

Evaluación de la eficacia de las biobaterías en la generación de energía eléctrica

Evaluation of the effectiveness of biobatteries in generating electrical energy

Edw Shandey Santa Cruz Camara ^{1,a}   , Donetsi Mercedes Pando Ibarra ^{1,a} ,
Michelle Jeftzibá Moreno Ríos ^{1,a} , Estéfano Marcelo Infante Morales ^{1,a} 

Filiación institucional

¹ Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Huánuco, Perú.

Grado académico

^a Estudiante de Ingeniería Ambiental.

Recibido: 24-10-24

Aprobado: 04-01-25

Publicado: 10-01-25

RESUMEN

El crecimiento de la demanda energética y la dependencia de combustibles fósiles representan desafíos ambientales significativos, especialmente en comunidades rurales con acceso limitado a la energía. En este contexto, las biobaterías basadas en celdas de combustible microbianas (CCM) surgen como una alternativa sostenible para la generación de energía eléctrica. El objetivo del siguiente estudio fue evaluar la eficacia de las biobaterías en la generación de energía eléctrica mediante CCM. Se realizó un estudio de tipo experimental con enfoque cuantitativo y alcance explicativo. Se utilizaron CCM elaboradas con electrodos de grafito y sustratos orgánicos locales. Se emplearon instrumentos, como multímetros digitales y espectrofotómetros UV-Vis, para registrar y medir la energía eléctrica a través del voltaje, la corriente y el análisis del sustrato. Los resultados revelaron que las biobaterías generan un voltaje promedio de 0,7 a 1,2 V en condiciones controladas. Se observó que variables, como el tipo de electrodo, influyen ligeramente en el rendimiento del sistema. La generación de energía fue estable durante cinco semanas. Se concluye que las biobaterías muestran una alta eficacia en la generación de energía eléctrica bajo condiciones experimentales, siendo viables para su implementación en zonas rurales como solución energética sostenible.

Palabras clave: bacteria; eficacia; electrolisis; combustible; voltaje.

ABSTRACT

The growth in energy demand and dependence on fossil fuels represent significant environmental challenges, especially in rural communities with limited access to energy. In this context, biobatteries based on microbial fuel cells (MFCs) emerge as a sustainable alternative for power generation. The objective of the following study was to evaluate the effectiveness of biobatteries in the generation of electric energy by means of MCC. An experimental study with a quantitative approach and explanatory scope was carried out. MCCs made with graphite electrodes and local organic substrates were used. Instruments such as digital multimeters and UV-Vis spectrophotometers were used to record and measure electrical energy through voltage, current and substrate analysis. The results revealed that the biobatteries generate an average voltage of 0.7 to 1.2 V under controlled conditions. Variables, such as electrode type, were found to slightly influence system performance. Power generation was stable for five weeks. It is concluded that the biobatteries show a high efficiency in the generation of electric energy under experimental conditions, being viable for their implementation in rural areas as a sustainable energy solution.

Keywords: bacteria; efficacy; electrolysis; fuel; voltage.

Citar como: Santa Cruz Camara, E.D., Pando Ibarra, D.M., Moreno Ríos, M.J., Infante Morales, EM. (2025). Evaluación de la eficacia de las biobaterías en la generación de energía eléctrica. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente*, 2(1), 49-56. <https://doi.org/10.37711/repiama.2025.2.1.6>



Introducción

En las últimas décadas, el incremento sostenido de la demanda energética ha generado una fuerte dependencia de fuentes no renovables, como los combustibles fósiles. Según Osman et al. (2022), el uso continuado de combustibles fósiles ha sido responsable de más del 75 % de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y del 90 % del CO₂, lo que genera contaminación en el aire, suelo y agua, y refuerza la fuerte dependencia energética de fuentes no renovables. Este escenario ha incentivado la búsqueda de tecnologías limpias y sostenibles para la generación de energía. Una de las alternativas emergentes son las celdas de combustible microbianas (CCM), también conocidas como biobaterías, que permiten producir electricidad a partir de la actividad metabólica de microorganismos que degradan la materia orgánica (Busalmen, 2010).

Algunos estudios recientes respaldan el potencial de las biobaterías como sistemas viables para la generación de energía eléctrica en contextos descentralizados y rurales. Estos han demostrado el potencial de estas tecnologías. Por ejemplo, Cárdenas et al. (2022) evaluaron las CCM utilizando aguas residuales del procesamiento de café, consiguiendo lograr una densidad de potencia de 89 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Así mismo, De La Cruz Noriega et al. (2021) demostraron la eficiencia de las CCM de bajo costo usando electrodos de cobre y zinc, para generar energía a partir de aguas residuales. Sin embargo, aún existe escasa implementación práctica, especialmente en zonas rurales donde esta tecnología podría brindar soluciones accesibles y sostenibles.

Según Kato (2015), ciertas especies de bacterias electroactivas pueden transferir electrones directamente a electrodos sólidos mediante respiración extracelular, lo que permite convertir materia orgánica en energía eléctrica de forma eficiente. Además, investigadores como Wang (2024) observaron que bacterias como la *Geobacter sulfurreducens* y la *Shewanella oneidensis* desarrollan biofilms conductores que transfieren electrones directamente a superficies sólidas (ánodos) sin mediadores químicos; por su parte, Shi et al. (2016) describen el uso de pili y citocromos tipo-c en estos microorganismos, para la respiración extracelular eficiente. Por último, Reguera, G. et al. (2006) confirmaron que el uso de nanocables bacterianos en *Geobacter sulfurreducens* mejoran notablemente la generación de corriente eléctrica.

Por otra parte, según Jacobs et al. (2024), en países de bajos ingresos, y especialmente en áreas rurales con acceso limitado a fuentes convencionales, las bacterias electrogénicas en sistemas tipo CW-MFC (celda de combustible microbiana de humedal construido) no solo transfieren electrones directamente a electrodos, sino que además alcanzan densidades de potencia desde 15 mW/m^2 hasta más de 1 000 mW/m^2 . Estos sistemas descentralizados, sostenibles y de bajo costo podrían proporcionar energía autónoma y tratamiento de agua de manera simultánea en comunidades rurales.

Dado el contexto actual, esta investigación tuvo como objetivo evaluar de manera integral la eficacia de las biobaterías en la generación de energía eléctrica mediante CCM en condiciones controladas. Para alcanzar este fin, se buscó evaluar la capacidad de generación de energía eléctrica de las biobaterías y analizar la estabilidad del flujo de energía eléctrica producido por las biobaterías en un intervalo de tiempo de cinco semanas, identificando posibles fluctuaciones en el voltaje. Con ello se esperaba observar la viabilidad de esta tecnología en espacios rurales, donde la energía es escasa e inaccesible, tratando de contribuir de esta manera a generar fuentes de energía óptimas y de bajo costo.

Métodología

El presente estudio fue de tipo experimental, con enfoque cuantitativo y de alcance explicativo, ya que se buscó establecer relaciones causales entre los componentes de las biobaterías (electrodos, sustratos, configuración) y la generación de energía eléctrica. La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio Experimental "Start Lab" de la Universidad de Huánuco, en la ciudad de Huánuco, en Perú, entre los meses de septiembre y agosto del año 2024.

Las CCM fueron construidas y evaluadas con una cámara modificada, a diferencia del diseño convencional de doble cámara, lo que permitió mayor eficiencia en la transferencia de electrones y reducción de costos. Se usó el

sistema de CCM, ya que, según Garbini et al. (2023), cuando se alimenta una celda de combustible microbiana con aguas residuales, la generación de voltaje y corriente eléctrica permite inferir la presencia de bacterias electroactivas en el sustrato, ya que estas son las responsables de formar biofilms en el ánodo, capaces de transferir electrones hacia el electrodo, sin necesidad de identificarlas directamente a nivel taxonómico. Por lo que se implementaron tres configuraciones experimentales, cada una con diferente combinación de electrodos metálicos y sustratos biodegradables (ver Tabla 1 y Figura 1).

El artefacto estuvo conformado por distintas configuraciones de biobaterías construidas a partir de celdas microbianas con bacterias electrogenicas seleccionadas por su alta capacidad de transferencia energética, como en el estudio realizado por Busalmen (2010). La Tabla 1 muestra los tres tipos de configuraciones experimentales.

Tabla 1
Configuración de biobaterías según tipo de electrodo y sustrato utilizado

Biobatería	Ánodo	Cátodo	Sustrato	Referencia
	Zinc	Grafito	Agua residual doméstica	Feregrino-Rivas et al. (2022)
	Zinc	Cobre	Agua con materia vegetal fermentada	
	Zinc	Zinc	Mezcla de ambos sustratos anteriores	

Como criterios de exclusión fueron considerados los factores de viabilidad técnica y económica. Así mismo, fueron descartados los materiales y configuraciones cuya adquisición implicara un costo elevado o una limitada disponibilidad en contextos rurales o de bajos recursos, donde se proyecta aplicar este tipo de tecnología. Por tal motivo, se priorizó el uso de placas de cobre y zinc, debido a su accesibilidad, bajo costo y adecuada conductividad eléctrica, así como el uso de agua residual doméstica como sustrato, ya que representa una fuente abundante y de fácil acceso, lo que permite mantener la funcionalidad de las celdas microbianas con una buena eficiencia y bajo mantenimiento (Feregrino-Rivas et al., 2022). Estas decisiones buscan garantizar la replicabilidad del sistema en escenarios reales de aplicación.

Materiales y equipos

Para la construcción de las biobaterías se utilizaron materiales accesibles y de bajo costo. Los electrodos consistieron en barras de grafito (5 mm de diámetro y 5 cm de longitud), conectadas con alambres de cobre y láminas de zinc, configuradas como ánodo y cátodo (ver Figura 1). El sustrato fue agua residual recolectada de zonas locales, complementada con restos vegetales fermentados, como cáscaras de frutas y residuos orgánicos. Se empleó una membrana protónica para separar los compartimentos del ánodo y cátodo, permitiendo el paso de protones, siguiendo el principio descrito por Tibaquirá (2009). Además, se utilizaron filtros de carbón activado entre los compartimentos, para evitar el paso de microorganismos. El voltaje del sistema se midió con un multímetro digital, de acuerdo con Pilco (2018), y la formación de biopelículas en los electrodos fue observada mediante un microscopio óptico para verificar la actividad microbiana.

Construcción de las biobaterías

Se construyeron 3 biobaterías, cada una con una configuración de electrodos y sustratos diferentes, como los mencionados anteriormente: batería 1, batería 2 y batería 3 (ver Tabla 1). Se utilizaron frascos plásticos de 0,65 l como cámaras únicas. En el interior se colocaron dos electrodos (ánodo y cátodo) sumergidos parcialmente y conectados mediante cables conductores. La membrana protónica se instaló entre ambos electrodos, siguiendo la estructura propuesta por Tibaquirá (2009), que fue fijada con silicona no conductora. Posteriormente, se añadió el sustrato biodegradable y los cultivos bacterianos al interior de la celda (ver Figura 1).

Figura 1

Construcción del prototipo de la biobatería. Las cajas de color plomo son las celdas, mientras que los cables de color rojo y verde representan el cátodo y ánodo respectivamente



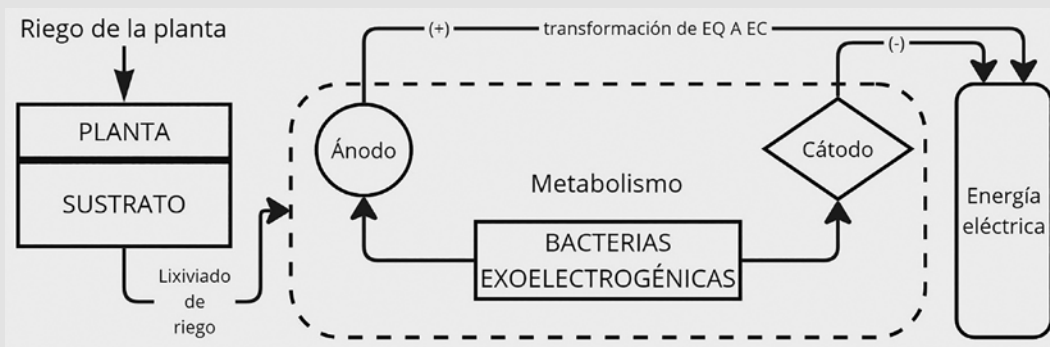
Nota. Las cajas de color plomo son las celdas, mientras que los cables de color rojo y verde representan el cátodo y ánodo, respectivamente.

Funcionamiento del sistema

Las bacterias iniciaron el proceso de degradación de la materia orgánica presente en el sustrato, liberando electrones. Estos electrones fueron transferidos desde el ánodo hacia el cátodo a través de un circuito externo, generando corriente eléctrica. Al mismo tiempo, los protones cruzaron la membrana protónica, completando el circuito iónico y permitiendo el funcionamiento continuo del sistema. Mayor detalle del flujo del funcionamiento del sistema en la Figura 2.

Figura 2

Diagrama representativo del funcionamiento interno de la biobatería. Energía química (EQ), energía eléctrica (EC), línea entre cortada representan el sistema



Monitoreo y recolección de datos

Durante cinco semanas, se registraron diariamente los valores de voltaje y la estabilidad del voltaje para evaluar el rendimiento de las biobaterías. Cada configuración fue evaluada en tres réplicas para garantizar la reproducibilidad de los resultados. La variable independiente fue la configuración de la biobatería, que incluye el tipo de electrodo y el tipo de sustrato. Las variables dependientes fueron el voltaje generado (V) y la estabilidad del sistema, la cual es medida por la duración de la generación constante de energía en las mismas unidades de medida (V).

Análisis de datos

Se aplicaron estadísticas inferenciales, como el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar las diferencias y para determinar la mayor eficiencia energética entre semanas y entre biobaterías. Además, se utilizó la prueba post-hoc de Tukey a un nivel de significancia del 95 % o $p < 0,05$, para determinar qué grupos eran diferentes. Los datos fueron organizados y procesados con Microsoft Excel y mediante el *software* estadístico de Infostat, versión 2020.

Resultados

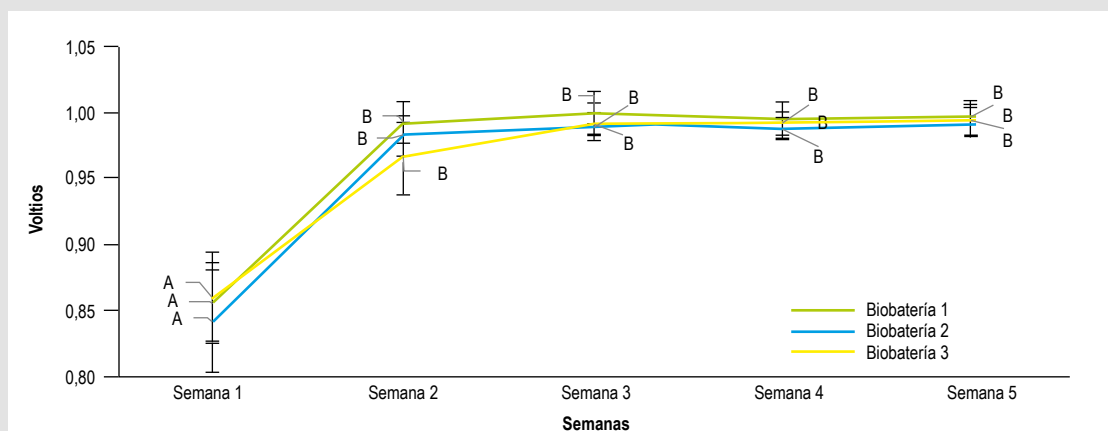
Durante el periodo experimental de cinco semanas, se observó una generación constante de energía eléctrica en las tres configuraciones de biobaterías. El voltaje promedio osciló entre 0,8 V y 1,2 V, con picos máximos alcanzados en la tercera semana. La configuración con electrodos de grafito y sustrato de agua residual doméstica mostró el mejor rendimiento, mientras que la configuración con agua y materia vegetal generó menor voltaje, pero estable.

Según el análisis de varianza (ANOVA) realizado para los grupos de biobaterías durante las cinco semanas de evaluación, se observaron diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,001$) entre las semanas y en la interacción entre semana y biobatería, pero no entre las biobaterías en sí. Estas últimas mostraron un comportamiento similar a lo largo del período evaluado ($p > 0,05$). La Figura 3 muestra la dinámica del voltaje de las biobaterías durante todo el ensayo.

El análisis post-hoc de Tukey, realizado con un nivel de significancia del 95 % ($p < 0,05$), permitió identificar las diferencias específicas entre semanas y biobaterías, representadas mediante letras mayúsculas distintas. Los resultados indican que la semana 1 difiere significativamente del resto, con niveles más bajos de producción energética. A partir de la segunda semana, todas las biobaterías tienden a estabilizar su voltaje, manteniéndose entre 0,84 V y 0,99 V en promedio hasta la quinta semana. Por otro lado, al comparar directamente las biobaterías dentro de cada semana evaluada, no se encontraron diferencias significativas entre ellas, lo que se refleja en el uso de letras iguales en la representación de los resultados.

Figura 3

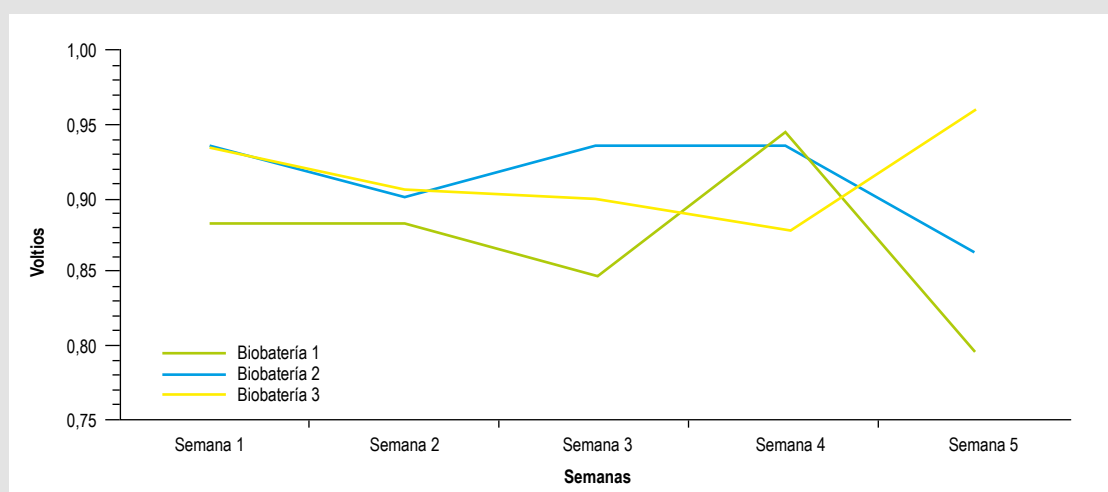
Cuantificación de la cantidad de voltios generados en un tiempo de 5 semanas de 3 biobaterías



En la Figura 4 se presenta la cuantificación de la estabilidad del flujo energético generado por tres biobaterías durante un período de cinco semanas. En general, las biobaterías 2 y 3 mantuvieron los valores de voltaje más altos a lo largo del tiempo, mientras que la biobatería 1 mostró una disminución en la semana 5, registrando 0.80 V, el valor más bajo observado, lo que podría indicar una leve pérdida de eficiencia o un inicio de deterioro del sistema. Del mismo modo, la biobatería 3, en la misma semana 5 mostró el mayor promedio (0,96 V), lo que parece asociado a una recuperación del flujo energético. No obstante, según el análisis de varianza (ANOVA), la estabilidad del flujo energético no presentó diferencias estadísticas significativas entre las semanas ni entre las biobaterías ($p > 0,05$). Por lo tanto, se puede mencionar que la estabilidad del flujo energético fue consistente en todas las biobaterías a lo largo del tiempo.

Figura 4

Cuantificación de la estabilidad de flujo energético generado en un tiempo de 5 semanas de 3 biobaterías



Discusión

Según reporta Busalmen (2010), el uso de *Geobacter sulfurreducens* demuestra ser efectivo como biocatalizador, aunque en nuestra investigación no se pudo identificar esta bacteria, al ser una tarea costosa. Suponemos como Garbini et al. (2023), que nuestros resultados fueron influenciados por la existencia de bacterias electrogénicas. La estabilidad del voltaje a lo largo del tiempo también refuerza la viabilidad de estas tecnologías para aplicaciones prácticas, como dar iluminación eléctrica en zonas rurales alejadas y la carga, aunque lenta, de baterías de pequeños dispositivos eléctricos.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que las biobaterías desarrolladas con sustratos derivados de aguas residuales y electrodos de grafito lograron una generación de voltaje estable entre 0,8 V y 1,2 V durante cinco semanas. Este rango supera lo reportado por De La Cruz Noriega et al. (2021), quienes utilizaron electrodos de cobre y zinc en celdas de combustible microbianas de bajo costo, alcanzando valores picos de $0,35 \text{ V} \pm 0,21 \text{ V}$, los cuales fueron menores a los nuestros. En nuestro caso, el uso de grafito, aunque más económico que otros metales como la plata o el tungsteno, ofreció una combinación efectiva de conductividad y compatibilidad con las bacterias, lo que se tradujo en una mejora en el rendimiento eléctrico del sistema.

Un aporte distintivo de esta investigación fue el diseño de una biobatería de una sola cámara, a diferencia del modelo de doble cámara comúnmente empleado en otros estudios, como los de Sánchez et al. (2021) o Plasencia-Verde et al. (2021). Este rediseño permitió una mayor eficiencia en la transferencia de electrones, simplificó el proceso constructivo y redujo costos, sin comprometer la capacidad de generación energética.

Comparando los hallazgos con los de Cárdenas et al. (2022), quienes emplearon electrodos de grafito modificado y lograron un voltaje de 0,650 V y una densidad de potencia de 89 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, nuestro estudio no se centró en la densidad de potencia y demostró un comportamiento sostenido del voltaje, lo cual es crucial para aplicaciones prácticas de uso continuo. Esto respalda el potencial del grafito como electrodo económico y eficaz.

Además, en el trabajo de Enríquez-León et al. (2020), que usó frutas descompuestas como sustrato y electrodos de plomo y cobre, se reportaron fluctuaciones energéticas. En cambio, en nuestra investigación se utilizó un sustrato de agua residual domestica que, combinado con los electrodos de grafito, ofreció una producción más estable, ideal para aplicaciones en zonas rurales.

Conclusiones

Las biobaterías basadas en celdas de combustible microbianas que utilizan bacterias electrogénicas han demostrado ser eficaces en la generación de energía eléctrica y ser estables en su funcionamiento, dando voltajes entre 0,8 V y 1,2 V y para que estos voltajes no suban o bajen drásticamente en un corto periodo de tiempo implicando, lo que implica su inestabilidad. Diversos factores influyen en el rendimiento de estas celdas de combustible, siendo el tipo de sustrato utilizado como fuente de alimento y energía para las bacterias electrogénicas, así como el material de los electrodos, aspectos determinantes en la cantidad de voltaje generado.

Estas tecnologías emergentes representan una alternativa energética viable, sostenible y de bajo costo, especialmente atractiva para comunidades rurales o regiones aisladas, con acceso limitado o nulo a las redes eléctricas convencionales. Además, al aprovechar desechos orgánicos como sustrato, las biobaterías contribuyen a la gestión de residuos y la reducción del impacto ambiental, alineándose con los principios de economía circular y desarrollo sustentable.

Aspectos éticos

Este estudio no involucró experimentación con seres humanos ni animales; por lo tanto, no requirió de aprobación por parte del comité de Ética.

Agradecimientos

Niler Rosario, Chahua García

Referencias

- Busalmen, J. P. (2010). *Bacterias electrogénicas: De los sedimentos a las celdas de combustible microbianas*. CONICET. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/12626>
- Cárdenas, D., Villegas, J. R., Solís, C., Sanabria-Chinchilla, J., Uribe, L., y Fuentes-Schweizer, P. (2022). Evaluación del desempeño de una celda de combustible microbiana con electrodo de grafito modificado para el tratamiento de agua residual del procesamiento del café. *Revista Colombiana de Química*, 51(1), 40-47. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v51n1.101185>
- De La Cruz Noriega, M., Rojas-Flores, S., Benites, S. M., Otiniano, N. M., Cabanillas-Chirinos, L. A., Rodríguez-Yupanqui, M., Valdiviezo-Dominguez, F., y Rojas-Villacorta, W. (2021). Generación bioelectricidad a partir de aguas residuales mediante celdas de combustible. *En Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.129>
- Enríquez-León, R., Rojas-Flores, S. J., Agüero Quiñones, R., Angelats Silva, L., y Benites Castillo, S. M. (2020). Bioelectricidad mediante celdas de combustible microbiana a partir de frutas descompuestas usando electrodos de plomo y cobre. *En Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.17>
- Feregrino-Rivas, M., Ramírez-Pereda, B., y Estrada-Godoy, F. (2022). Estudio estadístico de la influencia de la distribución geométrica del cátodo en la producción de energía eléctrica en una celda de combustible microbiana de sedimentos. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(1). <https://doi.org/10.37636/recit.v518095>
- Garbini, G. L., Barra Caracciolo, A., & Grenni, P. (2023). Electroactive Bacteria in Natural Ecosystems and Their Applications in Microbial Fuel Cells for Bioremediation: A Review. *Microorganisms*, 11(5), 1255. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051255>
- Jacobs, D.G., Kachienga L.O., Rikhotso M.C., Abia L.K., Traoré A. N., & Potgieter, N. (2024). Assessing the current situation of constructed wetland-microbial fuel cells as an alternative power generation and wastewater treatment in developing

- countries. *Front. Energy Res. (Sec. Bioenergy and Biofuels)*, 1. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2024.1448730>
- Kato S. (2015). Biotechnological Aspects of Microbial Extracellular Electron Transfer. *Microbes and environments*, 30(2), 133-139. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME15028>
- López Pilco, D. F. (2018). *Desarrollo de un equipo de monitoreo inalámbrico de sensores alimentado mediante celdas de combustible microbianas para el CEEA* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <https://dspace.esPOCH.edu.ec:8080/server/api/core/bitstreams/0acffa4d-f4a9-43c5-9972-7eadda5f218b/content>
- Osman, A., Chen, L., Yang, M., Msigwa, G., Farghali, M., Fawzy, S., Rooney, David., & Yap, P. (2022). Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review. *Environ Chem Lett.* <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>
- Plasencia-Verde, C. C., Grabiell-Ríos, K. S., Luque, J. A., y Best, I. K. (2021). Evaluación del potencial energético de residuos de cacao (*Theobroma cacao* L.) por medio de celdas de combustible microbiano (CCM). *Información Tecnológica*, 32(4), 89-98. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000400089>
- Reguera, G., Nevin, K. P., Nicoll, J. S., Covalla, S. F., Woodard, T. L., & Lovley, D. R. (2006). Biofilm and nanowire production leads to increased current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells. *Applied and environmental microbiology*, 72(11), 7345-7348. <https://doi.org/10.1128/AEM.01444-06>
- Sánchez, M., Fernández, L., y Espinoza-Montero, P. (2021). Generación de energía eléctrica y tratamiento de aguas residuales mediante celdas de combustible microbianas. *Revista Digital Novasinergia*, 4(1), 164-180. <https://doi.org/10.37135/ns.01.07.10>
- Shi, L., Dong, H., Reguera, G., Nealson, K. H., Fredrickson, J. K., & Zachara, J. M. (2016). Extracellular electron transfer mechanisms between microorganisms and minerals. *Nature Reviews Microbiology*, 14(10), 651–662. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2016.93>
- Tibaquirá G., Juan, E., y Posner, J. D. (2009). Diseño y construcción de una celda de combustible tipo membrana de intercambio protónico. *Scientia et Technica*, 2(42). <https://doi.org/10.22517/23447214.2569>
- Wang, M. H. (2024). Study on electron transfer mechanisms of electroactive bacteria in microbial fuel Cells. *Journal of Energy Bioscience*, 15(2), 87-97. doi:10.5376/jeb.2024.15.0009

Contribución de los autores

EMI: diseño experimental, recolección de datos y redacción del artículo.

MJM: procesamiento de datos, análisis de resultados y revisión final del manuscrito.

ESC: construcción del prototipo y trabajo de laboratorio.

DPI: revisión bibliográfica y elaboración de figuras y tablas.

Fuentes de financiamiento

La investigación fue realizada con recursos propios.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Correspondencia:

Edw Shandey Santa Cruz Camara

E-mail: edwshandeysantacruzcamara@gmail.com