

## BAÚL DE LA CIENCIA

### Sistemas bioelectroquímicos. Electrificando microorganismos

Raúl Mateos González<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Ingeniería Química, Ambiental y Bioprocesos. Instituto I4. Universidad de León.

[rmatg@unileon.es](mailto:rmatg@unileon.es)

#### Resumen

La electroquímica microbiana explora cómo los microorganismos interactúan con materiales conductores para catalizar reacciones electroquímicas, integrando áreas como ingeniería, ciencia de materiales y microbiología. Las tecnologías emergentes incluyen las Celdas de Combustible Microbianas (MFC) y las Celdas de Electrolisis Microbiana (MEC). Las MFC generan electricidad a partir de la degradación de materia orgánica por microorganismos, mientras que las MEC, al aplicar un potencial eléctrico, generan productos químicos como hidrógeno. Además, la Electrosíntesis Microbiana (MES) utiliza biocátodos para generar compuestos orgánicos a partir de carbono inorgánico. Los microorganismos exoelectrogénicos, como *Geobacter* y *Shewanella*, son clave en estos sistemas, empleando diversos mecanismos para el intercambio de electrones con superficie sólidas. Aunque hay desafíos en términos de costes y eficiencia, el potencial de estas tecnologías para la sostenibilidad medioambiental es significativo. Desde el descubrimiento de M.C. Potter sobre la generación de corriente por bacterias, el campo ha avanzado considerablemente, aunque aún enfrenta desafíos como la eficiencia y la escalabilidad industrial. Los sistemas bioelectroquímicos están llamados a ofrecer soluciones innovadoras y prometedoras para el tratamiento de residuos, la producción de bioelectricidad y la generación de productos químicos.

#### Palabras clave

Bioelectroquímica, microorganismos electroactivos, sistemas bioelectroquímicos, tecnología sostenible

#### 1.- Introducción

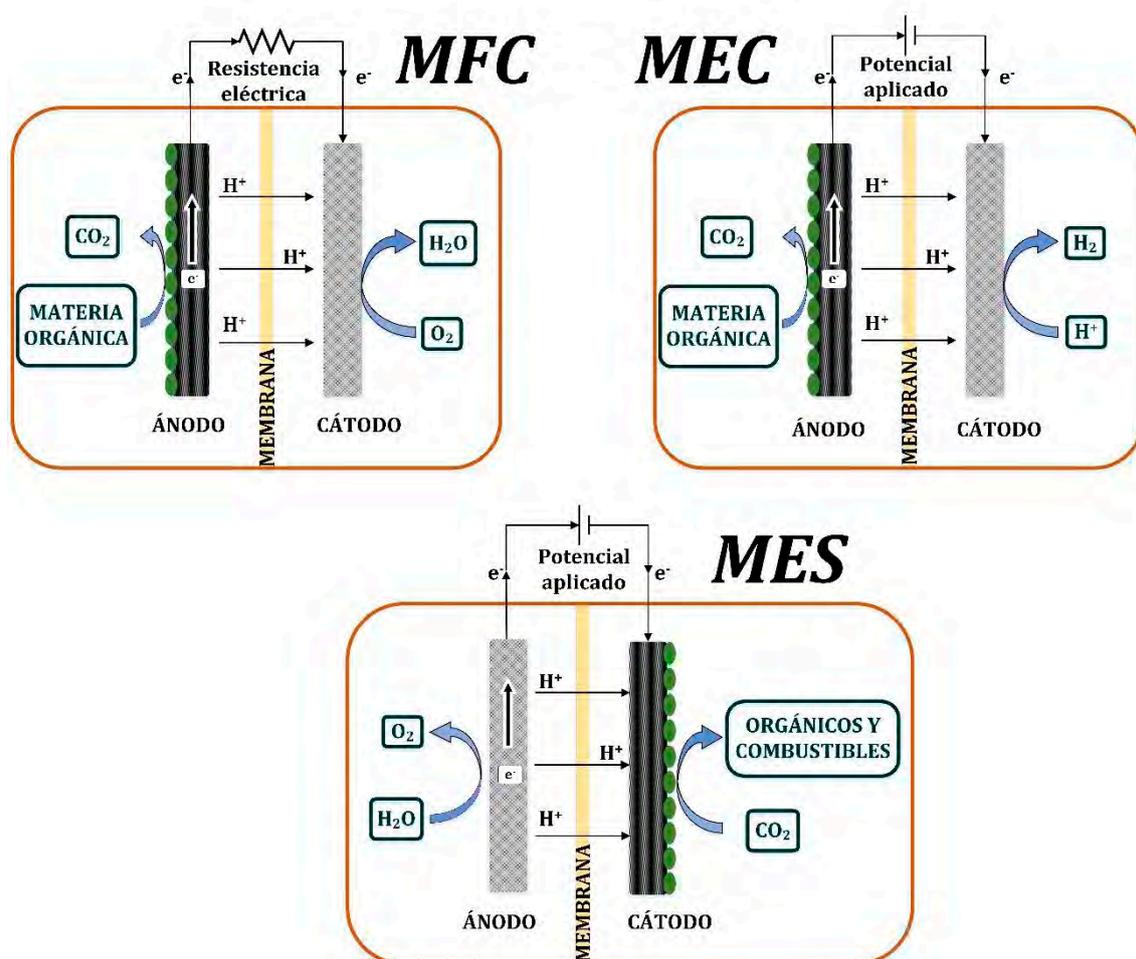
La bioelectroquímica, un campo que ha despertado el interés de los científicos desde hace mucho tiempo, estudia la interacción entre materiales conductores y microorganismos vivos (Potter, 1911; Schröder *et al.*, 2015). Los científicos

dedicados a la investigación fundamental llevan mucho tiempo interesados en este campo, y en este siglo XXI la implicación de la investigación aplicada junto a la ingeniería han promovido un número creciente de sistemas denominados técnicamente “tecnologías electroquímicas microbianas” (MET, por sus siglas en inglés) o “sistemas bioelectroquímicos” (BES, por sus siglas en inglés) (Schröder *et al.*, 2015). Este entrelazamiento de ingeniería, electroquímica, ciencia de materiales y microbiología abre un amplio y multidisciplinar campo de investigación y desarrollo tecnológico que ha crecido rápidamente en los últimos años. Otras disciplinas, como la bioquímica, la física o la modelización matemática, también han mostrado un interés creciente por los BES en los últimos años, lo que ha dado lugar a un número cada vez mayor de aplicaciones (Wang y Ren, 2013). Todas estas aplicaciones comparten un principio básico según el cual los microorganismos interactúan electroquímicamente con una superficie conductora sólida (electrodo) para catalizar una reacción bioquímica, que puede ser oxidante o reductora en función del potencial eléctrico del electrodo. La bioelectroquímica en sí es una rama de la electroquímica que se dedica al estudio de fenómenos electrofisiológicos. Esto abarca el transporte de electrones y protones en las células, los potenciales de membrana y las reacciones electroquímicas en las que intervienen los microorganismos. Este campo tiene aplicaciones cruciales en diversas disciplinas, como la tecnología del medio ambiente, la química sintética, la electrofisiología, la ingeniería biomédica o la cinética enzimática. De hecho, los avances en bioelectroquímica han tenido un impacto significativo en la tecnología, la medicina y la biología. Los sistemas BES ya han sido tratados en el ámbito de Ambociencias desde un punto de vista de sus aplicaciones (Vega González, 2023). Este artículo expondrá sus fundamentos, así como los últimos avances y sus retos y potenciales futuros.

## 2.-Historia y configuración de los sistemas bioelectroquímicos

La historia de los BES comenzó hace más de un siglo, cuando M.C. Potter descubrió que ciertas bacterias son capaces de generar corriente eléctrica asociada a la degradación de materia orgánica (Potter, 1911). Potter en concreto realizó un estudio sobre los efectos eléctricos que acompañan a la fermentación o putrefacción bajo la influencia de microorganismos como *Saccharomyces* u otras bacterias. Tras ese trascendental descubrimiento, sólo unos pocos trabajos exploraron esta observación hasta finales de los años 90 y principios de los 2000, cuando se emprendió la investigación sobre las pilas de combustible microbianas (Microbial Fuel Cells, MFC) con un renovado interés (Liu *et al.*, 2004). Normalmente, una MFC consta de dos electrodos: un ánodo y un cátodo (**Fig. 1**). El ánodo está colonizado por microorganismos y suele estar separado del cátodo por una membrana de intercambio iónico, de forma que los electrolitos de las cámaras catódica y anódica no se mezclen permitiendo a su vez el intercambio de iones. En el ánodo, las bacterias electroactivas degradan generalmente materia orgánica para producir electrones, protones y carbono inorgánico. Los protones y los electrones

se transfieren al cátodo (a través de la membrana de intercambio iónico y de un circuito eléctrico externo, respectivamente), donde suelen reaccionar con el oxígeno para formar agua (Rabaey y Verstraete, 2005). Las MFCs están por tanto enfocadas principalmente a la generación de energía eléctrica que es producida por esa circulación de electrones del ánodo al cátodo, aunque también cumplen el propósito de degradar materia orgánica como una alternativa a la depuración de residuos orgánicos. A pesar de tener el potencial para cumplir esta doble función, las MFC aún no han superado la escala piloto, pero la producción de energía eléctrica en estos sistemas ha aumentado drásticamente durante los últimos años desde unos pocos  $mW/m^2$  de electrodo, hasta más de  $2,7 W/m^2$ , demostrando ser capaces de alimentar iluminación o pequeños dispositivos electrónicos en aplicaciones prácticas de campo reales (Ieropoulos *et al.*, 2016).



**Figura 1.** Esquema de configuración de reactores tipo MFC, MEC y MES y reacciones comunes en sus cámaras.

Alrededor de 2005 se descubrió que un sistema MFC, además de ser operado en forma de pila para generación eléctrica, podía funcionar en una configuración electrolítica aplicando un potencial forzado, dando lugar al concepto de Celdas de Electrolisis Microbiana (MECs, por sus siglas en inglés) (Escapa *et al.*, 2016). Las MECs abrieron la oportunidad de recuperar energía en forma de productos químicos en lugar de como electricidad, siendo el hidrógeno quizás el producto más popular. En las MECs los microorganismos electroactivos generan electrones a partir de la oxidación de materia orgánica como en las MFCs; sin embargo, estos electrones son forzados a viajar hacia el cátodo por un potencial eléctrico aplicado donde se recombinan con protones para producir hidrógeno (**Fig. 1**). Además, la capacidad reductora del cátodo puede utilizarse para otros fines prácticos como la recuperación de metales, la reducción de sulfatos o la producción de peróxido de hidrógeno. Los desarrollos tecnológicos de MEC se han centrado principalmente en el diseño de sistemas para el tratamiento eficiente de residuos orgánicos combinado en paralelo a la producción de hidrógeno gaseoso. Además, se han probado prototipos piloto de hasta 1000 L que demuestran su viabilidad para futuras aplicaciones prácticas (Isabel San-Martín *et al.*, 2018).

En las MFCs y MECs no sólo la reacción anódica sino también la catódica puede ser bio-catalizada. Cuando el cátodo está catalizado biológicamente se suele denominar biocátodo, y fue Rozendal junto a sus colaboradores en 2007 quien operó un biocátodo (invirtiendo el potencial de un bioánodo) por primera vez. Esto abrió un nuevo campo en los BES, y rápidamente surgieron nuevas aplicaciones para los biocátodos. Así, en 2009 Clauwaert y Verstraete operaron un biocátodo diseñado específicamente para la producción de metano y poco después, en 2010, Nevin y colaboradores demostraron la generación de compuestos orgánicos a partir de carbono inorgánico dando lugar al concepto de Electrosíntesis Microbiana (MES, por sus siglas en inglés). Los compuestos orgánicos producidos más comúnmente en el biocátodo de estos sistemas son los ácidos grasos de cadena corta, como el acético o el butírico, los alcoholes, como el etanol y el butanol, y gases combustibles, como el metano. En general la MES combina ese biocátodo con un ánodo puramente químico en el que se lleva a cabo la electrolisis de agua, lo que genera oxígeno puro como subproducto (figura 1). La MES representa una tecnología de mayor novedad que las MFC y MEC, que ofrece un amplio abanico de oportunidades en diferentes campos industriales pero que también presenta un cierto número de problemas técnicos que deben ser superados antes de lograr su aplicación práctica (Mateos González, 2018).

### **3.-Microbiología de los sistemas bioelectroquímicos**

Las BES se basan en microorganismos exoelectrogénicos o electroactivos que pueden transferir electrones fuera de sus células, facilitando la generación de electricidad mediante la transferencia extracelular de electrones (EET), una vía respiratoria clave en estos microorganismos tan particulares. Estos microbios interactúan con otras diversas especies, minerales y aceptores o donantes

de electrones, incluidos los electrodos sólidos, para llevar a cabo su metabolismo (Thengumthottathil *et al.*, 2024). La bioelectroquímica simplemente aprovecha este fenómeno para construir los reactores expuestos en la **figura 1** de forma que se obtenga un beneficio deseado.

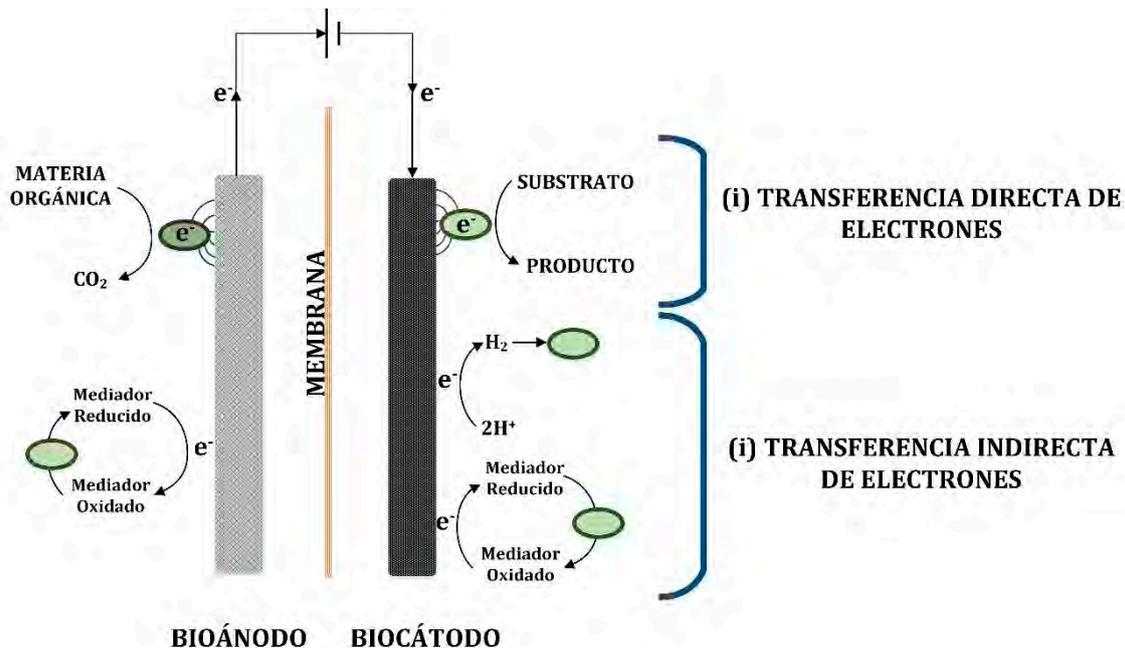
Los exoelectrónenos están muy extendidos en entornos como el suelo, las masas de agua, el compost, los sedimentos y condiciones extremas como las regiones polares, los ambientes extremadamente salinos o los volcanes. De hecho, cualquier cultivo bacteriano natural es susceptible de contener este tipo de microorganismos y de poder ser enriquecido y seleccionado para inocular un reactor bioelectroquímico. Sin embargo, identificar y cuantificar los microorganismos electroactivos es un reto debido a la ausencia de marcadores genéticos universales. Los investigadores utilizan el aislamiento de cultivos puros o la secuenciación de ADN y ARN para la identificación y, hasta ahora, se han identificado por encima de los 100 microorganismos electroactivos en todos los ámbitos de la vida, aunque se estima que son solo una pequeña parte de los microorganismos electroactivos existentes.

Los BES también albergan microorganismos no electrónenos, que desempeñan un papel crucial en la mejora del rendimiento del sistema a través de sinergias entre microorganismo, principalmente cuando los sustratos o productos son moléculas complejas (Thengumthottathil *et al.*, 2024). Estas interacciones pueden mejorar la generación de energía y la eficiencia de las MFC y MEC o la generación de orgánicos y combustibles en las MES. A pesar de ello, la literatura actual no ha desentrañado aún de forma exhaustiva la dinámica de las comunidades microbianas en los BES. Comprender las relaciones entre los microorganismos en las BES es vital, ya que impulsan los procesos bioelectroquímicos. En concreto, un factor clave para estos sistemas son los mecanismos de EET y las estrategias para mejorar la EET mediante la manipulación de las comunidades microbianas.

### 3.1.- Mecanismos de transferencia de electrones (Thengumthottathil et al., 2024)

Los microorganismos electroactivos suelen agruparse por parentesco entre ellos, aunque no se ha establecido una correlación directa entre los mecanismos de EET y este parentesco. Los exoelectrónenos más estudiados como *Geobacter metallireducens* y *G. sulfurreducens* pueden funcionar como electrónenos o electrótrofos, es decir tomando o cediendo electrones al entorno, dependiendo de las condiciones ambientales. La respiración electroactiva implica el movimiento de electrones desde el interior de la célula hasta el electrodo. Para llevar esto a cabo, los microorganismos electroactivos utilizan proteínas especializadas y citocromos para facilitar la transferencia de electrones. Sin embargo, se necesitan mecanismos adicionales, como hilos de proteínas conductoras o mediadores de transporte de electrones, para reducir los aceptores de electrones sólidos. Estos microorganismos pueden crecer en forma planctónica (en suspensión) o de biofilm (sobre una superficie sólida), y los géneros formadores de biofilm como

*Geobacter* y *Shewanella* transfieren electrones mediante transferencia directa de electrones (DET) o a través de nanowires, que son pequeños apéndices conductores que utilizan para literalmente “conectarse” (Fig. 2). Las *Shewanella spp.* planctónicas, por su parte, utilizan compuestos químicos como portadores de esos electrones para la EET.



**Figura 2.** Ejemplo de mecanismos de transferencia de electrones.

La DET implica que partes de la membrana externa, como los citocromos, entren en contacto físico con los electrodos sólidos. Este mecanismo ha sido bien estudiado en los géneros *Geobacter* y *Shewanella*, donde varios citocromos de tipo c están implicados en ese transporte de electrones.

Los nanowires, que son extensiones filamentosas de la membrana externa, a modo de cable, pueden establecer conexiones de largo alcance para la transferencia de electrones. *Geobacter* y *Shewanella* pueden transferir electrones a decenas de micras, mientras que otras bacterias como *Lysinibacillus varians* pueden transportar electrones a centímetros. Los nanowires contribuyen a mejorar la conductividad del biofilm, mejorando el rendimiento de los BES.

Para la EET de largo alcance, los cultivos de microorganismos electroactivos en suspensión utilizan moléculas solubles, como flavinas y quinonas, como transportadores de electrones. Esto se denomina transferencia de electrones indirecta (IET por sus siglas en inglés) y microorganismos como *Pseudomonas sp.* o *Shewanella oneidensis* han demostrado ser capaces de intercambiar electrones por esta vía. Estos compuestos pueden ser producidos por el microorganismo o añadidos artificialmente en el medio, y permiten la transferencia de electrones entre las células y los electrodos en estos casos. Los mediadores propios de los

microorganismos incluyen flavinas, riboflavinas y pirocianinas, mientras que los mediadores externos como la resazurina y el azul de metileno también pueden mejorar dicho transporte.

### 3.2.- Estructura y dinámica de la comunidad microbiana

La investigación sobre BES ha explorado diversas fuentes de inóculo, revelando tendencias clave en la estructura y dinámica de la comunidad microbiana a lo largo del tiempo. Varios factores, como el tipo de sustrato, el tipo de inóculo, las variaciones de potencial aplicado, la resistencia externa, los niveles de oxígeno disuelto o la temperatura, influyen de forma importante en las comunidades microbianas de las BES (Logan *et al.*, 2019). Por ejemplo, las especies de *Geobacter* tienden a dominar los biofilms en bioánodos cuando el sustrato es el acetato, mientras que otros reactores, como los biocátodos metanogénicos de una MES, pueden incluso tender a estar dominados por arqueas como *Methanobacterium*. En cualquier caso, con el medio y las condiciones de crecimiento adecuados, muchos otros microorganismos, desde las levaduras comunes hasta los extremófilos (microorganismos adaptados a condiciones extremas) también pueden generar altas densidades de corriente. Los microorganismos electrotrofos que crecen utilizando electrones de un cátodo son menos diversos y no tienen grandes rasgos comunes, y las densidades de corriente suelen estar muy por debajo de las registradas para los exoelectrógenos que crecen en ánodos. Sin embargo, los microorganismos electrotrofos pueden utilizar dióxido de carbono como fuente de carbono lo que permite una variedad de reacciones novedosas impulsadas por el cátodo así como la propia captura del CO<sub>2</sub> que es interesante en sí misma. La impresionante diversidad de microorganismos electroactivos y las condiciones en las que funcionan ofrecen una estructura y dinámica en muchos casos única para cada reactor o sistema. En cualquier caso, comprender la estructura y la dinámica de las comunidades microbianas es esencial para entender los procesos bioquímicos y la actividad electroquímica en los BES para cada una de sus aplicaciones (Logan *et al.*, 2019).

## **4.- Retos y perspectivas de los sistemas bioelectroquímicos**

Hasta el momento actual, los BES se han planteado como una tecnología prometedora para la producción de bioelectricidad, el tratamiento de residuos o la fijación de CO<sub>2</sub> (Ivase *et al.*, 2020). Sin embargo, a pesar de las prometedoras aplicaciones de las BES, su eficiencia y escalabilidad se ven obstaculizadas por varios retos. Además, en su mayor parte, los BES se han quedado en la escala de laboratorio o han llegado como mucho a escala piloto, quedando en incógnita su salto a la escala industrial real. A modo de ejemplo, la transferencia de electrones no está totalmente optimizada, lo que afecta la eficiencia global. Además, es crucial identificar y mantener comunidades microbianas eficaces para un rendimiento sostenido en el tiempo. El elevado coste y la limitada disponibilidad de materiales de electrodo adecuados representan barreras significativas. Asimismo,

el rendimiento de los BES puede verse afectado por las condiciones ambientales y la especificidad del sustrato. Por otra parte, para los reactores construidos en dos cámaras, el ensuciamiento y la degradación de las membranas pueden reducir tanto la eficiencia como la vida útil del sistema. Varios estudios ponen de relieve que la eficacia de los sustratos en los BES varía en función de la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos, y que los costes influyen en la viabilidad del proceso. Los sustratos incluyen azúcares simples, celulosa y opciones químicas, pero los lixiviados de vertedero y las aguas residuales plantean riesgos para la salud y el medio ambiente. El uso de sustratos basados en alimentos es controvertido debido a los debates sobre el uso de alimentos como combustible. Los materiales de los electrodos de los BES necesitan una conductividad, una superficie y una estabilidad elevadas, pero materiales costosos como el grafito y el platino, que son los más adecuados técnicamente, limitan la escalabilidad y la viabilidad. Las membranas utilizadas para separar las cámaras, por su parte, se enfrentan a problemas como la permeabilidad reducida a los protones, la pérdida de sustrato y el *biofouling*, lo que crea barreras técnicas. Entre los retos relacionados con los propios microorganismos figuran la necesidad de bacterias específicas, con cultivos mixtos específicos que complican la producción de energía y el consumo de sustrato. La sensibilidad a la temperatura también afecta a la eficiencia y la vida útil, ya que las bajas temperaturas ralentizan las reacciones bioelectroquímicas. Y en general, la falta de conocimientos exhaustivos sobre los microbios en entornos BES no tradicionales dificulta el escalado y la optimización (Ivase *et al.*, 2020).

Por otra parte, estos retos no hacen desaparecer las buenas perspectivas de las BES. Estas tecnologías tienen un gran potencial para diversas aplicaciones, como la generación de bioelectricidad a partir de residuos orgánicos, el tratamiento de aguas residuales mediante la descomposición de contaminantes orgánicos y la producción de electricidad, la producción de biohidrógeno como combustible limpio alternativo, o su uso en biosensores y remediación medioambiental para detectar y limpiar contaminantes. Para maximizar su potencial, es necesario seguir investigando en áreas como la mejora de la eficiencia mediante nuevos materiales y optimización de comunidades microbianas, la escalabilidad para aplicaciones industriales sin perder eficiencia, la reducción de costes con materiales y procesos más económicos, y una comprensión más profunda de los procesos microbianos y electroquímicos para innovar y mejorar los diseños de los sistemas.

En este sentido existen numerosos estudios que han demostrado que existen bacterias que pueden producir mayores corrientes eléctricas o que ofrecen mayores productividades de productos químicos sostenibles. La producción de biohidrógeno BES también es factible utilizando sustratos renovables como las aguas residuales, con o sin el empleo costosas membranas convirtiéndolas en bioenergía y bioproductos. También han probado ser eficaces para la valorización de residuos de biomasa y la biorremediación de metales pesados. En biosensores, las MFC se utilizan para detectar toxicidad de diversos compuestos, cuya lista

se amplía mes a mes con nuevos trabajos de investigación, con aplicaciones por ejemplo en el control de la calidad del agua de consumo. Y para finalizar, los BES tienen una aplicación clara en el campo de la fijación del CO<sub>2</sub> ya que se han identificado numerosos microorganismos electroactivos con capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> y producción de biocombustibles y otros compuestos orgánicos a partir de él. En esta aplicación existe un número considerable de trabajos científicos en los últimos años representando quizá la aplicación con mayor crecimiento actual dentro de los BES.

En concreto, recientemente, estos sistemas han contribuido al cambio de paradigma en el concepto energía-agua-nutrientes principalmente por su sinergia con la digestión anaerobia y el tratamiento de aguas, permitiendo la interrelación de estas tecnologías (Jadhav *et al.*, 2024). También ha cobrado impulso reciente la generación de bioproductos en sistemas BES como una alternativa tangible (Singh *et al.*, 2024). O para finalizar en su aplicación como biosensores de alta especificidad (Jayaraj *et al.*, 2024).

Por último, estos sistemas no son ajenos a la investigación de nuestro país. Existen varios grupos de regiones diferentes de España en la cúspide de la tecnología BES, liderando proyectos como el proyecto GAIA para la generación de combustibles renovables con la implicación de la U. de Girona, el proyecto VI-VALDI liderado por la U. Autónoma de Barcelona dedicado a la transformación de gases residuales en materias primas para la industria química, o el proyecto ATEM para la integración de los BES con la digestión anaerobia desarrollado en nuestra Universidad de León.

## 5.-Conclusión

Los sistemas bioelectroquímicos representan una prometedora opción como tecnología sostenible y ligada a los campos del medio ambiente, los biocombustibles o la generación de energía eléctrica. Aunque siguen planteando problemas, la investigación y los avances tecnológicos en curso podrían resolverlos, allanando el camino para su adopción generalizada y su integración en las infraestructuras existentes de gestión de la energía y los residuos añadiendo valor a la cadena. Los microorganismos electroactivos por su parte representan un grupo muy interesante y particular dentro de su reino, que tienen el potencial de transformar la visión dentro de los procesos electroquímicos tradicionales. En definitiva, el potencial de los BES para contribuir a la producción de energía limpia y a la sostenibilidad medioambiental los convierte en un área de estudio fundamental para futuras innovaciones en una amplia diversidad de aplicaciones.

## Bibliografía

Escapa, A., Mateos, R., Martínez, E. J. y Blanes, J. 2016. Microbial electrolysis cells: An emerging technology for wastewater treatment and energy recovery. From laboratory to pilot plant and beyond. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55:942-956. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.029>

- Ieropoulos, I. A., Stinchcombe, A., Gajda, I., Forbes, S., Merino-Jimenez, I., Pasternak, G., Sanchez-Herranz, D. y Greenman, J. 2016. Pee power urinal? microbial fuel cell technology field trials in the context of sanitation. *Environmental Science: Water Research and Technology*, 2:336-343. <https://doi.org/10.1039/C5EW00270B>
- Isabel San-Martín, M., Mateos, R., Carracedo, B., Escapa, A. y Morán, A. 2018. Pilot-scale bioelectrochemical system for simultaneous nitrogen and carbon removal in urban wastewater treatment plants. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 126(6):758-763. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2018.06.008>
- Ivase, T. J. P., Nyakuma, B. B., Oladokun, O., Abu, P. T. y Hassan, M. N. 2020. Review of the principal mechanisms, prospects, and challenges of bioelectrochemical systems. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 39:13298. <https://doi.org/10.1002/EP.13298>
- Jadhav, D. A., Yu, Z., Hussien, M., Kim, J. H., Liu, W. *et al.* 2024. Paradigm shift in Nutrient-Energy-Water centered sustainable wastewater treatment system through synergy of bioelectrochemical system and anaerobic digestion. *Bioresource Technology* 396:130404. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2024.130404>
- Jayaraj, K. K., Pendse, V. V., Bhowmick, G. D., Das, I. y Zekker, I. 2024. Advancements in the application of bioelectrochemical systems-based sensors. *Advances in Environmental Electrochemistry*, Ed. Elsevier, pp. 197-216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18820-6.00002-3>
- Liu, H., Ramnarayanan, R. y Logan, B. E. 2004. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*, 38:2281-2285. <https://doi.org/10.1021/ES034923G>
- Logan, B. E., Rossi, R., Ragab, A. y Saikaly, P. E. 2019. Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems. *Nature Reviews Microbiology*, 17:307-319. <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>
- Mateos González, R. 2018. Contributions towards practical application of microbial electrosynthesis. Tesis doctoral. Universidad de León.
- Potter, M. C. 1911. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*, 84:260-276. <https://doi.org/10.1098/RSPB.1911.0073>
- Rabaey, K. y Verstraete, W. 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotechnology*, 23:291-298. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008>
- Schröder, U., Harnisch, F. y Angenent, L. T. 2015. Microbial electrochemistry and technology: terminology and classification. *Energy and Environmental Science*, 8:513-519. <https://doi.org/10.1039/C4EE03359K>
- Singh, N.K., Mathuriya, A.S., Mehrotra, S., Pandit, S., Singh, A., Jadhav, D., 2024. Advances in bioelectrochemical systems for bio-products recovery. *Environment*

*and Technology* 45, 3853–3876. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2234676>

Thengumthottathil, V., Ponnusamy, K. y Naina Mohamed, S. 2024. Bioelectrochemical systems: Exploring microbial communities, interactions, and electron transfer. *Biochemical Engineering Journal*, 211:109442. <https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2024.109442>

Vega González, M. 2023. Aplicaciones de las celdas de combustible microbiano. *Ambio-ciencias* 20:55-68.

Wang, H. y Ren, Z. J. 2013. A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology Advances*, 31:1796-1807. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2013.10.001>