DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026 ISSN 1909-2520 (Impreso), ISSN 2590-8219 (En línea)

Development of a system to produce biogas CH_4 and biohydrogen by dark fermentation of agricultural waste (Review Paper).

Desarrollo de un sistema para producir biogás (CH_4) y biohidrógeno mediante fermentación oscura de residuos agrícolas (Revisión del estado del arte.)

Uriel Fernando Carreño Sayago[1];

Resumen. Las explotaciones agrícolas ecológicas utilizan los recursos de manera eficiente, con el objetivo de reducir el impacto de los residuos. Se emplean tecnologías adecuadas de producción energética —incluida la digestión anaerobia de residuos ganaderos y restos de poda— para generar biocombustibles como el biogás y el biohidrógeno. La investigación sobre métodos alternativos resulta fundamental para alcanzar un desarrollo sostenible. El proyecto propuesto tiene como objetivo desarrollar un sistema para producir biogás (CH_4) y biohidrógeno mediante fermentación oscura a partir de biomasas. Los biodigestores se diseñaron y construyeron utilizando residuos como estiércol avícola, estiércol porcino, desechos ganaderos y lodos de depuradora, bajo una revisión bibliográfica. Estos materiales fueron analizados para orientar el diseño de los digestores anaerobios, con el fin de obtener biogás y biohidrógeno. Los inóculos, derivados de estiércol avícola, estiércol porcino, residuos ganaderos y lodos, mostraron resultados favorables gracias a su rico perfil bacteriano, situándose a la vanguardia a nivel mundial. Entre las ventajas más destacadas de la producción de hidrógeno a gran escala mediante fermentación oscura, cabe señalar: i) la producción continua de hidrógeno, tanto de día como de noche, al no requerir luz; ii) la generación de metabolitos de alto valor añadido —como los ácidos butírico, láctico y acético— como subproductos; y iii) el hecho de ser un proceso anaerobio, lo que evita problemas derivados de la disponibilidad de oxígeno. La combinación de estos procesos podría dar lugar a un megaproyecto con beneficios ambientales; cabe destacar que, actualmente, ninguno de estos inóculos se utiliza en nuestro país, lo que permitiría abordar impactos ambientales y sociales significativos relacionados con los residuos poliméricos.

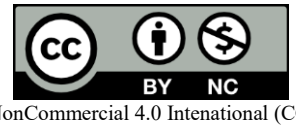
Palabras clave— CH_4, Biohidrogeno, biomasas, inoculos.

Abstract— The use of resources by organic farms is carried out in an efficient manner, with the aim of reducing the impact of waste. Appropriate energy production technologies, including anaerobic digestion of livestock and pruning waste, are used to generate biofuels such as biogas and biohydrogen. Ap-propriate energy production technologies, such as anaerobic digestion of livestock are used to generate biofuels, including biogas and biohydrogen. Research into alternative methods is of utmost importance if we are to achieve sustainable development. The aim of the proposed project is to develop a system to produce CH_4 biogas and biohydrogen by dark fermentation in biomass. The bio digesters were designed and built based on waste materials generated from chicken manure, pig manure, livestock and sewage sludge. The waste material was subjected to analysis to inform the design of anaerobic digesters, with the aim of producing biogas and biohydrogen. The inoculants, derived from chicken manure, pig manure, cattle and sludge, demonstrated favorable results due to their high bacterial profile, being at the forefront of general production of references worldwide. Among the most relevant advantages that large-scale hydrogen production would have by implementing dark fermentation are: i) Continuous production of hydrogen, day and night, since it does not require light. ii) it produces a series of high added value metabolites as by-products such as butyric, lactic, and acetic acids. iii) being an anaerobic process, it does not ex-perience problems due to limitations (availability) of oxygen. The combination of these processes could result in the creation of a megaproject with environmental benefits, given that none of these inoculants are currently used in our country, which generates significant environmental and social impacts, through the materials polymeric of waste.

Keywords— CH_4, Biohydrogen, inoculum.

[1]Profesor Investigador de Fundación Universitaria los Libertadores Author corresponding: ufcarrenos@libertadores.edu.co

Como citar este artículo: Carreño. U.F.S (2026). Desarrollo de un sistema para producir biogás (CH4) y biohidrógeno mediante fermentación oscura de residuos agrícolas (Revisión del estado del arte.). Revista INVENTUM. VOL 22. NUM 44.



Attribution-NonCommercial 4.0 Intenational (CC By-NC 4.0)

I. INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles en fuentes móviles y Destacionarias genera la emisión de gases particulados, principal causa de contaminación, efecto invernadero y calentamiento global [1-3]. Para abordar estas preocupaciones sociales, económicas y ambientales, la investigación se ha centrado en el desarrollo de formas de energía sostenibles y alternativas. Existen diversas energías alternativas y renovables, como la energía eólica, la energía solar, la producción de hidrógeno, las pilas de combustible y la biomasa [4-7]. Los biocombustibles y la biomasa se consideran actualmente una alternativa sostenible y prometedora al impacto ambiental de los combustibles fósiles [8-9]. La fermentación, la transesterificación, la digestión anaeróbica y la pirólisis son procesos utilizados para producir combustibles renovables como biodiésel, biogasolina, etanol, hidrógeno, biogás y bioaceite [10-12]. Sin embargo, la producción de biocombustibles a escala industrial presenta varias limitaciones y depende de diversos factores para ser económica y energéticamente viable en comparación con los combustibles tradicionales [13]. Estos factores incluyen la disponibilidad local de materias primas, modificaciones mínimas a los dispositivos de combustión existentes, costos de infraestructura razonables para la producción, compatibilidad ambiental y rendimiento óptimo del combustible [14]. Por lo tanto, la producción biológica de hidrógeno se lleva a cabo en diferentes biorreactores dependiendo del bioproceso metabólico llevado a cabo y el tipo de microorganismo utilizado. La producción de biogás se genera a través de un inóculo microbiano producido a partir de desechos de aguas residuales. Este proceso es ideal debido a la gran variedad de microorganismos que generan biogás, lo que resulta en tres resultados sostenibles: tratamiento de desechos, biocombustibles y biofertilizante [16].

La gran variedad de microorganismos que generan biogás, lo que resulta en tres resultados sostenibles: tratamiento de desechos, biocombustibles y biofertilizante [17-18]. Fermentación La producción oscura de hidrógeno consiste en obtener hidrógeno a partir de compuestos orgánicos ricos en carbohidratos en ausencia de luz por la acción combinada de un grupo de bacterias anaeróbicas. La generación de biohidrógeno mediante esta técnica es un proceso complejo que involucra diferentes grupos microbianos que crecen en la oscuridad, principalmente de los géneros Enterobacter, Bacillus y Clostridium, que actúan de manera coordinada y secuencial para descomponer la materia orgánica en ausencia de oxígeno libre [19]. La producción biológica de hidrógeno utilizando biomasa lignocelulósica representa una oportunidad significativa como fuente alternativa y renovable de bioenergía. Los métodos empleados para la generación de hidrógeno a través de procesos biológicos se basan en tres técnicas principales: (i) la biofotólisis del agua por medio de algas y bacterias (biofotólisis directa e indirecta), (ii) la fotodescomposición de compuestos orgánicos por medio de bacterias fotosintéticas (fotofermentación), y (iii) la producción de hidrógeno mediante la realización de fermentación en ausencia de luz durante la fase acidógena de la digestión anaeróbica de la materia orgánica (fermentación oscura) [20-23].

Con respecto a la fotofermentación y la fermentación oscura, se ha postulado que estas técnicas ofrecen varias ventajas, incluyendo el potencial de implementación tanto en el tratamiento de residuos como en la producción de hidrógeno. A diferencia de la biofotólisis, la fotofermentación emplea ácidos orgánicos como sustrato inicial para la producción de hidrógeno. Sin embargo, este proceso requiere una considerable energía de activación para estimular la producción de nitrogenasa, la enzima responsable de la generación de hidrógeno en bacterias fotosintéticas. La eficiencia y la conversión de este proceso dependen del nivel de energía solar. Además, este proceso es altamente susceptible a las fluctuaciones en los niveles de amoníaco y oxígeno, lo que lo hace poco práctico para aplicaciones a gran escala [24]. Los proyectos ambientales pueden mejorar aún más la sostenibilidad de estos retornos en las comunidades a través de enfoques financieros, de mercado y sociales. Los proyectos que utilizan biomasa generada en varios campos colombianos ofrecen una alternativa viable para la producción de biocombustibles a gran escala. Esto no solo beneficia al medio ambiente, sino que también genera ingresos adicionales, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad de las fincas agrícolas [25]. Además, los residuos requieren un material de soporte que proporcione la cantidad necesaria de azúcares especiales para aumentar los procesos de producción de biocombustibles, como CH_4 e hidrógeno [26]. Producción de biohidrógeno y metano (CH_4): El diseño del biorreactor para la fermentación oscura consiste en un recipiente oscuro o que se impida la luz, provisto de una tapa con salida de gases —ideal para el muestreo continuo—, colocado sobre una placa calefactora con agitación magnética a 120 rpm y una temperatura de 45 °C.

El objetivo de este artículo de revisión es integrar procesos ambientalmente sostenibles mediante la combinación de la producción de biogás y biohidrógeno a partir de cuatro tipos de residuos orgánicos —específicamente lodos de aguas residuales domésticas, estiércol porcino, estiércol avícola y lodos de depuradora— para generar biogás (CH_4) e hidrógeno (H_2) utilizando biorreactores a escala piloto basados en la fermentación oscura.

II. DISEÑO

Diseño de un biorreactor para fermentación oscura.

La figura 1 muestra un esquema del diseño integrado en una explotación agrícola. Según [15-18], esta es una guía paso a paso para construir su propio sistema de biorreactor basado en procesos de fermentación oscura.

1.0 Recipiente de 10 L.

2.0 Llenar con aproximadamente 7 litros de biomasa, como lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), estiércol de aves, estiércol bovino o estiércol porcino (dependiendo de las características del material específico). Añadir 3 litros de agua por cada 1 kg de biomasa.

3.0 Tubería de entrada, que proporciona una conexión entre el interior y el exterior. Tubería para lixiviados, conectada a la salida de la biomasa procesada. Racor de salida de gas y válvula de salida de gas; esta última debe incluir un dispositivo de alivio de presión en forma de «T».

4.0 Válvula con tapa para la introducción de materia orgánica.

DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026



Figura 1. Diseño integral del biorreactor.

La Figura 1 muestra el diseño de un biorreactor para la producción de biogás (metano e hidrógeno). Este biorreactor es el resultado de diversas revisiones bibliográficas, a partir de las cuales se establecieron los parámetros de diseño; por ejemplo, se determinó que el mejor rendimiento para este tipo de biorreactor se obtiene mediante una operación por lotes [32]. Además de su eficiencia, este tipo de biorreactor presenta un consumo energético óptimo, gracias a las características de los inóculos utilizados [33]. Mediante la digestión de lodos contaminantes —que poseen una elevada demanda química de oxígeno (DQO)— en este tipo de reactor, es posible reducir dicha carga contaminante; se trata, por tanto, de un modelo idóneo tanto para el tratamiento de residuos como para la producción de energía [34]. La sencillez y practicidad de este biorreactor resultan muy ventajosas, ya que los residuos orgánicos presentes en el efluente del biorreactor de hidrógeno pueden convertirse eficazmente en metano, lo que permite reducir aún más la DQO [35]. Esto se debe a que, en los lodos granulares anaerobios expuestos a un pH de entre 5 y 6, se ha observado una mayor proporción de metanógenos hidrogenotróficos (principalmente *Methanolinea*) y un incremento en la presencia de *Clostridium* [36-42]. El empleo de lodos procedentes de explotaciones agrícolas —junto con este tipo de biorreactores de diseño sencillo— resulta ideal para la obtención de dos tipos de biocombustibles, lo que favorece su implementación en dichas explotaciones y contribuye a hacerlas aún más sostenibles desde el punto de vista ecológico.

Generación de gas Metano CH_4

Una revisión de la literatura indica que la generación de CH_4 (biogás) es, en promedio, de 42 ml diarios, lo que alrededor y en promedio suma un total de 410 ml en un periodo de 10 días; este hallazgo se documenta en [43–50]. La generación de CH_4 a partir de lodos de depuradora constituye una estrategia óptima para reducir la carga contaminante. Este enfoque ofrece una doble vía hacia la sostenibilidad: mitiga la contaminación causada por los lodos y, al mismo tiempo, permite la producción de un biocombustible, en este caso, CH_4. El estiércol porcino también arrojó resultados prometedores para la producción de biogás, con un promedio de 40 ml de gas al día y un total de 400 ml al finalizar el proceso, tal como se documenta en [51–57]. Aprovechar este metano para la generación de energía o para su uso en sistemas de cocción es de gran importancia, dado que se trata de un factor que contribuye significativamente al calentamiento global. Las revisiones bibliográficas [58–63] indican que la industria ganadera genera, en promedio, cerca de 390 ml de gas metano; una cifra considerable para un sector que, debido a su amplia expansión en nuestro país, provoca graves consecuencias ambientales. La generación y la eliminación inadecuada de los residuos de la industria ganadera figuran entre las causas principales de la contaminación del agua, el suelo y el aire en nuestro país, una situación derivada de la falta de alternativas para el aprovechamiento de dichos materiales. La instalación de este tipo de biodigestor ofrece una posible solución, ya que permite obtener energía eléctrica, energía térmica y biofertilizantes a partir de los residuos ganaderos.

Aunque el estiércol avícola resultó ser la fuente menos eficaz para la producción de este biocombustible, aun así, arrojó resultados significativos, como se señala en [64–65]. El estiércol avícola es una materia prima clave para la producción de biogás, ya que ofrece un excelente potencial de rendimiento y se encuentra fácilmente disponible, dada la gran cantidad de explotaciones dedicadas a este tipo de actividad agrícola. Esta biotecnología tiene el potencial de mitigar el considerable impacto ambiental del gas metano y, simultáneamente, reducir la energía necesaria para su generación, lo que la convierte en una opción atractiva para la producción de biocombustibles. Producción de CH_4 (biogás). En la figura 2 presenta los resultados de la producción de CH_4 (biogás) a lo largo de un periodo de 12 días.

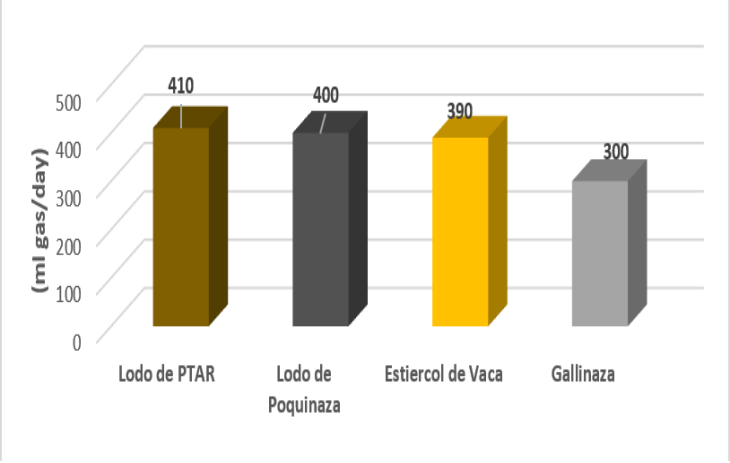


Figura 2. Generación de CH_4 con diferentes biomasas.

Generación de gas Biohidrogeno H_2

Diversas fuentes indican que se ha demostrado la producción de hidrógeno a partir de lodos residuales de plantas de tratamiento de agua, cuyo perfil bacteriano favorece una elevada producción de H_2 [67-69]. Las muestras presentaban un nivel de humedad de aproximadamente el 90 % en casi todos los experimentos., valor típico en este tipo de procesos de fermentación oscura en los diferentes experimentos. El inóculo de lodos obtuvo los mejores resultados, gracias a su perfil microbiano idóneo, con una producción media aritmética de 120 ml de H_2 por gramo de glucosa [70-73]

Por su parte, el inóculo de estiércol porcino presenta un rendimiento con 80 ml de H_2 por gramo de glucosa. El estiércol porcino arrojó resultados interesantes debido a su alto contenido de

DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026

bacterias hidrolíticas, fermentativas, acetonogénicas y reductoras de sulfatos, las cuales facilitan el proceso. En diversas explotaciones porcinas, este material suele desecharse; sin embargo, posee el potencial de ser utilizado como fuente de biocombustible. Se han investigado varios procesos agrícolas por su capacidad para producir este biocombustible, y los resultados han sido prometedores.

En Colombia, una parte considerable de estos lodos se desperdicia actualmente, debido en gran medida a la falta de conocimiento y comprensión de su potencial, lo que genera importantes impactos ambientales y sociales.

La producción de hidrógeno mediante el uso de inóculos a base de estiércol avícola es un método menos frecuente, pero constituye un aspecto fundamental para el desarrollo de una economía circular sostenible. Los niveles óptimos de producción de hidrógeno se alcanzan a una tasa de 60 H2/g, tal como se demuestra en los estudios referenciados en [74-78]. Colombia cuenta con un número considerable de explotaciones ganaderas, donde la generación de estiércol bovino representa un desafío importante para el avance de una economía circular en estos sectores productivos.

Las tablas muestran la alta productividad de dos tipos de biocombustibles, acompañada de una reducción en la carga contaminante que agrava problemas ambientales como la contaminación del agua y la emisión de gases de efecto invernadero. La generación de biogás y biohidrógeno es un fenómeno extendido, y la integración de sistemas para su producción resulta imperativa dado su elevado potencial, como lo evidencian los trabajos citados en [79-82].

Como se ha mencionado anteriormente, los biocombustibles derivados de inóculos —incluso aquellos que contienen carga microbiana diversa— representan una alternativa real y sostenible para ampliar la matriz energética y satisfacer las necesidades de suministro energético de la sociedad actual.

Tabla 1. Generación de gas Biohidrogeno H_2

Referente	Biomasa	H_2/g
[61].	Lodo de porquinaza	102
[62].	Lodo de porquinaza	80
[63].	Lodo de porquinaza	90
[69].	Lodo de PTAR	102
[70].	Lodo de PTAR	120
[71].	Lodo de PTAR	130
[72].	Lodo de PTAR	130
[73].	Lodo de PTAR	145
[74].	Gallinaza	60
[75].	Gallinaza	65
[76].	Gallinaza	71
[77].	Estiercol de vaca	87
[80].	Estiercol de vaca	125
[81].	Estiercol de vaca	97

Además de ser biocompatibles y respetuosos con el medio ambiente, estos biocombustibles ofrecen una solución viable para abordar los desafíos relacionados con la seguridad energética y la sostenibilidad. De ello se desprende que la utilización de recursos renovables y económicamente viables —como la biomasa lignocelulósica y los lodos, mediante el uso de biorreactores en explotaciones agrícolas— como materias primas para la producción de biohidrógeno podría representar una oportunidad significativa para la generación y el suministro de energía a escala industrial, dados sus posibles beneficios como vector energético.

VII. CONCLUSIONES

El inóculo a base de lodos de aguas residuales produjo un promedio de 42 ml de biogás (metano, CH_4) al día, alcanzando un total de 410 ml de gas en un periodo de 10 días, lo que demuestra que fue el inóculo más eficaz de los evaluados. Asimismo, el estiércol de aves, los residuos ganaderos y el estiércol porcino mostraron un potencial considerable para la producción de biogás. La generación de este biocombustible podría contribuir al desarrollo y fortalecimiento de la matriz energética en explotaciones agrícolas, tanto para su uso en cocinas como para la generación de energía eléctrica. El aprovechamiento de este biogás ayuda a mitigar los impactos actuales del cambio climático. La producción de biohidrógeno, utilizando el inóculo de lodos, es de aproximadamente 118 mg/l por cada 100 g de biomasa. Este inóculo mostró una productividad superior a la del estiércol porcino, con un promedio de 75 mg/l en los dos biorreactores. El biohidrógeno es un biocombustible ecológico con una alta eficiencia energética; su implementación en explotaciones agrícolas permitiría avanzar aún más hacia una economía circular. Además de reducir la carga contaminante de estos lodos —que actualmente generan graves problemas ambientales debido a su elevada carga orgánica—, resulta fundamental emplear los biorreactores descritos en este artículo, ya que son fáciles de implementar, eficientes y, sobre todo, beneficiosos para el medio ambiente en diversos contextos.

Estos procesos pueden integrarse en un megaproyecto con beneficios ambientales. Esta tecnología, basada en procesos que emplean polímeros naturales, tiene el potencial de descontaminar aguas residuales industriales y, simultáneamente, generar biocombustibles —como el hidrógeno— para su uso posterior. El aprovechamiento de cualquiera de estos inóculos en el marco de una economía circular ofrece ventajas ambientales, económicas y sociales: reducción de costes, generación de energía eléctrica, ahorro en la compra de fertilizantes, independencia energética y mayor flexibilidad en zonas rurales remotas, facilitando así el cierre de los ciclos productivos locales.

DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026

REFERENCIAS

1. Sarwer, A., Hamed, S. M., Osman, A. I., Jamil, F., Al-Muhtaseb, A. A. H., Alhajeri, N. S., & Rooney, D. W. (2022). Algal biomass valorization for biofuel production and carbon sequestration: a review. Environmental Chemistry Letters, 20(5), 2797-2851.

2. Hoang, A. T., Ong, H. C., Fattah, I. R., Chong, C. T., Cheng, C. K., Sakthivel, R., & Ok, Y. S. (2021). Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production to-ward environmental sustainability. Fuel Processing Technology, 223, 106997.

3. Jatoi, A. S., Abbasi, S. A., Hashmi, Z., Shah, A. K., Alam, M. S., Bhatti, Z. A., ... & Iqbal, A. (2021). Recent trends and future perspectives of lignocellulose biomass for biofuel production: A comprehensive review. Biomass Conversion and Biorefinery, 1-13.

4. Ma, J., Liu, K., Yang, X., Jin, D., Li, Y., Jiao, G., ... & Sun, R. (2021). Recent advances and challenges in photoreforming of biomass-derived feedstocks into hydrogen, biofuels, or chemicals by using functional carbon nitride photocata-lysts. ChemSusChem, 14(22), 4903-4922.

5. Onarheim, K., Hannula, I., & Solantausta, Y. (2020). Hydrogen enhanced biofuels for transport via fast pyrolysis of biomass: A conceptual assessment. Energy, 199, 117337.

6. Osman, A. I., Elgarahy, A. M., Eltaweil, A. S., Abd El-Monaem, E. M., El-Aqapa, H. G., Park, Y., ... & Sillanpää, M. (2023). Biofuel production, hydrogen production and water remediation by photocatalysis, biocatalysis and electrocatalysis. Environmental Chemistry Letters, 21(3), 1315-1379.

7. Kaloudas, D., Pavlova, N., & Penchovsky, R. (2021). Lignocellulose, algal biomass, biofuels and biohydrogen: a review. Environmental Chemistry Letters, 19(4), 2809-2824.

8. Sarwer, A., Hamed, S. M., Osman, A. I., Jamil, F., Al-Muhtaseb, A. A. H., Alhajeri, N. S., & Rooney, D. W. (2022). Algal biomass valorization for biofuel production and carbon sequestration: a review. Environmental Chemistry Letters, 20(5), 2797-2851.

9. Taipabu, M. I., Viswanathan, K., Wu, W., Hattu, N., & Atabani, A. E. (2022). A critical review of the hydrogen production from biomass-based feedstocks: Challenge, solu-tion, and future prospect. Process Safety and Environmental Protection, 164, 384-407.

10. Ganesh, G. S., Patil, B., Dasappa, S., & Shivapuji, A. M. (2024). Economics of small-scale biomass-to-X systems for advanced biofuel production–A case study from India. Energy Conversion and Management, 315, 118817.

11. Sayago, U. F. C., Gómez-Caicedo, M. I., & Mercado Suárez, Á. L. (2024). Design of a sustainable system for wastewater treatment and generation of biofuels based on the biomass of the aquatic plant Eichhornia Crassipes. Scientific Reports, 14(1), 11068.

12. Jiménez-Jiménez, W. J., Valdez-López, L. L., & Duque-Mariño, M. M. (2020). Fuentes alternativas para la producción de biocombustibles. Polo del Conocimiento, 5(10), 200-214.

13. Rey-Porras, K. D., Leguizamón-Nonsoque, G. M. M., González-LaRotta, E. C., & Bece-rra-Fernández, M. (2021). Análisis de brechas del sector de biocombustibles en Co-lombia. INVENTUM, 16(30), 61-90.

14. Carreño-Sayago, U. F. C., Castro, Y. P., Rivera, L. R. C., & Mariaca, A. G. (2020). Estimation of equilibrium times and maximum capacity of adsorption of heavy metals by E. crassipes. Environmental Monitoring and Assessment, 192(2), 141.

15. Carreño-Sayago, U. F., & Rodríguez-Parra, C. (2019). Eichhornia crassipes (Mart.) Solms: an integrated phytoremediation and bioenergy system. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 25(3), 399-411.

16. Sayago, U.F.C. The Design of a Sustainable Industrial Wastewater Treatment System and The Generation of Biohydrogen from E. crassipes. Polymers 2024, 16, 893. https://doi.org/10.3390/polym16070893

17. Pratama, J. H., Amalia, A., Rohmah, R. L., & Saraswati, T. E. (2020, May). The extrac-tion of cellulose powder of water hyacinth (Eichhornia crassipes) as reinforcing agents in bioplastic. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2219, No. 1, p. 100003). AIP Publishing LLC.

18. Carreño-Sayago, U. F. C. (2019). Design of a sustainable development process between phytoremediation and production of bioethanol with Eichhornia crassipes. Environ-mental monitoring and assessment, 191(4), 221.

19. Saratale, G. D., Chen, S. D., Lo, Y. C., Saratale, R. G., & Chang, J. S. (2008). Outlook of biohydrogen production from lignocellulosic feedstock using dark fermentation–a re-view.

20. Song, W., Ding, L., Liu, M., Cheng, J., Zhou, J., & Li, Y. Y. (2020). Improving biohydro-gen production through dark fermentation of steam-heated acid pretreated Alternan-thera philoxeroides by mutant Enterobacter aerogenes ZJU1. Science of the Total En-vironment, 716, 134695.

21. Puris Tovalino, K. J. (2019). Aplicación de la microalga Chorella Vulgaris como alter-nativa para la bioadsorcion de metales pesados Pb, Hg, Cd en aguas.

22. Qiao, L., Li, S., Li, Y., Liu, Y., & Du, K. (2020). Fabrication of superporous cellulose beads via enhanced inner cross-linked linkages for high efficient adsorption of heavy metal ions. Journal of Cleaner Production, 120017.

23. Reddy, K. R., Amaya-Santos, G., Yargicoglu, E., Cooper, D. E., & Negri, M. C. (2019). Phytoremediation of heavy metals and PAHs at slag fill site: three-year field-scale in-vestigation. International Journal of Geotechnical Engineering, 13(1), 32-47.

24. Lu, C., Jing, Y., Zhang, H., Lee, D. J., Tahir, N., Zhang, Q., ... & Zhang, X. (2020). Biohy-drogen production through active saccharification and photo-fermentation from al-falfa. Bioresource technology, 304, 123007.

25. Argun H. y Dao S., (2016), "Bio-hydrogen production from waste peach pulp by dark fermentation: Effect of inoculum addition", International Journal of Hydrogen Energy, 42(4):2569-2574.

26. Gupta, A. S. (2020). Feasibility Study for Production of Biogas from Wastewater and Sewage Sludge: Development of a Sustainability Assessment Framework and its Ap-plication.

27. Jung, K. W., Kim, D. H., Kim, S. H., & Shin, H. S. (2011). Bioreactor design for continu-ous dark fermentative hydrogen production. Bioresource technology, 102(18), 8612-8620.

28. Lay, C. H., Vo, T. P., Lin, P. Y., Abdul, P. M., Liu, C. M., & Lin, C. Y. (2019). Anaerobic hydrogen and methane production from low-strength beverage wastewater. International Journal of Hydrogen Energy, 44(28), 14351-14361.

29. Cheng, H. H., Whang, L. M., Wu, C. W., & Chung, M. C. (2012). A two-stage bioprocess for hydrogen and methane production

from rice straw bioethanol resi-dues. Bioresource technology, 113, 23-29.

30. Charalambous, P., Shin, J., Shin, S. G., & Vyrides, I. (2020). Anaerobic digestion of in-dustrial dairy wastewater and cheese whey: performance of internal circulation bio-reactor and laboratory batch test at pH 5-6. Renewable Energy, 147, 1-10.

31. Teplyakov, V. V., Gassanova, L. G., Sostina, E. G., Slepova, E. V., Modigell, M., & Ne-trusov, A. I. (2002). Lab-scale bioreactor integrated with active membrane system for hydrogen production: experience and prospects. International Journal of Hydrogen Energy, 27(11-12), 1149-1155.

32. Fiallos-Cárdenas, M., Ramirez, A. D., Pérez-Martínez, S., Romero Bonilla, H., Ordo-ñez-Viñan, M., Ruiz-Barzola, O., & Reinoso, M. A. (2021). Bacterial nanocellulose de-rived from banana leaf extract: yield and variation factors. Resources, 10(12), 121.

33. Raghavendra, N., Hublikar, L. V., Patil, S. M., & Bhat, P. (2021). Microwave assisted biosynthesis of silver nanoparticles using banana leaves extract: Phytochemical, spec-tral characterization, and anticancer activity studies. Journal of Water and Environ-mental Nanotechnology, 6(1), 49-61.

34. Shomodder, A., Hossain, M. M., Das, P. C., Ranganathan, T. V., & Mazumder, M. A. R. (2021). Effect of Banana Leaf Extract, Pumpkin Seed Extract and Bee Honey Treatment on the Inhibition of Browning of Fresh Cut Guava. Journal of Agricultural Sciences (Sri Lanka), 16(2).

35. Meenashree, B., Vasanthi, V. J., & Mary, R. N. I. (2014). Evaluation of total phenolic content and antimicrobial activities exhibited by the leaf extracts of Musa acuminata (banana). International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 3(5), 136-141.

36. Sayago, U. F. C., Gómez-Caicedo, M. I., & Mercado Suárez, Á. L. (2024). Design of a sustainable system for wastewater treatment and generation of biofuels based on the biomass of the aquatic plant Eichhornia Crassipes. Scientific Reports, 14(1), 11068.

37. Deumaga, M. F. T., Emaga, T. H., Tchokouassom, R., Vanderghem, C., Aguedo, M., Gil-let, S., ... & Richel, A. (2015). Genotype contribution to the chemical composition of ba-nana rachis and implications for thermo/biochemical conversion. Biomass Conversion and Biorefinery, 5, 409-416.

38. Abbas, Q., Liu, G., Yousaf, B., Ali, M. U., Ullah, H., Munir, M. A. M., & Liu, R. (2018). Contrasting effects of operating conditions and biomass particle size on bulk charac-teristics and surface chemistry of rice husk derived-biochars. Journal of analytical and applied pyrolysis, 134, 281-292.

39. Manals-Cutiño, E. M., Salas-Tort, D., & Penedo-Medina, M. (2018). Caracterización de la biomasa vegetal “cascarilla de café”. Characterization of vegetable biomass coffee husk. Chemical Technology, 38(1), 198-213.

40. Maj, G., Klimek, K., Kapłan, M., & Wrzesińska-Jędrusiak, E. (2022). Using wood-based waste from grapevine cultivation for energy purposes. Energies, 15(3), 890.

41. Mahamad, M. N., Zaini, M. A. A., & Zakaria, Z. A. (2015). Preparation and characteri-zation of activated carbon from pineapple waste biomass for dye removal. Interna-tional Biodeterioration & Biodegradation, 102, 274-280.

42. Avellaneda, Y. A., Muñoz, E. A. M., & Martínez, J. D. J. V. (2020). Effect of regrowth pe-riod on morphological development and chemical composition of kikuyu grass (Cenchrus clandestinus) in Colombian's highlands. CES Medicina Veterinaria y Zoo-tecnia, 15(2), 23-37.

43. Nguyen, L. N., Kumar, J., Vu, M. T., Mohammed, J. A., Pathak, N., Commault, A. S., ... & Nghiem, L. D. (2021). Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. Science of The Total Environment, 765, 142753.

44. Sayago, U. F. C. (2019). Design of a sustainable development process between phy-toremediation and production of bioethanol with Eichhornia crassipes. Environmen-tal monitoring and assessment, 191(4), 221.

45. Fernando Carreno-Sayago, U. (2021). Development of a sustainable system of phy-toremediation and bioethanol with E. crassipes. Tecnologia y Ciencias Del Agua, 12(4), 269-292.

46. El-Kebeer, A. A., Mahmoud, U. F., Ismail, S., Jalal, A. A. E., Kowal, P., Al-Hazmi, H. E., & Hassan, G. K. (2024). Maximizing Bio-Hydrogen and Energy Yields Obtained in a Self-Fermented Anaerobic Bioreactor by Screening of Different Sewage Sludge Pre-treatment Methods. Processes, 12(1), 118. Rangela, C., Sastoqueb, J., Calderonb, J., Mosquerab, J., Velasquezd, P., Cabezabc, I., & Acevedobd, P. (2020). Hydrogen produc-tion by dark fermentation process: Effect of initial organic load. Chem. Eng, 79, 133-138.

47. El-Kebeer, A. A., Mahmoud, U. F., Ismail, S., Jalal, A. A. E., Kowal, P., Al-Hazmi, H. E., & Hassan, G. K. (2024). Maximizing Bio-Hydrogen and Energy Yields Obtained in a Self-Fermented Anaerobic Bioreactor by Screening of Different Sewage Sludge Pre-treatment Methods. Processes, 12(1), 118.

48. Nguyen, L. N., Kumar, J., Vu, M. T., Mohammed, J. A., Pathak, N., Commault, A. S., ... & Nghiem, L. D. (2021). Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. Science of The Total Environment, 765, 142753.

49. Yörüklü, H. C., Filiz, B. C., & Figen, A. K. (2023). Use of Waste-Activated Sludge for the Production of Hydrogen. Materials for Hydrogen Production, Conversion, and Stor-age, 625-653.

50. Cluett, J., VanderZaag, A. C., Baldé, H., McGinn, S., Jenson, E., Hayes, A. C., & Ekwe, S. (2020). Effects of two manure additives on methane emissions from dairy manure. Animals, 10(5), 807.

51. Schommer, V. A., Wenzel, B. M., & Daroit, D. J. (2020). Anaerobic co-digestion of swine manure and chicken feathers: Effects of manure maturation and microbial pretreat-ment of feathers on methane production. Renewable Energy, 152, 1284-1291.

52. Li, Y., Jing, Y., Zhang, Z., Jiang, D., Zhang, Q., Hu, J., ... & Zhu, S. (2020). Kinetics of methane production from the co-digestion of cow dung, pig manure and corn straw. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 14(1), 91-97.

53. Hilgert, J. E., Herrmann, C., Petersen, S. O., Dragoni, F., Amon, T., Belik, V., ... & Amon, B. (2023). Assessment of the biochemical methane potential of in-house and outdoor stored pig and dairy cow manure by evaluating chemical composition and storage conditions. Waste Management, 168, 14-24.

54. Yang, H., & Deng, L. (2020). Using air instead of biogas for mixing and its effect on anaerobic digestion of animal wastewater with high suspended solids. Bioresource Technology, 318, 124047.

55. Tallou, A., Salcedo, F. P., Haouas, A., Jamali, M. Y., Atif, K., Aziz, F., & Amir, S. (2020). Assessment of biogas and biofertilizer produced from anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with municipal wastewater and cow dung. Environmental Technol-ogy & Innovation, 20, 101152.

56. Sakiewicz, P., Piotrowski, K., Ober, J., & Karwot, J. (2020). Innovative artificial neural network approach for integrated biogas–wastewater treatment system modelling: Ef-fect of plant operating parameters on process intensification. Renewable and Sus-tainable Energy Reviews, 124, 109784.

57. Moungmoon, T., Chaichana, C., Pumas, C., Pathom-Aree, W., Ruangrit, K., & Pekkoh, J. (2020). Quantitative analysis of methane and glycolate production from microalgae using undiluted wastewater obtained from chicken-manure biogas digester. Science of the total environment, 714, 136577.

58. Fakkaew, K., & Polprasert, C. (2021). Air stripping pre-treatment process to enhance biogas production in anaerobic digestion of chicken manure wastewater. Bioresource Technology Reports, 14, 100647.

59. Wijaya, A. S., Jariyaboon, R., Reungsang, A., & Kongjan, P. (2020). Biochemical me-thane potential (BMP) of cattle manure, chicken manure, rice straw, and hornwort in mesophilic mono-digestion. International Journal of Integrated Engineering, 12(3), 1-8.

60. Ceotto, E., Vasmara, C., Marchetti, R., Cianchetta, S., & Galletti, S. (2021). Biomass and methane yield of giant reed (Arundo donax L.) as affected by single and double annu-al harvest. GCB Bioenergy, 13(3), 393-407.

61. Cluett, J., VanderZaag, A. C., Baldé, H., McGinn, S., Jenson, E., Hayes, A. C., & Ekwe, S. (2020). Effects of two manure additives on methane emissions from dairy manure. Animals, 10(5), 807.

62. Polastri, P., Moreira, W. M., Martins, D. C. C., Fiewski, A. C., de Oliveira, M. A. S., Janeiro, V., ... & Gimenes, M. L. (2024). Anaerobic co-digestion of bovine ruminal waste and brewery spent grain: effects of inoculum to substrate ratio, mixing ratio, process stability, organic matter removal, and methane yield. Biochemical Engineering Jour-nal, 109414.

63. Hamzah, A. F. A., Hamzah, M. H., Mazlan, F. N. A., Man, H. C., Jamali, N. S., & Siajam, S. I. (2020). Anaerobic co-digestion of pineapple wastes with cow dung: effect of dif-ferent total solid content on bio-methane yield. Advances in Agricultural and Food Research Journal, 1(1).

64. Schommer, V. A., Wenzel, B. M., & Daroit, D. J. (2020). Anaerobic co-digestion of swine manure and chicken feathers: Effects of manure maturation and microbial pretreat-ment of feathers on methane production. Renewable Energy, 152, 1284-1291.

65. Zhang, L., Li, F., Kuroki, A., Loh, K. C., Wang, C. H., Dai, Y., & Tong, Y. W. (2020). Me-thane yield enhancement of mesophilic and thermophilic anaerobic co-digestion of algal biomass and food waste using algal biochar: Semi-continuous operation and microbial community analysis. Bioresource technology, 302, 122892.

66. Chen, H., Huang, R., Wu, J., Zhang, W., Han, Y., Xiao, B., ... & Yu, G. (2021). Bio-hythane production and microbial characteristics of two alternating mesophilic and thermophilic two-stage anaerobic co-digesters fed with rice straw and pig ma-nure. Bioresource Technology, 320, 124303.

67. Fang, H. H., Liu, H., & Zhang, T. (2002). Characterization of a hydrogen-producing granular sludge. Biotechnology and bioengineering, 78(1), 44-52.

68. Guan, R., Yuan, X., Wu, Z., Jiang, L., Li, Y., & Zeng, G. (2018). Principle and applica-tion of hydrogen peroxide based advanced oxidation processes in activated sludge treatment: A review. Chemical Engineering Journal, 339, 519-530.

69. Wang, L., Yang, C., Thangavel, S., Guo, Z., Chen, C., Wang, A., & Liu, W. (2021). En-hanced hydrogen production in microbial electrolysis through strategies of carbon re-covery from alkaline/thermal treated sludge. Frontiers of Environmental Science & En-gineering, 15, 1-10.

70. El-Kebeer, A. A., Mahmoud, U. F., Ismail, S., Jalal, A. A. E., Kowal, P., Al-Hazmi, H. E., & Hassan, G. K. (2024). Maximizing Bio-Hydrogen and Energy Yields Obtained in a Self-Fermented Anaerobic Bioreactor by Screening of Different Sewage Sludge Pre-treatment Methods. Processes, 12(1), 118.

71. Nam, J. Y. (2023). Optimum conditions for enhanced biohydrogen production from a mixture of food waste and sewage sludge with Alkali pretreatment. Energies, 16(7), 3281.

72. Khan, U., Bilal, M., Adil, H. M., Darlington, N., Khan, A., Khan, N., & Ihsanullah, I. (2024). Hydrogen from sewage sludge: Production methods, influencing factors, chal-lenges, and prospects. Science of The Total Environment, 170696.

73. Sheng, T., Meng, Q., Wen, X., Sun, C., Yang, L., & Li, L. (2021). Bioaugmentation with Ruminiclostridium thermocellum M3 to enhance thermophilic hydrogen production from agricultural solid waste. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 96(6), 1623-1631.

74. Sotelo-Navarro, P. X., & Poggi-Varaldo, H. M. (2021). Hydrogen from Dark Fermenta-tion of the Organic Fraction of Waste Diapers: Optimization Based on Response Sur-face Experiments. Frontiers in Energy Research, 9, 630212.

75. Moreno, R., & Gómez, X. (2012). Dark fermentative H2 production from wastes: effect of operating conditions. Journal of Environmental Science and Engineering. A, 1(7A), 936.

76. Wang, K. S., Chen, J. H., Huang, Y. H., & Huang, S. L. (2013). Integrated Taguchi method and response surface methodology to confirm hydrogen production by an-aerobic fermentation of cow manure. International journal of hydrogen energy, 38(1), 45-53.

77. Guo, X. M., Trably, E., Latrille, E., Carrere, H., & Steyer, J. P. (2014). Predictive and ex-plicative models of fermentative hydrogen production from solid organic waste: role of butyrate and lactate pathways. International journal of hydrogen energy, 39(14), 7476-7485.

78. Amekan, Y., & Cahyanto, N. (2014). Effect of different source of inoculum to the hy-drogen production from melon fruit waste on batch fermenter.

79. Rosli, N. H., Fadzil, F., Fadzil, F., Norazman, A. F., & Seswoya, R. (2023, July). Hydro-gen production and kinetic of wastewater from small-scale slaughterhouse. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2785, No. 1). AIP Publishing.

80. Moreno, R., & Gómez, X. (2012). Dark fermentative H2 production from wastes: effect of operating conditions. Journal of Environmental Science and Engineering. A, 1(7A), 936.

81. Prapinagsorn, W., Sittijunda, S., & Reungsang, A. (2017). Co-digestion of napier grass and its silage with cow dung for bio-hydrogen and methane production by two-stage anaerobic digestion process. Energies, 11(1), 47.

82. Kazimierowicz, J., Dębowski, M., & Zieliński, M. (2022). Effectiveness of hydrogen production by Bacteroides vulgatus in psychrophilic fermentation of cattle slur-ry. Clean Technologies, 4(3), 806-814.

DOI: https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.21.42.2026