



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Evaluación de la producción de bioelectricidad en celdas de combustible usando consorcio planta-microorganismo para la generación de energía sustentable

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
Bachiller en Ingeniería Ambiental

AUTORES:

Díaz Rojas, Ray Ronaldo (orcid.org/0000-0002-6551-5342)
Zelada Cabellos, Pablo Cesar (orcid.org/0000-0001-5429-0654)

ASESOR:

Dr. Cruz Monzon, Jose Alfredo (orcid.org/0000-0001-9146-7615)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO – PERÚ

2024



FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, CRUZ MONZON JOSE ALFREDO, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, asesor de Trabajo de Investigación titulado: "Evaluación de la producción de bioelectricidad en celdas de combustible usando consorcio planta-microorganismo para la generación de energía sustentable", cuyos autores son DIAZ ROJAS RAY RONALDO, ZELADA CABELLOS PABLO CESAR, constato que la investigación tiene un índice de similitud de 15%, verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones.

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender el Trabajo de Investigación cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido, asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

TRUJILLO, 02 de Julio del 2024

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
JOSE ALFREDO CRUZ MONZON DNI: 18887838 ORCID: 0000-0001-9146-7615	Firmado electrónicamente por: JACRUZM el 02-07- 2024 15:55:42

Código documento Trilce: TRI - 0788351



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA
PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Originalidad de los Autores

Nosotros, DIAZ ROJAS RAY RONALDO, ZELADA CABELLOS PABLO CESAR estudiantes de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA de la escuela profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO SAC - TRUJILLO, declaramos bajo juramento que todos los datos e información que acompañan el Tesis titulado: "Evaluación de la producción de bioelectricidad en celdas de combustible usando consorcio planta-microorganismo para la generación de energía sustentable", es de nuestra autoría, por lo tanto, declaramos que el Tesis:

1. No ha sido plagiado ni total, ni parcialmente.
2. Hemos mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicado, ni presentado anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de la información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Nombres y Apellidos	Firma
PABLO CESAR ZELADA CABELLOS DNI: 74292128 ORCID: 0000-0001-5429-0654	Firmado electrónicamente por: ZELADACPC el 02-07- 2024 17:35:17
RAY RONALDO DIAZ ROJAS DNI: 73339398 ORCID: 0000-0002-6551-5342	Firmado electrónicamente por: RAY el 02-07-2024 20:19:13

Código documento Trilce: TRI - 0788350

Dedicatoria

A mi madre, quien me dio la fuerza para realizar este trabajo, y su apoyo incondicional en mis responsabilidades y metas personales.

Díaz Rojas, Ray.

A mis padres, que son mi mayor motivación para alcanzar mis objetivos.

Zelada Cabellos, Pablo César.

Agradecimiento

A Dios, que es el que nos brinda un día más de vida, lo que nos permitió haber concluido esta revisión de literatura.

A nuestro asesor, el Dr. Cruz Monzón, José Alfredo, por su constante guía, confianza y apoyo durante todo este proceso, su compromiso con nuestro aprendizaje y desarrollo continuo ha sido invaluable.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula	i
Declaratoria de Autenticidad del Asesor.....	ii
Declaratoria de Originalidad de los Autores.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	9
II. METODOLOGÍA.....	11
III. RESULTADOS.....	14
IV. CONCLUSIONES.....	24
V. REFERENCIAS.....	21

Resumen

El trabajo de investigación surge debido a una problemática relacionada con la demanda de energía, la cual ha incrementado significativamente en los últimos años a causa de la expansión urbana, crecimiento demográfico y desarrollo industrial, lo que contribuye al deterioro ambiental debido al aprovechamiento descontrolado de combustibles fósiles. El presente estudio, se desarrolló con la finalidad de buscar fuentes alternativas de energía sostenible, y una de ellas son las celdas de combustible planta-microbiana (PMFC's) que representan una solución innovadora, ya que estas celdas utilizan las raíces de las plantas para alimentar bacterias electroquímicamente activas, generando bioelectricidad a su vez contribuyendo a la reducción de emisiones de CO². El objetivo de la investigación evaluar la producción de bioelectricidad en celdas de combustible usando consorcio planta-microorganismo para la generación de energía sustentable. Para ello, la metodología, incluye un enfoque cualitativo, con diseño no experimental y longitudinal, debido a que se realizó una revisión sistemática de artículos científico publicados entre 2019 y 2024 en diversas bases de datos como Science Direct, Scopus, Springer Open, Web of Science y PubMed. Además, se utilizó palabras claves relacionadas con PMFC's y bioelectricidad, las cuales cumplan con los criterios de búsqueda. Los resultados del estudio mostraron que las especies de plantas más eficientes para la producción de bioelectricidad en PMFC incluyen Canna, Solanum melongena, planta de tomate, planta de chile, Kalanchoe daigremontiana, y Aloe perfolia. Por otra parte, los materiales más eficaces para los electrodos fueron el grafito, el carbón activado y el titanio, concluyendo que las PMFC's representan una alternativa prometedora para la generación de energía sostenible, ofreciendo una solución viable para reducir la contaminación y conservar los recursos naturales, asimismo, teniendo en cuenta la combinación de ciertas plantas y materiales de electrodos se puede optimizar la producción de bioelectricidad, lo que puede ser fundamental para el desarrollo de tecnologías energéticas limpias en el futuro.

Palabras clave: Bioelectricidad, celdas de combustible planta-microbiana (PMFC's), electrodos, tecnologías energéticas limpias, desarrollo sostenible

Abstract

The research work originates from an issue related to energy demand, which has significantly increased in recent years due to urban expansion, population growth, and industrial development, contributing to environmental degradation due to the uncontrolled exploitation of fossil fuels. This study was developed with the aim of seeking alternative sources of sustainable energy, and one such alternative is plant-microbial fuel cells (PMFCs), which represent an innovative solution. These cells use plant roots to feed electrochemically active bacteria, generating bioelectricity and contributing to the reduction of CO₂ emissions. The objective of the research is to evaluate bioelectricity production in fuel cells using a plant-microorganism consortium for sustainable energy generation. The methodology includes a qualitative approach, with a non-experimental and longitudinal design, as a systematic review of scientific articles published between 2019 and 2024 was conducted across various databases such as Science Direct, Scopus, Springer Open, Web of Science, and PubMed. Keywords related to PMFCs and bioelectricity, which meet the search criteria, were used. The study results showed that the most efficient plant species for bioelectricity production in PMFCs include Canna, Solanum melongena, tomato plant, chili plant, Kalanchoe daigremontiana, and Aloe perfolia. On the other hand, the most effective materials for electrodes were graphite, activated carbon, and titanium. It was concluded that PMFCs represent a promising alternative for sustainable energy generation, offering a viable solution to reduce pollution and conserve natural resources. Furthermore, by considering the combination of certain plants and electrode materials, bioelectricity production can be optimized, which could be fundamental for the development of clean energy technologies in the future.

Keywords: Bioelectricity, plant-microbial fuel cells (PMFCs), electrodes, clean energy technologies, sustainable development

I. INTRODUCCIÓN

La electricidad se ha convertido en una necesidad esencial tanto para las actividades cotidianas como para el desarrollo óptimo de una variedad de tareas, su presencia es fundamental en nuestra vida diaria, afectando no solo nuestras actividades básicas, sino también impulsando el progreso y la innovación en diversos campos (Idzni et al., 2024 p. 1). Asimismo, la necesidad de encontrar alternativas energéticas sostenibles ha ido en aumento en el contexto actual donde las sociedades globales enfrentan los desafíos del cambio climático, la degradación ambiental y la limitada disponibilidad de recursos fósiles (Nursyuhada et al., 2023 p. 1). Se proyecta que la demanda de energía experimentará una tasa de crecimiento anual promedio del 4,7% hasta 2035 (Agencia Internacional de Energías Renovables., 2019).

Durante los últimos años, la expansión urbana, el crecimiento demográfico, las actividades antropogénicas y el desarrollo industrial han provocado un aumento significativo en la demanda mundial de energía y en el consumo de recursos hídricos (Idzni et al., 2024 p. 1; Nawaz et al., 2022 p. 358). A pesar de que la energía eléctrica se obtiene a partir de combustibles fósiles, los cuales son no renovables y contribuyen al deterioro ambiental mediante la emisión de gases de efecto invernadero (Fosados, 2021., p. 12; Nookwam et al., 2022, p. 1), esta dependencia aún prevalece siendo la principal fuente de energía a nivel global (Silva et al., 2023, p. 1).

En el contexto peruano, se ha observado un incremento anual del 7% en la demanda de electricidad, atribuido al aumento demográfico registrado en las últimas décadas y un 94% del uso de energía atribuido al transporte, seguido del alojamiento con el 3.5% (Raihan & Tuspekova., 2022, p. 2; Calderón et al., 2021, p. 2). Con la expansión de centrales hidroeléctricas, en parte se logró cubrir esta demanda; sin embargo, el sistema energético del país aún enfrenta un desafío crucial: la necesidad de mejorar el suministro de energía en las áreas rurales (Israel & Herrera., 2020, p. 4).

Por lo tanto, resulta poco viable continuar generando energía eléctrica de esta forma, lo que enfatiza la necesidad de explorar otras fuentes alternativas que sean renovables, eficientes y sostenibles (Huang et al., 2024, p. 1; Sonawane et al., 2024, p. 2), y que, a su vez, cumplan con el concepto de las 4E de energía, medio ambiente, eficiencia y economía; proporcionando así una fuente confiable de energía sostenible para reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Muhammad et al., 2022, p. 3). Es así que surge el desafío ambiental de evaluar tecnologías innovadoras,

sostenibles y respetuosas con el medio ambiente, que no solo generen energía eléctrica, sino que también contribuyan a la reducción de emisiones de CO₂. Entre estas innovaciones se encuentran las Celdas de Combustible Planta Microbiana (PMFC), la cual es una tecnología derivada de la pila de combustible microbiana (MFC), que utiliza raíces de plantas para alimentar directamente las bacterias electroquímicamente activas (EAB) en el ánodo mediante la excreción de rizodepósitos (Kabutey et al., 2019, p. 1; Rusyn., 2021, p. 1). Esta tecnología se ha convertido en una innovadora fuente de energía renovable para la generación de bioelectricidad, respaldada por el uso de microorganismos presentes en las plantas (Treesubstorn & Thiravetyan., 2020, p.1)

La realidad problemática exhibida nos conlleva a plantear la siguiente formulación del problema: ¿Cuáles son las celdas de combustible planta-microbiana más eficientes en la producción de bioelectricidad?

Las PMFC's representan un enfoque prometedor para avanzar hacia un futuro sostenible, ya que esta tecnología no solo permite reducir de manera significativa la dependencia de los combustibles fósiles, sino que también contribuye a prevenir la contaminación ambiental, proteger el ecosistema, conservar los recursos convencionales y mitigar los impactos negativos en la salud humana.

Para dar respuesta a la problemática, se plantea el siguiente **objetivo general**: Evaluar la producción de bioelectricidad en celdas de combustible planta-microbiana (PMFC's) para la generación de energía sustentable. Para lograr el desarrollo del objetivo general, se proyectan los siguientes **objetivos específicos**: Evaluar la generación de electricidad en las celdas de combustible planta-microbiana según las especies de plantas, evaluar la producción de corriente eléctrica según el tipo de material utilizado, evaluar la producción de corriente eléctrica y eliminación de DQO según el tipo de sustrato utilizado, para demostrar que las PMFC son una de las alternativas más efectivas para la generación de bioelectricidad.

II. METODOLOGÍA

La investigación realizada fue un estudio de tipo básico porque busca ampliar el conocimiento teórico, en este sentido, su enfoque fue cualitativo, puesto que incluye una revisión sistemática sin metaanálisis para comprender un fenómeno. Además, cuenta con un diseño no experimental y longitudinal, puesto que se dedicó a examinar bases de datos de revistas indexadas cómo se manifiestan en los años 2019 – 2024.

Tabla 1. *Criterios de selección de artículos*

Idioma	Ingles
Año de publicación	2019 – 2024
Tipo de acceso	Acceso libre
Tipos de celdas de combustible	PMFC's
Tipo de artículos	Científicos

Fuente: Elaboración propia

Además, se consideraron las siguientes palabras claves para la búsqueda de los artículos que formaron parte del desarrollo de la investigación.

Tabla 2. *Criterios de selección de artículos*

Base de datos	Palabras claves
Science Direct	“PMFC” AND “Bioelectricity” AND “Microorganisms” OR “Anode and cathode”
Scopus	“Bioelectricity” AND “Microorganisms” OR “PMFC” Bioelectricity, AND fuel AND cells AND microbial AND plant, AND Microorganisms
Springer Open	“Plant microbial fuel cell” AND “Bioelectricity” OR “Electrode”
Web of Science (WOS)	“Bioenergy” AND “PMFC” AND “Current” / “PMFC” AND “Bioelectricity” AND “Microorganisms” OR “Anode and cathode”
PubMed	“Bioelectricity” AND “Electrode” OR “PMFC”

Fuente: Elaboración propia

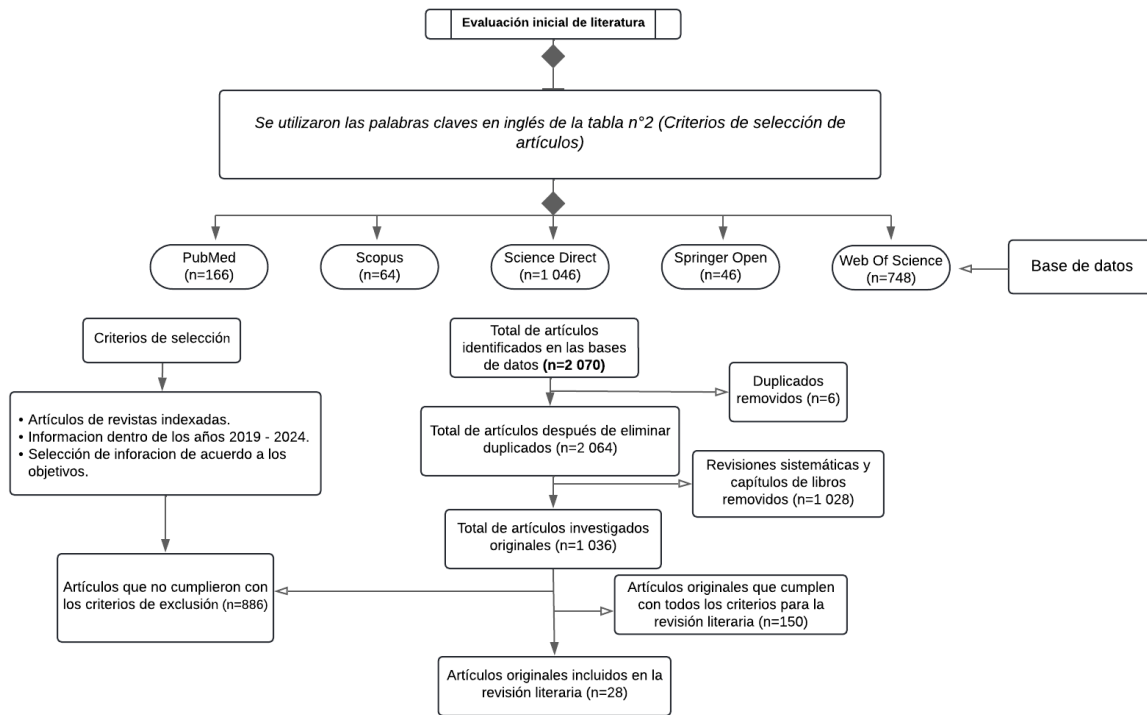


Figura 1. Proceso de búsqueda para la base de datos

Fuente: Elaboración propia

La figura N°1 muestra un riguroso proceso de búsqueda para identificar artículos aptos para el desarrollo de nuestra revisión literaria, con un total de 2 070 artículos recopilados, distribuidos en las siguientes bases de datos: 166 artículos de PubMed, 64 artículos de Scopus, 1 046 artículos de ScienceDirect, 46 artículos de Springer Open y finalmente, 748 artículos de Web of Science. Toda esta información se registró en un principio en el software Microsoft Excel y seguidamente en Mendeley, y posteriormente se excluyeron 6 repeticiones, resultando una diferencia de 1,036 artículos. Para el resto, se eliminaron 1 028 publicaciones entre revisiones sistemáticas y capítulos de libros, lo que resultó en 1 036 artículos de investigación originales. Finalmente, mediante los filtros, se pueden eliminar 886 artículos más, quedando 150 artículos aptos para el desarrollo de esta revisión literaria

Obteniendo los 28 artículos analizados, se evaluó la producción de bioelectricidad en las PMFC, para la generación de energía sostenible.

Tabla 3. Artículos recolectados en la búsqueda primaria

Años	Scopus	Science Direct	Springer Open	WOS	PubMed	Total
2019	8	45	8	106	22	189
2020	12	118	5	133	29	297
2021	9	183	12	166	31	401
2022	17	208	7	156	31	419
2023	14	251	10	137	37	449
2024	4	241	4	50	16	315
Total	64	1046	46	748	166	2 070

Fuente: Elaboración propia

Después de recopilar los artículos de todas las bases de datos investigadas, se utilizaron filtros para garantizar la precisión de la información.

El proyecto de investigación cumplió con los códigos éticos y los lineamientos establecidos por la Universidad César Vallejo. Además, se consideró el compromiso social y la autonomía del investigador. Asimismo, se respetaron los derechos de autor de los investigadores al obtener y procesar la información contenida en los artículos recopilados para su correcto desarrollo. Para asegurar la transparencia y veracidad de los datos, se utilizaron citas conforme al estilo ISO 690. Por último, la información incluida en la investigación podría ser útil para futuros trabajos sobre la evaluación de la producción de bioelectricidad en celdas de combustible planta-microbiana para la generación de energía sustentable.

III. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados de una búsqueda inicial en revistas indexadas, que incluyen PubMed, Scopus, ScienceDirect, Springer Open y Web of Science (WOS).

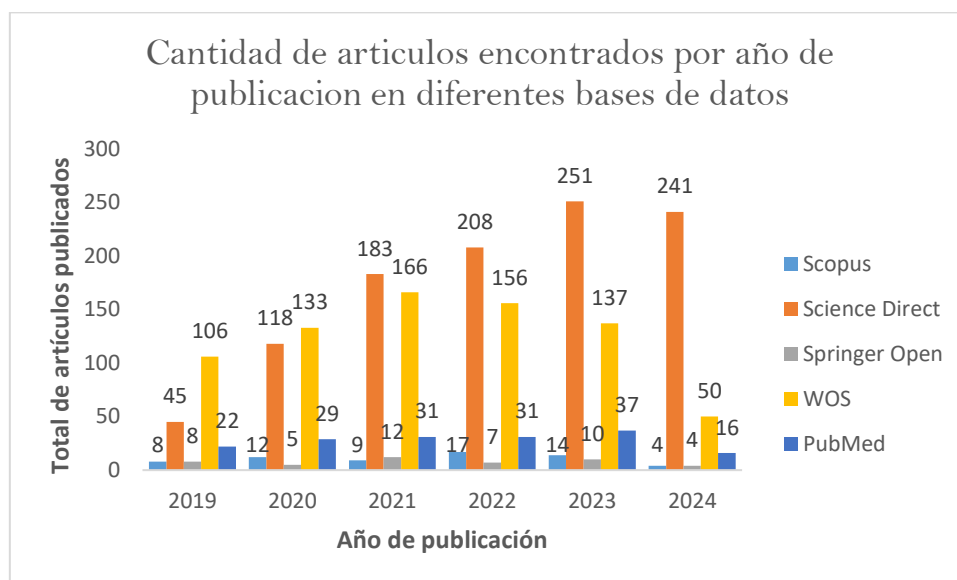


Figura 2. Cantidad de artículos publicados por año en diferentes bases de datos

Fuente: Elaboración propia

La figura 2 muestra la importancia de la investigación sobre la evaluación de la producción de bioelectricidad en celdas de combustible planta-microbiana para la generación de energía sustentable, entonces, podemos decir que el año en que sea tomado más importancia por desarrollar técnicas innovadoras y sostenibles para la producción de energía limpia es en año 2023, ya que se registran un total de 249 artículos, asimismo se tiene que en el año 2019 se tuvo menor cantidad de publicación presentando un total de 189 artículos.

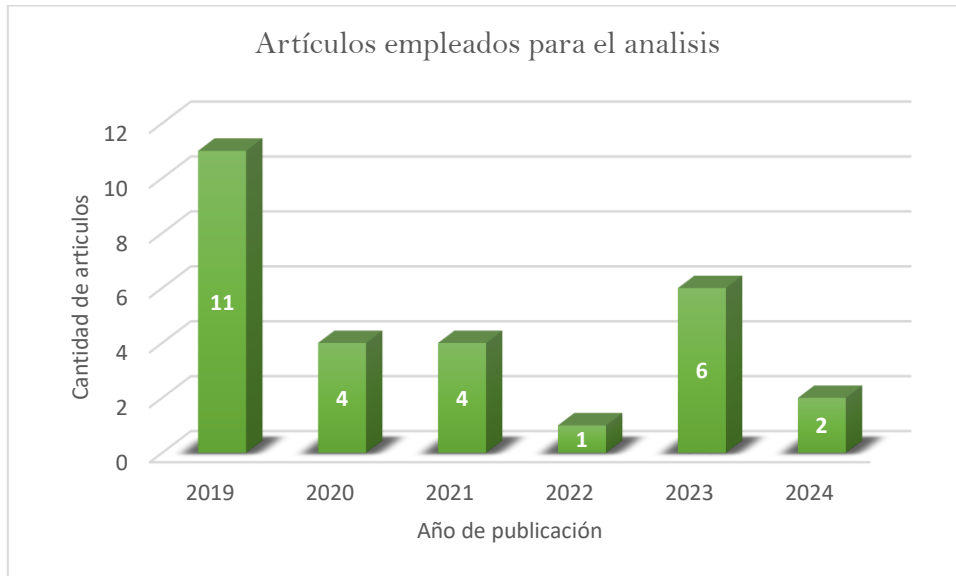


Figura 3. Cantidad de artículos empleados en el análisis

Fuente: Elaboración propia

La figura 3 muestra la cantidad de artículos que consultamos a lo largo de nuestra investigación. En 2019, utilizamos 11 artículos, mientras que, en los años 2020, 2021 y 2022 la cifra se redujo a 5 artículos. Durante 2023, empleamos 6 artículos y en 2024 añadimos 5 más. En total, hemos revisado 28 artículos para realizar este estudio.

De los artículos previamente seleccionados damos respuesta al primer objetivo planteado “Evaluar la producción de corriente eléctrica en la celda de combustible planta-microbiana según las especies de plantas utilizadas”

Tabla 4. Evaluación de la generación de electricidad en PMFC según las especies de plantas

N°	Autor	Especie de planta	Microorganismo	Densidad de potencia máxima	
				P max. (mW/m ²)	Voltaje (mV)
1	Concepción et al. (2023)	Hylocereus undatus	-	7.436	-
2	Jainista et al. (2023)	Eichhornia Crassipes	-	21,26	-
3	Moqsud. (2020)	Brinjal	-	120	-
4	Moqsud & Okamoto. (2023)	Zea mays	-	320	-
5	Maddalwar et al. (2023)	Solanum melongena	-	409,2	616,67 mV
6	Maddalwar et al. (2023)	Capsicum annum	-	25.5	400 mV
7	Maddalwar et al. (2023)	Solanum lycopersicum	-	28	516,67 mV
8	González et al. (2021)	Canna	-	140	750 mV
9	Jain et al. (2023)	Lemna minor	-	42,93	
10	Oodally et al. (2019)	Cyperus prolifer	-	52	229mV

11	Wang et al. (2020)	Iris croceis	Collimonas	243,57	94 mV
12	Oodally et al. (2019)	W. tirsiflora	-	106	21 mV
13	Srivastava et al. (2020)	Canna indica	-	11,67	-
14	Bolton et al. (2019)	Melaleuca quinquenervia	-	4,33	-
15	Galleguillos et al. (2023)	Aloe perfolia	-	5,9	0,295 V
16	Galleguillos et al. (2023)	Agave Potatorum	-	8,8	0,167 V
17	Galleguillos et al. (2023)	Kalanchoe daigremontiana	-	9,4	0,248 V
18	Liping & Feng. (2024)	Scindapsus aureus	-	-	5,25 mV
19	Sogani et al. (2020)	-	Rhodopseudomonas palustris	0,04	-
20	Li et al. (2019)	-	Chlorella vulgaris	5,94	-
21	Yu et al. (2019)	Pennisetum chino	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N°4 se muestran los resultados de la producción de electricidad en las PMFC's según las especies de plantas, de acuerdo con las investigaciones encontradas, las especies de plantas más eficientes para este tipo de celdas son canna, solanum melongena, planta de tomate, planta de chile, kalanchoe daigremontiana y Aloe perfolia.

Al realizar un análisis de las PMFC's que mostraron mejores resultados según el tipo de planta utilizada para la producción de corriente eléctrica se resaltan los estudios realizados por González et al. (2021), quienes utilizaron híbridos de Canna, obteniendo como resultado 750 mV para la producción de electricidad. Asimismo, también resulta pertinente mencionar el estudio realizado por Maddalwar et al. (2023), que utilizaron solanum melongena para las PMFC's, logrando generar un 616,67 mV. Por otro lado, Galleguillos et al. (2023), mencionan que utilizaron las especies de Aloe perfolia, Agave Potatorum y Kalanchoe daigremontiana para evaluar su desempeño, donde se mostraron los mejores resultados para Kalanchoe daigremontiana, con una generación de 0,248 V.

Tabla 5. Evaluación de la producción de corriente eléctrica según el tipo de material utilizado

N°	Autor	Tipo de Material (Electrodos)		Tipo de reactor con su volumen	Densidad de potencia máxima	
		Ánodo	Cátodo		P máx. (mW/m ²)	C.E (mV)
1	Valladares et al. (2019)	Acero inoxidable - Carbón activado granular	Tela de carbono	Fosa séptica-SCMFC 700 L,Desinfección	0.00043	23
2	Bhagat et al. (2022)	Acero inoxidable (SSM)	Filtro de carbono en forma de U reforzado con SSM	CMFC de flujo ascendente vertical	7.99	
3	Galleguillos et al. (2023)	Acero inoxidable AISI 316L	Cobre	-	0.248	-
4	Tang et al. (2019)	Acero inoxidable - Filtro de carbono	Acero inoxidable - Filtro de carbono	Humedales artificiales - MFC de doble cámara, 30 L	0.448	1.36
5	Blatter et al. (2021)	Carbono vítreo reticulado	Carbono vítreo reticulado	MFC de doble cámara, 1000 L	0.2	15
6	Tang & Cols et al. (2019)	Tela de carbono	Grafito	CW- pila de combustible microbiana osmótica	10	
7	Srivastava et al. (2020)	Carbón activado granular (GAC)	Papel carbón recubierto de platino	Sistema combinado de filtro de arena biológico y CMFC, 65 L	11,67	
8	González et al. (2021)	Carbón activado	Carbón activado	Humedales artificiales verticales - MFC de doble cámara, 1500 L	140	750
9	Fan et al. (2024)	Carbón activado	Carbón activado	-		
10	Prasad et al. (2021)	Cobre	Zinc	Sedimento MFC, 35 L	0.0069	-
11	Tripathi et al. (2021)	Cobre	Zinc	Sedimento MFC, 72 L	0.0019	-
12	Hiegemann et al. (2019)	Grafito	Acero inoxidable – Carbón activado	MFC sumergible, 255 L	0.300	31
13	He et al. (2019)	Grafito	Fibra de biografito	MFC de doble cámara, 1,5 m ³	0.400	-

14	Rossi et al. (2019)	Grafito	Acero inoxidable - Carbón activado	MFC de una cámara, 85 L	0.605	27
15	Bolton et al. (2019)	Grafito	Grafito	Subsuelo horizontal CMFC	4,33	
16	Jain et al. (2023)	Grafito	Grafito	-	21,26 - 42,93	-
17	Xu et al. (2019)	Titanio	Titanio	CMFC subsuperficial de flujo ascendente	16,4	
18	Wang et al. (2020)	Titanio	Titanio	CMFC de flujo ascendente vertical	243,57	94

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N°5 se muestran los resultados de la producción de electricidad en las PMFC's según el tipo de material utilizado, de acuerdo con las investigaciones encontradas, el tipo de material más eficiente para los electrodos en celdas son grafito, carbón activado, acero inoxidable, titanio y carbono.

Al realizar un análisis de las PMFC's que mostraron mejores resultados según el tipo de material para la producción de corriente eléctrica se resaltan los estudios realizados por González et al. (2021), quienes utilizaron láminas de carbón activado de 20 cm de diámetro por 3 cm de altura, en la zona de flujo libre y otra en la zona de saturación, además un cable de cobre aislado, debido a su bajo costo en el mercado, para conectar un circuito abierto por un período de 30 día obteniendo como resultado 750 mV para la producción de electricidad. Asimismo, también resulta pertinente mencionar el estudio realizado por Wang et al. (2020), que utilizaron titanio en la fabricación de los electrodos para las PMFC's, logrando generar un 94 mV. Por otra parte, Rossi et al. (2019), menciona que utilizaron las especies Grafito, acero inoxidable y carbón activado para el diseño de los electrodos, donde se evidenciaron resultados favorables, con una generación de 27 mV en cuanto a la producción de electricidad.

Tabla 6. Evaluación de la producción de corriente eléctrica y eliminación de DQO según el tipo de sustrato utilizado

N°	Autor	Sustrato	Eliminación de DQO (%)	Densidad de potencia máxima	
				P máx. (mW/m ²)	C.E (mV)
1	Hiegemann et al. (2019)	Aguas residuales municipales	41	0.300	30
2	Valladares et al. (2019)	Aguas residuales municipales	87	0.0009	22
3	Rossi et al. (2019)	Aguas residuales municipales	80	0.605	27
4	González et al. (2021)	Aguas residuales municipales	98	140	-
5	Blatter et al. (2021)	Aguas residuales municipales	34-95	0.200	15
6	Tang & Cols et al. (2019)	Aguas residuales sintéticas	84,69	59,53	10
7	Wang et al. (2020)	Aguas residuales sintéticas	79,83	243,57	94
8	Bhagat et al. (2022)	Aguas residuales sintéticas	91,7	7.99	-
9	Jain et al. (2023)	Aguas residuales hospitalarias- sintéticas	97.1 - 87.5	21,26 - 42,93	-
10	Xu et al. (2019)	Agua salina sintética	64,79	16,4	-
13	Prasad et al. (2021)	Agua de sedimentos de río	-	0.007	-
14	Tripathi et al. (2021)	Agua de sedimentos de río	23	0.002	-
16	He et al. (2019)	Efluente primario	91	0.400	-
17	Tang et al. (2019)	Lodos de alumbre deshidratado	92	0.448	0.360

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N°6 logramos observar diversos tipos de sustratos empleados en las PMFC's para evaluar la producción de corriente eléctrica y eliminación de DQO, de acuerdo con las investigaciones encontradas, los sustratos más utilizados para este tipo de celdas son aguas residuales sintéticas, aguas residuales municipales y aguas residuales domésticas.

Al realizar un análisis de las PMFC's que mostraron mejores resultados según el tipo de sustrato utilizado para la producción de corriente eléctrica y eliminación de DQO, se resaltan los estudios realizados por Wang et al. (2020) quienes emplearon aguas residuales sintéticas cuyos componentes fueron: KNO_3 , $(NH_4)_2SO_4$, KH_2PO_4 y $ZnSO_4$ con el fin de simular las características en las aguas residuales de una planta industrial, obteniendo una remoción para DQO del 79,83 % y con respecto al rendimiento de la producción de electricidad 243,57 mW/m². Asimismo, también resulta pertinente mencionar el estudio realizado por Tang & Cols et al. (2019) que utilizaron aguas residuales sintéticas como sustrato para las PMFC's, logrando remover DQO de manera eficiente con un 84,69% y 59,53 mW/m² para la producción de electricidad.

IV. CONCLUSIONES

1. Las especies de plantas en las cuales se evidenciaron los mejores resultados para las celdas de combustible planta microbiana, para la producción de energía sostenibles son Híbridos de Canna con un valor aproximado de (750 mV), Solanum melongena (616,67 mV) y kalanchoe daigremontiana (248 mV).
2. Se identificó los tipos de materiales más utilizado para mejorar la eficiencia de los electrodos en las PMFC's, tales como grafito, carbón activado, acero inoxidable, titanio, fibra de carbono y cobre. Además de que estos materiales promueven la conducción de energía debido a sus propiedades y su generación en las PMFC's mediante la degradación de contaminantes y materia orgánica.
3. De acuerdo con las investigaciones encontradas, se pudo determinar que los sustratos más utilizados son aguas residuales municipales, residuales sintéticas y lodos de efluentes primarios, destacando por su gran capacidad de remoción para DQO con valor promedio del 60%, en cuanto eficiencia según el tipo de PMFC's.
4. En conclusión, las PMFC's representan una alternativa prometedora para la generación de energía sostenible, proporcionando una solución viable para reducir la contaminación y preservar los recursos naturales, asimismo, teniendo en cuenta la combinación de ciertas plantas y materiales de electrodos se puede optimizar la producción de bioelectricidad, lo que puede ser fundamental para el desarrollo de tecnologías energéticas limpias en el futuro.

V. REFERENCIAS

- [1] BLATTER, Maxime, et al. Stretched 1000-L microbial fuel cell. Volume 483, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229130>
- [2] BOLTON, Lise, et al. Phosphorus adsorption onto an enriched biochar substrate in constructed wetlands treating wastewater. Volume 142, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoena.2019.100005>
- [3] CONCEPCION II, Ronnie, et al. Genetic atom search-optimized in vivo bioelectricity harnessing from live dragon fruit plant based on intercellular two-electrode placement. Volume 219, Part 2, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119528>
- [4] GALLEGUILLOS, Felipe, et al. An In Situ Evaluation of Different CAM Plants as Plant Microbial Fuel Cells for Energy Recovery in the Atacama Desert. Volume 12, Issue 23, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/plants12234016>
- [5] GONZÁLEZ, Humberto et al. Bioelectricity Generation and Production of Ornamental Plants in Vertical Partially Saturated Constructed Wetlands, Mexico. Volume 13, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/w13020143>
- [6] HE, Weihua, et al. Field tests of cubic-meter scale microbial electrochemical system in a municipal wastewater treatment plant. Volume 155, Pages 372-380, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.062>
- [7] HIEGEMANN, T, et al. Performance and inorganic fouling of a submergible 255 L prototype microbial fuel cell module during continuous long-term operation with real municipal wastewater under practical conditions. Volume 294, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122227>
- [8] HUANG, Menglu, et al. Bibliometric analysis and systematic review of electrogenic bacteria in constructed wetland-microbial fuel cell: Key factors and pollutant removal. Volume 451, 2024. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142018>

- [9] IDZNI, Nashuha, et al. The effect of different temperature in membrane-less microbial fuel cell under series and parallel circuit mode for power generation and bioremediation. Volume 22. 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100579>
- [10] ISRAEL, Alena y HERRERA, Rocío. The governance of Peruvian energy transitions: Path dependence, alternative ideas and change in national hydropower expansion. Energy Research & Social Science, Volume 69, 2020, 101608, ISSN 2214-6296, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101608>.
- [11] JAIN, Mahak et al. Development of microbial fuel cell integrated constructed wetland (CMFC) for removal of paracetamol and diclofenac in hospital wastewater. Volume 344, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118686>
- [12] LIPING, Fan & WANXUE, Feng. Preparation of PANI-SA/CF anode to enhance the remediation and power generation capabilities of plant microbial fuel cells for chromium contaminated soil, Volume 47, pages 509–5180, 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s00449-024-02981-x>
- [13] MADDALWAR, Shirang, et al. Evaluation of power generation in plant microbial fuel cell using vegetable plants. Volume 22, 2023. doi: [10.1016/j.biteb.2023.101447](https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101447)
- [14] MING, et al. Enhancement of CO₂ biofixation and bioenergy generation using a novel airlift type photosynthetic microbial fuel cell. Volume 272, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.078>
- [15] MOQSUD, Azizul. Bioelectricity generation and remediation of sulfide contaminated tidal flat sediment. Volume 35, Issue 1, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2019.08.006>
- [16] NAWAZ, A. et al. Microbial fuel cells: Insight into simultaneous wastewater treatment and bioelectricity generation. PAKISTAN, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.03.039>
- [17] NOOKWAM, Kidakarn et al. Microbial fuel cells with Photosynthetic-Cathodic chamber in vertical cascade for integrated Bioelectricity, biodiesel feedstock production and wastewater treatment. Bioresource Technology,

Volume 346, 2022, 126559, ISSN 0960-8524, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126559>.

- [18] NURSYUHADA, Kamaruzaman, et al. Assessing the current state of biomass gasification technology in advancing circular economies: A holistic analysis from techno-economic-policy perspective in Malaysia and beyond. Volume 199, Pages 593-619. 2023. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.10.023>
- [19] OODALLY, Adam, et al. Investigating the performance of constructed wetland microbial fuel cells using three indigenous South African wetland plants. Volume 32, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100930>
- [20] PRASAD, Jeetendra, et al. Field tests of cubic-meter scale microbial electrochemical system in a municipal wastewater treatment plant. Volume 155, Pages 372-380, 2019. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.187>
- [21] PRASAD, Jeetendra, et al. Scale-up and control the voltage of sediment microbial fuel cell for charging a cell phone. Volume 172, 15, 2021. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112767>
- [22] PROTHIBA, S, et al. Recent advancements on the development of microbial fuel cells: Anode modification and scale-up challenges in upgrading anode electrode. 2024. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.144>
- [23] RAIHAN, Asif & TUSPEKOVA, Almagul. The nexus between economic growth, renewable energy use, agricultural land expansion, and carbon emissions: New insights from Peru. Energy Nexus, Volume 6, 2022, 100067, ISSN 2772-4271, doi:
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100067>.
- [24] ROSSI, Ruggero et al. Evaluating a multi-panel air cathode through electrochemical and biotic tests. Volume 148, Pages 51-59, 2019. doi:
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.022>

- [25] SILVA, F, et al. Bioelectricity generation through Microbial Fuel Cells using *Serratia fonticola* bacteria and *Rhodotorula glutinis* yeast. Volume 9, Pages 295-301, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.255>
- [26] SOGANI, Monika, et al. Augmenting the biodegradation of recalcitrant ethinylestradiol using *Rhodopseudomonas palustris* in a hybrid photo-assisted microbial fuel cell with enhanced bio-hydrogen production. Volume 408, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124421>
- [27] SONAWANE, Amol V, et al. A review of microbial fuel cell and its diversification in the development of green energy technology. Bogotá. Volume 350. 2024. doi : <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141127>
- [28] SRIVASTAVA, Pratiksha, et al. Performance of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland coupled with a microbial fuel cell for treating wastewater. Volume 33, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100994>
- [29] VALLADARES, Rodrigo, et al. Effect of sediment microbial fuel cell stacks on 9 V/12 V DC power supply. Volume 46, Issue 27, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/w11020217>
- [30] WANG, Qian, et al. Characterization of microbial community and resistance gene (*CzcA*) shifts in up-flow constructed wetlands-microbial fuel cell treating Zn (II) contaminated wastewater. Volume 302, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122867>