146:123-33. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079610718302256>
4. Rojas S, De La Cruz-Noriega M, Otiniano N, Cabanillas L. Sustainable use of the fungus *Aspergillus* sp. to simultaneously generate electricity and reduce plastic through microbial fuel cells. *Sustainability*. 2024;16(17):7413. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/17/7413>
5. Behl K, SessaCharan P, Joshi M, Sharma M, Mathur A, Kareya M, et al. Multifaceted applications of isolated microalgae *Chlamydomonas* sp. TRC-1 in wastewater remediation, lipid production and bioelectricity generation. *Bioresour Technol*. 2020;304:122993. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852420302625>
6. Thu H, Xuan C, Thuong T, Nguyen T, Dang Q, Lee J, et al. Antibacterial effect of copper nanoparticles produced in a *Shewanella*-supported non-external circuit bioelectrical system on bacterial plant pathogens. *RSC Adv*. 2022;12(7):4428-36. <https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S2046206922003254>
7. Kuruvinashetti K, Pakkiriswami S, Panneerselvam D, Packirisamy M. Micro photosynthetic power cell array for energy harvesting: Bio-inspired modeling, testing and verification. *Energies*. 2024;17(7):1749. <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/7/1749>
8. Thulasinathan B, Jayabalan T, Sethupathi M, Kim W, Muniyasamy S, Sengottuvelan N, et al. Bioelectricity generation by natural microflora of septic tank wastewater (STWW) and biodegradation of persistent petrogenic pollutants by basidiomycetes fungi: An integrated microbial fuel cell system. *J Hazard Mater*. 2021;412:125228.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389421001916>

9. Raqba R, Razaqat S, Ali N, Munis M. Biodegradation of Reactive Red 195 azo dye and Chlorpyrifos organophosphate along with simultaneous bioelectricity generation through bacterial and fungal based biocathode in microbial fuel cell. *J Water Process Eng.* 2022; 50:103177. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714422006213>

10. Shrivastava A, Sharma R. Conversion of lignocellulosic biomass: Production of bioethanol and bioelectricity using wheat straw hydrolysate in electrochemical bioreactor. 2023;9(1):e12951. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023001585>

11. Jayakrishna S, Ganesh S. Unveiling the effects of electric field treatments on crop cultivation: a game-changing sustainable energy strategy for plant pathogen eradication and boosting yield growth in agriculture, validated with an artificial intelligence approach. *Energy Nexus.* 2025;18:100438. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427125000798>

12. Howe C, Bombelli P. Is it realistic to use microbial photosynthesis to produce electricity directly? *PLOS Biol.* 2023; 21(3):e3001970. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9980807/>

13. Toczyłowska R, Pielech K, Sekrecka A, Dziekońska U. Stimulation of electricity production in microbial fuel cells via regulation of syntrophic consortium development. *Appl Energy.* 2020; 271:115184. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920306966>

14. Rojas S, De La Cruz N, Cabanillas L, Otiniano N, Soto N, Terrones N. Reducing plastic waste and generating bioelectricity simultaneously through fuel cells using the fungus *Pleurotus ostreatus*. *Sustainability.* 2024;16(18):7909. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/18/7909>

15. Tanneru H, Kuruvinashetti K, Pillay P, Rengaswamy R, Packirisamy M. Feasibility studies of micro photosynthetic power cells as a competitor of photovoltaic cells for low and ultra-low power

IoT applications. *Energies.* 2019; 12(9):1595. <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/9/1595>

16. Peltier G, Stoffel C, Findinier J, Madireddi S, Dao O, Epting V, et al. Alternative electron pathways of photosynthesis power green algal CO₂ capture. *Plant Cell.* 2024; 36(10):4132-42. <https://doi.org/10.1093/plcell/koae143>

17. Lecaro J, Garzón V. Energía eléctrica fotosintética: una alternativa económica y ecológica para los sectores rurales y urbanos del Cantón Machala, Provincia de El Oro. *Polo Conoc Rev Científico - Prof.* 2021; 6(12):670-85. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8219318>

18. Subash M, Maheshwari A. Investigation of *Ochrobacter pseudintermedium* ASMCS06 for cleaner biodegradation and bioelectricity production. *Clean Mater.* 2022;6:100149. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772397622001095>

19. Lin C, Lai C, Liu S, Chen Y, Alfanti L. Enhancing bioelectricity generation and removal of copper in microbial fuel cells with a laccase-catalyzed biocathode. *J Clean Prod.* 2021; 298:126726. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262100946X>

20. Sani A, Savla N, Pandit S, Mathuriya S, Gupta P, Khanna N, et al. Recent advances in bioelectricity generation through the simultaneous valorization of lignocellulosic biomass and wastewater treatment in microbial fuel cell. *Sustain Energy Technol Assess.* 2021; 48:101572. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138821005865>

21. Rojas W, Rojas S, Benites S, Delfín D, Cruz M, Cabanillas L, et al. Potential use of pepper waste and microalgae *Spirulina* sp. for bioelectricity generation. *Energy Rep.* 2023; 9:253-61. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723012453>

22. Sharma R, Kumari R, Pant D, Malaviya P. Bioelectricity generation from human urine and simultaneous nutrient recovery: Role of microbial fuel cells. *Chemosphere.* 2022; 292:133437. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653521039114>

- 23.** Enamala M, Dixit R, Tangellapally A, Singh M, Dinakarrao S, Chavali M, et al. Photosynthetic microorganisms (algae) mediated bioelectricity generation in microbial fuel cell: concise review. *Environ Technol Innov.* 2020; 19:100959. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186420307227>
- 24.** Wang H, Wang Q, Li X, Wang Y, Jin P, Zheng Y, et al. Bioelectricity generation from the decolorization of reactive blue 19 by using microbial fuel cell. *J Environ Manage.* 2019; 248:109310. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719310126>
- 25.** Mendu V, Shearin T, Campbell J, Stork J, Jae J, Crocker M, et al. Global bioenergy potential from high-lignin agricultural residue. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2012;109(10):4014-9.
- 26.** Menger-Krug E, Niederste-Hollenberg J, Hillenbrand T, Hiessl H. Integration of microalgae systems at municipal wastewater treatment plants: implications for energy and emission balances. *Environ Sci Technol.* 2012;46(21):11505-14.
- 27.** Blatt M, Pullum G, Draguhn A, Bowman B, Robinson D, Taiz L. Does electrical activity in fungi function as a language? *Fungal Ecol.* 2024; 68:101326. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1754504823001034>
- 28.** Zhang J, Hou Y, Lei L, Hu S. Moist-electric generators based on electrospun cellulose acetate nanofiber membranes with tree-like structure. *J Membr Sci.* 2022; 662:120962. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738822007074>
- 29.** El-Esawy M, Elsharkawy S, Youssif M, Raafat A, Ramadan F, Ahmed B, et al. Recent advances of green nanoparticles in energy and biological applications. *Mater Today [Internet].* 2024; 72:117-39. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702123003863>
- 30.** Yang Y, Liu L, Tian H, Cooper A, Sprick R. Making the connections: physical and electric interactions in biohybrid photosynthetic systems. *Energy Environ Sci.* 2023; 16(10):4305-19: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/ee/d3ee01265d>
- 31.** Liang G, Xu X, Chen X, Wu J, Song W, Wei W, et al. Designing a periplasmic photosynthetic biohybrid system for succinate and electric energy production. *Chem Eng J.* 2023; 477:147152. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894723058837>
- 32.** Singh N, Brumer P. Electronic energy transfer in model photosynthetic systems: Markovian vs. non-Markovian dynamics. *Faraday Discuss.* 2011; 153(0):41-50. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/fd/c1fd00038a>
- 33.** Lewis K, Ogilvie J. Probing photosynthetic energy and charge transfer with two-dimensional electronic spectroscopy. *J Phys Chem Lett.* 2012; 3(4):503-10. <https://doi.org/10.1021/jz201592v>
- 34.** McCormick A, Bombelli P, Scott A, Philips A, Smith A, Fisher A, et al. Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system. *Energy Environ Sci.* 2011; 4(11):4699-709. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2011/ee/c1ee01965a>
- 35.** Duan H, Prokhorenko V, Cogdell R, Ashraf K, Stevens A, Thorwart M, et al. Nature does not rely on long-lived electronic quantum coherence for photosynthetic energy transfer. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2017;114(32):8493-8.
- 36.** Kuruvinashetti K, Tanneru H, Pakkiriswami S, Pakkirisamy M. Optical interactions in bioelectricity generation from photosynthesis in microfluidic micro-photosynthetic power cells. *Energies.* 2023;16(21):7353. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/21/7353>
- 37.** Xiong W, Peng Y, Ma W, Xu X, Zhao Y, Wu J, et al. Microalgae–material hybrid for enhanced photosynthetic energy conversion: a promising path towards carbon neutrality. *Natl Sci Rev.* 2023;10(10):nwad200. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad200>
- 38.** Strik D, Hamelers B, Snel J, Buisman C. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *Int J Energy Res.* 2008; 32(9):870-6. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.1397>

- 39.** Umar A, Smółka Ł, Gancarz M. The role of fungal fuel cells in energy production and the removal of pollutants from wastewater. *Catalysts*. 2023; 13(4):687. <https://www.mdpi.com/2073-4344/13/4/687>
- 40.** Rojas S, Pimentel C, Cabanillas L, Angelats L. Potential use of the fungus *Trichoderma* sp. as a plastic-reducing agent and electricity generator in microbial fuel cells. *Processes*. 2024;12(12):2904. <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/12/2904>
- 41.** Sarma H, Bhattacharyya P, Jadhav D, Pawar P, Thakare M, Pandit S, et al. Fungal-mediated electrochemical system: prospects, applications and challenges. *Curr Res Microb Sci*. 2021; 2:100041. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666517421000225>
- 42.** Moubasher H, Tammam A, Saleh M. Enhancing electricity generation using fungal laccase-based microbial fuel cell. *J Microbiol Biotechnol Food Sci*. 2024; 14(2):e9703-e9703. <https://office2.jmbfs.org/index.php/JMBFS/article/view/9703>
- 43.** Andriukonis E, Celiesiute R, Ramanavicius S, Viter R, Ramanavicius A. From microorganism-based amperometric biosensors towards microbial fuel cells. *Sensors*. 2021; 21(7):2442. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/7/2442>
- 44.** Wu C, Liu X, Li W, Sheng G, Zang G, Cheng Y, et al. A white-rot fungus is used as a biocathode to improve electricity production of a microbial fuel cell. *Appl Energy*. 2012; 98:594-6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912001596>
- 45.** Logan B. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nat Rev Microbiol*. 2009; 7(5):375-81. <https://www.nature.com/articles/nrmicro2113>