

## 5. Caracterización del sargazo, un residuo de manejo especial evaluado como sustrato para producción de biogás



MARIANA ABIGAIL MUÑOZ DÍAZ\*

LUIS RAÚL TOVAR GÁLVEZ\*\*

MARÍA EUGENIA GUTIÉRREZ CASTILLO\*\*\*

<https://doi.org/10.52501/cc.364.05>

### Resumen

En este capítulo se abordará una analogía de la problemática que implica el fenómeno de la macroalga pelágica conocida como sargazo (*Sargassum* spp.) que arriba al Caribe mexicano, y que al depositarse sobre sus playas en elevados volúmenes generan afectaciones a la flora, fauna, población e incluso economía de la región. La complejidad del manejo y gestión de residuos del sargazo se origina al desconocer las características fisicoquímicas que posee, así como la ausencia de una normativa oficial exclusiva que integre mecanismos de recolección, responsabilidades de su manejo y disposición final, y las posibles estrategias para su aprovechamiento o valorización.

Derivado de lo anterior se mencionará la normatividad actual aplicable en materia de residuos, así como algunos resultados de la caracterización fisicoquímica básica del sargazo y los hallazgos obtenidos en una alternativa de su manejo, mediante el estudio realizado para la optimización de la producción de biogás a partir de sargazo en codigestión anaerobia con la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU), el cual arrojó un

---

\* Maestra en Ciencias en Estudios Ambientales y de la Sustentabilidad. Doctorante en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6885-676X>; correo electrónico: [mmunozd1100@alumno.ipn.mx](mailto:mmunozd1100@alumno.ipn.mx)

\*\* Doctor en Nutrición. Profesor-investigador en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0821-966X>

\*\*\* Doctora en Ciencias en la Especialidad de Toxicología. Profesora-investigadora en el Instituto Politécnico Nacional, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1316-0244>

potencial poco viable del sargazo como bioenergético, esto asociado a la presencia del arsénico, un compuesto tóxico que puede limitar su aprovechamiento o valorización.

**Palabras clave:** *Sargassum spp*, sargazo, residuo de manejo especial, codigestión anaerobia, aprovechamiento del sargazo.

## Introducción

El arribo masivo de sargazo a las costas del Caribe mexicano, particularmente en el estado de Quintana Roo, México, es un fenómeno que data del año 2011; no obstante, la invasión marina de macroalgas flotantes no nativas del género *Sargassum spp.* se agudizó entre el verano del 2014 y hasta el invierno del 2015 (León, 2019; Rodríguez-Martínez et al., 2017). El influjo de algas cafés o pardas (*Phaeophyta*), del subgrupo de sargazo pelágico, integrado principalmente por dos especies de macroalgas *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* (Franks et al., 2011; Smetacek y Zingone, 2013), se ha presentado en extrema ocurrencia en periodos intermitentes y en cantidades sin precedentes, el pronóstico es que continúe, se incremente y expanda (Marks et al., 2017). La singularidad del sargazo no es exclusiva del Caribe mexicano, en otras regiones de África, Europa y Latinoamérica se ha observado afluencia masiva (Parra, 2022), asimismo en el noreste de América del Sur y todo el Caribe se ha reportado la presencia de cerca de 20 millones de toneladas métricas de biomasa de sargazo pelágico en playas (Wang et al. 2019) y, de acuerdo con Robledo et al. (2021), el punto máximo alcanzado y registrando en esta zona fue de una biomasa 200 veces mayor que en los 8-10 años anteriores.

Para la zona costera de Quintana Roo, México, los municipios de Benito Juárez, Solidaridad, Cozumel, Tulum y Othón P. Blanco reportaron un volumen total diario de sargazo de 71 353 m<sup>3</sup> en sus playas, lo que equivale a la llegada de 318.9 m<sup>3</sup>/km de playa al día (Rodríguez-Martínez et al., 2017), en tanto que reportes de la SEMA (2018) revelaron un volumen total de 144 959 m<sup>3</sup> de sargazo recolectado entre junio y diciembre de 2018 en playas de los municipios Benito Juárez, Cozumel, Isla Mujeres,

Othón P. Blanco, Solidaridad y Tulum. Estas recurrentes acumulaciones de toneladas de la biomasa residual de sargazo resultaron en notables daños económicos, sociales y ambientales en esta región, sobre todo si se considera que la actividad pesquera y turística en la región del Caribe mexicano representan el 15 % del Producto Interno Bruto (PIB) y 14 % de empleos en el país (Milledge et al., 2020). No solo se cerraron playas turísticas, también se perturbó la navegación marina y se produjeron cambios en el comportamiento de anidación de las tortugas marinas (Milledge y Harvey, 2016; Van Tussenbroek et al., 2017; NOAA/AOML, 2018). La economía de la región seguirá viéndose afectada; por ejemplo, el sector turístico en el estado de Quintana Roo reportó, para 2019, 26.4 millones de pasajeros en sus aeropuertos, 22.8 millones de visitantes y 7.2 millones de cruceristas; lo que se traduce a una derrama económica de 15 mil millones de dólares, cifra que se ve afectada por la presencia del sargazo y los gastos de limpieza para los propietarios de hoteles, cuya inversión oscila los \$54 000 dólares por mes, y un gasto estimado de \$120 millones de dólares por remoción de sargazo a través del Caribe de México (Milledge et al., 2020).

En relación a la afectación ambiental que produce el arribo excesivo del sargazo, es importante recordar que estas macroalgas del tipo holopelágico forman masas flotantes (gracias a sus neumatocitos o neumatocistos, pequeñas esferas aparentemente llenas de oxígeno y trazas de nitrógeno) de gran valor ambiental en mar abierto, que se desplazan (cambiando de tamaño y ubicación) en función del rumbo de las corrientes oceánicas en aguas someras y acaban en las playas. Se ha identificado que aparecen en zonas tropicales y subtropicales con dos regiones del “mar de los sargazos”, ubicado al este del Estrecho de Florida y la región de recirculación ecuatorial norte, en el norte de Brasil (López et al., 2023). La función de este ecosistema milenario es transcendental, secuestra carbono y provee oxígeno y nutrientes por lo que conforma el hábitat y refugio de muchos organismos marinos como tortugas, diferentes especies de peces, camarones y cangrejos (Rooker et al., 2006; Witherington et al., 2012). No obstante, su crecimiento descontrolado puede generar muerte masiva de especies de flora y fauna, ya que la densidad de la macroalga no permite el paso de la luz y disminuye el oxígeno en la columna de agua, lo que perjudica particularmente a los arrecifes de coral; además de que afecta la reproducción

de las tortugas y aumenta la mortalidad de los peces (León, 2019; Espinosa y Li, 2020; Parra, 2022).

Los impactos del sargazo no están aislados de los problemas que ocasiona a la población, estos se asocian con los trabajos en el sector turístico y efectos a la salud al contacto con la macroalga, la cual puede ocasionar desde picazón, alergias y salpullido, derivado de la presencia de crustáceos similares a pulgas o hidrozorios como anémonas o aguamala. Otra situación es que desprende gases en su proceso de descomposición como el metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) y amoníaco ( $\text{NH}_3$ ); además de contener concentraciones de metales pesados como el arsénico (As) que es altamente tóxico (León, 2019). De acuerdo con lo comentado en el trabajo de López et al. (2023), la gravedad en la salud por exposición a estos gases radica en que pueden provocar irritación de las vías respiratorias superiores, náuseas, dolor de cabeza, confusión y en situaciones extremas: lesiones pulmonares, neurológicas y cardiovasculares. En lo que respecta a los metales pesados, estos en altas concentraciones pueden provocar enfermedades gastrointestinales y renales, trastornos del sistema nervioso, daño vascular, lesiones cutáneas, defectos de nacimiento, hasta cáncer.

Si bien la presencia del sargazo genera diversos problemas, es inminente tener que resolver su presencia en las playas, así como el qué hacer con él y cómo evitar que continúe afectando. Para ello es necesario desarrollar estrategias de contención, recolección, manejo y gestión del sargazo, no obstante, para lograrlo primeramente se requiere conocerlo y clasificarlo adecuadamente para así generar directrices o normativas ideales que resuelvan la situación.

### **Estrategias existentes de recolección, manejo y gestión del sargazo**

Dentro de las acciones inmediatas para eliminar la presencia del sargazo se optó por ocultar al sargazo bajo la arena, además de recurrir a sistemas manuales o con maquinarias para recolectarlo, lo que genera alteraciones en el suelo de las playas e ignora la correcta disposición como residuo del sargazo. Esta acción se ejecutó principalmente por los propietarios del sector hotelero.

En lo que respecta a las acciones por el gobierno de México, León (2019) menciona que mediante el gobierno con apoyo de científicos y empresarios turísticos, a través de la SEMARNAT, se implementaron estrategias de contención y manejo del sargazo en 2015; esto a través de lineamientos que permiten disponer de las macroalgas recolectadas en la playa. Hacia el 2019 se publicó la primera versión de los lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe mexicano y el Golfo de México; dicho documento fue luego actualizado en 2021. Los lineamientos son provisionales para que, de alguna manera, se pueda enfrentar la contingencia del sargazo mientras expertos en el tema continúan definiendo una norma emergente. El contenido de los lineamientos se enfoca en los aspectos a cumplir para ejecutar seis actividades:

1. Recolección de sargazo en alta mar.
2. Contención del sargazo en zonas marinas cercanas a la costa.
3. Retiro de sargazo en las barreras de contención.
4. Remoción de sargazo de la playa.
5. Manejo y disposición final de sargazo.
6. Campamentos tortugueros y zonas de anidación.

El principal inconveniente de las actividades antes mencionadas es que sus objetivos se enfocan en mantener en buenas condiciones las playas para uso turístico y evitar afecciones a las anidaciones de tortugas o a los mismos ejemplares que se puedan localizar en el sargazo. En las actividades se menciona que los principales mecanismos de recolección del sargazo inician con barreras físicas de contención y el uso de maquinaria sobre las playas para recolectarlo. Lamentablemente la implementación de estos lineamientos no cubre de manera extensa una identificación del sargazo como residuo, su estrategia de recolección y, por tanto, las condiciones ideales para su disposición final o aprovechamiento.

Para lograr establecer los mecanismos más acertados sobre el manejo y gestión del sargazo es necesario tomar en cuenta que una vez que es retirado del océano se descompone en unos pocos días o en hasta una semana produciendo un olor fétido (Walsh, 2019).

Si se llegan a establecer las condiciones que hacen un residuo al sargazo, el siguiente objetivo es identificar a qué jurisdicción corresponde la responsabilidad de su manejo y esto depende de la zona en que se ubique el sargazo; es decir, el sargazo flotando en el océano se considera flora en su hábitat, incluso en los lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe mexicano y el Golfo de México, en su apartado H, numeral 84, dice explícitamente que: “para todas aquellas actividades que requieran recolectar el sargazo en fresco y en estado flotante, ya sea en mar abierto o cercano a la costa, debe ser considerado como un recurso pesquero y las actividades de recolección se deberán apegar a la normatividad vigente aplicable en materia de recursos pesqueros”, para este caso la atribución o responsabilidad sobre el manejo del sargazo es federal debido a que el sargazo se aproxima a las costas y flota sobre la zona marítima de México. No obstante, al arribar a las playas y depositarse sobre la arena en el territorio se considera entonces un residuo de manejo especial (RME) de tipo orgánico por su composición y estructura.

El fundamento de considerarlo un RME es principalmente por su característica predominante de producirse un alto volumen, además de no cumplir con características de un residuo sólido urbano (RSU) o un residuo peligroso (RP) de acuerdo con lo que indica la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, LGPGIR, Art. 5º, fracción xxx (2018). La atribución correspondiente a este tipo de residuo es estatal, y aunque aún no se cuenta con leyes, reglamentos o normativas exclusivas de nueva cuenta los lineamientos técnicos y de la gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe mexicano y el Golfo de México en el inciso “H”, punto 85, menciona que: “para todas actividades que requieran colectar sargazo en estado de descomposición en la costa, barreras de contención, sitios de transferencia y/o disposición final, éste deberá ser considerado como residuo de manejo especial susceptible de ser valorizado en apego a la normatividad aplicable”. Al ser considerado un RME es un residuo que se encuentra sujeto a un Plan de Manejo de Residuos, esto de acuerdo con el Art. 5º, fracción III de la LGPGIR (2018), fracción donde se menciona que: “los residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades”.

Bajo las consideraciones antes descritas es que se puede iniciar con un ejercicio de clasificación del sargazo, sin embargo, esto demuestra que es imperante la necesidad de caracterizarlo y conocer más sobre sus propiedades, para con ello estipular normas, leyes o reglamentos que aborden el tema del sargazo de manera exclusiva con cobertura de su clasificación, atribuciones, manejo, gestión, disposición final o el desarrollo de alternativas para su aprovechamiento.

Una vez abordada la necesidad de establecer también un plan de manejo de residuos para el sargazo, describamos su definición de acuerdo con el art. 5º, fracción XXI de la LGPGIR (2018), donde se indica que es un “instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno”. Como la definición lo indica, generar un plan de manejo del sargazo incluiría una serie de aspectos integrales que buscan involucrar a todas las figuras afectadas y responsables también por la problemática que genera la presencia abundante del sargazo; esto enfocado a la minimización de impactos negativos que este provoca, pero mediante los mecanismos o estrategias adecuadas y precisas para su recolección, manejo, disposición final o alternativas de aprovechamiento, que estén orientadas a una serie de objetivos claros que se establezcan en el plan de manejo.

Abordemos ahora cuáles son algunos de los avances en las propuestas del uso y aprovechamiento del sargazo en México que han sido difundidos por fuentes de noticieros e información nacional e internacional que mencionan el uso y aprovechamiento del sargazo para la elaboración de libretas, ecoladrillos, elaboración de cocteles gourmet, creación de fertilizantes caseros, elaboración de suelas para tenis e incluso producción de pieles sintéticas orgánicas y cremas cosméticas (Arce, 2019). Aunque ya existen esta serie de iniciativas que buscan aprovechar el sargazo, su industrialización y

comercialización ha quedado inconclusa a causa de la baja rentabilidad industrial, falta de coordinación y regulación (López et al., 2023), así como el paso esencial de su caracterización para conocer sus propiedades físico químicas, debido a que no solo posee contenidos benéficos, sino que también se ha documentado la presencia de concentraciones de elementos que incluyen metales pesados como la cantidad de arsénico (As) reportada en el trabajo de Rodríguez-Martínez et al. (2020), quienes detectaron 55,59 y 123 ppm del metal tóxico; mientras que Ortega-Flores et al. (2022) encontraron desde  $48.24 \pm 3.35$  mg/Kg de As hasta  $101.40 \pm 9.12$  mg/Kg de As en la especie de *S. fluitans* recolectada en Quintana Roo.

### **La producción de biogás a partir del RME de sargazo como una alternativa de manejo**

Una opción de aprovechamiento del sargazo es emplearlo como un sustrato para la producción de biogás, que es el producto final de un proceso denominado digestión anaerobia, el cual se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, es de tipo biológico, complejo, degradativo y por acción de microorganismos en los materiales orgánicos o biomasa de un sustrato (residuos animales y/o vegetales) son convertidos en biogás, este se compone de una mezcla de gases de metano (50-75 vol. %) y de dióxido de carbono (25-50 vol. %), aunque también contiene pequeñas cantidades de hidrógeno (H<sub>2</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), amoníaco (NH<sub>3</sub>) y otros gases traza (FAO, 2011; Mutz et al., 2017). En este proceso anaeróbico también se produce digestato, una mezcla acuosa de materiales sólidos rica en nutrientes, minerales y compuestos biológicamente activos, que puede ser utilizado como fertilizante o mejorador de suelos (Ramos, 2014).

Diversos investigadores han procesado la biomasa de algunas especies de algas vía digestión anaerobia, los estudios que lograron producciones elevadas con algas del mismo género o especie similares a las que llegan a Quintana Roo, fueron los de Olivera et al. (2014), quienes lograron producir hasta 119 y 380 L CH<sub>4</sub>/kg sv con *Sargassum sp.* como sustrato; mientras que Thompson et al. (2021) produjeron  $292.18 \pm 8.70$  CH<sub>4</sub> ml/gVS con

*Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*; y Tapia et al. (2018) lograron generar 104 L CH<sub>4</sub>/kg sv con *Sargassum fluitans* y *Sargassum natans*.

En este contexto, el presente trabajo planteó la evaluación del sargazo como sustrato en codigestión anaerobia con la FORSU (Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos) con la finalidad de comprobar si las macroalgas del género *Sargassum* spp. que arriban al Caribe Mexicano en co-digestión anaerobia con la FORSU aumentan la producción de biogás comparado con la digestión anaerobia del *Sargassum* spp. como único sustrato.

## Metodología

### Recolección de muestras de sargazo

Se seleccionó la playa El niño, ubicada en el municipio de Puerto Juárez en Quintana Roo (México), por ser de libre acceso (no pertenecía a ningún hotel) y sin interferencias de limpieza continua de sargazo en la zona; además de ser una zona muy popular de concurrencia familiar cercana al embarcadero del Ferri. El muestreo se realizó en julio 2020, de acuerdo con lo descrito en la norma NADF-020-AMBT-2011, en específico obedeciendo al punto 7.1 de la metodología de muestreo para así conseguir una muestra homogénea derivada de submuestras. Esta norma ambiental se fundamenta en la NMX-AA-15-1985 para el método de cuarteo, pero orientada a los residuos orgánicos, tal como lo es el sargazo al ser de origen vegetal y que al acumularse en las playas se convierte en un residuo orgánico de gran volumen. Las mismas normas se aplicaron para la recolección de la FORSU proveniente de pilas de la planta de composta en Bordo poniente, Ciudad de México, y para el caso del inóculo su toma fue directamente del cárcamo de lixiviación de la pila de composta muestreada.

Se recolectaron muestras compuestas homogéneas derivadas de submuestras o muestras individuales, que fueron recolectadas en dos medios: sobre la playa y dentro del mar; además, en ambos casos se realizó a la mitad de las muestras individuales de cada medio un lavado con agua de mar en el sitio de muestreo. Tanto la preservación del sargazo, así como de la del FORSU, fue en bolsas con cierre hermético, del material de

polietileno; las cuales se conservaron a  $-40^{\circ}\text{C}$  en ultracongelador; mientras que el inóculo se recolectó en frascos de 1L de plástico y se mantuvieron a  $55^{\circ}\text{C}$  en una incubadora estática.

### **Parámetros fisicoquímicos del sargazo**

Se considera que la digestión anaeróbica del sargazo se realizaría bajo condiciones de prelavado y en codigestión con FORSU y utiliza como inóculo lixiviado proveniente de la planta de composta de Bordo Poniente de la Ciudad de México, se evaluaron algunos parámetros físicos y químicos del sargazo, FORSU y del inóculo. Los parámetros valorados se describen en la tabla 1. Dentro de las determinaciones antes mencionadas la que fue el eje principal para el monitoreo de la producción de biogás fue la del PBM basada en el método de Angelidaki et al. (2009), que emplea controles con un blanco positivo de inóculo y celulosa, así como un blanco negativo con inóculo y agua. Tanto para los controles y las muestras a procesadas el método se realizó por duplicado para cada mezcla, para así analizar las tendencias de producción de biogás y metano.

### **Prueba de digestión anaeróbica**

A escala laboratorio, el proceso de digestión anaerobia se monitorea con la prueba del Potencial Bioquímico de Metanización (PBM), para verificar qué cantidad y calidad de biogás producen nuevos sustratos en el proceso; es así como mediante una investigación previa se estudian las particularidades que puede presentar el proceso, debido a que buena parte del desarrollo de este se condiciona por el sustrato (Arhoun, 2017).

Tabla 1. *Métodos de prueba de parámetros fisicoquímicos para caracterización del *Sargassum* spp.*

<i>Parámetro</i>	<i>Método de prueba propuesto</i>	<i>Referencia</i>
pH	Medición potenciométrica (suspensión acuosa)	Sadzawka et al., 2005.
Conductividad eléctrica	Medición conductimétrica (suspensión acuosa)	Sadzawka et al., 2005.
Porcentaje de humedad	Gravimetría y secado	Sadzawka et al., 2005.
Potencial de óxido reducción (ORP)	Medición directa a muestra con extracto en estado líquido	Sin referencia, método predefinido por equipo.
Sólidos totales	Calcinción en mufla	Sadzawka et al., 2005.
Sólidos volátiles (materia orgánica, para carbono orgánico)	Pérdida por calcinción a 550° C	Sadzawka et al., 2005.
Potencial bioquímico de metanización (PBM)	Volumen de gas generado	Angelidaki et al., 2009.
Lignina	Digestión H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 72 %	Modificación estandarizada norma TAPPI-T 222 om-02.
Poder calorífico superior e inferior	Método de prueba para RSM bomba calorimétrica	NMX-AA-33-1985.
Determinación de metales pesados	Digestión de muestras por calentamiento en placa	Método EPA 3052.

Fuente: los datos presentados en esta tabla fueron elaborados a partir de la información de los autores citados en la última columna.

El montaje de las pruebas consistió en un set de experimentos identificados como A, B y D en viales de 125 ml, con un volumen de operación de 60 ml y espacio libre de cabeza de 65 ml para almacén del biogás producido y con ello se evitó que se disolviera en el digestato. Los viales se sellaron con septas de goma y anillo de aluminio para lograr la posterior extracción de muestra de biogás y la purga de este. Las condiciones anaerobias se propiciaron con una purga en la preparación con gas Helio (He).

El proceso de codigestión anaerobia se llevó a cabo en la incubadora Lab Tech LSi-3016 a 55° C (digestión de tipo termófila (Vanegas, 2015)) y una agitación constante de 70 rpm por un periodo de 35 días; la digestión fue también de tipo seca debido a que la concentración de materia sólida es mayor al 20–40 % de sv (Angelonidi y Smith, 2015); con 20–40 % sv (Massi, 2012). En este tipo de digestiones se suelen emplear reactores completamente mezclados y por lotes. Se reporta que esta serie de condiciones hace el proceso más rápido (Fernández et al., 2010). Es relevante mencionar que para

el montaje del set de experimentos las relaciones de sólidos volátiles (sv) elegidas para los sustratos (sargazo y FORSU) fueron de 2:1, 1:2 y 1:1; esto de acuerdo con Esposito et al. (2012) y Raposo et al. (2011). Las cantidades de sustratos e inóculo agregadas a los viales fueron según los sv de cada sustrato, estos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Promedio de sólidos volátiles añadidos en el set de experimentos de los sustratos e inóculo

Prueba	Promedio % SV añadido	g SV añadidos de sustratos(s)
Blanco positivo	99.7	0.5
Blanco negativo	44.1	-
FORSU	90.4	0.6
SM	91.2	0.2
SML	77.5	0.5
SM_FO 1:2	73.6	0.9
SML_FO 1:2	72.4 ± 14.2	0.8 ± 0.2

\*Nota: Los valores de la tabla 2 que presentan desviación estándar se lograron realizar por triplicado, el resto por duplicado.

Nomenclatura:

SM = Sargazo sobre el mar sin prelavado

SML = Sargazo sobre el mar con prelavado

FORSU = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar sin prelavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar con prelavado y FORSU relación 1:2 SV

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Cada tercer día se midió la cantidad de biogás generado por desplazamiento de columna y la composición de biogás mediante inyecciones de muestra en el cromatógrafo de gases Autosystem Perkin Elmer, equipado con un detector de conductividad térmica (TSD) y una columna empacada de 12' de largo, 1/8" de diámetro externo y 0.08" de diámetro interno, soporte de acero inoxidable y material de empaque Porapak QS (Alltech), las medidas se visualizaron a través del *software* Clarity Chromatography SW en cromatogramas con 3 picos que representan el porcentaje de N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. El gas de arrastre fue el helio (He) grado cromatografía (Praxair); para la inyección de muestras se empleó una jeringa especial para gas de precisión (Vici Preciscion Lok).

## Resultados y discusión

### Resultados de la caracterización fisicoquímica de los sustratos e inóculo

Los resultados de los parámetros de la caracterización de las distintas muestras del sargazo que fueron probadas, así como de la FORSU y del lixiviado de la planta de composta que se utilizó como inóculo se resumen en la tabla 3; en ella se presentan los valores promedio para cada parámetro, en el caso del sargazo se presentan resultados en las condiciones de recolección sobre el mar y sobre la playa; en ambos casos con y sin prelavado; esto para verificar la influencia de la presencia de sal y arena en el proceso. De acuerdo con Cheng (2018) el pH óptimo para el desarrollo de los principales microorganismos en el proceso de digestión llamadas Archeas metanogénicas, es en un pH de 6.5-8.0; por lo que los datos de la tabla 3 cubren el rango permitido, a excepción de la FORSU, cuyo valor es inferior a 6.0. El resto de los valores de pH en los sustratos e inóculo indican condiciones básicas; aunque el sargazo recolectado en el mar sin pre-lavado (SM) y la FORSU registraron valores ácidos que influyen generalmente en el proceso al inhibir la producción de biogás, en especial por la FORSU; un beneficio de la codigestión es equilibrar estos niveles de pH.

En relación al ORP, este debe monitorearse durante el proceso, debido a que es un parámetro que verifica las condiciones en que se desarrollan las bacterias metanogénicas y de ello depende su baja velocidad de crecimiento y los estrictos requerimientos de bajo potencial redox que deben oscilar en los -300 mV (Lorenzo y Obaya, 2005). La conductividad por su lado expresa numéricamente la capacidad de la muestra para transportar una corriente eléctrica, es decir, la presencia de iones, en este caso las sales en el sargazo prelavado con agua de mar mostró un valor superior que el del sargazo sin prelavado.

La cantidad de los sólidos volátiles (sv) equivale a la materia orgánica susceptible a degradación en el proceso de digestión anaerobia para ser transformada a metano. Los resultados arrojaron que hubo mayor variación entre los tipos de sargazo para los valores de sv y st (sólidos totales). Las variaciones de estos parámetros se notaron aún más en el inóculo recolec-

tado en septiembre de 2020 y febrero de 2021, lo cual se atribuye a la variación estacional, ya que en septiembre fue época de lluvia y se presenta una dilución del lixiviado, en comparación de febrero de 2021 donde ya era época seca. De este par de parámetros se desprende la relación entre  $sv/st$  que equivale al porcentaje de materia orgánica susceptible a degradación en el proceso, estas cantidades muestran valores superiores a 80 % para los sustratos que fueron sometidos al proceso.

Otro dato que se puede conocer es el de la cantidad de cenizas de los sustratos mediante el valor de los  $st$ , es decir, lo equivalente al material recalcitrante que no es posible degradar en el proceso. Los valores de la tabla 3 son elevados para el sargazo, en particular a pesar de que hubo producción de biogás con contenido de metano.

El dato de lignina en el sargazo con prelavado registró un valor ligeramente menor al de sargazo sin prelavado, el único dato comparativo fue el realizado por Tapia et al. (2018), que obtuvieron un 15.6 % de lignina, valor superado por casi el doble para el sargazo sin prelavado y por un 10 % para el que sí tuvo prelavado.

En cuanto el valor de PCS (poder calorífico superior) y PCI (poder calorífico inferior) en las muestras del sargazo recolectado en el mar sin prelavado se encontró un PCI de  $1812.119 \pm 37.561$  cal/g y para el sargazo recolectado en el mar sin prelavado  $2036.896 \pm 4.07$  cal/g cantidad que representa cerca de 2000 cal/g menos que lo reportado por López-Sosa et al. (2020) quienes reportaron un valor de PCI de la mezcla de *Sargassum* spp. de entre 3224.421 cal/g y 3296.075 cal/g. Estos valores fueron de utilidad para poderlos comparar con el PCI o poder calorífico neto, que de acuerdo con la NMX-AA-033-1985 es “el calor producido por la combustión de una cantidad unitaria de combustible sólido en condiciones constantes de presión y condiciones específicas tales que toda el agua de los productos permanezca en forma de vapor”. Sin embargo, para tomar en cuenta la termovalorización de los residuos de esta macroalga se deben considerar factores como la concentración de metales en el sargazo (los valores de metales pesados del sargazo se mostrarán más adelante).

Tabla 3. Resultados de parámetros físicos y químicos de sargazo, FORSU e inóculo

Parámetro	SM	SML	SP	SPL	Inóculo septiembre 2020	Inóculo febrero 2021	FORSU
pH	6.9 ± 0.1	7.4 ± 0.1	7.9 ± 0.1	7.4 ± 0.2	8.9 ± 0.01	7.71 ± 0.01	4.47 ± 0.11
Conductividad (µS/cm)	55946.7 ± 1422.9	61213.3 ± 2294.5	46466.7 ± 3556.7	1467.3 ± 77.5	32160 ± 576.9	48400 ± 2593.5	43120 ± 7389.8
ORP (mV)	66.8 ± 2.3	54.8 ± 1	39.7 ± 3.8	35.5 ± 2.7	-468.1 ± 6.1	-482.1 ± 74.5	147.6 ± 5.0
% humedad	22.3 ± 0.9	22.0 ± 0.04	22.6 ± 0.8	17.8 ± 0.4	97.4 ± 0.1	96.3 ± 0.1	77.9 ± 2.4
ST (g/kg)	801.1 ± 10.6	546.5 ± 404.6	774 ± 8.4	822.2 ± 4	26.1 ± 1.1	37.0 ± 0.6	221 ± 23.9
SV (g/kg)	730.7 ± 13.3	484 ± 358.2	659.1 ± 12.7	749.9 ± 7.5	8.7 ± 0.2	16.3 ± 0.5	201.7 ± 23.6
SV/ST (%)	91.2 ± 0.6	88.7 ± 0.4	85.1 ± 0.8	91.2 ± 0.6	33.2 ± 0.5	43.9 ± 0.8	91.2 ± 1.1
Lignina (%)	30 ± 1.7	26 ± 0.2	-	-	-	-	-
Poder calorífico superior (cal/g)	2043.9 ± 29.8	2210.1 ± 5	-	-	-	-	-
Poder calorífico inferior (cal/g)	1812.1 ± 37.6	2039.9 ± 4.1	-	-	-	-	-

Nomenclatura:

SM = Sargazo sobre el mar sin prelavado

SML = Sargazo sobre el mar con prelavado

SP = Sargazo sobre la playa sin lavado

SPL = Sargazo sobre la playa con prelavado

FORSU = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

**Resultados del potencial bioquímico de metanización (PBM).** Si bien el método original de PBM indica que el proceso debería ser de al menos 30 días, los resultados que se muestran fueron de 35 días, esto debido a que el comportamiento de la evaluación del sargazo como cosustrato dio mejores niveles de producción de biogás hacia el día 20. Los resultados se muestran en condiciones estándar de operación, es decir, se considera la presión de 0.77 atm en la Ciudad de México (CDMX) y la condición de operación a una temperatura de 55°C, equivalente a 328 K.

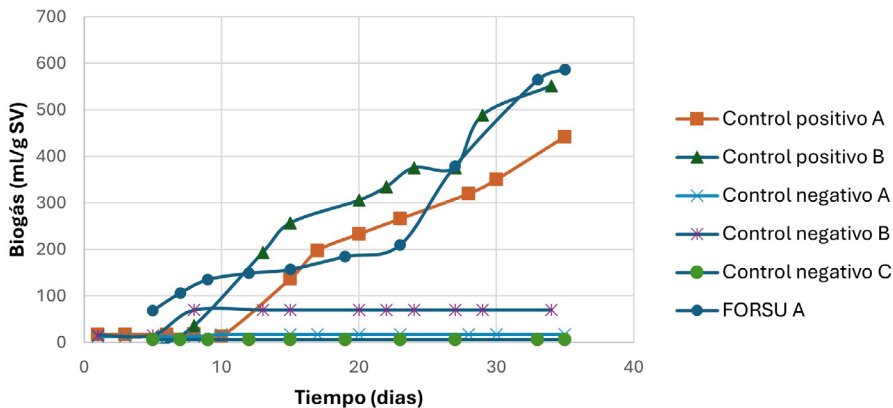
La mayor parte de los resultados fueron realizados por duplicado, solo algunos se lograron por triplicado, se reportó el volumen acumulado durante los días de monitoreo para así poder observar la tendencia del rendimiento de biogás y metano para los controles positivos, negativos, el sargazo como único sustrato, la FORSU y los esquemas de codigestión.

Las figuras que muestran las tendencias tienen el mismo rango numérico para el volumen de biogás (700 ml/g sv) y metano (350 ml/g sv) gene-

rados, esto con la finalidad de poder comparar las diversas tendencias de los diferentes sustratos.

A continuación, en la figura 1 se muestran los resultados de la evolución de la producción de biogás únicamente de la FORSU, lo que demuestra que su producción es superior en comparación con la producción de los controles negativos, como referente se observan las producciones de los controles positivos que contienen celulosa. Los resultados provienen de un set de experimentos identificados como A, B, y C, de los cuales los mejores resultados son los que se muestran en las tendencias. La producción de los controles positivos y de la FORSU se elevan hacia la mitad del proceso en el día 15.

Figura 1. Tendencia de la producción de biogás en los controles y la FORSU



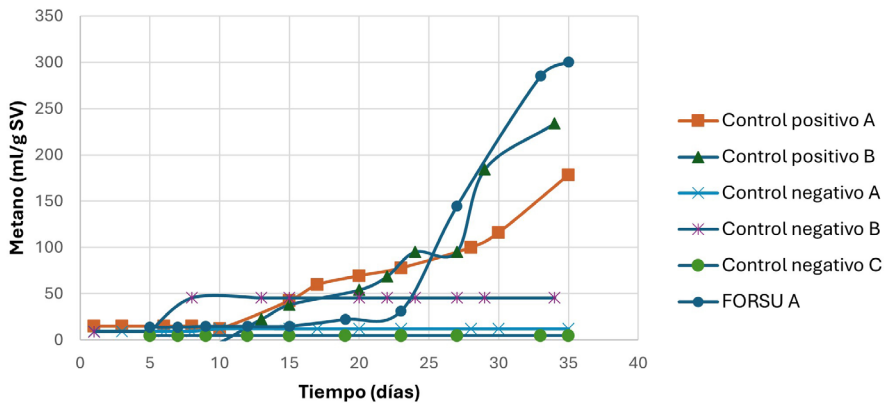
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Respecto a la concentración de metano, en la figura 2 se visualiza mayor producción en la FORSU que en los controles positivos y los controles negativos es la mayor tasa de producción de metano entre el día 17 y el día 20.

La ejecución de los experimentos demostró que la FORSU tiende a una producción de biogás de hasta 586.82 de los cuales 300.30 son lo que equivale a un 51.17% de  $\text{CH}_4$ . Al comparar estos valores con reportes de otros autores que realizaron sus experimentos con el inóculo y FORSU procedentes del mismo origen (la planta de composta de Bordo Poniente en la Ciudad de México), podemos observar que la tendencia del volumen de

producción de biogás y metano de esta investigación son similares para la FORSU, principalmente con lo reportado por Gállego (2021), quién reportó 472.2 y 290.9 mientras que su control positivo es también muy similar al que reportamos en este trabajo con  $316.3 \pm 58.92$  y  $166.2 \pm 16.0$ ; esto en un periodo de 42 días.

Figura 2. Tendencia de la producción de metano en los controles y la FORSU



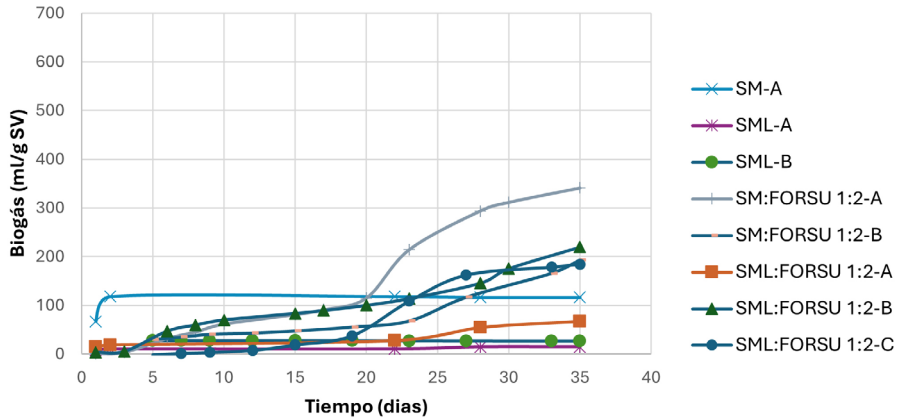
Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

En cuanto al control negativo es Salcedo (2017) quien reporta un valor muy similar al que se encontró en este trabajo de investigación con 29.3 en un periodo de 20 días. En lo que respecta al trabajo desarrollado por Sánchez (2015) tenemos que considerar que monitoreó su proceso en casi el doble de tiempo que lo realizado en este trabajo, por lo que toma sentido que su rendimiento de metano reportado tenga una cantidad de casi del triple de volumen en comparación al volumen que reportamos en este trabajo, con un valor de 1080.1 en 56 días.

En la comparativa de la producción de biogás con el sargazo como único sustrato y los distintos esquemas de codigestión se puede observar en la figura 3 que la producción de biogás del sargazo como único sustrato sin enjuague (SM) era baja en los primeros 5 días del proceso y, en general, se potencializó a partir del día 20. Para el caso de las codigestiones el sargazo

sin prelavado con la FORSU relación 1:2 (SM:FO 1:2), una de las réplicas es la que más producción de biogás mostró.

Figura 3. Tendencia de la producción de biogás en el sargazo y co-digestiones sargazo-FORSU

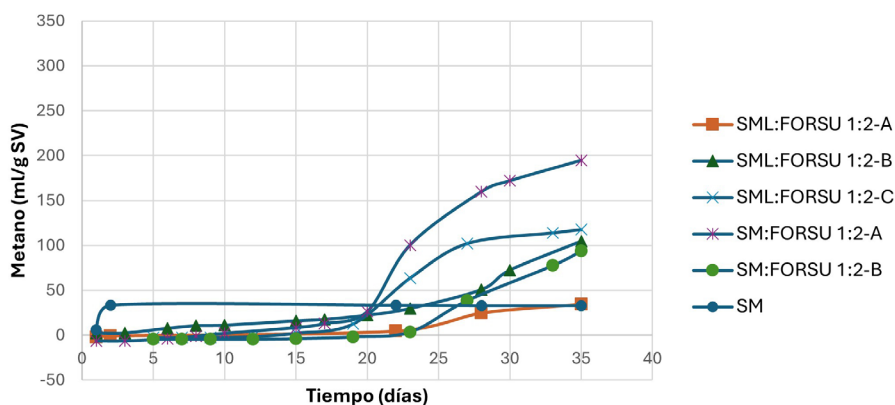


Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

En la figura 4 se muestra la tendencia, pero de la producción de metano para los mismos esquemas de sargazo como único sustrato y en codigestión mostró mejor producción de metano a una de las réplicas de sargazo sin prelavado (SM:FORSU) relación 1:2 sv, la cual se elevó desde el día 20 en adelante, hasta casi alcanzar 200, seguido de dos réplicas de sargazo prelavado (SML:FORSU) relación 1:2.

Las tendencias visualizadas en esta figura indican que la producción de metano coincide con la de biogás en el día 20 del proceso y que a diferencia de las tendencias de la FORSU, hubo una mejora en el contenido de metano hasta de un 60 % para las codigestiones.

Figura 4. Tendencia de la producción de metano en sargazo y la co-digestión de sargazo-FORSU



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Es necesario mejorar las réplicas de los esquemas de codigestión con sargazo prelavado y sin prelarvar para consolidar qué esquema es el que ofrece el mejor rendimiento de biogás y metano. Lo que si fue observable es que los esquemas de codigestión muestran mejor producción de biogás y metano a comparación del sargazo “crudo” como único sustrato, llegando a incrementar la calidad del biogás hasta 10 % más metano con respecto a la FORSU como único sustrato. En todas las tendencias analizadas se observó que el incremento de producción de biogás y metano con el esquema de codigestión se retarda, a comparación del incremento de producción de la FORSU como único sustrato.

### Calidad del digestato

El digestato es otro producto de interés del proceso de codigestión anaerobia, los mejores resultados de producción de biogás y metano para cada sustrato solo y en las diferentes proporciones de sv se compararon conforme a la NADF-020-AMBT-2011, esta norma originalmente es para clasificación de composta de acuerdo con su calidad; sin embargo, es aplicable también para

deducir la calidad del digestato y evaluar la viabilidad de emplearlo como mejorados de suelos o fertilizante. Los resultados de los parámetros analizados se observan en la tabla 4.

Tabla 4. *Parámetros determinados para los digestatos del set de experimentos analizados*

<i>Prueba</i>	<i>pH</i>	<i>Conductividad (μS/cm)</i>	<i>ORP (mV)</i>	<i>%H</i>	<i>SV (g/kg)</i>	<i>ST (g/kg)</i>	<i>% SV/ST</i>
Control positivo	8.2 ± 0.4	32660 ± 2671	-68.6	96.8 ± 0.8	9.7 ± 2.8	30.8 ± 6.5	30.3 ± 3.2
Control negativo	9.6 ± 0.3	25000 ± 1215.1	-108.8	97.6 ± 0.1	1.69	25.9 ± 3.1	17.1 ± 7
FORSU	8.2	33280	43	97.1	8.90	28.9	30.8
SM	9.4	22180	-84.5	97.9	4.21	20.9	19.1
SML	9.4	29000 ± 1216.2	-77	97.7	7.31	29.0	24.5
SM:FO 1:2	8.3	33800 ± 3479	-53.5	97.2	9.30	32.3	28.1
SML:FORSU 1:2	8.4 ± 0.4	31146.7 ± 4320.7	-9.3	97.1 ± 0.7	7.9 ± 2.7	29.0 ± 6.6	26.8 ± 3.2

Nota: Los valores de la tabla que presentan desviación estándar se lograron realizar por triplicado, el resto únicamente por duplicado.

Nomenclatura:

SM = Sargazo sobre el mar sin prelavado

SML = Sargazo sobre el mar con prelavado

FORSU = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar sin prelavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar con prelavado y FORSU relación 1:2 SV

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Al compararlos con la NADF-020-AMBT-2011, todos los valores de %H del digestato producto del esquema de codigestión muestran que se superó el valor sugerido para una composta, es un valor esperado debido a que el digestato es un producto semisólido que se compone en su mayoría de agua; no obstante, obedeciendo a la clasificación de norma, este entra en el rango para composta tipo C (%H de 25-45 %). En cuanto a la mayoría de los valores de pH registrados (superiores a 8.0), estos entran en la clasificación de composta de calidad B o C, y para la conductividad eléctrica se observó que es el único parámetro que entra en los valores de la composta tipo A con lecturas <4 dS/m (400 000 μS/cm) en todas las muestras. Para el caso de la materia orgánica (%sv) los valores fueron inferiores al 20 % lo que entra en la clasificación de composta de tipo A; a su vez este parámetro es un indicador de que la materia orgánica se redujo durante el proceso de codigestión.

Tabla 5. Concentraciones de metales pesados detectados en sustratos y digestatos del proceso de co-digestión anaerobia

Elemento	Sustratos (mg/kg) base seca			Digestatos (mg/kg) base seca						NADF-AMBT-020-2011 (mg/kg) base seca			
	SM	SME	FORSU	Control positivo	Control negativo	FORSU	SM	SM:FO 1:2	SML:FO 1:2	Control [As]	Nivel 1-tipo A	Nivel 2-tipo B	Nivel 3-tipo C
Cu	2.2	0.8	9.9	4.2	4.2	11.4	4.1	7.795	7.3	---	70	150	400-500
Cd	1.9	2.0	0.1	2.2	2.5	2.7	1.8	2.885	2.8	---	0.7	1	3
Cr	0	0	0	2.5	2.2	3	2.4	1.725	1.5	---	70	70	250
Ni	5.6	4.9	0	14.0	15.2	16.2	14.4	16.33	15.3	---	35	60	100
Pb	13.8	16.9	3.8	21	23.2	24.8	18.6	24.715	24.4	---	45	120	200
Zn	10.5	11.5	38.9	36.2	38.2	59.4	46.0	33.8	38.9	5.6	200	500	1200-1800
Hg	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0	0	0.4	0.7	3	
As	<b>22.6</b>	<b>20.3</b>	0.1	1.7	<b>2.2</b>	<b>2.5</b>	<b>3.8</b>	<b>5.6</b>	<b>8.8</b>	11.6	0.1	0.7	2

Nota: Valores determinados del set de experimentos analizados por duplicado para sustratos y digestatos, a excepción de la FORSU y control negativo.

Nomenclatura:

SM = Sargazo sobre el mar sin pre-lavado

SML = Sargazo sobre el mar con pre-lavado

FORSU = Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos

SM:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar sin pre-lavado y FORSU relación 1:2 SV

SML:FO 1:2 = Sargazo sobre el mar con pre-lavado y FORSU relación 1:2 SV

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos experimentalmente.

Un análisis conjunto del tipo de composta en que entraron la mayoría de los parámetros ubica a los digestatos como composta tipo C, cuyo uso es recomendado para paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación. Pese a que se logró un ejercicio de clasificación del digestato, es importante mencionar que puede complementarse al añadir los parámetros de carbono total, nitrógeno total, relación C/N, macronutrientes (NPK), fitotoxicidad (IG) y las concentraciones máximas de elementos traza en mg/kg base seca según el tipo de composta en los que incluye As, Cd, Cr total, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn.

En la tabla 5 se muestran los resultados de las concentraciones de Cu, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Hg y As que se determinaron para los sustratos (antes del proceso de digestión) y para los distintos digestatos. La técnica empleada fue espectrofotometría de absorción atómica.

La mayoría de los valores obtenidos no supera las concentraciones en mg/kg base seca del nivel de composta 1, tipo A; a excepción del Cd, sus

valores entran en su mayoría en el nivel 2, tipo B de composta. Del análisis de estos elementos el hallazgo más relevante es el elemento del arsénico (As), dónde los valores más elevados los registró el sargazo con y sin prelavado, esto antes de someterlos al proceso de codigestión. Se observó que la concentración disminuyó posterior al proceso de codigestión; no obstante, las lecturas aún excedieron la concentración de 2 mg/kg de As en base seca. El hallazgo de concentraciones de As coincide con los trabajos de Thompson et al. (2021) y López-Sosa et al. (2020), quienes también evaluaron el sargazo como fertilizante y alimento para ganado, coincidiendo en que el As es elevando para emplearlo como fertilizante en cultivos de alimentos y como alimento para ganado al implicar un riesgo a la salud humana por consumirlos. La mayoría de los valores de los digestatos entraron en el nivel de composta 3, tipo C, para uso recomendado en paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación.

## Conclusiones

Las tendencias de los rendimientos de biogás y metano en las pruebas de PBM indican que hubo producción a los 15 días del proceso en los controles positivos y la FORSU. Para el caso del sargazo como único sustrato y los esquemas de codigestión 1:2 sv se observó un retraso en la producción de biogás y metano potencializándose hacia el día 20 del proceso.

El comparativo del sargazo como único sustrato y el esquema de codigestión mostró que la tendencia del rendimiento de biogás y metano mejora FORSU relación 1:2 sv añadidos, el que superó por 10 % la tendencia de producción de metano en comparación de la FORSU como único sustrato. En lo que respecta al análisis de los sustratos con la NADF-AMBT-020-2011 se destacó que, en las concentraciones del contenido de metales pesados, el sargazo como sustrato supera en contenido de arsénico.

La calidad de digestato conforme a la NADF-AMBT-020-2011 permitió consolidar un fertilizante nivel 3, tipo C, para uso recomendado en paisaje, áreas verdes urbanas y reforestación, pero con una concentración que supera el límite máximo permisible (LMP) de la concentración de arsénico; sin embargo, aun con la presencia de este se registró producción de biogás y metano, generados por los microorganismos presentes en el inóculo. Se

infiere que la disminución de la concentración del arsénico posteriores al proceso fue un efecto de dilución por el mismo esquema de codigestión y el inóculo añadido. Aparentemente la presencia del arsénico en el sargazo pudo influir en la inhibición la producción de biogás y metano al usarlo como único sustrato y en las codigestiones, persistiendo el arsénico hasta su conversión a digestato, lo que representa un riesgo para los suelos y salud humana al emplearlo como fertilizante, ya que aun la concentración supera el valor del LMP de arsénico de 2 a 3 veces más.

## Referencias

- Lorenzo Acosta, Y. y Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35-48.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L. y Campos, J. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water, Science and Technology-WST*, 59(5), 927-934.
- Angelonidi, E. y Smith, S. (2015). A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. *Water and Environment Journal*, 29(4), 549-557. doi:10.1111/wej.12130.
- Arce, J. (23 de junio de 2019). El sargazo, un mar de oportunidades. *El Sol de México*. <https://www.elsoldemexico.com.mx/doble-via/ecologia/sargazo-caribe-mexicano-reciclaje-zapatos-viviendas-cambio-climatico-3791920.html>
- Arhoun, B. (2017). *Digestión y co-digestión anaerobia de residuos agrícolas, ganaderos y lodos de depuradora* [Tesis doctoral. Universidad de Málaga]. Universidad de Málaga.
- American Society for Testing and Materials [ASTM]. (2016). *Method of test for holocellulose in wood*. ASTM. <http://www.astm.org/Standards/D1104.htm>
- Cheng, J. (Ed.). (2018). *Biomass to renewable energy processes*. Tylor and Francis.
- Environmental Protection Agency (1996). Test Method 3052: Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices. (Revisión 0). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3052.pdf>
- Espinosa, L. y Li, J. (2020). *El riesgo del sargazo para la economía y turismo de Quintana Roo y México*. BBVA.
- Esposito, G., Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A. y Pirozzi, F. (2012). Bio-methane Potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. *The open environmental Engineering Journal*, 5(2112), 5-8.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO]. (2011) *Manual de biogás*. FAO.

- Fernández, L., Álvarez, C., Sales, D. y Romero, L. (2010). Start-up of thermophilic–dry anaerobic digestion of OFMSW using adapted modified SEBAC inoculum. *Biore-source Technology*, 101(23), 9031-9039. doi:10.1016/j.biortech.2010.07.021
- Franks, J. S., Johnson, D. R. y Ko, D. S. (2016). Pelagic Sargassum in the tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*, 27(1). SC6-SC11.
- Gállego, K. (2021). *Efecto de la bioaumentación en la generación de metano en un proceso de digestión anaerobia termófila de residuos orgánicos* [Tesis doctoral. Instituto Politécnico Nacional]. Instituto Politécnico Nacional.
- Mutz, D., Hengevoss, D., Hugi, C. y Gross, T. (2017). *Opciones para el aprovechamiento energético de residuos en la gestión de residuos sólidos urbanos. Guía para los responsables de la toma de decisiones en países en vías de desarrollo y emergentes*. GLZ.
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) de 2003. La presente Ley es reglamentaria de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la protección al ambiente en materia de prevención y gestión integral de residuos, en el territorio nacional. 8 de octubre de 2003. DOF 08-05-2023.
- León, C. (2019). El sargazo a escena. *Salud Pública México*, 61(5), 701-703. <https://doi.org/10.21149/10870>
- López-Sosa, L. B., Alvarado-Flores, J. J., Corral-Huacuz, J. C., Aguilera-Mandujano, A., Rodríguez-Martínez, R. E., Guevara-Martínez, S. J., Alcaraz-Vera, J. V., Rutia-ga-Quiñones, J. G., Zárata-Medina, J., Ávalos-Rodríguez, M. L. y Morales-Máximo, M. (2020). A Prospective Study of the Exploitation of Pelagic *Sargassum* spp. as a Solid Biofuel Energy Source. *Applied Sciences*, 10(23), 8706. <https://doi.org/10.3390/app10238706>
- López González, I. E., Lucho Constantino, C. A. y López Pérez, P. A. (2023). La invasión de sargazo: de un problema ambiental a un área de oportunidad. *Tópicos De Investigación En Ciencias De La Tierra Y Materiales*, 10(10), 18-26.
- Massi, E. (2012). Anaerobic digestion. *Green Energy and Technology*, 47-63. doi:10.1007/978-1-4471-2369-9\_3
- Marks, L. M., Reed, D. C. y Obaza, A. K. (2017). Assessment of control methods for the invasive seaweed *Sargassum horneri* in California, USA. *Management of Biological Invasions*, 8(2), 205-213.
- Milledge, J. J. y 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.
- Milledge, J. J., Supattra, M., Arribas López, E. y Bartlett D. (2020). Sargassum inundations in Turks and Caicos: Methane potential and proximate, ultimate, lipid, amino acid, metal and metalloid analyses. *Energies*. 13(6), 1523. doi:10.3390/en13061523
- Muñoz, M., Tovar, L. y Gutiérrez, M. (2019). *Producción de biogás a partir de sargazo como una alternativa de manejo* [Tesis para obtener el grado de maestría]. Instituto Politécnico Nacional.

- NOAA's Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory [NOAA/AOML]. (2 de enero de 2018). *Tracking Marine Debris*. [www.aoml.noaa.gov/keynotes/keynotes\\_0118\\_marinedebris.html](http://www.aoml.noaa.gov/keynotes/keynotes_0118_marinedebris.html)
- Oliveira, J. V., Alves, M. M. y Costa J. C. (2014). Optimization of biogas production from *Sargassum* sp. using a design of experiments to assess the co-digestion with glycerol and waste frying oil. *Bioresource Technology*, 175, 480-485.
- Ortega-Flores, P. A., Serviere Zaragoza, E., De Anda-Montañez, J. A., Freile-Pelegrín, Y., Robledo, D. y Méndez-Rodríguez, L. C. (2022). Trace elements in pelagic *Sargassum* species in the Mexican Caribbean: Identification of key variables affecting arsenic accumulation in *S. fluitans*. *Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150657>
- Parra, I. (2022). *Ecoinnovación de productos para el turismo a partir de sargazo en las costas de Quintana Roo*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo.
- Ramos, J. (2014). *Producción de biogás a partir de biomasa de la microalga *Scenedesmus* sp. procedente de diferentes procesos*. [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Raposo Bejines, F., De la Rubia, M. y Fernández-Cegrí, V. (2011). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode. An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 861-877.
- Robledo, D., Vázquez-Delfín, E., Freile-Pelegrín, Y., Vázquez-Elizondo, R. M., Qui-Minet, Z. N. y Salazar-Garibay, A. (2021) Challenges and Opportunities in Relation to *Sargassum* Events Along the Caribbean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 8. doi: 0.3389/fmars.2021.699664
- Rooker, J., Turner, J. y Holt, S. A. (2006). Trophic ecology of *Sargassum*- associated fishes in the Gulf of Mexico determined from stable isotopes and fatty acids. *Marine Ecology Progress Series*, 313, 249-259. doi: 10.3354/maps313249. pp. .
- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. y Jordán-Dahlgren, E. (2017). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexican (2014-2015). En E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggia, A. Olivos-Ortiz y E. J. Núñez-Vázquez, *Flore-cimientos algales nocivos en México* (pp.352-365). CICESE.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S., Collado-Vides, L., García-Sánchez, M. y van Tussenbroek, B. I. (2020). Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019. *PeerJ*, 8, e8667 <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Sadzawka R., A., Carrasco R., M. A., Grez Z., R. y Mora G., M. de la L. (2005). *Métodos de análisis de compost*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Salcedo, D. (2017). *Valoración del digestato generado por la digestión anaerobia de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos de la Ciudad de México* [Tesis de maestría Instituto Politécnico Nacional]. Instituto Politécnico Nacional.
- Sánchez, D. (2015). *Evaluación del potencial bioquímico de metanización de residuos orgánicos, usando como inóculo dos tipos de lixiviados provenientes de la planta de*

- composta bordo poniente* [Tesis de maestría Instituto Politécnico Nacional]. Instituto Politécnico Nacional.
- Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. (2011). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-020-AMBT-2011, que establece los requerimientos mínimos para la producción de composta a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales, así como las especificaciones mínimas de calidad de la composta producida y/o distribuida en el Distrito Federal.*
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-015-1985, que establece el método de cuarteo para residuos sólidos municipales y la obtención de especímenes para los análisis en el laboratorio.*
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. (1985). *Norma Mexicana NMX-AA-033-1985 que especifica un método de prueba para determinar el poder calorífico superior de los residuos sólidos municipales, empleando una bomba calorimétrica de los diferentes tipos para planear y diseñar los sistemas adecuados de disposición final de los mismos.*
- Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA)-Quintana Roo. (2018) Registro de actividades correspondientes a la limpieza costera. <http://sargazo2018.semaqroo.gob.mx/>.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2019). *Lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México.* SEMARNAT.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2021). *Lineamientos técnicos y de gestión para la atención de la contingencia ocasionada por sargazo en el Caribe Mexicano y el Golfo de México.* SEMARNAT. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/lineamientos-tecnicos-y-de-gestion-para-la-atencion-de-la-contingencia-ocasionada-por-sargazo-en-el-caribe-mexicano-y-el-golfo-de-mexico>.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2019). *Norma Mexicana NMX-AA-120-SCFI-2016 que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas.* <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/nmx-120-playa-limpia-sustentable>
- Smetacek, V. y Zingone, A. (2013). Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504, 84-88.
- Tapia, R., Avila, J., Domínguez, J., Valero, D., Olguín, D., Pérez, D. y Alzate, L. (2018). Biological pretreatment of Mexican Caribbean macroalgae consortiums using Bm-2 strain (*Trametes hirsuta*) and its enzymatic broth to improve biomethane potential. *Energies*, 11(494), 2-11.
- TAPPI-Professional organization dedicated to the pulp and paper industries. (2006). Test method for acid-insoluble lignin in wood. T 222 om-02-02,2-14.
- Thompson, T. M., Young, B. R. y Baroutian, S. (2021). Enhancing biogas production from caribbean pelagic Sargassum utilising hydrothermal pretreatment and anaerobic co-digestion with food waste. *Chemosphere*, 275, 130035. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130035>

- Uribe-Martínez, A., Guzmán-Ramírez, A., Arreguín-Sánchez, F. y Cuevas, E. (2020). El sargazo en el Caribe mexicano, revisión de una historia impensable. En E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, O. D. Cervantes Rosas, A. Espinoza-Tenorio, R. Silva Casarín, A. Ortega-Rubio, A. V. Botello y B. E. Vega-Serratos (eds.), *Gobernanza y Manejo de las Costas y Mares ante la Incertidumbre. Una Guía para Tomadores de Decisiones* (pp. 743-768). Universidad Autónoma de Campeche.
- Van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., González-Godoy, C. E., Barba-Santos, M. G., Vega-Zepeda, A., & Collado-Vides, 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. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>
- Vanegas, C. (2015). *Biogas production from seaweed biomass: A biorefinery approach*. [Tesis de doctorado]. Institute of Technology Sligo.
- Walsh, K. (2019). *Examining the quality of a compost product derived from Sargassum (Sargassum fluitans and Sargassum natans)* [Tesis de maestría, Universidad del Estado de Texas]. Repositorio Institucional <https://digital.library.txstate.edu/bitstream/handle/10877/8143/WALSH-THESIS-2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B. y Montoya, J. P. (2019). The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science (New York, N.Y.)*, 365(6448), 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
- Witherington, B., Hiram, S. y Hardy, R. (2012). Young sea turtles of the pelagic *Sargassum*-dominated drift community: habitat use, population density, and threats. *Marine Ecology Progress Series*, 463, 1-22. <http://www.jstor.org/stable/24876034>