

Síntesis de NPs-FeO y su aplicación en Celdas de combustible Microbianas Sedimentarias

Synthesis of NPs-FeO and their application in Sedimentary Microbial Fuel Cells

M. Mejía-López ^{a,*}, J.L. Alemán-Ramírez ^b, P.J. Sebastian ^b, J.J. Monjardín-Gómez ^b, C.P. Villamizar-Caballero ^b

^aUniversidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C.P. 29000, México.

^b Instituto de Energías Renovables (UNAM), Privada Xochicalco s/n, Temixco, Morelos, C.P. 62580, México.

Resumen

En este trabajo se sintetizaron nanopartículas de óxido de hierro (NPs-FeO) a partir de las hojas del extracto acuoso de *Cymbopogon citratus* usando química verde. Posteriormente, las NPs-FeO fueron esparcidas sobre fieltro de carbón por la técnica de aerografía para después utilizarse como cátodo o como bioánodo. El electrodo con NPs-FeO fue colonizado con bacterias para finalmente utilizarse como bioánodo en una celda de combustible microbiana sedimentaria (SMFC, por sus siglas en inglés). Las propiedades cristalográficas, morfológicas y minerales de las NPs sintetizadas, se determinaron a través del análisis XRD, SEM y EDS. Los resultados revelaron que las NPs, presentan una estructura cristalina amorfo, con una superficie altamente porosa y una alta concentración de hierro. Se realizaron análisis de voltamperometría cíclica antes y después del crecimiento microbiano. Las pruebas en la celda de combustible microbiana sedimentaria mostraron producciones de energía de 1.46 W/m² al emplearse el electrodo con NPs-FeO como bioánodo y 0.59 W/m² al emplearse como cátodo.

Palabras Clave: Ánodo, Cátodo, Nanopartícula, FeO, Síntesis verde, SMFC.

Abstract

In this work, iron oxide nanoparticles (NPs-FeO) were synthesized from the leaves of the aqueous extract of *Cymbopogon citratus* using green chemistry. Subsequently, the NPs-FeO were spread on carbon felt using the airbrushing technique and then used as a cathode or bioanode. The NPs-FeO electrode was colonized with bacteria to finally be used as a bioanode in a sedimentary microbial fuel cell (SMFC). The crystallographic, morphological and mineral properties of the synthesized NPs will be determined through XRD, SEM and EDS analysis. The results revealed that the NPs have an amorphous crystalline structure, with a highly porous surface and a high concentration of iron. Cyclic voltammetry analysis was performed before and after microbial growth. Tests in the sedimentary microbial fuel cell showed energy production of 1.46 W/m² when the electrode with FeO NPs was used as bioanode and 0.59 W/m² when used as cathode.

Keywords: Anode, Cathode, Nanoparticle, FeO, Green synthesis, SMFC.

1. Introducción

En los últimos años, la comunidad científica se ha apoyado de la nanotecnología para fabricar materiales nanométricos (nanopartículas o NPs) que estén dentro del rango de dimensión de 1 a 100 nm (Alemán-Ramírez et al., 2024). Para ello, se han explorado métodos emergentes como es la síntesis verde, la cual se caracteriza por implementar extractos acuosos de diversas materias primas, tales como; hojas, flores, pulpa de diversos residuos agroindustriales, residuos agrícolas, hongos y levaduras, etc. (Reyes-Vallejo et al., 2024). Estas materias primas se caracterizan por ser ricas en diversos

fitoconstituyentes como son alcaloides, flavonoides, saponinas, minerales y vitaminas; que permiten estabilizar, reducir y desarrollar los nanomateriales sintetizados por esta ruta verde (Thirumavalavan et al., 2024). Con el empleo de este proceso, los nanomateriales fabricados son amigables con el medio ambiente, de bajo costo, de fácil elaboración y presentan una mayor rentabilidad a mediano y largo plazo. Dentro, de los principales nanomateriales que se han fabricado con este proceso se destacan el Cu₂O, CuO, Fe₂O₃, ZnO, TiO₂ y el SiO₂, entre otros. Los cuales han sido sintetizados a partir de los extractos acuosos del residuo agroindustrial de la pulpa de guayaba (Torres-Arellano et al., 2024), ceniza del olote de

*Autor para la correspondencia: monicamejia11987@gmail.com

Correo electrónico: monicamejia11987@gmail.com (Mónica Patricia Mejía-López), alraj1@ier.unam.mx (José Luis Alemán-Ramírez), sjp@ier.unam.mx (Pathiyamattom Joseph Sebastián), jjmoga@ier.unam.mx (José de Jesús Monjardín-Gómez), cpvica@ier.unam.mx (Claudia Patricia Villamizar-Caballero).

Historial del manuscrito: recibido el 26/09/2024, última versión-revisada recibida el 11/11/2024, aceptado el 11/11/2024, publicado el 12/12/2024. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial5.13715>



maíz (Torres-Arellano et al., 2023), extracto de la planta *Cordia myxa* (Batool et al., 2022), Aloe vera (Dülger et al., 2024) y hojas de Cartamo (Doğan et al., 2024), respectivamente.

Se ha observado que las NPs metálicas como son el Fe, Zn, Ni, Cu y Co pueden modificar la superficie de los materiales carbonosos promoviendo la actividad electroquímica en celdas de combustible microbianas o por sus siglas en inglés MFCs (Mohamed et al., 2018). Este tipo de sistemas bioelectroquímicos, utilizan la energía química atrapada en materia orgánica y la convierten en electricidad. Debido a los procesos de oxidación, la transferencia de electrones entre el microorganismo y el ánodo y la reacción de reducción de oxígeno (ORR) en el cátodo (Mejía-López et al., 2023). Se han buscado y sintetizado nuevos materiales por la vía verde que permitan incrementar la transferencia de electrones en estos sistemas electroquímicos. Dentro de estos materiales, figura el óxido de hierro (FeO) o también conocido como óxido de hierro (II). Este material se caracteriza principalmente por sus propiedades ópticas, carga electrostática, alta área superficial y a su potenciación en los ciclos redox (Basak et al., 2021). Además, el FeO se ha utilizado en el crecimiento de diversas plantas, elaboración de sensores, fotocatalizadores, cerámica fina, tratamiento de aguas, pigmentos y en la elaboración de productos químicos con propiedades anticorrosivas (Panneerselvam et al., 2024), (Rama et al., 2024), (Haider et al., 2024). Los pocos informes que existen en la literatura sobre el empleo del FeO en sistemas bioelectroquímicos, han informado que este material, mejora la conductividad, el transporte de electrones y sobre todo promueve la adherencia de bacterias electrogénicas (Harshiny et al., 2017).

Por otro lado, el género *Cymbopogon* está constituido por alrededor de 55 especies de hierbas, conocidas tradicionalmente como limoncillo (Nacer et al., 2024). Sin embargo, la variedad más sobresaliente es la *Cymbopogon citratus* (*C. citratus*). Esta variedad es cultivada en varias partes del mundo para ser utilizada en la preparación de alimentos y para tratar diversas dolencias (calambres estomacales e indigestión) y para la inhibición de microorganismos patógenos (Dinakarkumar et al., 2024), (Subahar et al., 2024).

C. citratus está compuesta por una gran cantidad de alcaloides, flavonoides, carotenoides, tanino, terpenoides volátiles y no volátiles, isómeros α -citral y β -citral, geranial y neral, flavonoides y flavonas (Falcon et al., 2024), (Tazi et al., 2024).

En la literatura consultada hasta el desarrollo de este trabajo de investigación, se ha informado el empleo del extracto acuoso de *C. citratus* para el desarrollo de diversas NPs por la vía verde, tales como CuO (Jabeen et al., 2024), (Jabeen et al., 2023), NiO (Thirbika et al., 2022), ZnO (Sidik et al., 2020) y TiO₂ (Uthiravel et al., 2024).

En el presente trabajo de investigación, se sintetizaron nanopartículas de FeO a partir del extracto acuoso de la planta de *Cymbopogon citratus* con el objetivo principal de utilizarlas en la mejora de electrodos a base de carbón para ser implementados como cátodo o ánodo en una SMFC.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales y Reactivos

Los productos químicos utilizados en este trabajo de investigación fueron cloruro férrico (FeCl₃), hidróxido de sodio (NaOH), ácido clorhídrico (HCl), alcohol polivinílico (PVA), cloruro de potasio (KCl), acetato de sodio (NaC₂H₃O₂). Los reactivos fueron de las marcas Fermont, Jalmek y Sigma-Aldrich, respectivamente. Las hojas de la planta *Cymbopogon citratus* utilizadas para sintetizar las NPs de FeO fueron recolectadas en un invernadero local del municipio de Xoxocotla, Morelos, México.

2.2. Síntesis de nanopartículas

2.2.1. Preparación del extracto y síntesis verde de las NPs FeO

La síntesis de las NPs de FeO se llevó a cabo en varios pasos consecutivos. Primeramente, las hojas de *C. citratus* se sometieron a un proceso de lavado y posteriormente se secaron en un horno de convección forzada (redLine by Blinder) a una temperatura constante de 60 °C durante 8 h. Al término de este proceso, se llevó a cabo la extracción de los principales fitoconstituyentes de esta planta. Se pesaron 30 g de las hojas de *C. citratus* y se colocaron en un vaso de precipitado de 500 mL, luego se añadió una cantidad de 300 mL de agua desionizada. Las condiciones de extracción fueron una temperatura de 80 °C durante 30 min bajo agitación constante. Al finalizar este proceso, el extracto se filtró con ayuda de un kit de filtración al vacío utilizando papel filtro Whatman (Nº, 24 mm). El extracto obtenido se almacenó en un frasco hermético color ámbar, hasta su posterior empleo en la síntesis de las NPs-FeO.

Las NPs de FeO se obtuvieron mediante el método tradicional de coprecipitación. Para lo cual se utilizó 50 mL de una solución de FeCl₃ a 0.5 M (Harshiny et al., 2017), y 20 mL del extracto acuoso de *C. citratus*. Para llevar a cabo la precipitación de las NPs se utilizó una solución de NaOH a 1 M, hasta alcanzar un valor de pH 11. (Chatterjee et al., 2021). Para ajustar el pH del medio, se prepararon dos soluciones, una de HCl y otra de NaOH a 0.1 M. Al finalizar la precipitación de las NPs, estas se lavaron en reiteradas ocasiones con agua desionizada mediante un proceso de centrifugación (Solbat/C-40) a 3500 rpm durante 10 min. Luego, estas se colocaron en el interior de un horno de secado a una temperatura de 80 °C durante 24h. Finalmente, las NPs-FeO se almacenaron en recipientes herméticos para su caracterización y empleo en el desarrollo de los electrodos.

2.3. Fabricación de los electrodos

Para la fabricación de los electrodos se empleó el fieltro de carbón comercial (Grupo Rooe) de 1x1 cm. Este se impregnó mediante la técnica de aerografía con 1 mL de una solución de PVA y NPs-FeO en una proporción de 1:5 %peso/peso. según la metodología reportada por (Harshiny et al., 2017). Después, el fieltro de carbón impregnado con NPs-FeO se sometió a un proceso de secado a una temperatura constante de 60 °C durante 3 h.

Al término de este proceso, el electrodo impregnado se empleó como cátodo en el sistema bioelectroquímico. Mientras tanto, el ánodo fue enriquecido por un consorcio microbiano, el cual consistió en sumergir el electrodo con NPs-

FeO con lodo anaerobio por 15 días. Posteriormente, tanto el cátodo como el ánodo fueron empleados en una celda de combustible microbiana sedimentaria.

2.4. Caracterización

Las NPs-FeO se sometieron a diversas caracterizaciones cristalográficas, morfológicas y elementales. Se utilizó el análisis de difracción de rayos X (XRD, Rigaku modelo DMAX 2200) para determinar la fase cristalográfica de las NPs sintetizadas. La morfología superficial de las NPs se observó mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM, Hitachi, modelo SU 1510). La composición mineral de las NPs-FeO se determinó mediante un mapeo superficial a través del análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS) acoplado al SEM.

Posteriormente, el ánodo impregnado con NPs-FeO se sometió a un proceso de caracterización antes y después del crecimiento microbiano. Mediante voltamperometría cíclica (VC) y SEM. La caracterización electroquímica se realizó en un potenciostato (Solartron, modelo SI 1287A) en una celda de tres electrodos utilizando Ag/AgCl (KCl a 3 M) como electrodo de referencia. La VC se registró desde -0.7 V a 0.7 V y una velocidad de barrido de 1 mV/s¹. El electrolito utilizado para el análisis fue acetato de sodio 100 mM con pH 9.

2.5. Implementación en la celda de combustible microbiana sedimentaria

Se llevó a cabo la puesta en marcha de dos celdas de 0.1 L, en la primera celda se utilizó el electrodo impregnado con NPs-FeO, el cual se empleó como cátodo y como ánodo se utilizó el fieltro de carbón. Mientras tanto, en la segunda celda se usó como bioánodo, el electrodo con NPs-FeO después del enriquecimiento con un consorcio bacteriano y como cátodo se empleó el fieltro de carbón catalizado con 0.5 mg Pt/cm² (20% en peso de Pt, E-TEK). Para las SMFC el sedimento marino se obtuvo de Guasave, Sinaloa, México. El cátodo se colocó en la superficie de la celda expuesta al aire y el bioánodo se sumergió en el sedimento marino en el fondo de la celda. La densidad de potencia de la SMFC se obtuvo a partir de la curva de polarización evaluada conectando diferentes resistencias eléctricas (Rext) desde 0Ω hasta $100K\Omega$ y el voltaje se registró con un sistema de adquisición de datos (2700, Keithley, EE. UU.).

3. Resultados

3.1. Caracterización de nanopartículas

3.1.1. Análisis SEM

La morfología superficial de las NPs-FeO sintetizadas en el presente trabajo de investigación se examinó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Las NPs-FeO presentaron una morfología porosa, aglomerada y casi esférica (Figura 1). Este tipo de morfología podría atribuirse al método de síntesis empleado para su elaboración y a los fitoconstituyentes presentes en el extracto acuoso de *C.*

citratum. Este tipo de morfología ha sido observada previamente por Nadeem et al. (Nadeem et al., 2022). Donde sintetizaron NPs-FeO a partir del extracto de *Nephrolepis exaltata*. Además, informaron que la aglomeración de las NPs-FeO podría deberse a las fuerzas electrostáticas que existen durante su síntesis, ocasionando su aglomeración. En otro trabajo de investigación observaron que las NPs-FeO podrían tomar una morfología en forma de panal con una superficie lisa y no uniforme (Karpagavinayagam & Vedhi, 2019).

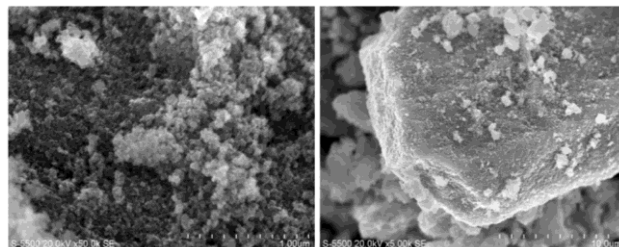


Figura 1. Morfología superficial de las NPs-FeO observadas a diferentes magnificaciones.

3.1.2. Análisis EDS

El análisis elemental EDS reveló la pureza y la clara formación de las NPs sintetizadas que se puede observar en la Tabla 1. Las NPs de FeO revelaron estar constituidas principalmente por Fe y O con valores de 37.3% y 62.7%, respectivamente. Baharathi et al. (Baharathi et al., 2019) y Bautista et al. (Bautista-Guzman et al., 2021) informaron picos similares a los reportados en el presente trabajo de investigación (Figura 2).

Tabla 1. Porcentaje de los minerales presentes en las NPs FeO sintetizadas

NPs	% Atómico		
	Fe	O	Total (%)
FeO	37.3	62.7	100

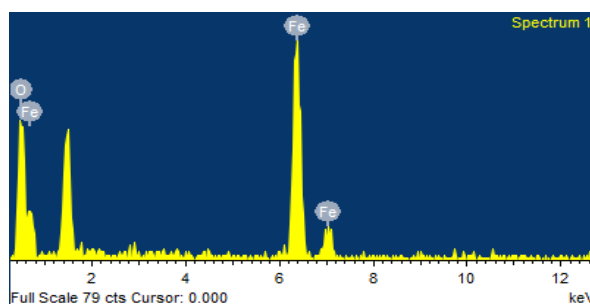


Figura 2. Espectro de rayos X de energía dispersiva (EDS) de las NPs de FeO.

3.1.3. Análisis XRD

En la Figura 3, se muestra el difractograma XRD de las nanopartículas sintetizadas de FeO. Sin embargo, no se pudo realizar la identificación de la fase principal del compuesto porque presentó características amorfas, lo que significa que sus cristales se encuentran de manera desordenada. Para

reagruparlos se puede optar por un proceso de recocido a altas temperaturas. Tal como lo llevo a cabo, Franco et al. (Franco et al., 2021) donde sometieron a las NPs-FeO a un proceso de calcinación a diferentes temperaturas dentro del rango de 400 °C a 900 °C. Observaron que, a medida que se incrementaba la temperatura de calcinación, se podían observar reflexiones bien definidas a compuestos de hierro cristalinos. Por ejemplo; a la fase de Fe_2O_3 . Además, la temperatura de calcinación podría ocasionar que las partículas cambien de tamaño, volviéndose más grandes.

También, la fase amorfa observada en el análisis XRD de las NPs-FeO, puede ser atribuida a los fitoconstituyentes que componen el extracto acuoso de *C. citratus*, que podrían interferir para que el compuesto adopte una fase cristalina. Sin embargo, el análisis EDS confirma la formación y pureza de las NPs-FeO sintetizadas por la vía verde.

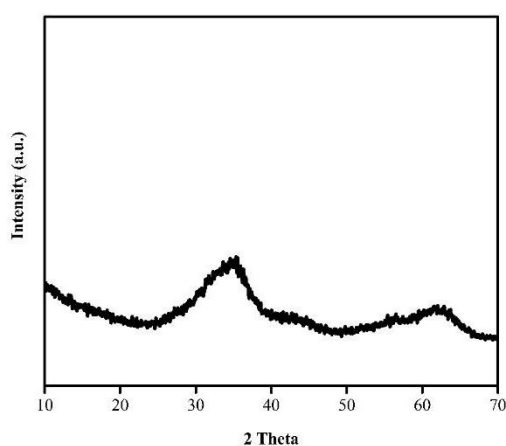


Figura 3. Difractograma XRD de las NPs de FeO.

3.2. Caracterización de la biopelícula

3.2.1. Análisis electroquímico

El fieltro de carbón se analizó mediante voltamperometría cíclica (VC) antes (línea negra) y después de agregar NPs-FeO (línea azul). También se analizó el electrodo con NPs-FeO después de la formación de biopelículas microbianas (línea roja). La VC con NPs-FeO mostró una ligera onda de oxidación a -0.03 V de $1.4 \times 10^{-4} \text{ A}$ y una reducción a -0.2 V de $-6.3 \times 10^{-4} \text{ A}$ (Figura 4). Después de la formación de la biopelícula, se observaron dos picos de oxidación, el primero en -0.1 V de $0.7 \times 10^{-4} \text{ A}$ y el segundo en el rango de 0.2 V de $1.5 \times 10^{-4} \text{ A}$. También, se observó una onda de reducción en -0.3 V de $-8.3 \times 10^{-4} \text{ A}$, lo que indica que se produjo una reacción redox (Lv et al., 2012). Picos similares después de la formación de la biopelícula en electrodos de papel carbón y fieltro de carbón modificados con NPs-FeO han sido observados antes en 0.75 V ($4.2 \times 10^{-3} \text{ A}$) y -0.45 V ($-3.7 \times 10^{-4} \text{ A}$) (Harshiny et al., 2017) y de 0.38 V ($3 \times 10^{-3} \text{ A}$) y -0.35 V ($2 \times 10^{-4} \text{ A}$) (Yang et al., 2021). Como era de esperarse las características electroquímicas obtenidas por el bioánodo (electrodo modificado con NPs-FeO y biopelícula) fueron mejores que las obtenidas con el electrodo con solo NPs-FeO (sin biopelícula). Se observaron picos de oxidación y reducción que confirmaron el pagado de bacterias electrogénicas y su actividad catalítica. Esto se debe a que las

NPs-FeO generaron nuevos sitios de pegado de bacterias y por consecuencia una mayor superficie electroquímica activa y una oxidación catalítica del sustrato por parte de las bacterias más rápida.

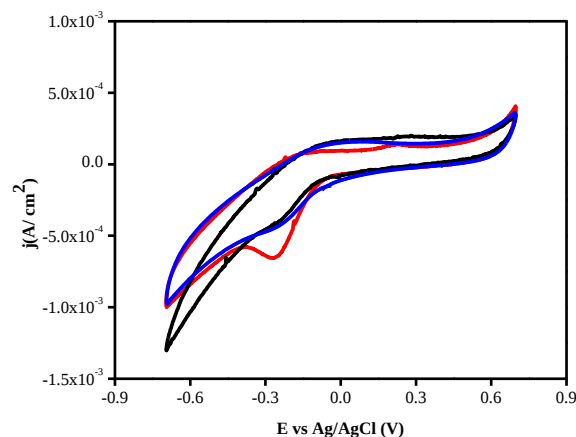


Figura 4. Voltamperometría cíclica (velocidad de barrido 1 mV/s^{-1}). Voltamperometría del fieltro de carbón (línea negra), fieltro de carbón con NPs-FeO (línea azul) y fieltro de carbón con NPs-FeO y formación de biopelícula (línea roja).

3.3. Rendimiento de la Celda de combustible microbiana sedimentaria

3.3.1 Curva de polarización y densidad de potencia

Se analizó el efecto de las NPs-FeO en el cátodo y ánodo de una SMFC. El inóculo y sedimento, en ambos sistemas fueron iguales, esto para atribuir los cambios únicamente a los electrodos. Se analizó la curva de polarización y densidad de potencia para el electrodo con NPs-FeO utilizado como cátodo (Figura 6) y después del enriquecimiento microbiano utilizado como bioánodo (Figura 5).

El ánodo con NPs-FeO utilizado en SMFC mostró una densidad de potencia de 1.4 W/m^2 , que fue 2 veces mayor que la celda donde el electrodo con NPs-FeO se utilizó como cátodo (Figura 5). Además, esta densidad de potencia fue mayor que la reportada por otros autores al utilizarse NPs-FeO en ánodos y NPs-FeO como ánodo y como cátodo (ver Tabla 2).

Las celdas de combustible microbianas sedimentarias pueden mostrar altas densidades de potencia y de corriente debido al aporte de materia orgánica presente en el sedimento además de ofrecer una fuente pura e ilimitada de donantes de electrones. La colocación de un electrodo anódico (aceptor de electrones sólido) en el sedimento permite aprovechar la energía almacenada en ellos como corriente eléctrica (Gupta et al., 2023). La implantación de un electrodo anódico modificado con NPs metálicas aumenta la superficie del material, permite mayor adhesión de microorganismos electrogénicos y aumenta la velocidad de transferencia de electrones (Mejía-López et al., 2024).

La alta densidad de potencia en la SMFC con el bioánodo (NPs-FeO y biopelícula) en comparación al electrodo con solo NPs-FeO utilizado como cátodo, se atribuye a varios factores como la gran superficie del material, la mayor adhesión de

microorganismos electrogénicos (ya que este se encontraba en contacto directo con el sedimento) y a la actividad catalítica. Lo que contribuyó a disminuir la resistencia del material y aumentó la velocidad de transferencia de electrones, lo cual se verificó mediante los análisis de voltamperometría cíclica.

Tabla 2: Comparación de densidades de potencia en MFC donde se utilizaron NPs de Fe

Material del electrodo	Tipo de electrodo	Nanopartícula	Tipo de celda	Densidad de potencia (W/m^2)	Ref.
Carbón poroso	Cátodo	FeO dopado con N	MFC	2.74	(Fan et al., 2020)
Papel carbón	Ánodo	FeO	MFC	0.79	(Yang et al., 2021)
Tela de carbón	Ánodo	CeO	BMFC	0.05	(Pushkar et al., 2019)
Tela de carbón	Cátodo	CeO	BMFC	0.07	(Pushkar et al., 2019)
Papel carbón	Ánodo	FeO	MFC	0.14	(Harshiny et al., 2017)
Filtro de carbón	Cátodo	FeO	SMFC	0.59	Este estudio
Filtro de carbón	Ánodo	FeO	SMFC	1.46	Este estudio

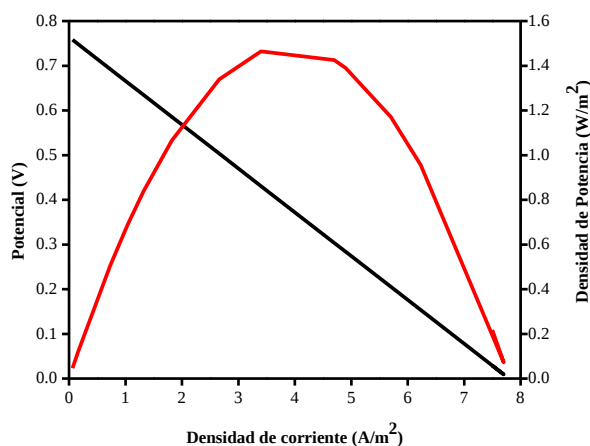


Figura 5. Curva de polarización (línea negra) y curva de densidad de potencia (línea roja) de la Celda de combustible microbiana sedimentaria usando como ánodo filtro de carbón con NPs-FeO y con formación de biopelícula..

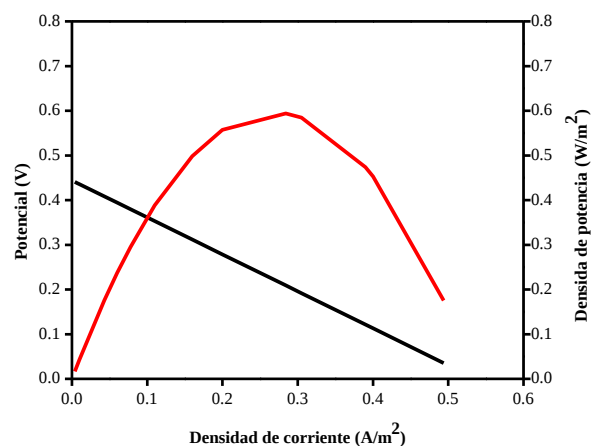


Figura 6. Curva de polarización (línea negra) y curva de densidad de potencia (línea roja) de la Celda de combustible microbiana sedimentaria usando como cátodo filtro de carbón con NPs-FeO.

4. Conclusiones

Se sintetizaron nanopartículas a base de óxido de hierro (FeO) a partir del extracto acuoso de la planta de *Cymbopogon citratus*. Estas nanopartículas se emplearon para modificar electrodos, los cuales se utilizaron como ánodo o cátodo para mejorar la transferencia de electrones en una celda de combustible microbiana sedimentaria, para la generación de bioelectricidad. Los resultados revelaron que las nanopartículas de FeO presentan una morfología superficial porosa, aglomerada y casi esférica lo que contribuyó a una mejor adherencia de los microorganismos electrogénicos. Además, el material sintetizado exhibió una estructura amorfa, sin embargo, esta característica no afectó a la transferencia de electrones. Ya que se logró obtener una densidad de potencia de 1.4 W/m^2 , la cual fue dos veces mayor que al utilizarse como cátodo en una SMFC.

De acuerdo a la literatura revisada hasta el momento, la utilización y estudio de nanopartículas metálicas como FeO en celdas de combustible microbianas tipo sedimentarias es un área poco explorada. Conforme a los resultados obtenidos en este trabajo, las propiedades obtenidas al utilizar NPs en SMFC son muchas; aumento en la superficie del material, la transferencia de electrones, la adherencia de microorganismo, la actividad catalítica y el aumento en la densidad de potencia de la celda. Sin embargo, a pesar de obtener densidades de potencia altas aún falta comprender a fondo los procesos y escalar la tecnología para proponer nuevas aplicaciones como la biorremediación in situ de contaminantes complejos como colorantes y plaguicidas. El estudio del efecto de nuevos materiales en los electrodos empleados en celdas de combustible microbiana tipo sedimentaria es un área poco explotada que genera sin duda nuevas direcciones para su investigación.

Agradecimientos

Mónica Mejía-López agradece la beca posdoctoral número 420239 otorgada por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), México. Los autores agradecen a M.C. José Campos Álvarez y Mtra. María Luisa

Ramón del IER-UNAM para mediciones de SEM/EDS y XRD, respectivamente.

5. Referencias

- Aleman-Ramirez, J. L., Okoye, P. U., Torres-Arellano, S., & Sebastian, P. J. (2024). Challenges and prospects in energetic application of *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth as a bioenergy tree. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 18(5), 1658–1675. <https://doi.org/10.1002/bbb.2601>
- Basak, S., Ali, S., Mondal, M., Roy, D., Dutta, A., Kumar, A., Sikdar, S., & Roy, M. N. (2021). Green synthesis and characterization of heterostructure MnO-FeO nanocomposites to study the effect on oxidase enzyme mimicking, HSA binding interaction and cytotoxicity. *Chemical Physics Letters*, 785, 139163. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2021.139163>
- Batool, S., Hasan, M., Dilshad, M., Zafar, A., Tariq, T., Wu, Z., Chen, R., Gul Hassan, S., Munawar, T., Iqbal, F., Saqib Saif, M., Waqas, M., & Shu, X. (2022). Green synthesis of Cordia myxa incubated ZnO, Fe₂O₃, and Co₃O₄ nanoparticle: Characterization, and their response as biological and photocatalytic agent. *Advanced Powder Technology*, 33(11), 103780. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103780>
- Bautista-Guzman, J., Gomez-Morales, R., Asmat-Campos, D., & Checca, N. R. (2021). Influence of the Alcoholic/Ethanol Extract of *Mangifera indica* Residues on the Green Synthesis of FeO Nanoparticles and Their Application for the Remediation of Agricultural Soils. *Molecules*, 26(24), 7633. <https://doi.org/10.3390/molecules26247633>
- Bharathi, D., Ranjithkumar, R., Vasantharaj, S., Chandarshekar, B., & Bhuvaneshwari, V. (2019). Synthesis and characterization of chitosan/iron oxide nanocomposite for biomedical applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132, 880–887. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.233>
- Chatterjee, A., Mridha, D., Banerjee, J., Chanda, S., Ray, K., Acharya, K., Das, M., Roychowdhury, T., & Sarkar, J. (2021). Green synthesis of iron oxide nanoparticles and their ameliorative effect on arsenic stress relief in *Oryza sativa* seedlings. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 38, 102207. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102207>
- Dinakarkumar, Y., Rajabathar, J. R., AL-Lohedan, H., Venkatesan, D., Sankaran, K., Veera, H. M., & Ramakrishnan, G. (2024). Inhibition of *Vibrio parahaemolyticus* biofilm formation in Squid (*Loligo duvauceli*) meat by *Cymbopogon citratus* essential oil and DNase: An investigative study. *Food and Humanity*, 3, 100392. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100392>
- Doğan, B., Yeşilyurt, M. K., Yaman, H., Korkmaz, N., & Arslan, A. (2024). Green synthesis of SiO₂ and TiO₂ nanoparticles using safflower (*Carthamus tinctorius* L.) leaves and investigation of their usability as alternative fuel additives for diesel-safflower oil biodiesel blends. *Fuel*, 367, 131498. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131498>
- Dülger, B., Özkan, G., Angi, O. S., & Özkan, G. (2024). Green synthesis of TiO₂ nanoparticles using Aloe Vera extract as catalyst support material and studies of their catalytic activity in dehydrogenation of Ethylenediamine Bisborane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 75, 466–474. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.223>
- Falcon, R. M. G., Fahrenbach, S. U., Feliciano, J. F., Flores, B. M. B., Dida-Agun, A. S., Domingo, E. J. V., Domingo, F. K. S., Duran, H. E. T., Dungala, D. B., Dychiao, G. R. K., Evangelista, P. E. D., Facon, H. E. L., FlorCruz, F. E. R., Florita, M. H. B., Giron, M. S. T., & Yabes, A. M. (2024). Antifungal properties of *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf—A scoping review. *South African Journal of Botany*, 170, 425–442. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.05.042>
- Fan, Z., Li, J., Yang, W., Fu, Q., Sun, K., Song, Y.-C., Wei, Z., Liao, Q., & Zhu, X. (2020). Green and facile synthesis of iron oxide nanoparticle-embedded N-doped biocarbon as an efficient oxygen reduction electrocatalyst for microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, 385, 123393. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123393>
- Franco, R. T., Silva, A. L., Licea, Y. E., Serna, J. D. P., Alzamora, M., Sánchez, D. R., & Carvalho, N. M. F. (2021). Green Synthesis of Iron Oxides and Phosphates via Thermal Treatment of Iron Polyphenols Synthesized by a *Camellia sinensis* Extract. *Inorganic Chemistry*, 60(8), 5734–5746. <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.0c03794>
- Gupta, S., Patro, A., Mittal, Y., Dwivedi, S., Saket, P., Panja, R., Saeed, T., Martínez, F., & Yadav, A. K. (2023). The race between classical microbial fuel cells, sediment-microbial fuel cells, plant-microbial fuel cells, and constructed wetlands-microbial fuel cells: Applications and technology readiness level. *Science of The Total Environment*, 879, 162757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162757>
- Haider, F. U., Zulfiqar, U., ul Ain, N., Hussain, S., Maqsood, M. F., Ejaz, M., Yong, J. W. H., & Li, Y. (2024). Harnessing plant extracts for eco-friendly synthesis of iron nanoparticle (Fe-NPs): Characterization and their potential applications for ameliorating environmental pollutants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 281, 116620. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116620>
- Harshiny, M., Samsudeen, N., Kameswara, R. J., & Matheswaran, M. (2017). Biosynthesized FeO nanoparticles coated carbon anode for improving the performance of microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(42), 26488–26495. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.084>
- Jabeen, A., Khan, A., Ahmad, P., Khalid, A., Ibrahim Wizrah, M. S., Anjum, Z., Alotibi, S., Aloufi, B. H., Alanazi, A. M., Jefri, O. A., & Ismail, M. A. (2024). Biogenic synthesis of levofloxacin-loaded copper oxide nanoparticles using *Cymbopogon citratus*: A green approach for effective antibacterial applications. *Heliyon*, 10(6), e27018. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27018>
- Jabeen, A., Khan, A., Ahmad, P., Khalid, A., Majeed, Z., Anjum, Z., Modafar, Y., Jefri, O. A., Alanazi, A. M., Saeedi, A. M., Alsehli, A. H., Alsowayigh, M. M., Khandaker, M. U., & Boukhris, I. (2023). Biomedical and photocatalytic dye degradation studies of *Cymbopogon citratus* mediated copper oxide nanoparticles (CuO NPs). *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 87, 104795. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104795>
- Karpagavinayagam, P., & Vedhi, C. (2019). Green synthesis of iron oxide nanoparticles using *Avicennia marina* flower extract. *Vacuum*, 160, 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.11.043>
- Lv, Z., Xie, D., Yue, X., Feng, C., & Wei, C. (2012). Ruthenium oxide-coated carbon felt electrode: A highly active anode for microbial fuel cell applications. *Journal of Power Sources*, 210, 26–31. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.02.109>
- Mejía-López, M., Lastres, O., Alemán-Ramírez, J. L., Lobato-Peralta, D. R., Verde, A., Gámez, J. J. M., de Paz, P. L., & Vereá, L. (2023). Conductive carbon-polymer composite for bioelectrodes and electricity generation in a sedimentary microbial fuel cell. *Biochemical Engineering Journal*, 193, 108856. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108856>
- Mejía-López, M., Lastres, O., Alemán-Ramírez, J. L., Verde, A., Alvarez, J. C., Torres-Arellano, S., Trejo-Díaz, G. N., Sebastian, P. J., & Vereá, L. (2024). Improvement of Power Density and COD Removal in a Sediment Microbial Fuel Cell with α -FeOOH Nanoparticles. *Catalysts*, 14(9), 561. <https://doi.org/10.3390/catal14090561>
- Mohamed, H. O., Sayed, E. T., Obaid, M., Choi, Y.-J., Park, S.-G., Al-Qaradawi, S., & Chae, K.-J. (2018). Transition metal nanoparticles doped carbon paper as a cost-effective anode in a microbial fuel cell powered by pure and mixed biocatalyst cultures. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(46), 21560–21571. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.199>
- Nacer, S. N., Wassima, L., Boussebaa, W., Abadi, A., Benyahia, I., Mouhoubi, D., Ladjal, A., Hammi, H., Bachir, H., Dehliz, A., & Moussaoui, Y. (2024). Phytochemical screening, antioxidant, antibacterial, and antifungal properties of the *Cymbopogon citratus* methanolic extract. *Pharmacological Research - Natural Products*, 5, 100094. <https://doi.org/10.1016/j.prenap.2024.100094>
- Nadeem, F., Fozia, F., Aslam, M., Ahmad, I., Ahmad, S., Ullah, R., Almutairi, M. H., Aleya, L., & Abdel-Daim, M. M. (2022). Characterization, Antiplasmodial and Cytotoxic Activities of Green Synthesized Iron Oxide Nanoparticles Using *Nephrolepis exaltata* Aqueous Extract. *Molecules*, 27(15), 4931. <https://doi.org/10.3390/molecules27154931>
- Panneerselvam, C., Ali Alshehri, M., Saif, A., Faridi, U., Khasim, S., Mohammedsalem, Z. M., Parveen, H., Omer, N., Alasmari, A., Mukhtar, S., & Al-Aoh, H. A. (2024). Green synthesis of *Abutilon indicum* (L) derived iron oxide (FeO) nanoparticles with excellent biological, anticancer and photocatalytic activities. *Polyhedron*, 257, 117022. <https://doi.org/10.1016/j.poly.2024.117022>
- Pushkar, P., Prakash, O., Imran, M., Mungray, A. A., Kailasa, S. K., & Mungray, A. K. (2019). Effect of cerium oxide nanoparticles coating on the electrodes of benthic microbial fuel cell. *Separation Science and Technology*, 54(2), 213–223. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1501393>
- Rama, P., Thangapushbam, V., Sivakami, S., Jothika, M., Mariselvi, P., Sundaram, R., & Muthu, K. (2024). Preparation, characterization of green synthesis FeO nanoparticles and their photocatalytic activity towards Basic Fuchsin dye. *Journal of the Indian Chemical Society*, 101(4), 101142. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101142>

- Reyes-Vallejo, O., Torres-Arellano, S., Aleman-Ramirez, J. L., & Sebastian, P. J. (2024). Green chemical synthesis of photovoltaic materials. In *Photovoltaics Beyond Silicon* (pp. 405–435). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90188-8.00004-X>
- Sidik, D. A. B., Hairom, N. H. H., Ahmad, M. K., Madon, R. H., & Mohammad, A. W. (2020). Performance of membrane photocatalytic reactor incorporated with ZnO-Cymbopogon citratus in treating palm oil mill secondary effluent. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 273–284. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.038>
- Subahar, R., Hadyansyah, R., Aldilla, R., Yulhasri, Y., Winita, R., Dwira, S., & El Bayani, G. F. (2024). Toxicity of 6-gingerol and Cymbopogon citratus against Pediculus humanus capitis De Geer (Phthiraptera: Pediculidae): Mortality, detoxifying enzymes, and morphological ultrastructure alterations in lice. *Research in Veterinary Science*, 177, 105364. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2024.105364>
- Tazi, A., Zinedine, A., Rocha, J. M., & Errachidi, F. (2024). Review on the pharmacological properties of lemongrass (Cymbopogon citratus) as a promising source of bioactive compounds. *Pharmacological Research - Natural Products*, 3, 100046. <https://doi.org/10.1016/j.prenap.2024.100046>
- Thirbika, S., Karthi, H., Premila, R., & Ramesh Prabhu, M. (2022). Investigations on biosynthesized nickel oxide nanoparticles using Cymbopogon citratus leaf extract for antibacterial activity. *Materials Today: Proceedings*, 68, 276–281. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.168>
- Thirumavalavan, M., Sukumar, K., & Sabarimuthu, S. Q. (2024). Trends in green synthesis, pharmaceutical and medical applications of nano ZnO: A review. *Inorganic Chemistry Communications*, 169, 113002. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113002>
- Torres-Arellano, S., Luevano-Hipolito, E., Fabela-Cedillo, M. G., Aleman-Ramirez, J. L., Torres-Martinez, L. M., & Sebastian, P. J. (2024). Optimized CO₂ photoreduction using cuprous oxide (Cu₂O) nanoparticles synthesized using Psidium guajava extract. *Energy, Ecology and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40974-024-00331-x>
- Torres-Arellano, S., Torres-Martinez, L. M., Luévano-Hipólito, E., Aleman-Ramirez, J. L., & Sebastian, P. J. (2023). Biologically mediated synthesis of CuO nanoparticles using corn COB (Zea mays) ash for photocatalytic hydrogen production. *Materials Chemistry and Physics*, 301, 127640. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127640>
- Uthiravel, V., Narayanamurthi, K., Raja, V., Anandhabasker, S., & Kuppasamy, K. (2024). Green synthesis and characterization of TiO₂ and Ag-doped TiO₂ nanoparticles for photocatalytic and antimicrobial applications. *Inorganic Chemistry Communications*, 113327. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113327>
- Yang, Q., Yang, S., Liu, G., Zhou, B., Yu, X., Yin, Y., Yang, J., & Zhao, H. (2021). Boosting the anode performance of microbial fuel cells with a bacteria-derived biological iron oxide/carbon nanocomposite catalyst. *Chemosphere*, 268, 128800. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128800>