

Producción de biogás a partir de sargazo: desafíos y estrategias de implementación

Biogas production from *Sargassum*: challenges and implementation strategies

Iván Ehecatl López-González¹
Dulce Jazmín Hernández-Melchor²
Pablo Antonio López-Pérez³

Fecha de recepción: 30-11-2023 Fecha de aceptación: 02-04-2024

Resumen

El sargazo es una macroalga marina parda perteneciente al género *Sargassum* C. Agardh y al orden Fucales, con una concentración persistente en ambientes tropicales y subtropicales. Su proliferación ha aumentado en los últimos años como consecuencia del cambio climático y otros factores climatológicos; suscitando problemas socioeconómicos, ambientales y de salud pública. En este sentido, los investigadores han llevado a cabo proyectos biotecnológicos enfocados en el procesamiento y valorización del sargazo con un enfoque de biorrefinería. El presente trabajo tiene como objetivo analizar el proceso de producción de biogás a partir de sargazo mediante una investigación documental que permita discutir los avances tecnológicos, oportunidades y desafíos de su conversión. Se realizó una revisión sistemática de la literatura utilizando motores de búsqueda y el gestor bibliográfico EndNote X9, en el cual se crearon grupos inteligentes, basados en los subtemas de interés. Los resultados muestran que es factible producir biogás a escala laboratorio. No obstante, su escalabilidad industrial dependerá de la integración de procesos orientada al desarrollo sostenible, considerando aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales.

Palabras clave: Macroalga, digestión anaerobia, biocombustibles, biorrefinería de algas, sostenibilidad, integración de procesos.

Abstract

Sargassum spp. is a brown marine macroalgae belonging to the genus *Sargassum* C. Agardh and the order Fucales, commonly found in tropical and subtropical environments. Its proliferation has increased in recent years due to climate change and other climatological factors, resulting in significant socioeconomic, environmental, and public health challenges. In response, researchers have carried out biotechnological projects focused on processing and valorizing *Sargassum* using a biorefinery approach. This work aims to analyze the biogas production process from *Sargassum* through documentary research, which allows for a discussion of the technological advancements, opportunities, and challenges associated with its conversion. A systematic literature review was conducted using search engines and the bibliographic manager EndNote X9, where intelligent groups were created based on the relevant subtopics. The results indicate that biogas production is feasible at the laboratory scale. However, its industrial scalability relies on the integration of processes focused on sustainable development, taking into account technical, economic, environmental, and social aspects.

Keywords: Macroalgae, anaerobic digestion, biofuels, algal biorefinery, sustainability, process integration.

1. Ingeniero en Biociencias. Estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Línea de investigación: Biotecnología Ambiental. ORCID ID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0009-0009-6566-3917>; email: lo352940@uah.edu.mx
2. Doctora en Ciencias en la Especialidad de Biotecnología, Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, México. Líneas de investigación: Escalamiento de procesos, Microalgas, Fertilizantes. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0909-7040>; email: dulcejazz@hotmail.com
3. Doctor en Ciencias en la Especialidad de Biotecnología. Profesor-Investigador en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI), Nivel 1. Líneas de investigación: Modelado, simulación y control no lineal de reactores, biorreactores y fotobiorreactores. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7534-2142>; email: pablo_lopez@uah.edu.mx

1. Introducción

El sargazo (*Sargassum* C. Agardh) es un género complejo de macroalgas marinas pardas que comprende alrededor de 615 especies distribuidas por diversas regiones oceánicas, de color marrón oliva oscuro y con un talo ramificado por nematocistos (Guiry & Guiry, 2020; Stiger-Pouvreau *et al.*, 2023).

Sargassum pertenece a la clase Phaeophyceae, subclase Cyclosporeae, orden Fucales y familia Sargassaceae. Presenta una concentración persistente en ambientes marinos tropicales y subtropicales con dos regiones de proliferación: el mar de los sargazos y la Región de Recirculación Ecuatorial del Norte (NEER) (Mattio *et al.*, 2015; Thompson *et al.*, 2020). La mayoría de las especies de sargazo se reproducen sexualmente, muestran una fase béntica al inicio de su vida útil y al madurar, pueden fragmentarse o desprenderse del fondo marino (Hees *et al.*, 2019; Amador *et al.*, 2021).

En la última década, más de 20 millones de toneladas de sargazo pelágico se han acumulado en las costas del Caribe y África Occidental, registrando una biomasa 200 veces mayor que en años anteriores; y trayendo consigo severos problemas socioeconómicos, ambientales y de salud pública (Putman *et al.*, 2018; Rodríguez *et al.*, 2019). Dicha proliferación es atribuida al aumento de nutrientes provocado por la deforestación, cambios en los patrones de afloramiento en alta mar, cambios en los

patrones de disposición del polvo del Sahara y el aumento de las temperaturas superficiales del mar (Lapointe *et al.*, 2014; Louime *et al.*, 2017).

Con relación a los efectos socioeconómicos, países del Caribe como Bahamas, República Dominicana y México han reportado importantes pérdidas económicas causadas por la disminución de tasas de ocupación hotelera y los fondos de emergencia destinados a la limpieza de playas; los cuales exceden los 17 millones de dólares distribuidos en maquinaria, barreras, embarcaciones y la contratación de más de 5000 trabajadores temporales (Orozco *et al.*, 2022).

En altas concentraciones, el sargazo puede afectar negativamente a la flora y fauna marina, ya que su acumulación bloquea la entrada de luz y, por consecuencia, impacta a los pastos marinos que requieren de energía luminosa para llevar a cabo la fotosíntesis (López *et al.*, 2008; UNEP, 2018). La proliferación de sargazo puede alterar el anidamiento de las tortugas marinas, dificultando el desplazamiento de las crías desde la orilla hacia el mar abierto y causar cambios en las redes tróficas que impacten el equilibrio de la estructura alimentaria (Chávez *et al.*, 2020).

Por otra parte, la descomposición de *Sargassum* genera efectos ambientales relacionados con la alteración química del agua y la contaminación por metales pesados, lo que provoca la muerte de especies de peces susceptibles a

los bajos niveles de oxígeno y afecta los parámetros bioquímicos de los organismos a causa de la bioacumulación del contaminante (Hoang et al., 2016; Rodríguez *et al.*, 2020). Los lixiviados producidos por esta descomposición pueden contribuir a la contaminación por metales tóxicos cuando se drenan al mar o se vierten en depósitos terrestres inadecuados. Además, pueden liberar gases que causan irritación de las vías respiratorias superiores, dolor de cabeza, náuseas, confusión y en casos extremos, lesiones pulmonares, neurológicas y cardiovasculares (Rodríguez *et al.*, 2020; Resiere *et al.*, 2021).

Ante esta situación emergente, los investigadores han llevado a cabo proyectos biotecnológicos enfocados en el aprovechamiento del sargazo para la obtención de compuestos de valor agregado, como los biocombustibles, que representan una alternativa energética al uso de combustibles fósiles responsables del calentamiento global y el cambio climático (Braungardt et al., 2019; Orozco *et al.*, 2022). De manera particular, el biogás es un sustituto viable en la generación de energía a pequeña y gran escala, el transporte y los sectores domésticos; reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y con un alto potencial de integrarse en modelos de biorrefinería (Börjesson et al., 2008; Pavičić *et al.*, 2022; Peñalosa-Bernal & Ossa, 2023).

El sargazo constituye un recurso prometedor para la producción de biocombustibles, debido a sus múltiples ventajas en comparación

con otros tipos de biomasa, como la de cultivos agrícolas (1G) o lignocelulósica (2G) (Mathimani & Pugazhendhi, 2019). En consecuencia, su uso como materia prima en la producción de biogás ha aumentado en los últimos años; sin embargo, su implementación a escala industrial aún enfrenta limitaciones. La presente revisión proporciona información actualizada sobre el procesamiento del sargazo para la obtención de biogás, abordando los avances tecnológicos, oportunidades y desafíos de su conversión.

2. Desarrollo

Se hizo una revisión sistemática de la literatura, utilizando las bases de datos Web of Science y ScienceDirect, con el objetivo de identificar estudios publicados en los últimos diez años sobre proyectos biotecnológicos enfocados en la producción de biogás y co-productos a partir de *Sargassum*.

La estrategia de búsqueda consistió en introducir jerárquicamente las palabras clave: “*sargassum biofuels*”, “*sargassum biogas*”, “*algal biorefineries*”, “*macroalgae biofuels*”, “*macroalgae bioproducts*” y “*sustainable bioprocesses*”, de manera que se generara el mayor número de resultados y procurando resumir el objetivo de estudio.

Los resultados de la consulta se filtraron a través del análisis de títulos, resúmenes y conclusiones, permitiendo la organización y estructura de la información mediante el uso del gestor bibliográfico *EndNote X9*, en el cual se crearon

tres grupos inteligentes basados en los subtemas de interés. El análisis realizado en este trabajo incluye la revisión de los avances tecnológicos, métodos y herramientas utilizadas en el procesamiento del sargazo para la obtención de biogás. A partir de este análisis, se discuten los desafíos y oportunidades del bioproceso, destacando la importancia de la sostenibilidad e integración en el escalado.

El sargazo como recurso potencial en la producción de biogás

El sargazo es considerado un recurso potencial para la producción de biogás debido a su composición, bajos costos de operación y su capacidad para generar co-productos y subproductos. Es una fuente rica en carbohidratos y presenta una baja concentración de compuestos similares a la lignina que facilitan la degradación de la biomasa para su tratamiento y la conversión microbiana de materia orgánica en biogás (Konda *et al.*, 2015; Kumar *et al.*, 2015; Thompson *et al.*, 2021).

Por otro lado, la tecnología utilizada para producir este combustible es relativamente barata,

fácil de configurar y puede ser adaptada a digestores domésticos de bajo costo (Thompson *et al.*, 2019; Orozco *et al.*, 2022).

Las biorrefinerías de tercera generación han sido de interés en la obtención de productos de valor agregado en virtud de las múltiples ventajas que ofrece la biomasa algal. De acuerdo a lo reportado por Kostas *et al.* (2021) y Adams *et al.* (2011), las macroalgas son más adecuadas para los procesos de biorrefinería que la biomasa de primera o segunda generación, debido a sus altos rendimientos, rápidas tasas de crecimiento, ausencia de requisitos terrestres para su cultivo y falta de estructura lignocelulósica recalcitrante que implica la disminución de costos operativos y energéticos en el proceso.

En particular, la investigación en torno al aprovechamiento del sargazo para la producción de biogás es limitada y representa un área de oportunidad para el mercado algal biotecnológico valorado en 13 millones de dólares (GVR, 2023). En la Tabla 1 se muestran algunos de los estudios más destacados de la literatura.

Tabla 1

Estudios enfocados en la producción de biogás a partir de sargazo (lab-scale)

Especie	Pretratamiento	Concentración (CH ₄)	Referencia
<i>Sargassum</i> spp.	Bioquímico / Térmico	84.56 ± 0.15 %	Chikani <i>et al.</i> (2022)
		65.84 ± 0.82 %	Thompson <i>et al.</i> (2021)
<i>Sargassum</i> spp.	Biológico	≈ 52 %	Tapia <i>et al.</i> (2018)
<i>Sargassum fulvellum</i>	Físico / Químico	≈ 44 %	Yuhendra <i>et al.</i> (2021)
		≈ 43 %	
<i>Sargassum casifolium</i>	Físico / Mecánico	24.56%	Irfan <i>et al.</i> (2019)

Nota. Las condiciones de operación reportadas son temperatura de 25-55 °C, tiempos de retención de 14-28 días, pH de 6.52 ± 0.02 y presión de 3.75-11.54 bar.

Chikani *et al.* (2022) utilizaron un pretratamiento combinado de peróxido de hidrógeno al 2.5%, seguido de un pretratamiento enzimático con *Trametes hirsuta* aislado de madera en descomposición, obteniendo una concentración de metano de hasta el 85%. Tapia *et al.* (2018) utilizaron este mismo hongo empleando un pretratamiento biológico, destacando que el efecto de la cepa Bm-2 en consorcios de macroalgas es prometedor para el futuro escalamiento en reactores continuos.

Por otra parte, Thompson *et al.* (2021) determinaron que la producción de biogás a partir de sargazo pelágico puede optimizarse mediante la aplicación de un pretratamiento hidrotermal, alcanzando concentraciones de hasta 66%. Yuhendra *et al.* (2021) evaluaron dos tipos de pretratamiento en *Sargassum fulvellum*, pretratamiento químico con ácido clorhídrico (HCl) y pretratamiento alcalino con hidróxido de sodio (NaOH), obteniendo una concentración promedio de 44%. Irfan *et al.* (2019) obtuvieron una concentración de 24.5% mediante la biodegradación del método discontinuo (batch small-scale) en *Sargassum casifolium* y a una proporción de sustrato de 2:1.

El potencial bioquímico de metano en algas pardas es de 200-380 L CH₄/kg de sólidos volátiles, superior al de la biomasa lignocelulósica (100-260 L CH₄/kg) (Miranda *et al.*, 2021). No obstante, diversos factores, como la complejidad de los polisacáridos, la sali-

inidad, el grado de polimerización y el contenido de fucooidanos y polifenoles, limitan su aprovechamiento y exigen el desarrollo de tecnologías que permitan extraer compuestos orgánicos valiosos, a la vez que se optimiza la producción del biocombustible (Thompson *et al.*, 2019).

El contenido de metano puede aumentar una vez que el biogás producido es mejorado mediante métodos fisicoquímicos destinados a eliminar CO₂, H₂S, NH₃ y otros gases (p. e.j., adsorción, absorción, separación por membrana, lavado con agua, precipitación química *in-situ* y carbón activado); o bien, llevando a cabo procesos de co-digestión, los cuales pueden mejorar los rendimientos hasta en un 56% (Oliveira *et al.*, 2015; Milledge *et al.*, 2020 y Khan *et al.*, 2021).

Factores limitantes en la biodigestión de *Sargassum* y estrategias de control

La producción de biogás a partir de *Sargassum* enfrenta varias limitaciones que afectan la eficiencia del proceso de digestión anaerobia, especialmente la alta salinidad, la presencia de metales pesados y la generación de compuestos inhibidores:

- **Salinidad:** *Sargassum* contiene niveles elevados de sales, especialmente cloruros que interfieren con la actividad de las bacterias metanogénicas responsables de la producción de biogás (Zhang *et al.*, 2017). A escala laboratorio, esta limitante se controla mediante pretratamientos que redu-

cen el contenido salino (Thompson *et al.*, 2021; Chikani *et al.*, 2022). A nivel industrial, esto podría resolverse con sistemas de pretratamiento en flujo continuo que minimicen la acumulación de sales en el biodigestor, manteniendo condiciones óptimas para la actividad microbiana.

- **Metales pesados:** *Sargassum* también puede acumular metales como arsénico y plomo, tóxicos para los microorganismos anaerobios (Rodríguez-Martínez *et al.*, 2020). En laboratorio, se utilizan agentes quelantes o filtros de carbón activado para reducir su concentración (Maneein *et al.*, 2018). A gran escala, la incorporación de filtros o adsorbentes previos a la digestión podría mitigar estos efectos.
- **Compuestos inhibidores y rendimientos de la digestión:** Durante la degradación de *Sargassum*, se generan compuestos que inhiben la actividad bacteriana, lo que reduce la eficiencia en procesos de mono-digestión (Thompson *et al.*, 2019). Estudios experimentales han demostrado que esto puede superarse mediante la co-digestión con otros tipos de biomasa o materias primas orgánicas alternativas (p. ej., estiércol, glicerol, residuos vegetales); diluyendo los inhibidores, la concentración de sal y mejorando el rendimiento del biogás al aportar nutrientes complementarios y estabilizar el proceso (Yang *et al.*, 2019; Thompson *et al.*, 2021). Para aplicaciones

industriales, la co-digestión en sistemas continuos con residuos agroindustriales resultaría esencial para optimizar la producción del biocombustible.

Si bien, a pequeña escala, estos métodos han mostrado eficacia en la mitigación de factores limitantes, la transición a niveles piloto e industriales requiere ajustes adicionales en los pretratamientos y un monitoreo constante de variables críticas (p. ej., relación C:N, carga orgánica volumétrica, tiempo de retención, pH y temperatura). Las estrategias de control permitirán optimizar la estabilidad del proceso y maximizar la eficiencia en la producción de biogás, logrando así una integración más sostenible y efectiva del sargazo como recurso bioenergético.

Integración de procesos

La deficiencia en la sostenibilidad de los proyectos de biorrefinería puede atribuirse a dos factores principales: i) la integración ineficiente de procesos y ii) una evaluación tecnoeconómica y ambiental limitada. Estos factores resultan en altos costos de producción, consumo excesivo de energía y el desaprovechamiento de la materia prima (Robledo *et al.*, 2021; Orozco *et al.*, 2022).

La integración de procesos juega un papel holístico en el diseño y operación de los mismos, mejorando la productividad, la conservación de los recursos de masa-energía y la reducción de costos operativos e impactos ambientales adversos (Dunn y El-Halwagi, 2003). Por lo

tanto, para lograr el desarrollo de un proceso biotecnológico sostenible, es necesario el aprovechamiento integral de múltiples productos a la vez (Hernández-Melchor *et al.*, 2017, 2020) (López-Pérez *et al.*, 2013, 2017, 2022).

El sargazo es una materia prima heterogénea, rica en nutrientes, polisacáridos, vitaminas, pigmentos y otros compuestos bioactivos de gran utilidad para diversas industrias (Miranda *et al.*, 2021; López-González *et al.*, 2023). La digestión anaerobia permite extraer dichos compuestos y producir biogás que podrá ser utilizado en la obtención de calor y electricidad mediante un equipo de co-generación y, asimismo, recuperar el digestato rico en nutrientes en forma de biofertilizante o composta (Benyahya *et al.*, 2021). Por otra parte, pueden obtenerse alcoholes como el biometanol por medio de la conversión del CH₄ y CO₂ presente en el biogás, a través de un procesamien-

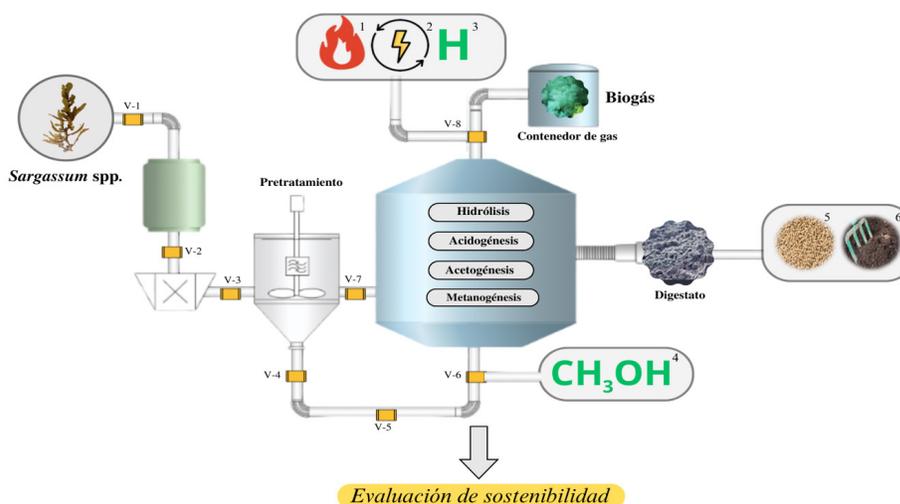
to termoquímico (Ghosh *et al.*, 2019) o bien, producir otros gases como el biohidrógeno por reformado con vapor de metano (Kumar *et al.*, 2022) (Figura 1).

El diseño de procesos debe identificar la gama de productos que pueden obtenerse de la materia prima empleada, así como la elección de protocolos adecuados para la extracción de compuestos y conversión de biomasa, de modo que se mantengan las propiedades estructurales y funcionales de los productos finales (Prabhu *et al.*, 2020).

En este sentido, su escalamiento tomará en cuenta las condiciones operativas, el espacio, equipo y la escala temporal del proceso que permita obtener múltiples productos en cortos periodos de tiempo y con bajo consumo energético (López-Pérez *et al.*, 2013; Alvarado-Santos *et al.*, 2023; López-González *et al.*, 2024).

Figura 1

Producción de biogás y co-productos a partir de sargazo



Nota. V= válvula; 1= calor; 2= electricidad; 3= biohidrógeno; 4= biometanol; 5= biofertilizante y 6= composta.

A modo de ejemplo, si se considera un proceso de producción de biogás y cogeneración de energía con una base de alimentación de 60 t/día, factor de biogás de 40 m³/t, conversión de 9.6 kWh/m³ y 230 días de operación al año, se podría generar aproximadamente 1900 MWh de energía neta; sin considerar la obtención de co-productos (Rodríguez-Mata *et al.*, 2023).

Sostenibilidad

Los sistemas de biorrefinería se han considerado inherentemente sostenibles debido a la capacidad de renovación de la biomasa. Sin embargo, esto ha sido refutado recientemente dado que la sostenibilidad no se fundamenta exclusivamente en la rentabilidad económica o en la dimensión ambiental, sino en todas las dimensiones (Dominguez-Solis *et al.*, 2023).

La sostenibilidad juega un papel indispensable en el diseño e implementación de procesos a escala industrial, por lo que es necesario realizar evaluaciones que permitan predecir y determinar la factibilidad del mismo. Las evaluaciones de desempeño sostenible se basan en el uso de indicadores encargados de representar el nivel de impacto del sistema en un aspecto específico de la sostenibilidad (Palmeros-Parada *et al.*, 2016; Kostas *et al.*, 2021). Generalmente, se utilizan mecanismos ambientales, económicos y sociales que relacionan determinadas categorías de impacto (midpoint) con los daños de punto final (endpoint).

Los indicadores y métodos empleados pueden abordar una, dos o tres dimensiones de la sostenibilidad, y se consideran monodimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) según el caso. De forma que la evaluación 1D se relaciona exclusivamente con impactos económicos, ambientales o sociales; mientras que la 2D cubre impactos socioambientales, socioeconómicos o económico-ambientales y la 3D hace referencia a la sustentabilidad integral en sus tres dimensiones (Palmeros-Parada *et al.*, 2016; Castro y Cigarroa, 2018; Velázquez-Cigarroa, 2023).

3. Conclusiones

Las investigaciones recientes sobre el aprovechamiento del sargazo han confirmado su alto potencial para la producción de biogás y co-productos, especialmente cuando se emplean técnicas de pretratamiento y codigestión. A pesar de esto, persisten desafíos importantes, como la salinidad, presencia de inhibidores, contenido de metales pesados y disponibilidad estacional, que deben atenderse para optimizar su uso en la generación de energía sostenible.

El enfoque de una biorrefinería de sargazo ofrece soluciones a los problemas derivados de su proliferación, al tiempo que se explotan los productos intermedios provenientes de la pared celular y se satisface la creciente demanda energética. La mayoría de los esfuerzos de valorización del sargazo se han desarrollado a nivel laboratorio, por lo que su escalabilidad

industrial aún no es una realidad. Esta limitación está estrechamente relacionada con la baja sostenibilidad en los procesos; lo que refleja ineficiencia en su diseño, tecnologías de conversión complejas y controles inadecuados que conducen a elevados costos operativos e impactos ambientales adversos.

Para superar estos obstáculos, será necesario desarrollar tecnologías que permitan la obtención simultánea de múltiples productos y

la implementación de un modelo de producción circular. Es esencial realizar estudios adicionales a escala piloto para maximizar el potencial bioenergético de esta macroalga, así como ejecutar estrategias de evaluación tecnoeconómica, ambiental y social para determinar la factibilidad del sistema, optimizar las operaciones unitarias y cumplir con la normativa vigente.

4. Referencias

- Adams, J. M. M.; Toop, T. A.; Donnison, I. S. & Gallagher, J. A. (2011). Seasonal variation in *Laminaria digitata* and its impact on biochemical conversion routes to biofuels. *Biore-source technology*, 102(21), 9976-9984. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852411011205>
- Alvarado-Santos, E.; Aguilar-López, R.; Neria-González, M. I.; Romero-Cortés, T.; Robles-Olivera, V. J. & López-Pérez, P. A. (2023). A novel kinetic model for a cocoa waste fermentation to ethanol reaction and its experimental validation. *Preparative Biochemistry & Biotechnology*, 53(2), 167-182. <https://doi.org/10.1080/10826068.2022.2056746>
- Amador, F.; García, T.; Alper, H.; Rodríguez, V. & Carrillo, D. (2021). Valorization of pelagic *Sargassum* biomass into sustainable applications: current trends and challenges. *J. Environ. Manage.* (283:112013). doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112013.
- Benyahya, Y.; Fail, A.; Alali, A. & Sadik, M. (2021). Recovery of household waste by generation of biogas as energy and compost as bio-fertilizer—a review. *Processes*, 10(1), 81. <https://doi.org/10.3390/pr10010081>
- Börjesson, P. & Mattiasson, B. (2008). Biogas as a resource-efficient vehicle fuel. *Trends in biotechnology*, 26(1), 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.09.007>
- Braungardt, S.; van-den-Bergh, J. & Dunlop, T. (2019). Fossil fuel divestment and climate change: Reviewing contested arguments. *Energy Research & Social Science*, 50, 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.12.004>
- Castro, O. & Cigarroa, E. (2018). *Educación ambiental y sustentabilidad: Aportaciones multidisciplinarias para el desarrollo*. Universidad Autónoma de Chapingo. <https://omp.siea.org.mx/omp/index.php/omp/catalog/view/1/55/83>.

- Chávez, V.; Uribe-Martínez, A.; Cuevas, E.; Rodríguez-Martínez, R. E.; van-Tussenbroek, B. I.; Francisco, V. & Silva, R. (2020). Massive influx of pelagic Sargassum spp. on the coasts of the Mexican Caribbean 2014-2020: challenges and opportunities. *Water*, 12(10), 2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>
- Chikani-Cabrera, K. D.; Fernandes, P. M. B.; Tapia-Tussell, R.; Parra-Ortiz, D. L.; Hernández-Zárate, G.; Valdez-Ojeda, R. & Alzate-Gaviria, L. (2022). Improvement in methane production from pelagic sargassum using combined pretreatments. *Life*, 12(8), 1214. <https://doi.org/10.3390/life12081214>
- Dominguez-Solis, D.; Martínez-Rodríguez, M. C. & Alvarado-Cardona, M. (2023). Implementación de estrategias para un desarrollo sustentable en México: una reflexión social, política y cultural. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales y Humanas*, 14(1), 63-72. doi:<https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.231401.06>
- Dunn, R. F. & El-Halwagi, M. M. (2003). Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology*, 78(9), 1011-1021. <https://doi.org/10.1002/jctb.738>
- Grand View Research. (2023). Biogas Market Size, Share & Trends Analysis Report. Grand View Research Inc., San Francisco, obtained from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biogas-market>.
- Guiry, M. & Guiry, G. (2022). *AlgaeBase*. Worldwide electronic publication, National University of Ireland, Galway, en línea: <https://www.algaebase.org>
- Hees, D.; Olsen, Y.; Mattio, L.; Ruiz, L., Wernberg, T. & Kendrick, G. (2019). Cast adrift: physiology and dispersal of benthic Sargassum spinuligerum in surface rafts. *Limnology and Oceanography*, 64(2), pp, 526-540.
- Hernández-Melchor, D. J.; Camacho-Pérez, B.; Ríos-Leal, E.; Alarcón-Bonilla, J. & López-Pérez, P. A. (2020). Modelling and multi-objective optimization for simulation of hydrogen production using a photosynthetic consortium. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18(7), <https://doi.org/10.1515/ijcre-2020-0019>
- Hernández-Melchor, D. J.; Cañizares-Villanueva, R. O.; Terán-Toledo, J. R.; López-Pérez, P. A. & Cristiani-Urbina, E. (2017). Hydrodynamic and mass transfer characterization of flat-panel airlift photobioreactors for the cultivation of a photosynthetic microbial consortium. *Biochemical Engineering Journal*, 128, 141-148. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2017.09.014>

- Hoang, T. C.; Cole, A. J.; Fotedar, R. K.; Leary, M. J.; Lomas, M. W. & Roy, S. (2016). Seasonal changes in water quality and Sargassum biomass in southwest Australia. *Marine Ecology Progress Series*, 551, 63-79. <https://doi.org/10.3354/meps11735>
- Irfan, M.; Wahab, I. H.; Subur, R. & Akbar, N. (2019). Seaweed Sargassum sp. as material for biogas production. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation*, 12(5), 2015-2019. <http://www.bioflux.com.ro/aac1>
- Khan, M. U.; Lee, J. T. E.; Bashir, M. A.; Dissanayake, P. D.; Ok, Y. S.; Tong, Y. W. & Ahring, B. K. (2021). Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>
- Konda, N. M.; Singh, S.; Simmons, B. A. & Klein-Marcuschamer, D. (2015). An investigation on the economic feasibility of macroalgae as a potential feedstock for biorefineries. *BioEnergy Research*, 8, 1046-1056.
- Kostas, E. T.; Adams, J. M.; Ruiz, H. A.; Durán-Jiménez, G. & Lye, G. J. (2021). Macroalgal biorefinery concepts for the circular bioeconomy: A review on biotechnological developments and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111553>
- Kumar, A.; Bhardwaj, S. & Samadder, S. R. (2022). Evaluation of methane generation rate and energy recovery potential of municipal solid waste using anaerobic digestion and landfilling: A case study of Dhanbad, India. *Waste Management & Research*, <https://doi.org/10.1177/0734242>
- Kumar, S.; Sahoo, D. & Levine, I. (2015). Assessment of nutritional value in a brown seaweed *Sargassum wightii* and their seasonal variations. *Algal Research*, 9, 117-125.
- Lapointe, B. E.; West, L. E.; Sutton, T. T. & Hu, C. (2014). Ryther revisited: nutrient excretions by fishes enhance productivity of pelagic Sargassum in the western North Atlantic Ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 458, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2014.05.002>
- López, C. B.; Dortch, Q.; Jewett, E. B. & Garrison, D. (2008). Scientific assessment of marine harmful algal blooms. <https://aquadocs.org/bitstream/handle/1834/30786/>
- López-González, I. E.; López-Pérez, P. A. & Hernández-Melchor, D. J. (2024). Coupling of Process Intensification to Life Cycle Assessment for Eco-Design of Biohydrogen Factory by Microalgae. *Towards Green Hydrogen Generation*, 171-204. <https://doi.org/10.1002/9781394234110.ch6>

- López-González, I. E.; Lucho-Constantino, C. A. & López-Pérez, P. A. (2023). La invasión de sargazo: de un problema ambiental a un área de oportunidad. *Tópicos De Investigación En Ciencias De La Tierra Y Materiales*, 10(10), 18-26. <https://doi.org/10.29057/aactm.v10i10.11236>
- López-Pérez, P. A.; Neria-Gonzalez, M. I. & Aguilar-López, R. (2013). Nonlinear controller design with application to a continuous bioreactor. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 47(5), 585-592. <https://doi.org/10.1134/S0040579513050199>
- López-Pérez, P. A.; Peña, C.; Ruiz, C. & Aguilar, L. (2017). Increasing of lipid productivity in microalgae cultures via dynamic analysis and closed-loop operation. *European Chemical Bulletin*, 6(4), 145-150. <https://doi.org/10.17628/ecb.2017.6.145-150>
- López-Pérez, P. A.; López-López, M.; Núñez-Colín, C. A.; Mukhtar, H.; Aguilar-López, R. & Peña-Caballero, V. (2022). A novel nonlinear sliding mode observer to estimate biomass for lactic acid production. *Chemical Product and Process Modeling*, <https://doi.org/10.1515/cppm-2021-0074>
- Louime, C.; Fortune, J. & Gervais, G. (2017). Sargassum invasion of coastal environments: a growing concern. *American Journal of Environmental Sciences*, 13(1), 58-64.
- Maneein, S.; Milledge, J. J.; Nielsen, B. V. & Harvey, P. J. (2018). A review of seaweed pre-treatment methods for enhanced biofuel production by anaerobic digestion or fermentation. *Fermentation*, 4(4), 100. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION4040100>.
- Mathimani, T. & Pugazhendhi, A. (2019). Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation. *Biocatalysis and agricultural biotechnology*, 17, 326-330. <https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2018.12.007>.
- Mattio, L.; Anderson, R. J. & Bolton, J. J. (2015). A revision of the genus Sargassum (Fucales, Phaeophyceae) in South Africa. *S. Afr. J. Bot.* (98), pp.95–107. doi: 10.1016/j.sajb.2015.02.008
- Milledge, J. J.; Maneein, S.; Arribas-López, E. & Bartlett, D. (2020). Sargassum inundations in Turks and Caicos: Methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. *Energies*, 13(6), 1523. <https://doi.org/10.3390/en13061523>
- Miranda, J.; Celis, L.; Estévez, M.; Chávez, V.; Van-Tussenbroek, B.; Uribe, A. & Silva, R. (2021). Commercial potential of pelagic Sargassum spp. in Mexico. *Frontiers in Marine Science*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.768470>

- Oliveira, J. V.; Alves, M. M. & Costa, J. C. (2015). Optimization of biogas production from *Sargassum* sp. using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. *Bioresource technology*, 175, 480-485. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.121>
- Orozco, J.; Amador, F.; Gordillo, A.; García, T.; Alper, H. & Carrillo, D. (2022). Opportunities Surrounding the Use of *Sargassum* Biomass as Precursor of Biogas, Bioethanol, and Biodiesel Production. *Frontiers in Marine Science*. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.791054>
- Palmeros-Parada, M. P.; Osseweijer, P. & Duque, J. A. P. (2016). Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design. *Industrial Crops and Products*, 106, 105-123. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.08.052>
- Pavičić, J.; Novak-Mavar, K.; Brkić, V. & Simon, K. (2022). Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. *Energies*, 15(8), 2940. <https://doi.org/10.3390/en15082940>
- Peñalosa-Bernal, J. P. & Ossa-Carrasquilla, L. C. (2023). Estimación de gases de efecto invernadero emitidos por la paca biodigestora durante el tratamiento de residuos orgánicos. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(1), 55-69. <https://doi.org/10.5154/r.rch-sagt.2023.03.05>
- Prabhu, M. S.; Israel, A.; Palatnik, R. R.; Zilberman, D. & Golberg, A. (2020). Integrated biorefinery process for sustainable fractionation of *Ulva ohnoi* (Chlorophyta): process optimization and revenue analysis. *Journal of Applied Phycology*, 32, 2271-2282.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). (2018). *Sargassum White Paper - Sargassum outbreak in the Caribbean: Challenges, Opportunities and Regional Situation*. Panama: UNEP. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/>
- Putman, N.; Goni, G.; Gramer, C.; Johns, E. Tritanes, J. & Wang, M. (2018). Simulating transport pathways of pelagic *Sargassum* from the Equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Prog.Oceanogr*, (165), pp. 205-214, doi: 10.1016/j.pocean.2018.06.009
- Resiere, D.; Mehdaoui, H.; Florentin, J.; Gueye, P.; Lebrun, T.; Blateau, A. & Nevriere, R. (2021). *Sargassum* seaweed health menace in the Caribbean: Clinical characteristics of a population exposed to hydrogen sulfide during the 2018 massive stranding. *Clinical Toxicology*, 59(3), 215-223. <https://doi.org/10.1080/15563650.2020>

- Robledo, D.; Vázquez, E.; Freile, Y.; Vázquez, R.; Qui, Z. & Salazar, A. (2021). Challenges and opportunities in relation to Sargassum events along the Caribbean Sea. *Frontiers in Marine Science*, (8:699664). doi: 0.3389/fmars.2021.699664.
- Rodríguez-Martínez, R. E.; Roy, P. D.; Torrescano-Valle, N.; Cabanillas-Terán, N.; Carrillo-Domínguez, S.; Collado-Vides, L. & Van-Tussenbroek, B. (2020). Element concentrations in pelagic Sargassum along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, 8. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Rodríguez, R.; Medina, A.; Blanchon, P.; Monroy, L.; Almazán, A.; Delgado, B.; Vázquez, L. & García, M. (2019). Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic Sargassum. *Marine pollution bulletin*, (146), pp 201–205. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.06.015.
- Rodríguez-Mata, A. E.; Gómez-Vidal, E.; Lucho-Constantino, C. A.; Medrano-Hermosillo, J. A.; Baray-Arana, R. & López-Pérez, P. A. (2023). State Estimation in a Biodigester via Nonlinear Logistic Observer: Theoretical and Simulation Approach. *Processes*, 11(4), 1234. <https://doi.org/10.3390/pr11041234>
- Stiger-Pouvreau, V.; Mattio, L.; De-Ramon-N'Yeurt, A.; Uwai, S.; Dominguez, H.; Flórez-Fernández, N. & Critchley, A. T. (2023). A concise review of the highly diverse genus Sargassum C. Agardh with wide industrial potential. *Journal of Applied Phycology*, 1-31. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-02959-4>
- Tapia-Tussell, R.; Avila-Arias, J.; Domínguez-Maldonado, J.; Valero, D.; Olguin-Maciel, E.; Pérez-Brito, D. & Alzate-Gaviria, L. (2018). Biological pretreatment of mexican caribbean macroalgae consortiums using Bm-2 strain (*trametes hirsuta*) and its enzymatic broth to improve biomethane potential. *Energies*, 11(3), 494. <https://doi.org/10.3390/en11030494>
- Thompson, T. M.; Young, B. R. & Baroutian, S. (2019). Advances in the pretreatment of brown macroalgae for biogas production. *Fuel Process. Technol.* 195:106151. doi: 10.1016/j.fuproc.2019.106151
- Thompson, T.; Young, B. & Baroutian, S. (2020). Pelagic Sargassum for energy and fertiliser production in the Caribbean: a case study on Barbados. *Renew. Sustain. Energy Rev.* (118:109564). doi: 10.1016/j.rser.2019.109564.
- Thompson, T. M.; Young, B. R. & Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from caribbean pelagic Sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere*, 275, 130035. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130035>

- Velázquez-Cigarroa, E. (2023). Sustentabilidad y bien común. Experiencias de proyectos socioambientales en México y Costa Rica. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales y Humanas*, 14(1), 10-13. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.231401.01>
- Yang Q., Wu B.; Yao F., He L.; Chen F., Ma Y. *et al.* Biogas production from anaerobic co-digestion of waste activated sludge: co-substrates and influencing parameters. *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2019;18:771-793. doi: 10.1007/s11157-019-09571-8.
- Yuhendra, A.; Farghali, M.; Mohamed, I.; Iwasaki, M.; Tangtaweewipat, S.; Ihara, I. *et al.* (2021). Potential of biogas production from the anaerobic digestion of *Sargassum fulvellum* macroalgae: influences of mechanical, chemical, and biological pretreatments. *Biochem. Eng. J.* 175, 108140. doi: 10.1016/j.bej.2021.108140.
- Zhang, Y.; Li, L.; Kong, X.; Zhen, F.; Wang, Z.; Sun, Y. & Lv, P. (2017). Inhibition effect of sodium concentrations on the anaerobic digestion performance of *Sargassum* species. *Energy & Fuels*, 31(7), 7101-7109. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.7B00557>.