

La invasión de sargazo: de un problema ambiental a un área de oportunidad

The *Sargassum* invasion: from an environmental problem to an opportunity area

I.E. López-González ^a, C.A. Lucho-Constantino ^a, P.A. López-Pérez ^{b*}

^aÁrea Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, C.P. 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bEscuela Superior de Apan, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, C.P. 43900, Chimalpa Tlalayote, Hidalgo, México.

Resumen

El cambio climático junto con otros factores, ha provocado un incremento en la proliferación de *Sargassum* spp., el cual comprende cerca de 615 especies que se distribuyen por todo el mundo y representa una fuente valiosa de agua y compuestos orgánicos útiles para diversas industrias. En las últimas décadas, grandes cantidades de sargazo han llegado a las costas del Caribe y África Occidental, ocasionando graves problemas socioeconómicos y ambientales. Ante esta situación emergente, las investigaciones se han centrado en formas efectivas de utilizar esta macroalga como materia prima y convertirla en compuestos de valor agregado. La presente revisión describe las hipótesis existentes sobre las posibles causas del incremento del sargazo, destacando el efecto del cambio climático y las actividades antropogénicas en los impactos generados por esta invasión. Por otra parte, se analizan las oportunidades y desafíos de su valorización, así como la importancia de la industrialización y comercialización de los productos resultantes.

Palabras Clave:

Sargassum, valorización, calentamiento global, estrategias de gestión, industria algal.

Abstract

Climate change along with other factors, has caused an increase in the proliferation of *Sargassum* spp., which includes about 615 species that are distributed throughout the world and represents a valuable source of water and useful organic compounds for various industries. In recent decades, large amounts of *Sargassum* have reached the coasts of the Caribbean and West Africa, causing serious socioeconomic and environmental problems. Faced with this emerging situation, research has focused on effective ways to use these macroalgae as a raw material and convert it into value-added compounds. This review describes the existing hypotheses about the possible causes of the increase of *Sargassum*, highlighting the effect of climate change and anthropogenic activities on the impacts generated by this invasion. On the other hand, the opportunities and challenges of its valorization are analyzed, as well as the importance of the industrialization and commercialization of the resulting products.

Keywords:

Sargassum, valorization, global warming, management strategies, algae industry.

1. Introducción

El sargazo (*Sargassum* C. Agardh) es un género de macroalgas marinas pardas del filo Ochrophyta, clase Phaeophyceae, orden Fucales y familia Sargassaceae que comprende una gran variedad de especies que se distribuyen por todo el mundo, generalmente de color marrón oliva oscuro, con un talo leñoso, vesículas parenquimatosas y simetría bilateral (Mattio et al., 2015; Orozco et al., 2022; Stiger-Pouvreau et al., 2023).

Sargassum spp. desempeña funciones vitales en los ecosistemas marinos, brinda protección y hábitat a otras especies y ayuda a mantener condiciones específicas del agua como la temperatura, pH, contenido de oxígeno disuelto, iluminación descendente y flujo de agua (Komatsu et al., 2007; Guldberg y Bruno, 2010; Yeh et al., 2021). Presenta una concentración persistente en ambientes marinos tropicales y subtropicales con dos regiones de proliferación: el “mar de los sargazos”, ubicado al

este del Estrecho de Florida y la Región de Recirculación Ecuatorial del Norte, ubicada al noreste de Brasil (Thompson et al., 2020; Amador et al., 2021).

En las últimas décadas, millones de toneladas de sargazo se han acumulado en las costas del Caribe y África Occidental, aumentando exponencialmente año tras año y provocando graves problemas socioeconómicos y ambientales que van desde la reducción del turismo e inversiones hasta la disminución de la biodiversidad, la mortalidad de los organismos marinos y la degradación de los ecosistemas asociados (Putman et al., 2018; Rodríguez et al., 2019).

De acuerdo a lo reportado en informes actuales, se estima que alrededor de 20 millones de toneladas métricas de biomasa de sargazo pelágico se acumulan frente a la costa del noreste de América del Sur y se distribuyen por todo el Caribe (Wang et al., 2019). De hecho, la llegada de sargazo en esta región ha alcanzado

*Autor para la correspondencia: pablo_lopez@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: lo352940@uaeh.edu.mx (Iván Ehecatl López-González), carlos_lucho8906@uaeh.edu.mx (Carlos Alexander Lucho-Constantino), pablo_lopez@uaeh.edu.mx (Pablo Antonio López-Pérez).

su punto máximo, registrando una biomasa 200 veces mayor que en los 8-10 años anteriores (Robledo et al., 2021).

Aunque algunas de estas llegadas de sargazo forman parte de un fenómeno natural estacional propiciado por factores biológicos y climatológicos como el ciclo de vida, reproducción, senescencia, crecimiento, elongación o la presencia de tormentas y corrientes marinas (Orr et al., 2005; Barreiro et al., 2011). Otros factores relacionados con el cambio climático y las actividades antropogénicas han influido directamente en esta problemática. A partir de la revolución industrial, el crecimiento urbano y la industrialización han afectado en gran medida al ecosistema, modificando su estructura. Las actividades antropogénicas agravan el cambio climático, resultando en un aumento incontrolable en el número de desastres que afectan a los sistemas biológicos de todo el mundo (Pecl et al., 2017).

En este sentido, se han propuesto diferentes hipótesis que intentan explicar las causas del incremento masivo de sargazo; incluyendo el aumento de nutrientes del agua, de la temperatura y cambios en el patrón climatológico (Wang et al., 2019). El cambio climático global representa una causa directa de este fenómeno, obligando al Mar de los Sargazos a trasladarse muy cerca del sur, provocando la distribución de las algas por todo el Mar Caribe (Louime et al., 2017; Wu et al., 2022).

Las etapas de crecimiento de las algas marinas suelen verse afectadas negativamente por el calentamiento global, cambios en la salinidad del agua, irradiación y otros parámetros fisicoquímicos como el oxígeno disuelto, pH, turbidez y concentraciones de nutrientes (Hoang et al., 2016; Kerrison, 2016; Robledo et al., 2021).

A modo de ejemplo, se tiene identificado que a causa de la deforestación, el río Amazonas extrae toneladas de materia orgánica y nutrientes al mar que promueven el crecimiento de sargazo (Louime et al., 2017). Por otra parte, los cambios en las condiciones oceanográficas provocan la acumulación de la macroalga en aguas costeras, propiciando el bloqueo de luz solar a otros organismos marinos (Robledo et al., 2021).

El presente trabajo tiene como objetivo analizar los factores que influyen en el crecimiento excesivo de sargazo mediante el desarrollo de una investigación documental que permita discutir los desafíos y oportunidades de su proliferación.

2. Origen del sargazo

El género *Sargassum* tiene la más alta complejidad morfológica en la clase Phaeophyceae y el mayor número de especies del orden Fucales (Yoshida, 1989), con alrededor de 615 especies reconocidas que se distribuyen en casi todas las cuencas oceánicas (Guiry y Guiry, 2022). La llegada del sargazo a las costas del Caribe suele ocurrir de forma periódica, generalmente cuando los vientos suelen ser fuertes. Sin embargo, el aumento en la frecuencia, el alcance y la magnitud de la invasión de esta macroalga ha generado preocupación mundial debido al drástico crecimiento en los últimos años (Gavio et al., 2015; Milledge y Harvey, 2016).

El sargazo presenta dos grandes regiones de proliferación: el "mar de los sargazos", ubicado al este del Estrecho de Florida, donde el sargazo crece durante los meses de primavera/verano y la Región de Recirculación Ecuatorial del Norte (NERR), ubicada al noreste de Brasil y extendida desde el Ecuador hasta la

Contracorriente Ecuatorial del Norte (Thompson et al., 2020; Amador et al., 2021), ver Figura 1.



Figura 1. Regiones de proliferación del sargazo pelágico, (1) Mar de los sargazos y (2) Región de Recirculación Ecuatorial del Norte. Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la Figura 1, la corriente de agua en el mar de los sargazos opera en un movimiento circular, el cual es gradual y permite el desplazamiento de hasta 10,000 toneladas diarias de sargazo entre sus límites (Milledge y Harvey, 2016; Marx et al., 2021). El mar de los sargazos era considerado como la fuente principal de las mareas de sargazo pelágico, no obstante, su concentración en la NERR comenzó a incrementar de tal forma que permitió la formación de un cinturón de algas de 20 millones de toneladas en Junio de 2018, duplicando su crecimiento en la zona nerítica cada 11 días (Franks et al., 2016; Louime et al., 2017; Wang et al., 2019; Thompson et al., 2020).

3. Causas probables de la proliferación de *Sargassum* spp.

Si bien la llegada de macroalgas pardas a las costas del Atlántico y el Caribe puede atribuirse a un fenómeno natural estacional, factores adicionales relacionados con las actividades antropogénicas han sido reportados como las causas principales de la proliferación excesiva de sargazo (Lapointe et al., 2014; Johns et al., 2020; Tritanes et al., 2021). Estas causas son inciertas y pueden implicar una combinación de factores ambientales. Sin embargo, se han establecido diferentes hipótesis que intentan explicar esta problemática; siendo el cambio climático global, la presencia del polvo atmosférico africano y la deforestación de la cuenca del Amazonas, las más aceptadas y discutidas por la comunidad científica.

3.1 Cambio climático global

La primera hipótesis atribuye el crecimiento descontrolado del sargazo al cambio climático, obligando al mar de los sargazos a moverse un poco más al sur y acercando a las algas al Mar Caribe (Sargeant, 2015; Louime et al., 2017). Se cree que los cambios en el flujo y distribución del sargazo están directamente relacionados con un movimiento abrupto de las corrientes oceánicas, el aumento de la temperatura del agua de mar y los vientos anormales provocados por este problema ambiental (Sissini et al., 2017; Chávez et al., 2020).

La temperatura es un factor abiótico importante que afecta a las actividades biológicas de las algas marinas, de hecho, se ha identificado una correlación entre los cambios en la temperatura del mar y las etapas de desarrollo y distribución del sargazo (Ogawa, 1985; Wu et al., 2022). El aumento de la temperatura promueve su crecimiento y proliferación, con un rango óptimo de

18-30 °C para especies como *Sargassum natans*, *Sargassum muticum* y *Sargassum patens* (Bui et al., 2018; Jouanno et al., 2021).

Por otra parte, la fuerte convergencia de los vientos alisios en el Atlántico Norte, en donde la velocidad promedio es de 5-6 m/s, promueve la acumulación de la macroalga entre los meses de Abril y Septiembre bajo la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Britannica, 2013; Skliris et al., 2022). La ZCIT es una zona estrecha de convección profunda y fuertes precipitaciones donde se unen los vientos de los hemisferios norte y sur (Skliris et al., 2022; Magaña-Gallegos et al., 2023); se caracteriza por tener una precipitación media anual de 1430.7 mm, evaporación media anual de 2148.7 mm y presiones atmosféricas bajas (900-1000 hPa) como consecuencia del movimiento ascendente inducido por la convergencia de los vientos (Žagar et al., 2011; de Medeiros et al., 2020).

Sánchez et al. (2018) justificaron esta conjetura con un mapeo de distribución a largo plazo de *Sargassum* mediante la comparación de regímenes hidrográficos contrastantes usando pruebas no paramétricas, concluyendo que el cambio climático alteró la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO), es decir, la variación térmica de la superficie del mar.

3.2 Polvo atmosférico africano

El polvo atmosférico africano, que representa la fuente de polvo más grande del mundo (Prospero et al., 2014), también se ha propuesto como una de las posibles causas para esta problemática. La capa de aire del Sahara está compuesta de arena, tierra y otros polvos que se elevan a la atmósfera desde el norte de África y es transportada hacia el Océano Atlántico (Djakouré et al., 2017). El transporte de polvo africano causa una degradación considerable de los suelos y al mismo tiempo, la sedimentación proporciona nutrientes (Fe, K y PO_4^{3-}) al mar, lo que facilita el crecimiento de sargazo (Moanga, 2015; Oxenford et al., 2015).

3.3 Deforestación de la cuenca del Amazonas, Brasil

Esta hipótesis atribuye la invasión del sargazo al exceso de nutrientes resultante de la deforestación de la cuenca del Amazonas en Brasil, lo que provoca que el río Amazonas dirija grandes cantidades de materia orgánica y nutrientes al mar, promoviendo el crecimiento excesivo de algas. Wang y Hu. (2019) sugirieron que el aumento en la deforestación de la selva amazónica en los últimos años, ha provocado la escorrentía de fertilizantes en el río Amazonas, generando una eutrofización a gran escala que permite la proliferación descontrolada de sargazo.

Si bien no se ha llegado a un consenso sobre la causa principal de la proliferación del sargazo, se puede priorizar una hipótesis con base en su sustento científico. En primera instancia, podemos descartar a la hipótesis #2 relacionada con el polvo atmosférico africano, ya que se ha demostrado que su aportación de nutrientes es significativamente menor a la de los ríos tropicales (Yu et al., 2015). Asimismo, el transporte de polvo africano ha disminuido de forma considerable desde su pico en la década de 1980, por lo que puede inferirse que no representa un factor de riesgo directo a la proliferación de *Sargassum* (Hsu et al., 2012).

Las hipótesis 1 y 3 parecen ser las más acertadas, por un lado, el cambio climático provoca el aumento de la temperatura del mar, lo que origina que el agua se vuelva más cálida y por consiguiente, las algas crezcan más rápido y con mayor espesor. Por otro, la descarga de nutrientes del río Amazonas ha llegado a tal punto que

se ha observado la formación de un pequeño conglomerado similar al “mar de los sargazos” en el este de Brasil (Gower y King, 2008).

La deforestación está ampliamente relacionada con el cambio climático, ya que al liberar cantidades masivas de gases de efecto invernadero, conduce a un aumento de la temperatura global terrestre y desencadena efectos negativos en los ecosistemas como el derretimiento de los polos, aumento del nivel del mar, acidificación de los océanos, aparición de fenómenos meteorológicos extremos, migraciones y extinción de especies (Alves de Oliveira et al., 2021; Wolff et al., 2021).

4. Impactos potenciales de la invasión de *Sargassum* spp.

La acumulación excesiva de sargazo en las costas del Caribe y África Occidental, ha provocado graves problemas socioeconómicos, ambientales y de salud pública. De hecho, se estima que alrededor de 20 millones de toneladas métricas de biomasa de sargazo puede acumularse frente a la costa del noreste de América del Sur y distribirse por todo el Caribe (Wang et al., 2019).

México, en particular, es uno de los países que más cantidad de sargazo ha recibido desde 2011; los depósitos máximos en el Caribe Mexicano alcanzaron niveles impresionantes en Septiembre de 2015 y Mayo de 2018, con una media de 10,000 toneladas métricas por día (García et al., 2020; Thompson et al., 2021). La recurrencia del sargazo en México puede deberse a su ubicación geográfica, ya que estas algas son trasladadas desde el cinturón de sargazo del Atlántico hasta la región del Caribe por la acción de corrientes marinas y flujo de aire.

4.1 Impactos socioeconómicos

Zonas como Barbados, República Dominicana y México han sido afectadas directamente por la llegada de sargazo, experimentando cancelaciones imprevistas durante la temporada alta de turismo. Estas regiones dependen casi por completo de la industria turística, por ejemplo, el corredor turístico de la costa del Caribe Mexicano recibe hasta 15 millones de visitantes anuales, aportando cerca del 3.5% del producto interno bruto del país (Chávez et al., 2020; OECD, 2020).

La acumulación de sargazo en el mar y la biomasa en descomposición presente en la orilla de las playas, afectan la comodidad y percepción de los turistas. Según lo reportado por Vinagre et al. (2019), hubo una caída significativa en las tasas de ocupación hotelera de Cancún y la Riviera Maya a partir del evento masivo de sargazo en 2018.

Ahora bien, las pérdidas económicas no solo se centran en la disminución de turismo en la región, sino también en la limpieza de las playas y el desarrollo inmobiliario. Las instituciones gubernamentales del Caribe han autorizado fondos de emergencia para financiar campañas de limpieza, a modo de ejemplo, el gobierno mexicano invirtió alrededor de 17 millones de dólares y contrató a más de 5000 trabajadores temporales para la remoción de 522,226 toneladas de sargazo en 2018 (Hoang et al., 2016; Espinoza, 2020). La remoción de sargazo pelágico en las playas involucra el uso de equipo costoso que va desde los 82,000 hasta los 200,000 dólares, ver Tabla 1.

Tabla 1. Equipo utilizado para la limpieza de playas en Cancún, Quintana Roo (México).

Equipo	Costo (USD)	Referencia
Maquinaria	82,000	Chirinas et al.
Barreras y anclas	*220-330 por metro	(2020); Chávez et al. (2020).
Embarcaciones	200,000-1,000,000	

Nota: *El precio de las barreras y anclas no incluye el costo de instalación.

Por otra parte, el desarrollo inmobiliario se ha convertido en una fuente importante de ingresos en estas zonas y se ha visto afectado por esta situación; los famosos “tiempos compartidos” que consisten en condominios de lujo ubicados en sitios turísticos, tuvieron una baja considerable durante el último lustro. Debido a las enormes pérdidas económicas y la preocupación global de este fenómeno, naciones caribeñas han convocado reuniones para establecer medidas de mitigación, tal es el desconcerto, que la Isla de Tobago ha declarado un estado de desastre natural (Louime et al., 2017).

Se debe considerar que si el turismo continúa disminuyendo y el desarrollo inmobiliario sigue siendo afectado, se desencadenará una grave situación de desempleo en la región, lo que podría ocasionar otros problemas sociales como el aumento de la pobreza y delincuencia.

4.2 Impactos ambientales

Bajo ciertas condiciones, la presencia de algas como *Sargassum* spp. puede ayudar a combatir la erosión de las playas y actuar como abono natural que favorezca el crecimiento de la vegetación debido a la introducción de nutrientes al medio marino (Bruun, 1983; Williams y Feagin, 2010; Chávez et al., 2020). De igual manera, la biomasa de sargazo flotante en el mar puede ser de utilidad para determinadas especies, ya que proporciona alimento y refugio (Huffard et al., 2014; Chávez et al., 2020).

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 importancia de los pastos marinos radica en su sistema de raíces y rizomas subterráneos, los cuales le permiten formar amplias praderas submarinas útiles para estabilizar los sedimentos, mantener la claridad del agua, ayudar en el reciclaje de nutrientes y sostener a un amplio número de especies (van Tussenbroek et al., 2017).

La proliferación de sargazo puede alterar el anidamiento de las tortugas marinas, dificultando el movimiento de las crías desde la orilla hasta el mar y ocasionar cambios en las redes alimenticias que impacten el equilibrio de la estructura trófica (López et al., 2008; Chávez et al., 2020).

Respecto a la descomposición de esta macroalga, se han reportado efectos relacionados con la alteración química del agua y riesgos potenciales de contaminación ambiental por metales pesados, los cuales pueden suscitar la muerte de ciertas especies de peces susceptibles a los bajos niveles de oxígeno y la afectación de los parámetros bioquímicos de los organismos a causa de la bioacumulación del contaminante (Hoang et al., 2016; Kumari et al., 2016; Rodríguez et al., 2020).

Los lixiviados generados por la descomposición de sargazo pueden contribuir a la contaminación por metales potencialmente tóxicos una vez que son drenados en el mar y vertidos en depósitos terrestres inadecuados (Davis et al., 2000; Rodríguez-Martínez et al., 2020). El contenido de metales pesados en el género *Sargassum* varía según las condiciones ambientales, pH, sustancias orgánicas del medio y la especie (Upadhyay, 2022), ver Tabla 2. De acuerdo a la mayoría de los estudios experimentales, el arsénico es el metaloide más común en especies de sargazo debido a su capacidad de ser absorbido rápidamente y en grandes cantidades (Devault et al., 2020; Dassié et al., 2022).

4.3 Impactos a la salud pública

A pesar de que no se ha demostrado un efecto alergénico o venenoso en estas algas, se han estudiado otros efectos potenciales a la salud humana.

En primer lugar, se debe tomar en cuenta el hecho de que la descomposición de cualquier tipo de biomasa produce gases como el ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y amoníaco, que pueden ser tóxicos si se tiene una exposición constante a ellos (Chávez et al., 2020). La exposición a estos gases puede provocar irritación de las vías respiratorias superiores, náuseas, dolor de cabeza, confusión y en situaciones extremas; lesiones pulmonares, neurológicas y cardiovasculares (Resiere et al., 2020). En el caso del H₂S, su nivel de toxicidad depende de la dosis inhalada y la duración de la exposición, de tal modo que si la concentración alcanza los 300 mg/L, paraliza el nervio olfativo y origina la pérdida de conciencia (Louime et al., 2017).

El sargazo tiene la capacidad de absorber metales y otros elementos tóxicos en altas concentraciones, provocando enfermedades como la disfunción gastrointestinal y renal, trastornos del sistema nervioso, daño vascular, lesiones cutáneas, defectos de nacimiento y cáncer (Hernández et al., 2018; Balali-Mood et al., 2021). La preocupación ante la presencia de metales pesados y otros contaminantes en el ecosistema marino se centra en la capacidad que tienen de biomagnificarse; estos elementos contaminan el agua y se acumulan en las plantas y tejidos de las especies, alcanzando concentraciones mayores a medida que se avanza en la cadena alimenticia.

5. Avances y desafíos en la valorización del sargazo

El sargazo es de interés porque llega en grandes cantidades a diferentes regiones del mundo y tiene un alto potencial de utilizarse en la extracción de compuestos fenólicos, alginatos, terpenoides, nutrientes y polisacáridos que permiten que pueda ser utilizado en diversas industrias (Orozco et al., 2022). En la Tabla 3 se enlistan algunas de las empresas más destacadas que han utilizado esta macroalga para la obtención de productos de alto valor.

El aprovechamiento de *Sargassum* spp. contribuirá al crecimiento del mercado algal y biotecnológico a una tasa anual compuesta del 2.3% y con un valor total de ≈3.9 billones de dólares para 2030 (GVR, 2023; Kumar et al., 2021). Entre las numerosas aplicaciones de la biomasa de sargazo que se han reportado, se encuentran los productos agrícolas como fertilizantes y composta, cosmeceúticos, farmacéuticos, papel, bioplásticos y bioenergéticos (Amador et al., 2021), ver Figura 2.

Tabla 2. Concentraciones de metales pesados en especies del género *Sargassum*.

Especie analizada	País	As	Cd	Cu	Pb	Zn	Referencia
<i>Sargassum</i> spp.	México	8.81 x 10 ⁻²	1.82 x 10 ⁻³	N.D	2.32 x 10 ⁻⁵	N.D	Bonilla et al. (2022)
<i>S. fluitans</i> <i>S. natans</i>	Francia	5.4-156.1	0.18-10.63	0.9-68.5	0.08-4.37	<1.0-44.8	Devault et al. (2020)
<i>S. filipendula</i> <i>S. vulgare</i>	Trinidad y Tobago	N.D	1.77-3.65	4.33-13.30	4.61-12.11	12.61-194.15	Seepersaud et al. (2018)
<i>S. vachellianum</i>	China	23.8 ± 3.9	8.48 ± 0.3	8.59 ± 0.2	1.9 ± 0.4	81 ± 12.9	Pan et al. (2018)
<i>S. swartzii</i>	India	N.D	0.311	0.03-0.291	0.165	0.019-5.537	Kaviarasan et al. (2018)
<i>S. fusiforme</i>	Egipto	N.D	0.79 ± 0.02	1.55 ± 0.07	0.43 ± 0.03	13.4 ± 0.5	Ismail et al. (2017)
<i>S. elegans</i>	India	N.D	N.D	7.43-43.2	N.D	7.16-23.33	Magura et al. (2016)

Nota: Los valores se expresan en mg/kg⁻¹, donde N.D= no determinado.

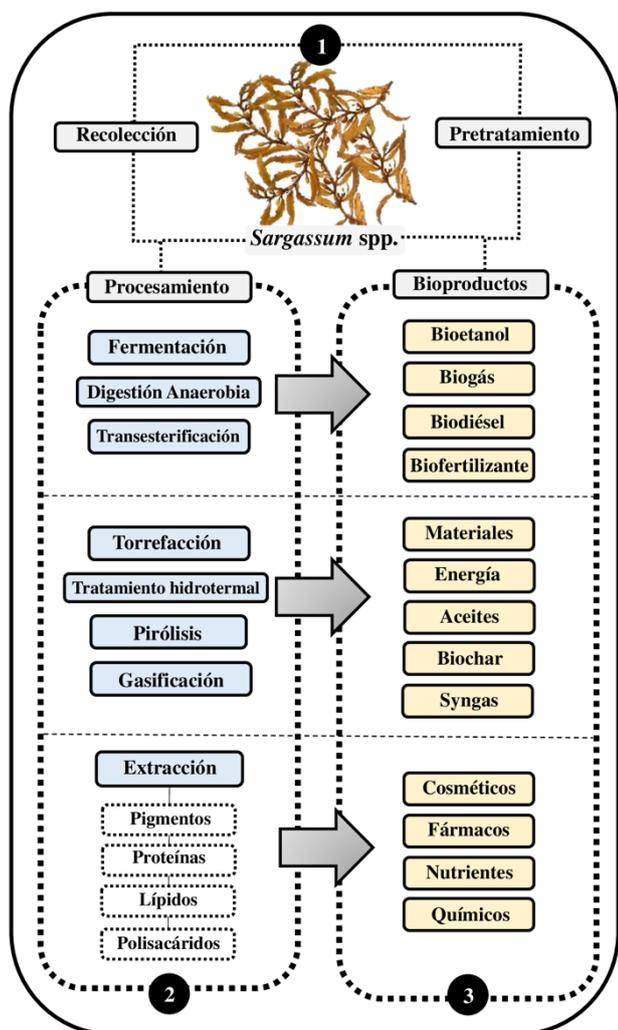


Figura 2. Diagrama de flujo de las vías de producción en *Sargassum* spp., donde (1) proceso upstream, (2) proceso midstream y (3) proceso downstream. Fuente: Elaboración propia, con información de Rodríguez-Mata et al. (2023), Tamayo-Román et al. (2022), Kostas et al. (2021), Hernández-Melchor et al. (2020), López-Pérez et al. (2019, 2020) y Khoo et al. (2019).

Las investigaciones actuales enfocadas en establecer soluciones eficientes para aprovechar la biomasa de sargazo, han abordado una serie de técnicas y métodos que demuestran que esta macroalga es una excelente alternativa para la obtención de productos de valor agregado debido a sus tasas rápidas de crecimiento, altos rendimientos, ausencia de requisitos terrestres para su cultivo y la presencia de pocos compuestos similares a la lignina que facilitan el rompimiento de la pared celular y la degradación de la biomasa para su tratamiento (Oliveira et al., 2015; Ramachandra y Hebbale, 2020; Thompson et al., 2020).

El descubrimiento de las propiedades bioquímicas del sargazo ha permitido la conversión de esta situación emergente en oportunidades, ayudando a contrarrestar algunos de los problemas ambientales provocados por el cambio climático. De manera particular, la obtención de biocombustibles a partir de esta macroalga ha sido relevante en la última década porque ofrece seguridad energética y genera menos emisiones de gases contaminantes, lo que representa una alternativa viable al consumo insostenible de los combustibles fósiles responsables de más del 75% de las emisiones de gases de efecto invernadero y casi el 90% de dióxido de carbono (Baltazar et al., 2020; Savage et al., 2020; del Río et al., 2021).

Si bien se han desarrollado proyectos de mitigación y aprovechamiento del sargazo para la obtención de productos de interés comercial e industrial, estos han resultado insuficientes debido a la falta de información exploratoria, escalabilidad industrial y cooperación internacional (Lange et al., 2020; Robledo et al., 2021). Por lo tanto, los principales desafíos de estos bioprocesos incluyen: (a) la falta de normativa para la cosecha, transporte y explotación de sargazo, (b) la falta de enfoque integral para su valorización, (c) la falta de modelos de negocios enfocados en su procesamiento y (d) el desarrollo de nuevas tecnologías que sean económicamente viables, ambientalmente sostenibles y técnicamente eficientes (Miranda et al., 2021).

La orientación de procesos biotecnológicos hacia una economía circular parece ser una alternativa de solución a estos desafíos; trayendo consigo innovación tecnológica, ahorro en productos de consumo, creación de oportunidades laborales, productividad, rentabilidad y sostenibilidad (Ubando et al., 2020).

Tabla 3. Empresas e instituciones que utilizan sargazo para la obtención de bioproductos.

Industria	País	Empresa / Institución	Productos
Agrícola	México	Salgax, Dianco, C-Combinator, Palau Bioquim	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fertilizantes ▪ Composta ▪ Estimulantes
	Puerto Rico	Carbonwabe	
	Estados Unidos	Algas Organics, Carbonwabe	
	Jamaica	Awganic Feeds	
Farmacéutica	México	IPN, CICY, Grupo Metco, Alquimar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compuestos bioactivos ▪ Aditivos alimenticios ▪ Neuroprotectores ▪ Analgésicos ▪ Antioxidantes ▪ Antibacterianos
	Corea del Sur	Universidad de Wenzhou y Chonham	
	India	The Seaweed Company	
	Holanda		
	Irlanda		
	Marruecos		
	Estados Unidos	Universidad de Florida del Sur	
Trinidad y Tobago	Universidad de West Indies		
Cosmética	México	ITESM, Salgax	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cremas corporales ▪ Emulsionantes ▪ Maquillaje ▪ Tratamientos capilares
	Francia	Algaia	
	Estados Unidos	SeaBalance 2000 by Carbonwabe	
	Puerto Rico	Carbonwabe	
	Barbados	Oasis Laboratory	
Biotecnológica	México	Energryn, Abaplas, CICY	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Biocombustibles ▪ Pellets ▪ Biochar ▪ Bioplásticos
	Holanda	Damen / Maris Group	
	Francia	Mécameto, SARA, Algopack	
	Barbados	Biogen Idec	
	Israel		
	República Dominicana	EnergyAlgae, AlgaeNova	
Textil y papelera	México	Salgax, Sargánico, Renovare, Sargazbox	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Papel artesanal ▪ Calzado ▪ Cuadernos ▪ Carpetas
	Curazao	Golden Tide Project	
	Francia	Sargasse Project	
Constructora	México	Sargablock	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tableros de resina ▪ Bloques ▪ Asfalto
	Barbados	Biogen Idec	
	Francia	The Marine Box	

Fuente: Elaboración propia con información obtenida de Desrochers et al. (2022) y Miranda et al. (2021).

6. Conclusiones

La invasión creciente de sargazo en las costas del Caribe ha provocado diversos problemas económicos, ambientales y sociales, así como una preocupación global por mitigar esta situación. Todavía no existe un consenso científico sobre el origen de esta problemática. Sin embargo, se ha establecido que el cambio climático global y las actividades humanas son los principales impulsores.

A medida que el cambio climático y las actividades humanas como la deforestación sigan persistiendo, las emisiones de gases de efecto invernadero se incrementarán y conducirán a un aumento de la temperatura global, lo que provocará la llegada de más sargazo y desencadenará otros efectos negativos en el ecosistema.

Si logramos contar con tecnología que permita brindar información más precisa sobre la ubicación, tiempo y cantidad esperada de sargazo y al mismo tiempo, se diseñan procesos integrados que faciliten la generación de productos de interés y

fomenten el desarrollo sostenible, podremos controlar de forma efectiva esta situación. El sargazo tiene un alto potencial de ser valorizado en productos de interés, que van desde la creación de bloques de construcción hasta bioplásticos y bioenergéticos. No obstante, su industrialización y comercialización ha quedado inconclusa a causa de la baja rentabilidad industrial y falta de coordinación y regulación.

La mayoría de los esfuerzos de valorización de sargazo se llevan a cabo a escala piloto, ya que su aplicación en sistemas reales aún debe evaluarse; por lo que es necesario el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan recuperar y aprovechar múltiples productos a la vez, aumentando la factibilidad del proceso.

Por otra parte, la coordinación y regulación de las instituciones gubernamentales sobre los reglamentos de recolección y tratamiento del sargazo, juegan un papel indispensable en el desarrollo de estrategias de gestión que permitan enfrentar el impacto de las mareas de esta macroalga en áreas costeras sensibles.

Por consiguiente, es fundamental un trabajo colaborativo que garantice la confiabilidad de las herramientas de detección y pronóstico, así como el desarrollo de productos innovadores que posibiliten el aprovechamiento de la biomasa de sargazo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por las facilidades prestadas y al CONAHCyT por la beca de Doctorado otorgada (CVU #1234673).

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

Referencias

- Alves de Oliveira, B. F., Bottino, M. J., Nobre, P., & Nobre, C. A. (2021). Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 207.
- 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
- Aparicio, E., Rodríguez, R., Pinales, C., Loreda, A., Robledo, A., Aguilar, C., et al. (2021). High-pressure technology for *Sargassum* spp biomass pretreatment and fractionation in the third generation of bioethanol production. *Bioresour. Technol.* 329:124935. doi: 10.1016/j.biortech.2021.124935.
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in pharmacology*, 227.
- Baltazar, O. S. C., Pérez, P. L., Villalobos, J. M. G., Aguilar-López, R., & Caballero, V. P. (2020). Diseño de un nuevo controlador no lineal con aplicación al modelo de un biorreactor para producción de microalgas. *Res. Comput. Sci.*, 149(10), 137-148
- Barreiro, F., Gómez, M., Lastra, M., López, J & De La Huz, R. (2011). Annual cycle of wrack supply to sandy beaches: effect of the physical environment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* (433), pp 65–74. doi: 10.3354/meps09130.
- Bonilla Loaiza, A. M., Rodríguez-Jasso, R. M., Belmares, R., López-Badillo, C. M., Araújo, R. G., Aguilar, C. N., ... & Ruiz, H. A. (2022). Fungal Proteins from Sargassum spp. using solid-state fermentation as a green bioprocess strategy. *Molecules*, 27(12), 3887.
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2013). *trade wind*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/trade-wind>
- Brun, P. (1983). Beach scraping—is it damaging to beach stability? *Coastal Engineering*, 7(2), 167-173.
- Bui, H. T. T., Luu, T. Q., & Fotedar, R. (2018). Effects of temperature and pH on the growth of *Sargassum linearifolium* and *S. podacanthum* in potassium-fortified inland saline water. *Am J Appl Sci*, 15, 186-97.
- Chirinas, J, Ortíz, A, Jáuregui, D, Luna, A, Cardeña, L & May, R. (2020) (Hoteliers and Businessman, Puerto Morelos, Quintana Roo, Mexico). Personal communication.
- 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.
- Dassié, E. P., Gourves, P. Y., Cipolloni, O., Pascal, P. Y., & Baudrimont, M. (2022). First assessment of Atlantic open ocean Sargassum spp. metal and metalloid concentrations. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-11.
- Davis, T. A., Volesky, B., & Vieira, R. H. S. F. (2000). Sargassum seaweed as biosorbent for heavy metals. *Water research*, 34(17), 4270-4278.
- Del Río, P., Gullón, B., Pérez, A., Román, A., & Garrote, G. (2021). Microwave hydrothermal processing of the invasive macroalgae
- Del Río, P., Domínguez, E., Domínguez, V., Román, A., Domingues, L. & Garrote, G. (2019). Third generation bioethanol from invasive macroalgae: *Sargassum muticum* using autohydrolysis pretreatment as first step biorefinery. *Renew. Energy* 141, 728–735. doi: 10.1016/j.renene.2019.03.08
- de Medeiros, R. M., Filho, M. C., de França, M. V., de Holanda, R. M., Piscoya, V. C., de Freitas, J. R., & de Araújo Filho, R. N. (2020). Characterization of the Average Wind Speed in the Municipality of Teresina-PI.
- Desrochers, A., Cox, S. A., Oxenford, H. A., & Van Tussenbroek, B. (2022). Pelagic sargassum-A guide to current and potential uses in the Caribbean.
- Devault, D. A., Pierre, R., Marfaing, H., Dolique, F., & Lopez, P. J. (2021). Sargassum contamination and consequences for downstream uses: a review. *Journal of Applied Phycology*, 33, 567-602.
- Djakouré, S., Araujo, M., Hounsou-Gbo, A., Noriega, C., & Bourlès, B. (2017). On the potential causes of the recent Pelagic Sargassum blooms events in the tropical North Atlantic Ocean. *Biogeosciences Discussions*, 1-20.
- Espinoza, L. A., & Li, J. J. (2020). El riesgo del sargazo para la economía y turismo de Quintana Roo y México. *BBVA Research*, 20, 2-33.
- Franks, J. S., Johnson, D. R., & Ko, D. S. (2016). Pelagic sargassum in the tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*, 27(1), SC6-SC11
- García-Sánchez, M., Graham, C., Vera, E., Escalante-Mancera, E., Álvarez-Filip, L., & van Tussenbroek, B. I. (2020). Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*, 167, 103275.
- Gavio, B., Rincon-Diaz, M. N., & Santos-Martinez, A. (2015). Massive quantities of pelagic Sargassum on the shores of San Andres Island, Southwestern Caribbean. *Acta Biológica Colombiana*, 20(1), 239-241.
- Gower, J., & King, S. (2008). Satellite images show the movement of floating Sargassum in the Gulf of Mexico and Atlantic Ocean. *Nature Precedings*.
- Grand View Research. (2023). Biotechnology market size to reach \$3.88 trillion by 2030. Grand View Research Inc., San Francisco, obtained from: <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-biotechnology-market>.
- Grand View Research. (2023). Commercial Seaweed Market Size, Share & Trends Analysis Report. Grand View Research Inc., San Francisco, obtained from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/commercial-seaweed-market>.
- Guiry, M. & Guiry, G. (2022). *AlgaeBase*. Worldwide electronic publication, National University of Ireland, Galway, en línea: <https://www.algaebase.org>
- Guldberg, O & Bruno, J. (2010). The impact of climate change on the worlds marine ecosystems. *Science*. (328), pp.1523–1528. doi: 10.1126/science.1189930.
- 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), 20200019.
- Hernández-Melchor, D. J., López-Pérez, P. A., Carrillo-Vargas, S., Alberto-Murrieta, A., González-Gómez, E., & Camacho-Pérez, B. (2018). Experimental and kinetic study for lead removal via photosynthetic consortia using genetic algorithms to parameter estimation. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 21286-21295.
- 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.
- Hsu, N. C., Gautam, R., Sayer, A. M., Bettenhausen, C., Li, C., Jeong, M. J & Holben, B. N. (2012). Global and regional trends of aerosol optical depth over land and ocean using SeaWiFS measurements from 1997 to 2010. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(17), 8037-8053.
- Huffard, C. L., Von Thun, S., Sherman, A. D., Sealey, K., & Smith, K. L. (2014). Pelagic Sargassum community change over a 40-year period: temporal and spatial variability. *Marine Biology*, 161(12), 2735-2751.
- Ismail, M. M., El Zokm, G. M., & El-Sayed, A. A. (2017). Variation in biochemical constituents and master elements in common seaweeds from Alexandria Coast, Egypt, with special reference to their antioxidant activity and potential food uses: prospective equations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 1-17.
- Jouanno, J., Benschila, R., Berline, L., Soulié, A., Radenac, M. H., Morvan, G., & Mallet, M. (2021). A NEMO-based model of Sargassum distribution in the tropical Atlantic: description of the model and sensitivity analysis (NEMO-Sarg1.0). *Geoscientific Model Development*, 14(6), 4069-4086.
- Johnson, D., Ko, J., Franks, Moreno, P & Sanchez, G. (2013). The sargassum invasion of the Eastern Caribbean and dynamics of the Equatorial North Atlantic. *Proceedings of the 65th Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, Nov. (5-9), Santa Marta, Colombia, pp. 102-103.
- Johns, E. M., Lumpkin, R., Putman, N. F., Smith, R. H., Muller-Karger, F. E., Rueda-Roa, D. T & Werner, F. E. (2020). The establishment of a pelagic Sargassum population in the tropical Atlantic: biological consequences of a basin-scale long distance dispersal event. *Progress in Oceanography*, 182, 102269.

- Kaviarasan, T., Gokul, M. S., Henciya, S., Muthukumar, K., Dahms, H. U., & James, R. A. (2018). Trace metal inference on seaweeds in Wandoor area, Southern Andaman Island. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 100, 614-619.
- Kerrison, P. (2016). Algae as crops seaweed. In *Encyclopedia of Applied Plant Sciences* (pp. 148-152). Elsevier Academic Press, New York.
- Khoo, C. G., Dasan, Y. K., Lam, M. K., & Lee, K. T. (2019). Algae biorefinery: Review on a broad spectrum of downstream processes and products. *Bioresource technology*, 292, 121964.
- 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, 111553.
- Komatsu, T et al., (2007). Distribution of drifting seaweeds in eastern East China Sea, *J. Mar. Syst.* (67), pp. 245-252. doi:10.1016/j.jmarsys.2006.05.018.
- Kumar, D., Pugazhendhi, A., Bajhaiya, A. K., & Gugulothu, P. (2021). Biofuel production from Macroalgae: present scenario and future scope. *Bioengineered*, 12(2), 9216.
- Lange, L., Bak, U., Hansen, S., Gregersen, O., Harmsen, P., Karlsson, E., et al. (2020). "Opportunities for seaweed biorefinery," in *Sustainable Seaweed Technologies*, eds M. D. Torres, S. Kraan, and H. Dominguez (Salt Lake City, UT: Elsevier Inc.), 3-31.
- 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.
- López-Pérez, P.A., López, R. A., & Femat, R. (2020). *Control in bioprocessing: Modeling, estimation and the use of soft sensors*. John Wiley & Sons.
- López-Pérez, P. A., Castillo-Baltazar, O. S., Aguilar-López, R., Caballero, V. P., & Castañeda, E. V. (2019). Virtual sensors for biofuels production: a brief mathematical description for synthesis of algorithms. *Comptes Rendus de l'Académie Bulgare des Sciences*, 72(10), 1383-1392.
- López-Pérez, P., 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.
- López, C. B., Dortch, Q., Jewett, E. B., & Garrison, D. (2008). Scientific assessment of marine harmful algal blooms.
- Louime, C., Fortune, J., & Gervais, G. (2017). Sargassum invasion of coastal environments: a growing concern. *American Journal of Environmental Sciences*, 13(1), 58-64.
- Magaña-Gallegos, E., Villegas-Muñoz, E., Salas-Acosta, E. R., Barba-Santos, M. G., Silva, R., & van Tussenbroek, B. I. (2023). The effect of temperature on the growth of holopelagic sargassum species. *Phycology*, 3(1), 138-146.
- Magura, J., Moodley, R., & Jonnalagadda, S. B. (2016). Chemical composition of selected seaweeds from the Indian Ocean, KwaZulu-Natal coast, South Africa. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 51(8), 525-533.
- Marx, U. C., Roles, J., & Hankamer, B. (2021). Sargassum blooms in the Atlantic Ocean—From a burden to an asset. *Algal Research*, 54, 102188.
- 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., & Harvey, P. J. (2016). Golden tides: problem or golden opportunity? The valorisation of Sargassum from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(3), 60.
- 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*.
- Moanga, D. A. (2015). *Karenia brevis Hot Spots in the West Florida Shelf and their Associated Socio-economic Implications* (Doctoral dissertation, University of Miami).
- Ogawa, H. (1985). The maturation and early development of Sargassaceae plants and the effects of environment to them. *Gekkan Kaiyo-Kagaku*, 17, 26-31.
- Oliveira, J., Alves, M., & Costa, J. (2015). Optimization of biogas production from Sargassum sp. using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. *Bioresour. Technol.* 175, 480-485. doi: 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*.
- Orr, M., Zimmer, M., Jelinski, D & Mews, M. (2005). Wrack deposition on different beach types: spatial and temporal variation in the pattern of subsidy. *Ecology*. (86), pp 1496-1507. doi: 10.1890/04-1486.
- Oxenford, H. A., Johnson, D., Cox, S. A., & Franks, J. (2019). Report on the Relationships between Sargassum Events, Oceanic Variables and Dolphinfish and Flyingfish Fisheries.
- OECD. *Tourism Trends and Policies* (2020); OECD: Paris, France, 2020. Available online: <https://doi.org/10.1787/6b47b985-en>.
- Pan, Y., Wernberg, T., de Bettignies, T., Holmer, M., Li, K., Wu, J., ... & Xiao, X. (2018). Screening of seaweeds in the East China Sea as potential bio-monitors of heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 16640-16651.
- Pecl, G., Araújo, M., Bell, J., Blanchard, J., Bonebrake, T., Chen., & Williams, S. (2017). Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(6332), doi: 10.1126/science.aai9214.
- Prospero, J. M., Collard, F. X., Molinié, J., & Jeannot, A. (2014). Characterizing the annual cycle of African dust transport to the Caribbean Basin and South America and its impact on the environment and air quality. *Global Biogeochemical Cycles*, 28(7), 757-773.
- 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
- Ramachandra, T. V., & Hebbale, D. (2020). Bioethanol from macroalgae: Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109479
- 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.
- 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.
- Rodríguez, R., Medina, A., Blanchon, P., Monroy, L., Almazán, A., Delgado, B., Vásquez, 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.
- Robledo, D., Vázquez, E., Freile, ., 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., Torrecano-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.
- Sánchez, M., Graham, C., Vera, E., Escalante-Mancera, E., Álvarez-Filip, L & van Tussenbroek, B. (2020). Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic Sargassum species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*, 167, 103275.
- Sánchez-Rubio, G., Perry, H., Franks, J. S., & Johnson, D. R. (2018). Occurrence of pelagic Sargassum in waters of the US Gulf of Mexico in response to weather-related hydrographic regimes associated with decadal and interannual variability in global climate. *Fishery Bulletin*, 116(1).
- Sargeant, P.G., (2015). What you need to know about Sargassum invading the Caribbean, en línea: <https://www.linkedin.com/pulse/what-you-need-know-sargassum-invading-caribbean-sargeant-gsm>.
- Savage, E., Nagle, N., Laurens, L. & Knoshaug, E. (2020). Nitrogen derived from combined algal processing supports algae cultivation for biofuels. *Algal Res.* 50:101987. doi: 10.1016/j.algal.2020.101987.
- Seepersaud, M. A., Ramkissoon, A., Seecharan, S., Powder-George, Y. L., & Mohammed, F. K. (2018). Environmental monitoring of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Sargassum filipendula and Sargassum vulgare along the eastern coastal waters of Trinidad and Tobago, West Indies. *Journal of Applied Phycology*, 30, 2143-2154.
- Sissini, M. N., de Barros Barreto, M. B. B., Széchy, M. T. M., De Lucena, M. B., Oliveira, M. C., Gower, J & Horta, P. (2017). The floating Sargassum (Phaeophyceae) of the South Atlantic Ocean—likely scenarios. *Phycologia*, 56(3), 321-328.
- Skliiris, N., Marsh, R., Appeaning Addo, K., & Oxenford, H. (2022). Physical drivers of pelagic Sargassum bloom interannual variability in the Central West Atlantic over 2010-2020. *Ocean Dynamics*, 72(6), 383-404.
- Tamayo-Román, E. D., Ordaz-Oliver, J. P., López-Pérez, P. A., González-Viveros, I. & Hernández-Hernández, J. L. (2022). Observador robusto de orden reducido aplicado a un biodigester. *Páidi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 10(Especial3), 48-56.
- Thompson, T., Young, B & Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from Caribbean pelagic Sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere* 275:130035. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.130035.

- 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.
- Ubando, A. T., Felix, C. B., & Chen, W. H. (2020). Biorefineries in circular bioeconomy: A comprehensive review. *Bioresource technology*, 299, 122585.
- Upadhyay, R. (2022). Heavy metals in our ecosystem. In *Heavy Metals in Plants Physiological to Molecular Approach* (pp. 1-15). CRC Press.
- UNEP. (2018). *Sargassum White Paper - Sargassum outbreak in the Caribbean: Challenges, Opportunities and Regional Situation*. Panama: UNEP.
- Van Tussenbroek, B., Arana, H, Rodríguez-Martínez, R., Espinoza, J., Canizales, H, González, C & Collado, L. (2017). Severe impacts of brown tides caused by Sargassum spp. on near-shore Caribbean seagrass communities. *Marine pollution bulletin*, 122(1-2), 272-281.
- Vinagre, F., Zamacona, A., & Casseb, T. (2019). Sargassum: Another Bump in Tourism. *Credit Suisse: Mexico City, Mexico*, 12.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B & Montoya, J. (2019). The great Atlantic Sargassum belt. *Science*. (365), pp 83–87. doi: 10.1126/science.aaw7912.
- Williams, A., & Feagin, R. (2010). Sargassum as a natural solution to enhance dune plant growth. *Environmental management*, 46(5), 738-747.
- Wolff, N. H., Zeppetello, L. R. V., Parsons, L. A., Aggraeni, I., Battisti, D. S., Ebi, K. L., & Spector, J. T. (2021). The effect of deforestation and climate change on all-cause mortality and unsafe work conditions due to heat exposure in Berau, Indonesia: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(12), e882-e892.
- Wu, T., Xia, L., Zhuang, M., Pan, J., Liu, J., Dai, W & Qin, Y. (2022). Effects of Global Warming on the Growth and Proliferation of Attached Sargassum horneri in the Aquaculture Area near Gouqi Island, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 9.
- Yanagisawa, M., Kawai, S., & Murata, K. (2013). Strategies for the production of high concentrations of bioethanol from seaweeds: production of high concentrations of bioethanol from seaweeds. *Bioengineered*, 4(4), 224-235.
- Yeh, Y., Libatique, M., Liao, Z., Nan, F & Lee, M. (2021). Environmental factors impact the early life stages of Sargassum ilicifolium in laboratory. (56). doi: 10.1016/j.algal.2021.102306.
- Žagar, N., Skok, G., & Tribbia, J. (2011). Climatology of the ITCZ derived from ERA Interim reanalyses. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D15).