Lirio acuático (*Eichhornia crassipes*): Retos para la producción de Bio-hidrógeno

Juan Jesús Reyes-Valdez [1], Josefina García-Navarro [2] y Sandra Edith Benito-Santiago [2,*]

[1] Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira, Carretera Tampico-Puerto Industrial Altamira Km. 14.5, 89600 Altamira, Tamaulipas, México.
[2] Universidad Politécnica de Altamira, Nuevo Libramiento Altamira km 3, 89602 Altamira, Tamaulipas, México.
* Autor de correspondencia: edith.santiago@upalt.edu.mx.

Artículo de divulgación científica

Recibido: 22 de octubre de 2024 Aceptado: 7 de noviembre de 2024 Publicado: 10 de noviembre de 2024
DOI: https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.281

Resumen: El Bio-hidrógeno (Bio – H_2) es un vector energético y una materia prima industrial que se puede obtener a partir del lirio acuático y que puede contribuir a reducir tanto su impacto negativo en ecosistemas como la dependencia de combustibles fósiles. El Bio – H_2 se puede obtener por métodos como la fermentación oscura, y celdas de electrólisis microbiana por medio de diferentes fuentes de biomasa, donde las condiciones de operación y el rendimiento se ven afectados por el inóculo, el sustrato, el pH, la temperatura y la configuración del reactor. El artículo destaca algunas ventajas de la fermentación oscura y celdas de electrólisis microbiana, así como la utilización de materias primas renovables. Además, se señalan algunos desafíos para mejorar la eficiencia y la estabilidad de los procesos de producción del Bio – H_2.

Palabras clave: Bio-hidrógeno; lirio acuático; biomasa; fermentación oscura; celdas de electrólisis microbiana.

Introducción

La planta acuática de agua dulce *Eichhornia crassipes*, conocida comúnmente como lirio acuático, es una planta hidrófita de la familia Pontederiaceae, y es originaria de América del Sur (Bisht *et al*., 2024). Fue introducida como especie ornamental para adornar los cuerpos de agua, en muchos países hace más de un siglo, por sus atractivas flores azules o púrpuras (Figura 1) (Sahota *et al*., 2016). Pero, tiempo después, se descubrió que esta planta supuestamente preciada era una especie invasora y es considerada una de las plantas acuáticas más problemáticas debido a su reproducción y tasa de crecimiento formando tapetes o esteras que disminuyen el oxígeno disuelto y la entrada de luz en los cuerpos de agua (Bhattacharya *et al*., 2010).



Figura 1. Invasión de *Eichhornia crassipes* en la laguna de Champayán en Altamira, Tamaulipas.

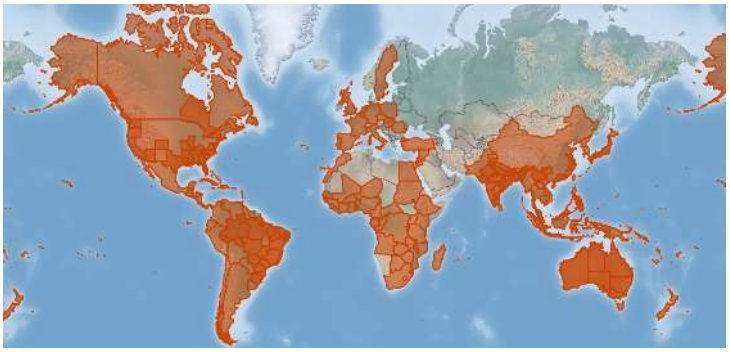


Figura 2. Mapa de distribución de *Eichhornia crassipes*. Fuente: (CABI, 2024)

La capacidad de proliferación del lirio acuático lo ha llevado a invadir regiones en Asia, África y América del Norte (Gao *et al*., 2004) (Figura 2). En México, según estimaciones de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la organización Agua Asociación Civil, más de 70,000 hectáreas de embalses, lagos, canales y desagües están infestados con *Eichhornia crassipes*, llegando a causar graves problemas económicos y ambientales (Gaurav *et al*., 2020) que afectan negativamente la agricultura, el transporte acuático, el riego y los ecosistemas acuáticos (Ajithram *et al*., 2021).

Sin embargo, esta planta invasora es vista como un recurso de gran potencial. Su considerable biomasa ha sido utilizada en la eliminación de colorantes y contaminantes orgánicos tóxicos, remediación de metales pesados, tratamiento de aguas residuales, como fuente de biocombustible

(etanol, biogás) debido a su alto contenido de celulosa y hemicelulosa (Figura 3), para la generación de electricidad, diversas industrias como la alimentaria, farmacológica, así como en elaboración de productos para el hogar (Patel, 2012).

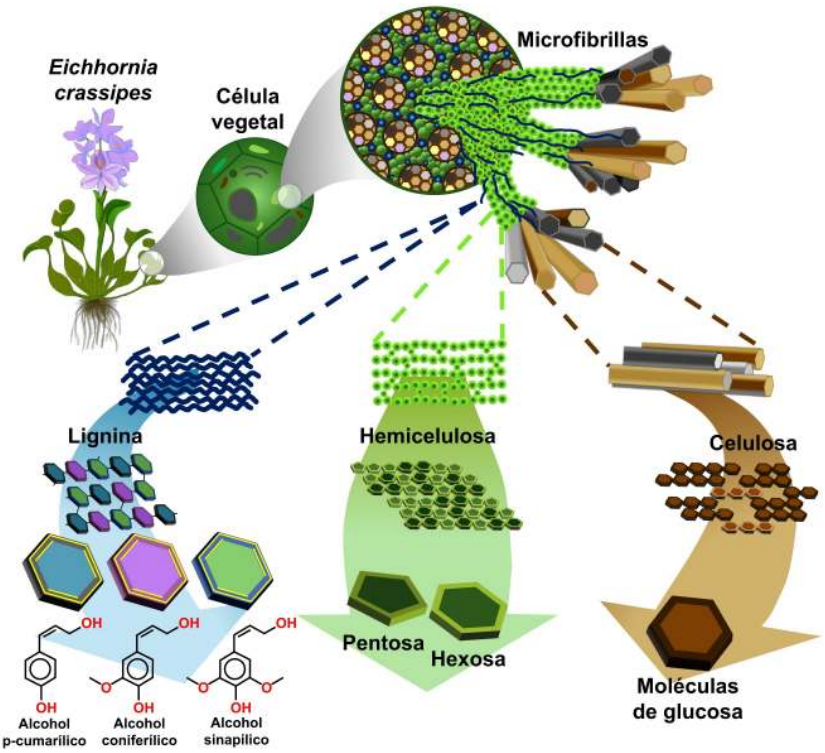


Figura 3. Estructura de la biomasa lignocelulósica que contiene lignina, celulosa y hemicelulosa.

Desarrollo

Se han llevado a cabo múltiples estudios con el objetivo de explorar los posibles beneficios del lirio acuático y uno de ellos es la producción de Biohidrógeno (Bio – H_2) mediante fermentación oscura que ha recibido una atención significativa en las últimas dos décadas debido a su carácter ecológico y sostenible (Tran *et al*., 2022) gracias al uso como materia prima renovable. La fermentación oscura es uno de los procesos comúnmente utilizados para la producción de H_2 en el cual se pueden utilizar diferentes fuentes de biomasa, siendo un proceso biológico con bajos requerimientos de energía operativa e independencia de la luz (Dahiya *et al*., 2021) (Figura 4).



Figura 4. Proceso de fermentación oscura.

La fermentación oscura es un proceso en el cual la degradación de compuestos ricos en carbohidratos se lleva a cabo anaeróbicamente por microbios que crecen en un entorno oscuro. Por lo tanto, la materia prima es fundamental, dado que una biomasa con alto contenido de agua y masa celulósica que puede hidrolizarse en azúcares, resultando idóneo para el proceso de fermentación oscura (Reith *et al*., 2003), la naturaleza y la composición de los residuos biogénicos y aguas residuales empleados como materia prima, así como su disponibilidad, son factores determinantes en la productividad y la viabilidad económica del proceso. Sin embargo, para mejorar la degradabilidad de la biomasa, es necesario utilizar un pretratamiento para acelerar la descomposición e hidrólisis de la biomasa (Mohammad *et al*., 2022). Además, la configuración y los materiales con que son construidas las celdas de electrólisis microbianas

(electrodos y membranas), también forman parte fundamental en la obtención de Bio – H_2 (Bora *et al*., 2022). Una de las ventajas de la fermentación oscura es que no requiere una fuente de luz, se puede realizar a diferentes escalas utilizando diferentes tipos de biorreactores, como reactores de tanque agitado continuamente (CSTR, por sus siglas en inglés), reactores de lecho de lodos anaeróbicos de flujo ascendente (UASB, por sus siglas en inglés), reactores de filtro anaeróbico y reactores de lecho fijo (FBR, por sus siglas en inglés) (Castelló *et al*., 2020); cada configuración presenta características y dinámicas particulares, rendimientos de Bio – H_2 y especies bacterianas dominantes (Pugazhendhi *et al*., 2019).

La producción de Bio – H_2 se lleva a cabo mediante la reducción de protones (H^+) por electrones que se generan durante la degradación de la fuente de carbono. En este proceso, la oxidación del sustrato produce electrones que son aceptados por los protones para dar lugar a la formación de hidrógeno (Rani *et al*., 2024). Teóricamente, 1 mol de glucosa produce 12 moles de hidrógeno, además de butirato, acetato y otros subproductos (Srivastava *et al*., 2024). A pesar de los avances significativos en las últimas dos décadas para optimizar y escalar el proceso de fermentación oscura, aún enfrenta desafíos críticos para su implementación a nivel industrial (Sarkar *et al*., 2021). Los principales obstáculos incluyen la naturaleza del biocatalizador y su metabolismo, las interacciones sintróficas entre microorganismos, las características de la materia prima, la inhibición por retroalimentación, así como las condiciones oxidación-reducción, térmicas, pH y la configuración del reactor (Nemestóthy *et al*., 2020; Soares *et al*., 2020). Para promover la producción de Bio – H_2 la fermentación oscura se puede integrar con un proceso posterior como la electrolisis microbiana para mejorar la recuperación de energía (Varanasi *et al*., 2020).

Las celdas de electrólisis microbiana son una tecnología para eliminar compuestos orgánicos y representan una herramienta prometedora para la conversión en biohidrógeno a través de la electrohidrogénesis. Las reacciones que ocurren en estos dispositivos son no espontáneas, por lo que es necesario el uso de una fuente externa de energía. En estas celdas, las bacterias se adhieren al ánodo, formando una biopelícula electroactiva que cataliza la oxidación del sustrato. Este proceso genera protones, dióxido de carbono y electrones, los cuales fluyen a través del circuito externo hacia el cátodo. Por su parte, los protones migran a través de una membrana de intercambio de protones (PEM, por sus siglas en inglés). Finalmente, se combinan los electrones y protones generando hidrógeno en un entorno anaeróbico (Varanasi *et al*., 2019) (Figura 5).

La reacción electroquímica global entre el ánodo y el cátodo es la siguiente; donde el acetato es el sustrato orgánico.

$$CH_3COO^- + 4H_2O \rightarrow 2HCO_3^- + H^+ + 4H_2$$

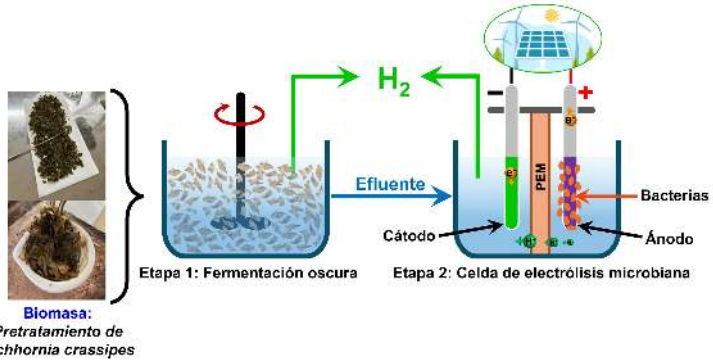


Figura 5. Etapas para la producción de Biohidrógeno.

Las celdas de electrólisis microbianas presentan diversas configuraciones, éstas pueden ser de dos cámaras en donde ánodo y cátodo están separadas por una membrana de intercambio iónico (González *et al*., 2021). Otra configuración, es de una sola cámara en donde ambos electrodos se encuentran sumergidos en el sustrato (Cui *et al*., 2021). Por último, las celdas de flujo continuo presentan una configuración con dos placas de policarbonato dispuestas en serie para formar la cámara anódica, mientras que la otra es la cámara de recolección de gases. Esta configuración no requiere de una membrana de intercambio protónico (Escapa *et al*., 2012).

Diversas investigaciones han demostrado que el inóculo es un parámetro crucial para la producción de hidrógeno. En este sentido, las comunidades mixtas pueden influir en la producción de hidrógeno durante la fermentación oscura. Los microorganismos se pueden dividir en tres principales categorías, psicrófilos (0 – 25°C, mesófilos (25 – 45°C) y termófilos (45 – 65°C), en relación a su temperatura de vida. Dauptain et. al, realizaron una investigación sobre el impacto del almacenamiento del inóculo. Los resultados demostraron que existe una disminución de H_2 en el inóculo de lodo activado almacenado durante 2 meses a una temperatura de 35°C en comparación con el inóculo fresco. Por otra parte, otras investigaciones indican que es posible almacenar mediante congelación o secado por congelación para

producir H_2. Incluso, la deshidratación por congelación por largos periodos de tiempo puede ofrecer mejores resultados en los inóculos (Dauptain *et al*., 2021).

El beneficio significativo de este proceso es que requiere una entrada de energía eléctrica relativamente baja (> 0.2 V) para facilitar el proceso de electrohidrogénesis microbiana, lo cual es inferior a la energía necesaria para la electrólisis convencional (> 1.2 V). A diferencia de la fermentación oscura, las celdas de electrólisis microbiana no están sujetos a limitaciones termodinámicas, lo que les permite, en teoría, alcanzar rendimientos óptimos de hidrógeno a partir del sustrato utilizado (Borole *et al*., 2011).

Las celdas de electrólisis microbiana y la fermentación oscura se complementan entre sí presentando notables mejoras en el rendimiento de producción de Bio – H_2, debido a que los compuestos orgánicos complejos se descomponen en compuestos más simples durante la fermentación oscura y estos son utilizados por bacterias situadas en el ánodo en las celdas de electrólisis microbiana.

Conclusiones

En conclusión, el Biohidrógeno todavía se enfrenta al desafío de optimizar su proceso de producción. Si bien la producción de Bio – H_2 por fermentación oscura con celdas de electrólisis microbiana representa un área prometedora de desarrollo tecnológico para la generación de energía renovable aún se continúan desarrollando estudios a escala de laboratorio para encontrar vías para mejorar el rendimiento y las tasas de producción. Siendo en este sentido considerado el lirio acuático como una materia prima potencial para la producción de Bio – H_2 en estos procesos de fermentación oscura y celdas de electrólisis microbiana, ya que es renovable, sostenible y está disponible en grandes cantidades.

Bibliografía

Ajithram, A., Jappes, J. T. W., & Brintha, N. C. (2021). Water hyacinth (Eichhornia crassipes) natural composite extraction methods and properties - A review. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 1626–1632. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.472.

Anjanabha Bhattacharya, & Pawan Kumar. (2010). Water hyacinth as a potential biofuel crop. *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry*, *9*(1), 112–122.

Bisht, M. S., Singh, M., Chakraborty, A., & Sharma, V. K. (2024). Genome of the most noxious weed water hyacinth (Eichhornia crassipes) provides insights into plant invasiveness and its translational potential. *iScience*, *27*(9), 110698. https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110698.

Bora, A., Mohanrasu, K., Angelin Swetha, T., Ananthi, V., Sindhu, R., Chi, N. T. L., Pugazhendhi, A., Arun, A., & Mathimani, T. (2022). Microbial electrolysis cell (MEC): Reactor configurations, recent advances and strategies in biohydrogen production. *Fuel*, *328*, 125269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125269.

Borole, A. P., & Mielenz, J. R. (2011). Estimating hydrogen production potential in biorefineries using microbial electrolysis cell technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, *36*(22), 14787–14795. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.152.

CABI. (2024). *Eichhornia crassipes (water hyacinth)*. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.1079/cabicompendium.20544.

Castelló, E., Nunes Ferraz-Junior, A. D., Andreani, C., Anzola-Rojas, M. del P., Borzacconi, L., Buitrón, G., Carrillo-Reyes, J., Gomes, S. D., Maintinguer, S. I., Moreno-Andrade, I., Palomo-Briones, R., Razo-Flores, E., Schiappacasse-Dasati, M., Tapia-Venegas, E., Valdez-Vázquez, I., Vesga-Baron, A., Zaiat, M., & Etchebehere, C. (2020). Stability problems in the hydrogen production by dark fermentation: Possible causes and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *119*, 109602. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109602.

Cui, W., Lu, Y., Zeng, C., Yao, J., Liu, G., Luo, H., & Zhang, R. (2021). Hydrogen production in single-chamber microbial electrolysis cell under high applied voltages. *Science of The Total Environment*, *780*, 146597. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146597.

Dahiya, S., Chatterjee, S., Sarkar, O., & Mohan, S. V. (2021). Renewable hydrogen production by dark-fermentation: Current status, challenges and perspectives. En *Bioresource Technology* (Vol. 321). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124354.

Dauptain, K., Schneider, A., Noguer, M., Fontanille, P., Escudie, R., Carrere, H., & Trably, E. (2021). Impact of microbial inoculum storage on dark fermentative H_2 production. *Bioresource Technology*, *319*, 124234. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124234.

Escapa, A., Gil-Carrera, L., García, V., & Morán, A. (2012). Performance of a continuous flow microbial electrolysis cell (MEC) fed with domestic wastewater. *Bioresource Technology*, *117*, 55–62. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.060.

Gao, L., & Li, B. (2004). The study of specious invasive plant, water hyacinth (Eichhornia crassipes) Achievements and Challenges. *Chinese Journal of Plant Ecology*, *28*, 735. https://doi.org/10.17521/CJPE.2004.0097.

Gaurav, G. K., Mehmood, T., Cheng, L., Klemeš, J. J., & Shrivastava, D. K. (2020). Water hyacinth as a biomass: A review. *Journal of Cleaner Production*, *277*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122214.

González Pabón, M. J., Cardeña, R., Cortón, E., & Buitrón, G. (2021). Hydrogen production in two-chamber MEC using a low-cost and biodegradable poly(vinyl) alcohol/chitosan membrane. *Bioresource Technology*, *319*, 124168. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124168.

Mohammad, A., Gahlot, P., Moustakas, K., Kazmi, A. A., Shekhar Prasad Ojha, C., & Tyagi, V. K. (2022). Pretreatment methods to enhance solubilization and anaerobic biodegradability of lignocellulosic biomass (wheat straw): Progress and challenges. *Fuel*, *319*, 123726. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123726.

Nemestóthy, N., Bélafi-Bakó, K., & Bakonyi, P. (2020). Enhancement of dark fermentative H_2 production by gas separation membranes: A review. *Bioresource Technology*, *302*, 122828. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122828.

Patel, S. (2012). Threats, management and envisaged utilizations of aquatic weed Eichhornia crassipes: an overview. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *11*(3), 249–259. https://doi.org/10.1007/s11157-012-9289-4.

Pugazhendhi, A., Kumar, G., & Sivagurunathan, P. (2019). Microbiome involved in anaerobic hydrogen producing granules: A mini review. *Biotechnology Reports*, *21*, e00301. https://doi.org/10.1016/j.btre.2018.e00301.

Rani, P., Kumar Yadav, D., Yadav, A., Ram Bishnoi, N., Kumar, V., Ram, C., Pugazhendhi, A., & Kumar, S. S. (2024). Frontier in dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Challenges and future prospects. *Fuel*, *366*, 131187. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131187.

Reith, J. H., Wijffels, R. H., & Barten, H. (2003). *Bio-methane & Bio-hydrogen organic Status and perspectives of biological methane and hydrogen production*. Dutch Biological Hydrogen Foundation.

Sahota, S., Pande, K. M., Suresh, S., Arisutha, S., Singh, D., & Shah, G. (2016). Biological Pretreatment of Water Hyacinth (Eichhornia crassipes) for Biofuel Production-A Review. *Journal of Biofuels and Bioenergy*, *2*(2), 97. https://doi.org/10.5958/2454-8618.2016.00013.4.

Sarkar, O., Katakojwala, R., & Venkata Mohan, S. (2021). Low carbon hydrogen production from a waste-based biorefinery system and environmental sustainability assessment. *Green Chemistry*, *23*(1), 561–574. https://doi.org/10.1039/D0GC03063E.

Soares, J. F., Confortin, T. C., Todero, I., Mayer, F. D., & Mazutti, M. A. (2020). Dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technological challenges and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *117*, 109484. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109484.

Srivastava, P., García-Quismondo, E., Palma, J., & González-Fernández, C. (2024). Coupling dark fermentation and microbial electrolysis cells for higher hydrogen yield: Technological competitiveness and challenges. *International Journal of Hydrogen Energy*, *52*, 223–239. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.293.

Tran, T. T. H., & Nguyen, P. K. T. (2022). Enhanced hydrogen production from water hyacinth by a combination of ultrasonic-assisted alkaline pretreatment, dark fermentation, and microbial electrolysis cell. *Bioresource Technology*, *357*. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127340.

Varanasi, J. L., & Das, D. (2020). Maximizing biohydrogen production from water hyacinth by coupling dark fermentation and electrohydrogenesis. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*(8), 5227–5238. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.030.

Varanasi, J. L., Veerubhotla, R., Pandit, S., & Das, D. (2019). Biohydrogen Production Using Microbial Electrolysis Cell. En *Microbial Electrochemical Technology* (pp. 843–869). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64052-9.00035-2.