

Valorización de la fracción sólida de la biomasa de sargazo, mediante extracción sólido – líquido de compuestos de valor agregado y su aprovechamiento como bioenergético.

Israel de Jesús Balderas-Caballero ¹, Norma Alejandra Vallejo-Cantú ¹, Juan Manuel Méndez-Contreras ¹, Erik Samuel Rosas-Mendoza ² y Alejandro Alvarado-Lassman ^{1,*}

¹ Laboratorio de Ambiental I y II, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.

² CONACYT-Tecnológico Nacional de México/ Instituto Tecnológico de Orizaba, Orizaba, Veracruz, México.

* Autor de correspondencia: alejandro.al@orizaba.tecnm.mx

Desarrollo Sustentable (Gestión y aprovechamiento de residuos sólidos). **Ponencia Presencial.**

Recibido: 16 de junio de 2023 Aceptado: 5 de septiembre de 2023 Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: En la presente investigación se valoriza el sargazo mediante dos aplicaciones con la finalidad de resolver problemas ambientales asociados a su arribo masivo a las costas del Caribe Mexicano. Para lograr lo anterior primero se realizó una clasificación y caracterización de las diferentes especies de sargazo en playa delfines de la ciudad de Cancún, encontrándose las especies *S. fluitans* III, *S. natans* I y *S. natans* VIII en proporciones de 84, 8 y 8 % respectivamente del total de la biomasa. Se encontró que la mayor retención de humedad fue en la especie *S. natans* I (94.46 ± 2.04 %). En SV no hubo diferencia significativa debido a que las tres especies presentaron valores similares (>80 %). El mayor contenido de proteína (5.81 ± 0.41 %) fue en *S. natans* I. La fibra en las tres especies fue entre 16 – 22 %. El porcentaje de carbohidratos presente fue de 44 – 51 % en la biomasa. *S. fluitans* III y *S. natans* VIII fueron las especies con mayor contenido de minerales 109410 y 97077 mg/Kg respectivamente. A continuación, se realizó la extracción del alginato de sodio por medio de extracción sólido-líquido obteniéndose rendimientos entre 22.76 ± 1.17 – 27.45 ± 0.96 % W/W en las especies *S. natans* y *S. fluitans* mediante un pretratamiento químico a 60 °C y un tiempo de 4 h. El residuo sólido remanente después de la extracción de alginato de sodio fue sometido a digestión anaerobia (DA) obteniéndose rendimientos entre 220 ± 6.50 mL de biogás/ g SV y 450 ± 3.30 mL de biogás/ g SV. En la DA de la fracción sólida de sargazo en fresco fue de la generación de biogás producido en las muestras de *S. natans* I, *S. natans* VIII y *S. fluitans* III fue de 1152 ± 5.05 mL, 830 ± 4.64 mL y 1090 ± 7.0 mL de biogás/ g SV respectivamente.

Palabras clave: Biomasa sólida de Sargazo; *S. natans*; *S. fluitans*; Alginato; Digestión anaerobia.

Valorization of the solid fraction of sargassum biomass through solid-liquid extraction of value-added compounds and its use as biofuel.

Abstract: In this research, sargassum is valorized through two applications in order to solve environmental problems associated with its massive arrival to the coasts of the Mexican Caribbean. To achieve the above, first a classification and characterization of the different species of sargassum was carried out on Dolphin Beach in the city of Cancun, finding the species *S. fluitans* III, *S. natans* I and *S. natans* VIII in proportions of 84, 8 and 8 %, respectively, of the total biomass. The highest moisture retention was found in the species *S. natans* I (94.46 ± 2.04 %). In SV there was no significant difference because the three species presented similar values (>80 %). The highest protein content (5.81 ± 0.41 %) was in *S. natans* I. Fiber in the three species was between 16 - 22 %. The percentage of carbohydrates present was 44 - 51 % in the biomass. *S. fluitans* III and *S. natans* VIII were the species with the highest mineral content 109410 and 97077 mg/kg respectively. Next, sodium alginate extraction was performed by solid liquid extraction obtaining yields between 22.76 ± 1.17 - 27.45 ± 0.96 % w/w in *S. natans* and *S. fluitans* species by chemical pretreatment at 60 °C and time of 4 h. The solid residue remaining after sodium alginate extraction was subjected to anaerobic digestion (AD) obtaining yields between 220 ± 6.50 mL biogas/ g SV and 450 ± 3.30 mL biogas/ g SV. In the DA of the solid fraction of fresh sargassum, the generation of biogas produced in the samples of *S. natans* I, *S. natans* VIII and *S. fluitans* III was 1152 ± 5.05 mL, 830 ± 4.64 mL and 1090 ± 7.0 mL of biogas/ g SV, respectively.

Keywords: Sargassum solid biomass; *S. natans*; *S. fluitans*; Alginate; Anaerobic Digestion.

Introducción

La biomasa sólida de sargazo, especialmente del género *Sargassum* son algas pardas que están distribuidas mundialmente (Amador *et al.*, 2021). Esta biomasa sirve de refugio y alimento a más de 120 especies de peces e invertebrados (Doyle *et al.*, 2015). Un gran número de estas especies (>350) crecen en el fondo del mar, pero solo dos tipos son pelágicos *S. natans* y *S. fluitans* (Milledge *et al.*, 2016). Estas especies de biomasa han causado severas afectaciones medioambientales, ecológicas y económicas en las costas del Caribe y las costas de África occidental desde

2011 (Davis *et al.*, 2021, Wang *et al.*, 2019), debido a que grandes cantidades de esta biomasa empezaron a encallar y a descomponerse a lo largo de todo el litoral del Caribe mexicano. La proliferación de esta biomasa ha continuado en gran crecimiento en la Región de Recirculación Ecuatorial del Norte (NERR), probablemente a la eutrofización de los océanos y al cambio climático como principales factores (Alleyne *et al.*, 2023). Esta zona (NERR) fue denominada como el gran cinturón de los sargazos, en junio de 2018 abarcaba una superficie de $\sim 3000 \text{ km}^2$ con una cantidad aproximada de >20 millones de toneladas de biomasa (Chávez *et al.*, 2020), por lo que se calcula que en esta área donde habita la biomasa sólida de sargazo posee una tasa de producción de $0.81 \cdot 10^6$ toneladas de carbono orgánico, lo cual esta macroalga es una fuente potencial empleándola como energía a través de la producción de biogás (Ayala–Mercado *et al.*, 2022).

Una alternativa para erradicar la biomasa de sargazo de las playas es la producción de biogás mediante DA empleándola como materia prima, aunque hay que superar algunos inconvenientes p. ej. la etapa limitante durante la DA es la hidrólisis debido a la composición de la biomasa debido su contenido de fibras (7.15 – 75 %), lignina (15.6 – 29.5 %), metales pesados y sales (15.2 – 23.1 %) etc., por lo que es necesario realizar un pretratamiento a la biomasa. Los pretratamientos físicos han resultado ser eficientes en los rendimientos de metano a partir de 92 L $\text{CH}_4/\text{Kg SV}$ hasta 422 L $\text{CH}_4/\text{Kg SV}$ (Chikani – Cabrera *et al.*, 2022), sin embargo, los rendimientos de CH_4 en la DA pueden variar debido a las distintas especies de la biomasa utilizada, así como la ubicación y la composición química (Milledge *et al.*, 2020). Por tal motivo, se han realizado diversos estudios con el propósito de emplear las algas en la producción de biocombustibles de tercera generación, las ventajas del uso de esta biomasa es su crecimiento en aguas saladas y municipales, la necesidad de una tierra cultivable y del uso de fertilizantes, además de poder aumentar su biomasa rápidamente (Barbot *et al.*, 2016).

El objetivo de este estudio es la evaluación de la composición proximal de la biomasa sólida de sargazo, debido a que son limitados cuando se aplican a las especies *S. natans* y *S. fluitans* ya que estas se encuentran en la naturaleza mezcladas y no por especie, además de aplicar un pretratamiento físico en la reducción del tamaño de partícula la cual nos favorecerá en la liberación de azúcares en obtención de compuestos de valor agregado (p. ej. Alginato de sodio) mediante una extracción sólido – líquido durante el tratamiento con formol, ácido y álcali y faciliten la extracción más a fondo y rápidamente de las paredes celulares de la biomasa, además de desechar el residuo de dicho método se empleara como sustrato en la DA resultando ser una materia prima para la conversión de energía alterna, favoreciendo la formación de una economía alterna.

Materiales y Métodos

Recolección de biomasa e inóculo.

La recolección de la biomasa sólida de sargazo se llevó a cabo en agosto de 2022 en playa delfines (latitud $21^{\circ}3'43.286''$ N longitud $86^{\circ}46'45.179''$ O) de la ciudad de Cancún perteneciente al municipio de Benito Juárez. Este punto de recolección fue seleccionado debido a que es una de la zona reportada con mayor presencia de biomasa. El muestreo se realizó 10 metros mar adentro. Se transportó la biomasa con bolsas de hielo gel de 400 ml de la marca Thincol como refrigerante y se almacenó en bolsas de polietileno de alta densidad con zipper y válvula de $11 \times 16'' / 27.9 \times 40.6 \text{ cm}$ y un volumen aproximado de 1 gal/ 3.79 L de la marca V Vesta precision, y se sellaron al vacío con una selladora de mano de la marca V Vesta precision-Vacín Seal. La biomasa recolectada se almaceno y se congelo hasta su posterior análisis.

El inóculo utilizado se recolecto del efluente de un reactor de lecho fijo a escala piloto de un volumen útil de 1000 L operado a temperatura ambiente, ubicado en el Instituto Tecnológico de Orizaba ($18^{\circ}51'19.887 \text{ N} - 97^{\circ}5'53.85 \text{ O}$). El inóculo se trasladó al laboratorio de ambiental II, incubándose a una temperatura mesofílica de 35 - 40° C. El inóculo se caracterizó fisicoquímicamente (ST, SVT, cenizas, pH) de acuerdo con Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Antes de ser utilizado el inóculo se desgasificó durante 7 días. El pH del inóculo fue de 7.02 ± 0.01 , el contenido de cenizas fue de 31.71 ± 0.75 , sólidos totales (ST) fue de $3.88 \pm 0.08 \%$, sólidos volátiles (SV) fue de $2.65 \pm 0.07 \%$, Demanda Química de Oxígeno total (DQO_T) fue de $74.12 \pm 1.23 \%$, Demanda Química de Oxígeno soluble (DQO_S) fue de $48.9 \pm 1.27 \%$.

Pretratamiento, clasificación y caracterización de la biomasa sólida de sargazo

La biomasa pelágica se lavó y enjuago con agua potable para desalinizar, eliminar arena, restos de coral y conchas. posteriormente se separó en sus formas de *S. natans* I, *S. natans* VIII y *S. fluitans* III conforme lo descrito por Schell et al., 2015 et al., 2015. La biomasa fue procesada para reducir el tamaño como se describe a continuación, se trituró por separado las especies *S. natans* I, *S. natans* VIII y *S. fluitans* III en una procesadora de alimentos marca Oster modelo BLSTXPN7003 (Xpert Series™ Oster, China) con una potencia de 2 HP con cuchillas quirúrgicas para reducir el tamaño de la muestra aproximadamente de 1 a 2 mm durante 20-30 segundos con una dilución 1:1 con agua destilada, Posteriormente se separó la fracción líquida (FL) de la fracción sólida (FS) utilizando una malla de nailon con tamaño de poro de 150 μm . Finalmente, la biomasa sólida se secó en una estufa de secado marca Riossa a 60 ± 2 °C hasta peso constante. La caracterización fisicoquímica de la FS se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis fisicoquímicos de la biomasa sólida de sargazo

Determinación	Unidad	Método
Cenizas		Método gravimétrico 2540 G
Sólidos totales (ST)	%	Standard Methods
Sólidos volátiles totales (SVT)		
Humedad	%	NMX-AA-16-1984
pH	-	NMX-AA-013-SCFI-2006
Nitrógeno total	%	NMX-AA-24-1984
Proteína	%	AOAC 2001.11
Fibra	%	AOAC 985.29
Grasas	%	AOAC 920.39

Métodos analíticos

El análisis elemental se determinó mediante un analizador por combustión (Elementar, vario Macro cube, Langenselbold, Germany) con capacidad para determinar nitrógeno (N), carbono (C), hidrógeno (H) y azufre (S), el contenido de oxígeno se realizó por diferencia de peso de acuerdo por Tadesco y Daniel, 2019, para el pesado de las muestras se utilizó una Microbalanza (Mettler Toledo, modelo XP6, Greifensee, Switzerland).

La determinación de fósforo (P), calcio (Ca), cobre (Cu), hierro (Fe), magnesio (Mg), potasio (K), Sodio (Na), zinc (Zn) y manganeso (Mn) de la biomasa sólida de sargazo fueron analizadas mediante los métodos EPA3051a y EPA6010 vigentes. La concentración elemental se midió por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, Avio 560 Max, Waltham, MA, USA) con itrio como estándar interno y cloruro de cesio como tampón de ionización.

El contenido de carbohidratos se realizó por diferencia de peso de acuerdo a la formula descrita por Oyesiku y Egunyomi, 2014.

Extracción de compuestos de valor agregado de la biomasa de sargazo

El alginato tiene diferentes aplicaciones, particularmente en las industrias de alimentos y fármacos empleándose como agentes gelificantes, espesantes y estabilizantes. Las algas pardas son la principal fuente de alginato de uso comercial (Rhein-Knudsen et al., 2017). Para la extracción del alginato se realizó el procedimiento descrito por Fertah et al., 2017 con algunas modificaciones, la biomasa de *S. natans* y *S. fluitans* fueron hidratadas en una solución de formaldehído al 2% V/V durante 24 horas para la eliminación de pigmentos. Transcurrido el tiempo de hidratación se filtró y se lavó con agua destilada y se agregaron a una solución de ácido clorhídrico 0.2 M y se dejaron reposar durante 24 horas. Posteriormente se filtraron y se lavaron nuevamente las muestras con agua destilada, las fracciones solidas se colocaron en una solución al 2 % de carbonato de sodio Na_2CO_3 W/V . Por último, se separó el residuo de la fracción sólida (RFS) la cual se lavó con agua destilada y se secó 105 ± 2 °C y se guardaron para su análisis proximal descrito en

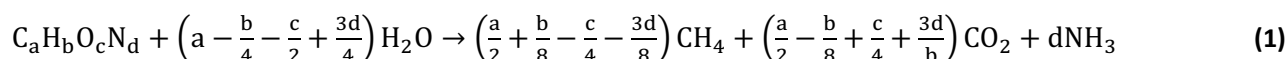
la sección 2.2 con el fin de utilizarlo en los ensayos de DA. La fracción líquida se precipito con etanol al 95%, el precipitado se lavó dos veces con acetona y se repurifico con etanol y se secó a temperatura ambiente.

Actividad metanogénica específica

La cuantificación de la Actividad Metanogénica Específica (AME) fue de acuerdo a la metodología descrita por Torres et al., 2010 con algunas modificaciones. Los biorreactores consistían en matraces Erlenmeyer de 125 ml con un volumen de trabajo de 112 ml, los cuales fueron llenados con la FS y RFS. Se montó a parte un control positivo (C+) con sacarosa como referencia para la producción de biogás y fuente de carbono. El volumen del inóculo y del sustrato adicionado se calculó a una relación 2:1 en función de los sólidos volátiles mediante la aplicación web Online Biogas App (OBA; <https://biotransformers.shiny3.apps.io/oba1/>). Los reactores se ajustaron al inicio de cada ensayo a un pH de 7.06 ± 0.09 y se purgaron con N_2 al 99.9 % (Praxair México S. de R.L. de C.V.) durante 2 minutos para desplazar el oxígeno presente y crear condiciones anaerobias. La temperatura de incubación de los reactores fue de 35 ± 2 °C hasta que la producción de biogás fue <1 % del volumen acumulado. Durante los días de incubación el reactor se agito constantemente a 600 rpm. En los ensayos AME en los que se aplicara agitación se requiere que la concentración del inóculo sea de 2.0 – 5.0 gSVT/L (Torres et al., 2010) para que el inóculo garantice un eficiente contacto entre la biomasa y el sustrato. Los resultados se expresaron en ml como el volumen de gas en condiciones estándar (273 K y 1 atm), los ensayos y mediciones se realizaron por duplicado (n=3).

Cálculos estequiométricos

El potencial bioquímico teórico de metano (TBMP) y la formula empírica ($C_aH_bO_cN_d$) se determinó a partir de la composición elemental presente en la biomasa sólida de sargazo empleando la ecuación de Buswell (Ecuación 1) y la ecuación de Boyle (Ecuación 2) (Mhatre et al., 2019 y Anchin et al., 2016).



$$\text{Rendimiento teórico de metano} = \frac{\left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8}\right) * 22.4}{12a + b + 16b + 14c} \left(\frac{mLCH_4}{gSV}\right) \quad (2)$$

Donde 22.4 es el volumen (L) de 1 mol de gas a temperatura y presión estándar.

Resultados y Discusión

Clasificación de la biomasa sólida de sargazo

Durante la llegada masiva de la biomasa de sargazo a las playas del Caribe mexicano en verano de 2022, se identificaron dos tipos de biomasa y una de estas especies con dos morfologías distintas pelágicas: *S. fluitans* III, *S. natans* I y *S. natans* VIII. De acuerdo con García-Sánchez et al., 2020 la biomasa de la especie *S. fluitans* III presenta espinas en el tallo lo que la diferencia de los morfotipos *S. natans* I y *S. natans* VIII las cuales son de tallos lisos, además estos morfotipos se diferencia una de otra por la forma de las vejigas que les confiere la capacidad de flotar y en el tamaño de las hojas, siendo más anchas en el morfo tipo *S. natans* VIII.

S. fluitans III y *S. natans* I fueron las especies más comunes recolectadas en Cancún oscilando valores entre 8 y 84 % de la biomasa fresca recolectada, mientras que la especie *S. natans* VIII fue de 8 % (Figura 1). Vázquez-Delfín et al., 2021 reportó valores para *S. fluitans* III del 81 %, *S. natans* I 15 % y *S. natans* VIII del 4 % en el mismo sitio de recolección. Sin embargo, García-Sánchez et al., 2020 reportaron desde 2016 la composición de la biomasa comprendía solo las especies *S. fluitans* III y *S. natans* VIII, siendo *S. fluitans* III la más predominante durante todo su periodo de estudio con

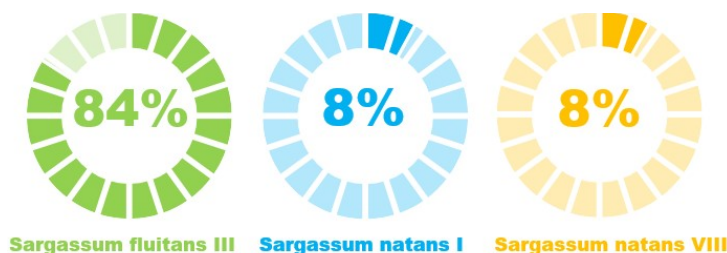


Figura 1. Composición morfológica de la biomasa sólida de sargazo en Cancún, 2022.

un promedio >60 %. De 2016 a 2019 *S. natans VIII* disminuyó su abundancia de 41 a 3 %, *S. natans I* empezó a tener registro en 2018 aumentando su presencia relativa entre 23 % a 31 % en 2019.

Composición de la biomasa sólida de sargazo

La biomasa sólida de sargazo presentó un alto porcentaje de humedad >93 % (Tabla 2) el cual es un parámetro a considerar cuando se emplea la biomasa para ciertos bioprocesos debido a que se puede requerir un secado previo antes de su aplicación y un porcentaje de cenizas entre 14 – 16 % debido a que la biomasa puede contener grandes cantidades de sales inorgánicas, ya que contiene polisacáridos capaces de captar compuestos presentes en su hábitat (Amador *et al.*, 2021), el contenido de agua en las algas varía entre 70 – 90 % en la biomasa húmeda, sin embargo la biomasa *sargassum* su contenido de agua varía desde 81 – 92 % de la composición total. Milledge *et al.*, 2020 reportaron valores para la biomasa de *S. fluitans III* y sus variantes de *S. natans* un porcentaje de humedad entre 82 – 87 % en muestras obtenidas de las islas Turcas y Caicos. El contenido de cenizas en la biomasa puede variar, ya que se han reportado valores entre 18 a 55 % del peso seco. Oyesiku y Egunyomi, 2014 reportaron valores para las mismas especies de estudio de ~9.5 % recolectadas en costas de África. Nielsen *et al.*, 2021 reportó desde 2020 a 2021 valores para el contenido de cenizas entre 28.45 – 51.1 %, La composición fisicoquímica de estas especies, así como el de otras muchas algas varían de acuerdo con la ubicación geográfica y la estación del año (Amador *et al.*, 2021 y Barbot *et al.*, 2016).

Tabla 2. Composición fisicoquímica de la fracción sólida de la biomasa de sargazo en base seca ($n = 3$).

Determinación	<i>S. natans I</i>	<i>S. natans VIII</i>	<i>S. fluitans III</i>
Humedad (%)	93.26 ± 0.39	94.46 ± 2.04	93.17 ± 1.30
Cenizas (%)	16.07 ± 0.36	14.58 ± 0.18	15.84 ± 0.30
ST (%)	85.52 ± 0.39	91.16 ± 2.04	89.76 ± 1.30
SV (%)	85.10 ± 0.36	86.46 ± 0.16	82.44 ± 0.30
Proteína (%)	5.81 ± 0.41	4.92 ± 0.25	5.00 ± 0.31
Grasas (%)	0.42 ± 0.03	0.51 ± 0.08	0.36 ± 0.02
Fibra (%)	22.31 ± 0.41	20.69 ± 0.72	16.61 ± 0.02
Carbohidratos (%)	51.35 ± 0.43	46.24 ± 0.33	44.64 ± 0.09
pH	7.34 ± 0.02	6.40 ± 0.06	7.16 ± 0.03
Alginatos (%)	27.45 ± 0.96	22.76 ± 1.17	22.79 ± 0.01

Los ST y SV son parámetros importantes debido a que a concentraciones superiores al 50 % se considera idónea para la DA para la producción de biogás como, metano, hidrógeno, etc. (Wang *et al.*, 2016), en este estudio se reportan valores entre 85 – 91 % para ST y >85 % para los SV.

El contenido de proteína varía según la especie, el área geográfica, la estación o las condiciones ambientales (Balboa *et al.*, 2016), siendo generalmente menor en las algas marrones (3 ± 15 % del peso seco) comparado con las algas rojas o verdes (10 ± 47 % del peso seco) (Patarra *et al.*, 2011). Las proteínas son interesantes por su valor nutricional con funciones estructurales. En la biomasa sólida del sargazo de Cancún se reporta que en sus tres especies arroja valores que oscilan entre 5.81 ± 0.41 % (*S. natans I*), 4.92 ± 0.25 % (*S. natans VIII*) y 5.00 ± 0.28 % (*S. fluitans III*). La proteína en la biomasa sólida del sargazo constituye una fuente común de alimento para animales. Los diferentes métodos de

análisis y la cantidad variable de proteína generan incertidumbre para la estimación real en las diferentes biomásas sólidas del sargazo (Amador – Castro *et al.*, 2021).

Los lípidos es uno de los componentes minoritarios en las algas marinas con valores inferiores al < 5 % en base seca (Amador-Castro *et al.*, 2021, Roesijadi *et al.*, 2010). Las algas marinas poseen ácidos grasos esenciales, que permite una alternativa como suplemento dietético o parte de una dieta (MacArtain *et al.*, 2007). Los estudios indican que el contenido de lípidos en las especies *S. natans* y *S. fluitans* oscilan entre 0.01 – 4.56 % del peso seco del alga. En esta investigación se reportan valores de entre 0.36 – 0.51 %. Vázquez *et al.*, 2021 reporto valores de hasta 3.4 % un valor superior a los encontrados por Oyesiku y Egunyomi, 2014 de 2.75 %.

En la presente investigación se encontró que el contenido de fibra en la biomasa fue de 16 – 22 %, la biomasa de algas pueden ser una fuente valiosa de fibras utilizada en la dieta humana (Hernández-López *et al.*, 2014), está biomasa posee grandes cantidades de carbohidratos como alginatos y polisacáridos sulfatados los cuales son considerados como fibras que en gran medida no pueden ser digeridos por el ser humano (Amador-Castro *et al.*, 2021). Además, la determinación de fibra puede ser un factor esencial para las reacciones posteriores en la DA para la producción de CH₄, (Hernández – López, 2014). Milledge *et al.*, 2020 encontró que el contenido de fibra en las tres especies de sargazo es entre 31 – 37 % lo que equivale que un gran porcentaje de valor energético no está disponible para los seres humanos y animales de estómago simple.

La biomasa sólida del sargazo es fuente de polisacáridos que incluyen alginatos, fucoidanos, agares, carragenina y laminarinas. Los carbohidratos representan el 25 – 60 % del peso seco, aunque también pueden oscilar de 30 – 50 % (Amador-Castro *et al.*, 2021, Devault *et al.*, 2021). Esta biomasa puede ser fuente de carbohidratos que pueden ser aprovechados para la producción de etanol y bioplásticos por acción microbiana (Davis *et al.*, 2021).

Los alginatos son constituyentes principales en las paredes celulares de las algas pardas, estos representan entre el 10 – 40 % en peso seco (Torres *et al.*, 2007, Stephen *et al.*, 2006). En esta investigación se logró extraer entre el 22 – 27 % de este polisacárido (Alginato de sodio), por lo que el contenido de alginato no solo depende de la especie, estación del año, clima, sino que además de las condiciones en donde se encuentre la biomasa (p. ej. Intensidad de la oleada). Por lo que el contenido de alginato de las especies de la biomasa de sargazo oscila entre 15 – 25 % (Devault *et al.*, 2021). De acuerdo con Fertah *et al.*, 2017 la temperatura puede ser un parámetro importante que puede afectar el rendimiento durante el proceso de extracción en este estudio una temperatura de 60 °C, así como el tamaño de partícula de ~2 mm fueron condiciones apropiadas para obtener rendimientos óptimos de extracción. Rhein – Knudsen *et al.*, 2017 reportó un rendimiento de extracción de la especie *S. natans* de 23 ± 1.6 % recolectada en Ghana, África mediante un proceso químico similar a este trabajo, pero con una temperatura de 99 °C. Jiménez – Contreras, 2020 reporto un rendimiento de 12 % en muestras de *sargassum* a una temperatura de 80 °C mediante el mismo procedimiento químico.

En la Tabla 3 se resume la composición de sales inorgánicas y metales presentes por especie de biomasa.

Tabla 3. Análisis mineral de la fracción sólida de la biomasa de sargazo en base seca ($n = 1$)

Determinación mg/Kg	<i>S. natans</i> I	<i>S. natans</i> VIII	<i>S. fluitans</i> III
Calcio (CaO)	66040.0	66800.0	70210.0
Magnesio (MgO)	4450.0	17540.0	13310.0
Sodio (Na ₂ O)	0.4470	4340.0	17190.0
Potasio (K ₂ O)	4470.0	7600.0	8070.0
Fósforo (P ₂ O ₅)	660.0	670.0	450.0
Hierro (Fe)	80.0	31.0	90.0
Cobre (Cu)	10.0	6.0	10.0
Zinc (Zn)	50.0	29.0	30.0
Manganeso (Mn)	60.0	61.0	50.0
Total	75820.447	97077.0	109410.0

La concentración mineral de la biomasa sólida de sargazo en este estudio demuestra que la especie con mayor concentración es *S. fluitans* III con un total de 109,410 mg/Kg, esto tiene como limitación al ser considerada una alternativa a la alimentación humana y animal, así como la fabricación de compostas y fertilizantes, debido a que las formas orgánicas e inorgánicas de metales y metaloides tienen diferentes grados de toxicidad (Davis *et al.*, 2021). La acumulación de componentes inorgánicos puede estar relacionada con factores que tiene la biomasa de sargazo desde su florecimiento de origen hasta alcanzar la playa, donde esta es sometida a condiciones ambientales diversas como la temperatura, salinidad, pH, etc. La biodisponibilidad de compuestos inorgánicos puede ser afectada por la capacidad de absorción de la biomasa influenciada por la edad del tejido y la composición estructural (Vázquez – Delfín *et al.*, 2021, Thompson *et al.*, 2020). Salgado – Hernández *et al.*, 2022 reportó una concentración de 168,600.0 mg/Kg en la fracción sólida de la mezcla de *sargassum*. Para la DA los macronutrientes (p. ej. Na, K, Mg, Ca y P) son importantes durante el crecimiento de las bacterias anaerobias, así como su actividad metabólica y estabilidad del biorreactor (Wall *et al.*, 2014). Sin embargo, una alta concentración de sodio de 17190.0 mg/Kg presente en la especie de *S. fluitans* III puede inhibir el crecimiento y la función metabólica de los metanógenos deshidratando las células mediante la presión osmótica (Thompson *et al.*, 2020).

El análisis elemental orgánico en la fracción sólida de sargazo (Tabla 4) muestra que la relación C: N en la especie *S. natans* I es menor (8.83) comparándolo con otros autores como Salgado – Hernández *et al.*, 2022 donde reporta (18.6) en las especies mixtas de *sargassum*. Otro autor como Milledge *et al.*, 2020 reporta relaciones C: N en la especie de *S. natans* I (22.14), *S. natans* VIII (17.40) y *S. fluitans* III (18.62) que son mucho mayores a los encontrados en la presente investigación. Estos bajos valores pueden representar complicaciones en la DA donde se recomiendan que la relación óptima debe encontrarse en el rango de 20 – 30:1 (Salgado – Arreguín, 2022), por lo que se propone que una co-digestión con otros sustratos puede compensar los bajos índices de C: N y ayudar a la reducción la alta concentración de sales presentes en la biomasa (Amador-Castro *et al.*, 2021).

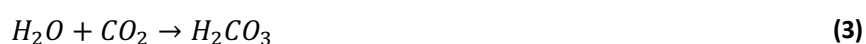
Tabla 4. Análisis elemental de la fracción sólida de la biomasa de sargazo en base seca ($n = 1$).

Determinación	<i>S. natans</i> I	<i>S. natans</i> VIII	<i>S. fluitans</i> III
C (%)	36.58	36.20	30.21
H (%)	4.85	5.03	3.82
O (%)	38.45	35.77	43.72
N (%)	4.14	4.20	3.78
S (%)	1.08	3.78	0.91
Relación C:N	8.83	8.62	7.99
Fórmula empírica	$C_{3.04}H_{4.81}O_{2.40}N_{0.21}$	$C_{3.01}H_{4.99}O_{2.23}N_{0.29}$	$C_{2.51}H_{3.78}O_{2.73}N_{0.26}$

3.3 Actividad Metanogénica Específica

La producción de biogás por AME de la fracción sólida de la biomasa de sargazo se muestran en la Figura 2, como se puede observar en la Figura 2a, la generación de biogás producido en las muestras de *S. natans* I, *S. natans* VIII y *S. fluitans* III fue de 1152 ± 5.05 mL, 830 ± 4.64 mL y 1090 ± 7.0 mL de biogás/ g SV respectivamente. La baja producción de metano en la especie *S. fluitans* III se puede deber a la gran acumulación de sales minerales presentes (Ca, Na, K y Mg), el bajo índice de relación C: N (7.99), así como el contenido de carbohidratos que pueden afectar significativamente la estabilidad y el rendimiento en la DA (Laiq Ur Rehman *et al.*, 2019). La composición del biogás obtenido con cada biomasa de sargazo se muestra en la Figura 2b en términos de porcentaje de metano y dióxido de carbono siendo similares *S. natans* I y *S. natans* VIII entre $79 - 81 \% \pm 2 \%$.

La AME es un método volumétrico basado en cuantificación del volumen de metano producido por una sustancia desplazante como es el uso de NaOH (al 3 % w/v), esta solución tiene la posibilidad de reaccionar con el dióxido de carbono generado en el biogás así como se presenta en la Ecuación 3 - 5, lo que permite medir un volumen del metano formado.



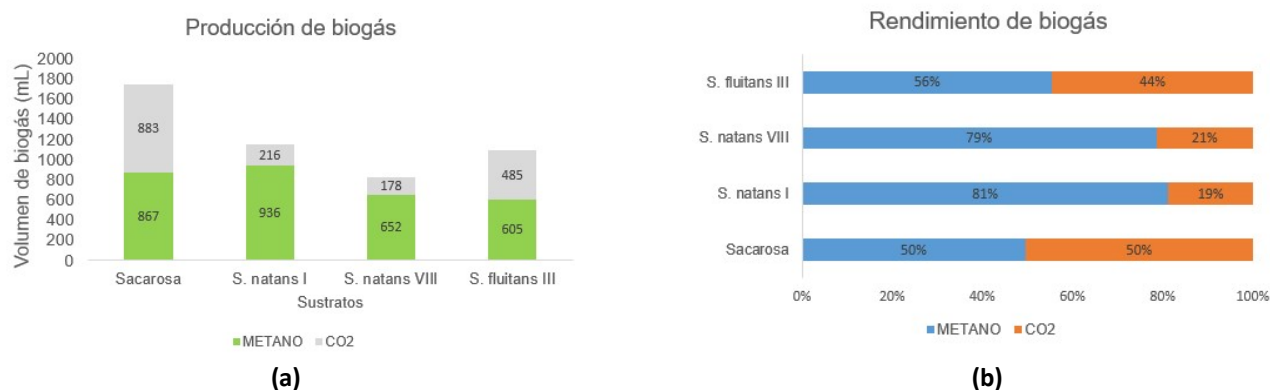


Figura 2. Volumen de biogás generado por la fracción sólida de sargazo (a) y porcentaje de la composición del biogás (b).

En el caso del residuo sólido de la biomasa de sargazo posterior a la extracción de los compuestos de valor agregado como el alginato de sodio se observó que la mayor producción de biogás fue la muestra de *S. fluitans* III (450 ± 3.30 mL de biogás/ g SV), esto demuestra que aún hay oligoelementos y trazas de micro y macro nutrientes que pueden ser útiles para favorecer la DA (Figura3) posterior a la extracción, resultando ser una materia prima para la conversión de energía alterna, favoreciendo la formación de una economía circular.

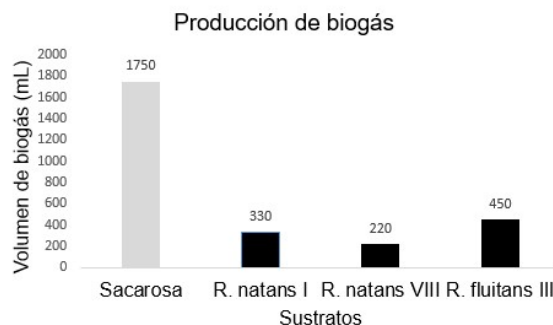


Figura 3. Volumen de biogás generado, empelando como sustrato el residuo de la biomasa de sargazo, posterior a la extracción de compuestos de valor agregado.

Conclusiones

La valorización de la biomasa sólida de sargazo en este estudio demuestra las variaciones en las composición entre especies lo cual es una oportunidad desafiante debido a sus diferentes aplicaciones, los efectos de los arribazones atípicos constituidos por la biomasa pelágica causan severas afectaciones ecológicas y económicas debido a las grandes inversiones para su remoción de las playas las cuales pueden no ser efectivas, la atención deberá centrarse en cómo aprovechar esta biomasa sólida económicamente útil.

Las especies de la biomasa de sargazo del Caribe mexicano fueron evaluadas por sus características y propiedades como fuentes potenciales de alginato. Los rendimientos de extracción de alginato oscilaron entre el 22 y 27 % en peso del material seco de acuerdo a la especie de biomasa sólida de sargazo. Se estableció las condiciones óptimas de extracción y el rendimiento de extracción encontrando que la temperatura de 60 °C y un tamaño de partícula de ~ 1 mm son condiciones apropiadas para obtener un buen rendimiento de extracción. Esto es comparable en los rendimientos de alginato obtenidos de extracciones de otras biomazas sólidas de algas reportadas.

La actividad metanogénica permite cuantificar la máxima capacidad de producción de metano por microorganismos anaerobios, realizada en condiciones de laboratorio que permitir la máxima actividad bioquímica de conversión del sustrato orgánico a metano como se observó en la fracción sólida de la biomasa de sargazo obteniendo buenos rendimientos de biogás.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen enormemente a la coordinadora en playa de ZOFEMAT la Biol. Claudia Hernández, por su facilitación para la recolección de la biomasa, así como a los H. Ayuntamiento de Benito – Juárez, Solidaridad – Playa del Carmen, Tulum y Cozumel por su amable atención en la petición para el permiso para la recolección de sargazo. También un agradecimiento al Laboratorio de Ambiental I y II por todas las facilidades otorgadas para realizar este proyecto. Israel de Jesús Balderas Caballero agradece a CONACYT la beca de maestría (944323).

Bibliografía

- Alleyne, K. S. T., Johnson, D., Neat, F., Oxenford, H. A., y Vallés, H. (2023). Seasonal variation in morphotype composition of pelagic sargassum influx events is linked to oceanic origin. *Scientific Reports*, 13 (3753), <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30969-2>.
- Amador-Castro, F., García-Cayuela, T., Alper, S. H., Rodríguez-Marínez, V. y Carrillo-Nieves, D. (2021). Valorization of pelagic sargassum biomass into sustainable applications: Current trends and challenges. *Journal of Environmental Management*, 283 (112013), <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112013>.
- Anchinas, S., Willem – Euverink, G. J. (2016). Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste. *Resource-Efficient Technologies*, 2 (3), 143 – 147, <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.08.001>.
- Ayala – Mercado, I. D., Weber, B. y Durán – García, M. D. (2022). Use of Hydrothermal Pretreatment to Enhance Biogas Production from Pelagic Sargassum. *Bioenerg. Res.* 15, 1639–1648, <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10371-4>.
- Barbot, Y. N., Al-Ghaili, H. y Benz, R. (2016). A Review on the Valorization of Macroalgal Wastes for Biomethane Production. *Marine Drugs*, 14 (120), doi:10.3390/md14060120.
- Chávez, V., Uribe – Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez – Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I. Francisco, V., Estévez, M., Celis, L. B., Monroy – Velázquez, L. V., Leal – Bautista, R., Álvarez – Filip, L., García – Sánchez, M., Masia, L. y Silva, R. (2020). Massive Influx of Pelagic Sargassum spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12 (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, (1214), <https://doi.org/10.3390/life12081214>.
- Davis, D., Simister, R., Cambell, S., Marston, M., Bose, S., McQueen-Mason, S. J., Gomez, L. D., Gallimore, W. A. y Tonon, T. (2021). Biomass composition of the golden tide pelagic seaweeds Sargassum fluitans and *S. natans* (morphotypes I and VIII) to inform valorisation pathways. *Science of the Total Environment*, 762 (143134), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143134>.
- Devault, D. A., Pierre, R., Marfaing, H., Dolique, F. y Lopez, P. J. (2021). Sargassum contamination and consequences for downstream uses: a review. *Journal of Applied Phycology*, 33, 567 – 602, <https://doi.org/10.1007/s10811-020-02250-w>.
- Doyle, E. and Franks, J. (2015). Sargassum Fact Sheet. Gulf and Caribbean Fisheries Institute: Fort Pierce, FL, USA.
- Fertah, M., Belfkira, A., Dahmane, E., Taourirte, M. y Brouillette, F. (2017). Extraction and characterization of sodium alginate from Moroccan Laminaria digitata brown seaweed. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, (Supplement 2), S3707 – S3714, <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjoc.2014.05.003>.
- García-Sánchez, M., Graham, C., Vera, E., Escalante-Mancera, E., Álvarez-Filip, L. y 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), <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2020.103275>.
- Hernández – López, F. (2014). Obtención de biogás a partir de algas del tipo sargassum de la playa miramar de Cd. Madero Tamaulipas. *Centro de investigación en materiales avanzados: Universidad Tecnológica de Altamira*.
- Jiménez-Contreras, L. F. (2020). Aprovechamiento del alga marina Sargassum spp. mediante digestión anaerobia y tratamiento en medio ácido. *Departamento de Física Aplicada: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional*.
- Laiq Ur Rehman, M., Iqbal, A., Chang, C., Li, W. y Ju, M. (2019). Anaerobic digestion. *Water Environment Research*, 91, 1253 – 1271. DOI: 10.1002/wer.1219.
- MacArtain, P., Gill, C. I. R., Brooks, M., Campbell, R. y Rowland, I. R. (2007). Nutritional Value of Edible Seaweeds. *Nutrition Reviews*, 65 (12), 535–543, <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2007.tb00278.x>.
- Mhatre, A., Gore, S., Mhatre, A., Trivedi, N., Sharma, M., Pandit, R., Anil, A. y Lali, A. (2019). Effect of multiple product extractions on bio-methane potential of marine macrophytic green alga Ulva lactuca. *Renewable Energy*, 132, 742-751. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.012>.
- Milledge, J. J. and Harvey, P. J. (2016). Review: Golden Tides: Problem or Golden Opportunity? The valorization of sargassum from beach inundations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4 (60), <https://doi.org/10.3390/jmse4030060>.
- Nielsen, B. V., Milledge, J. J., Hertler, H., Maneein, S., Al Farid, M. M. y Bartlett, D. (2021). Chemical Characterisation of Sargassum Inundation from the Turks and Caicos: Seasonal and Post Stranding Changes. *Phycology*, 1 (2), 143 – 162, <https://doi.org/10.3390/phycolgy1020011>.
- Oyesiku, O. O. y Egunyomi, A. (2014). Identification and chemical studies of pelagic masses of Sargassum natans (Linnaeus) Gaillon and *S. fluitans* (Borgesen) Borgesen (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 13 (10). 1188-1193. doi:10.5897/AJB2013.12335.

- Patarra, R. F., Paiva, L., Neto, A. I., Lima, E. y Baptista, J. (2011). Nutritional value of selected macroalgae. *J. Appl. Phycol*, 23, 205-208. DOI 10.1007/s10811-010-9556-0.
- Rhein-Knudsen, N., Tutor-Ale, M., Ajalloueiian, F. y Meyer, A. S. (2017). Characterization of alginates from Ghanaian brown seaweeds: *Sargassum spp.* and *Padina spp.* *Food Hydrocolloids*, 71, 236-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.05.016>.
- Roesijadi, G., Jones, S. B., Snowden – Swan, L. J. y Zhu Y. (2010). Macroalgae as a Biomass Feedstock: A Preliminary Analysis. *Analysis*, 10.2172/1006310.
- Salgado – Arreguín, A. A. (2022). Estudio de la digestión anaerobia del sargazo (*Sargassum spp.*), como una fuente potencial de producción de un bioenergético. Instituto Tecnológico Nacional de México: Instituto Tecnológico de Orizaba.
- Salgado-Hernández, E., Ortiz-Ceballos, Á. I., Martínez-Hernández, S., Rosas-Mendoza, E. S., Dorantes-Acosta, A. E., Alvarado-Vallejo, A. y Alvarado-Lassman, A. (2022). Methane Production of *Sargassum spp.* Biomass from the Mexican Caribbean: Solid–Liquid Separation and Component Distribution. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 20 (219), <https://doi.org/10.3390/ijerph20010219>.
- Schell, J.M., D.S. Goodwin, and A.N.S. Siuda. (2015). Recent *Sargassum* inundation events in the Caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form. *Oceanography* 28, (3), 8–10, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>.
- Stephen, A. M., Phillips, G. O. y Williams, P. A. (2006). Alginates. In *Food Polysaccharides and Their Applications* (289-317). United States of America: Taylor & Francis Group.
- Thompson, T. M., Young, B. R. y Baroutian, S. (2020). Efficiency of hydrothermal pretreatment on the anaerobic digestion of pelagic *Sargassum* for biogas and fertiliser recovery. *Fuel*, 279 (118527), <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118527>.
- Torres, M. R., Sousa, A. P., Filho, E. A., Melo, D. F., Feitosa, J. P., de Paula, R. C. y Lima, M. G. (2007). Extraction and physicochemical characterization of *Sargassum vulgare* alginate from Brazil. *Carbohydrate Research*, 342 (14), 2067-74. doi: 10.1016/j.carres.2007.05.022.
- Torres, L. P., & Pérez, A. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, 9, 5 – 14, <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116434001>.
- Vázquez – Delfín, E., Freile – Pelegrín, Y., Salazar – Garibay, A., Serviere – Zaragoza, E., Méndez – Rodríguez, L. C. y Robledo D. (2021). Species composition and chemical characterization of *Sargassum* influx at six different locations along the Mexican Caribbean coast. *Science of the Total Environment*, 795 (148852), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148852>.
- Wall, D. M., Allen, E., Straccialini, B., O’Kiely, P. y Murphy, J. D. (2014). The effect of trace element addition to mono-digestion of grass silage at high organic loading rates. *Bioresource Technology*, 172, 349 – 355. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.09.066>.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B., y Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science*, 365 (6448), 83 – 87.
- Wang, X., Duan, X., Chen, J., Fan, K., Feng, L., Yan, Y. y Zhou, Q. (2016). Enhancing anaerobic digestion of waste activated sludge by pretreatment: effect of volatile to total solids. *Environmental Technology*, 37 (12), 1520-1529, <http://dx.doi.org/10.1080/09593330.2015.1120783>.