

COLECCIÓN  
CIENCIAS Y  
HUMANIDADES  
PARA MÉXICO

# Cimientos para un manejo integral de arribazones masivos de sargazo en el Caribe Mexicano

Judith Rosellón  
Edith Calixto  
COORDINADORAS



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

## **COLECCIÓN CIENCIAS Y HUMANIDADES PARA MÉXICO**

El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) difunde, a través de la colección Ciencias y Humanidades para México, obras de investigación científica y humanística que aportan conocimientos para el desarrollo y bienestar de nuestro país.

Las personas autoras, tanto nacionales como extranjeras, son profesionales y académicas altamente capacitadas en la investigación humanística y científica, dedicadas a la atención de las principales temáticas y los problemas prioritarios de México, así como del contexto latinoamericano.

Con la publicación de estos trabajos se conforma un corpus valioso, accesible para estudiantes de educación superior, así como profesionales especializados y no especializados. De igual forma, el público general podrá completar o enriquecer su formación mediante la lectura y el estudio de sus páginas.

Los libros de esta colección abordan cuestiones fundamentales y de interés, como salud, movilidad, soberanía alimentaria, migración, cambio climático, transición energética, educación, artes y literatura, y contribuyen al diálogo e intercambio de ideas sobre temas actuales que remiten a nuestras realidades.

De esta manera, el Conahcyt y el Fondo de Cultura Económica han unido esfuerzos para hacer de esta colección una muestra significativa de las visiones y los conocimientos que las y los expertos tienen respecto de algunos temas sobresalientes que hoy se debaten en México y América Latina.



# Cimientos para un manejo integral de arribazones masivos de sargazo en el Caribe mexicano

COLECCIÓN  
**CIENCIAS Y  
HUMANIDADES  
PARA MÉXICO**



# Cimientos para un manejo integral de arribazones masivos de sargazo en el Caribe mexicano

Judith Rosellón  
Edith Calixto  
COORDINADORAS



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



Primera edición, 2024

---

Rosellón, Judith y Edith Calixto (coords.)

Cimientos para un manejo integral de arribazones masivos de sargazo en el Caribe mexicano / coord. de Judith Rosellón, Edith Calixto ; pról. de Fernando Córdova Tapia. - México : Conahcyt, Instituto Mora, 2024

237 p. : ilus., fots., grafs., tablas ; 23 x 16.5 cm - (Colec. Ciencias y Humanidades para México)

ISBN formato impreso: 978-607-8273-67-6

ISBN formato digital: en trámite

1. Sargazo - Quintana Roo - Estudio de casos 2. Ecología marina - Quintana Roo - Estudio de casos 3. Protección ambiental - México - Siglo XXI 4. Políticas ambientales - México - Siglo XXI 5. Cambio climático - México 6. Divulgación científica I. Calixto, Edith, coord. II. Córdova Tapia, Fernando, pról. III. t. IV. Ser.

LC QH541.5

Dewey 574.9097267 R656c

---



**CONAHCYT**

CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

*Distribución nacional*

© Coordinadoras: Judith Rosellón y Edith Calixto

© Ilustración: Danila Ilbaca Argandoña

D.R. © 2024 Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías  
Av. Insurgentes Sur 1582, col. Crédito Constructor, Benito Juárez, Ciudad de México, CP 03940

D. R. © 2024 Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora  
Calle Plaza Valentín Gómez Farías 12, col. San Juan Mixcoac, Benito Juárez, Ciudad de México, CP 03730

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, la fotocopia o la grabación, sin la previa autorización por escrito del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

Esta publicación forma parte del proyecto "Plataformas de difusión científica: narrativas transmedia para México" del Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora, proyecto apoyado por el Conahcyt en el año 2024.

ISBN formato impreso: 978-607-8273-67-6

ISBN formato digital: en trámite

*Distribución gratuita, prohibida su venta*

Hecho en México

# Primera Parte

CIMIENTOS GUBERNAMENTALES



# 1. La atención del fenómeno desde el gobierno de México: avances y logros

Edith Calixto Pérez, Josefina Huguette Hernández Gómez, Alonso Jiménez Reyes, Germán Ruiz Méndez, Sergio Cerdeira-Estrada, Anaïd Ibeth López Urban, Jessica Nubia Sarmiento Carral, Gabriel Navarro Guerrero, Judith Rosellón Druker

La llegada masiva del sargazo a las costas del Caribe ha representado, desde hace más de una década, un reto para los gobiernos de la región, motivándonos a constituirnos como sociedades cada vez más resilientes, con un aprendizaje continuo sobre cómo enfrentar de manera articulada un fenómeno tan complejo, hasta ahora impredecible y de largo plazo. Nos encontramos ante un fenómeno de escala regional, resultado del cambio global, caracterizado por el cambio climático, la creciente contaminación de nuestros mares y el deterioro ambiental.

Desde el gobierno de México se ha promovido una atención integral al fenómeno de arribo masivo de sargazo. Esto implica atender los diversos daños ambientales, sociales y económicos, evitando que los esfuerzos se centren únicamente en la limpieza de playas. Asimismo, se busca aprovechar el sargazo como materia prima, para convertir un problema en una oportunidad. Esto requiere una amplia y compleja coordinación entre los diferentes niveles de gobierno, la academia, la industria y la sociedad. Este capítulo es un recuento de algunas de las acciones implementadas

por el gobierno a nivel federal y estatal, sus principales avances y logros para hacer frente a este desafío ambiental.

## ACCIONES DE CONTENCIÓN Y COLECTA EN ALTAMAR: SEMAR

En el año 2019, el presidente de la República, Andrés Manuel López Obrador, designó a la Secretaría de Marina (Semar) como responsable de la atención a la problemática de arribazón de sargazo. La Semar elaboró un Plan General de Atención al Sargazo que, además de enfocarse en la contención y colecta en altamar, contempló un trabajo conjunto con autoridades federales, estatales y municipales en acciones que contribuyeran a mitigar sus afectaciones económicas, turísticas, ecológicas, ambientales y sociales (Semar, 2021). En el mismo año, la Semar y el gobierno del estado de Quintana Roo firmaron un Convenio de Coordinación mediante el cual ambas partes se comprometían a trabajar en acciones de monitoreo, detección, contención, recuperación y disposición de la biomasa, tomando en cuenta la recuperación, protección y conservación del ambiente marino.

Las capacidades humanas para las acciones referentes a contención, colecta y limpieza de sargazo, desde 2019 y hasta 2022, fueron de 350 elementos pertenecientes a la Marina y 618 elementos civiles. Además, la Semar desarrolló equipos especializados y tecnologías mexicanas para el manejo de sargazo, incluyendo 11 buques sargaceros costeros, un buque sargacero oceánico y 9050 metros de barrera de contención de sargazo (Semar, 2022). Los esfuerzos conjuntos entre esta dependencia oficial, el gobierno del estado y las direcciones municipales de la Zona Federal Marítimo Terrestre (Zofemat) lograron la recolección de aproximadamente 250 000 toneladas de sargazo entre 2019 y 2023. Esta cifra contempla un control total de su traslado y disposición adecuada.

La Semar también se encarga del monitoreo de las playas vía aérea haciendo uso de sus helicópteros y mediante imágenes satelitales que

muestran presencia del sargazo, a través del Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe. El objetivo de este monitoreo es proporcionar información regular y oportuna al mando naval sobre el seguimiento y pronóstico del sargazo que se desplaza desde el Atlántico central occidental hacia las costas del Caribe mexicano. Con esta información, la Semar ha desarrollado boletines públicos de manera diaria y semanal, lo cual sirve como apoyo para la toma de decisiones frente a los posibles escenarios e impactos negativos causados por este fenómeno en las costas mexicanas.<sup>1</sup>

#### LA VINCULACIÓN Y ARTICULACIÓN DEL ECOSISTEMA DE HUMANIDADES, CIENCIAS, TECNOLOGÍAS E INNOVACIÓN: CONAHCYT

En 2019 el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) articuló un grupo de expertos en diversos sectores para construir la Agenda de ciencia, tecnología e innovación para atención, adaptación e innovación para la atención y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México, misma que fue publicada después de un proceso de consulta abierta en la que se recopilieron comentarios de la ciudadanía.<sup>2</sup> La Agenda Conahcyt identificó nueve líneas estratégicas para atender el fenómeno de los arribazones de una manera integral, tomando en cuenta sus diferentes aristas (figura 1).

Dentro de cada una de las líneas estratégicas se presenta una serie de acciones a través de las cuales se genera conocimiento para alcanzar metas generales como comprender las causas del fenómeno, caracterizar los impactos ambientales y sociales, desarrollar modelos robustos de predicción, contar con alternativas de manejo y aprovechamiento, entre otras. Las líneas estratégicas, a su vez, se estructuran con una visión a corto, mediano y largo plazo, dependiendo del tiempo que cada una de

<sup>1</sup> <https://digaohm.semar.gob.mx/OpSargazo/BoletinesSargazo.html>

<sup>2</sup> [https://energia.conahcyt.mx/sargazo/recursos\\_docs/Agenda\\_Conahcyt\\_Sargazo-2020.pdf](https://energia.conahcyt.mx/sargazo/recursos_docs/Agenda_Conahcyt_Sargazo-2020.pdf)

ellas requiera para consolidarse. De esta manera, las acciones de cada línea estratégica generarán los insumos que complementarán la ejecución de otras, propiciando la consolidación de cada una de las líneas en diferentes momentos en el tiempo (figura 1) (Conahcyt, 2019).

**Figura 1.** Visión a corto, mediano y largo plazo para la atención, adaptación y mitigación de los arribazones de sargazo



**Fuente:** Conahcyt (2019).

Para una óptima implementación de esta agenda, así como una eficiente distribución de los esfuerzos multisectoriales, es fundamental entender los avances y necesidades del conocimiento generado. Con el objetivo de contar con un diagnóstico profundo de este saber acumulado a lo largo de una década sobre el fenómeno de arribo masivo de sargazo en México, Conahcyt también elaboró y mantiene actualizado, de manera permanente, un estado del arte que representa una exhaustiva búsqueda, selección y análisis de información para entender las tendencias espaciales (zona norte, centro y sur del estado de Quintana Roo), temporales (anualmente) y sectoriales (academia, empresas gobierno, sociedad civil) de iniciativas, investigación, desarrollo tecnológico e innovación,

así como los retos en torno a dichas arribazones (Rosellón-Druker et al., 2022). Como resultado, se han generado dos bases de datos: la primera para proyectos e iniciativas y la segunda para expertos en el tema de sargazo pelágico en México, las cuales han representado un insumo importante para diversas acciones interinstitucionales.

A través de esta agenda se ha articulado, impulsado y financiado proyectos con una estrategia multidisciplinaria y multisectorial, es decir, bajo el Modelo Mexicano de Innovación Soberana para el Bienestar, el cual se constituye como una pentahélice que articula a la academia, el gobierno, la industria, la sociedad y un irrestricto cuidado del ambiente (tabla 1). Un resultado de este esfuerzo fue la evaluación técnica y propuestas de mejora para las tecnologías existentes en materia de contención, colecta y procesamiento primario del sargazo. También se produjeron nuevos conocimientos en la caracterización bioquímica del sargazo y sus lixiviados, lo cual ayudó a una mejor comprensión de potenciales riesgos al ambiente y a la salud humana, así como a explorar y determinar los usos más factibles para estas macroalgas. Además, se articularon diversos grupos del país para construir el prototipo de un sistema nacional de monitoreo y alerta temprana del sargazo. Asimismo, se ha incluido de forma decidida el conocimiento local en la determinación de las líneas de investigación, desarrollo tecnológico e innovación prioritarias (ver el capítulo 8 sobre conocimiento local).

Los resultados de todos estos proyectos se han transferido a diversos sectores de la pentahélice para su óptimo aprovechamiento, y contribuyen al diseño de acciones robustas y basadas en evidencia científica y conocimiento local. De la misma manera, se sientan las bases para la construcción (en el corto y mediano plazo) de nuevos marcos regulatorios en conjunción con dependencias de gobierno como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), que den certeza jurídica a las acciones de manejo de sargazo en México.

**Tabla 1.** Líneas estratégicas, metas y logros de la Agenda Conahcyt para la atención del sargazo

LÍNEAS ESTRATÉGICAS	META GENERAL	LOGROS
1) Contención, recolección y disposición final	Contar con las mejores prácticas, tecnologías y procesos para que la mayor cantidad de sargazo que arribe a costas mexicanas sea colectada en mar abierto, reduciendo así su arribo a playas	"Catálogo y jerarquización de técnicas y tecnologías existentes para la contención física, colecta, transformación primaria y disposición final del sargazo" (proyecto financiado por Conahcyt y liderado por el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Cidesi)
2) Normatividad	Norma Oficial Mexicana o marco regulatorio similar	"Caracterización bioquímica del sargazo (fresco y en diferentes niveles de descomposición) y sus lixivados" (proyecto financiado por Conahcyt y liderado por el Centro de Investigación Científica de Yucatán, cicv)
3) Comunicación y educación	Visión generalizada del sargazo como un fenómeno natural y adaptativo, así como un recurso biótico nacional	Capítulo de sargazo en el Ecosistema Nacional Informático de Energía y Cambio Climático del Conahcyt
		Generación de espacios de comunicación, acceso universal al conocimiento y promoción de sinergias, a través del webinar permanente del Conahcyt "Sargazo, actualidad y retos"
		Mapeo nacional de actores y proyectos
Estado del arte sobre arribazones de sargazo en México		
4) Monitoreo, modelación y alerta temprana	Sistema nacional y regional de monitoreo y alerta temprana de sargazo para aplicaciones multisectoriales	Reporte institucional sobre capacidades, retos y necesidades para el monitoreo del sargazo coconstruido a través del Seminario-Taller Nacional de teledetección, monitoreo, pronóstico y alerta temprana del sargazo

		Colaboración con la Conabio para el fortalecimiento del Sistema Satelital de Alerta Temprana de Sargazo (SATsum), como parte del Simar
		"Prototipo de sistema de monitoreo y alerta temprana" (proyecto financiado por Conahcyt y liderado por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada - CICESE)
		Colaboración con Semarnat para fortalecer el sistema Simsar
5) Origen e importancia ecológica	Mayor conocimiento sobre la biología, el origen y la importancia del sargazo pelágico a través del desarrollo de ciencia básica	"Caracterización de la biota asociada al sargazo. Determinación de condiciones fisicoquímicas asociadas al crecimiento y características biológicas del sargazo" (proyecto financiado por Conahcyt y liderado por el Centro de Investigación Científica de Yucatán, CICY)
6) Impactos socioeconómicos y ambientales	Sistema de monitoreo permanente de impactos socioeconómicos y ambientales causados por los arribazones masivos de sargazo	"Caracterización de microorganismos patógenos asociados a los arribazones" (proyecto financiado por Conahcyt y liderado por el Centro de Investigación Científica de Yucatán, CICY)
		Recopilación del conocimiento local para caracterizar las afectaciones de los arribazones al bienestar humano
7) Usos y aprovechamiento sustentables	Cadenas de valor reguladas para el aprovechamiento del sargazo	"Metodologías innovadoras y patentes para la obtención de bioenergía y compuestos de interés industrial" (proyecto financiado por Conahcyt y liderado por el Centro de Investigación Científica de Yucatán, CICY)
8) Cooperación Internacional	Consortio de países de la región y convenios internacionales para promover el intercambio de experiencias	Sargassum Hub (EE. UU.): Desarrollo de micrositio para México

		SargCoop (Francia): Inventario de sistemas de teledetección de sargazo y webinarios a nivel regional
		Cooperación (a través del gobierno de Inglaterra) con Islas Turcas y Caicos para el desarrollo de un plan local y regional de atención al sargazo
9) Restauración y conservación de ecosistemas	Transitar hacia un manejo costero integrado que use como base el sistema de monitoreo de impactos socioeconómicos y ambientales con miras a la restauración de sistemas afectados	Codesarrollo del Plan de Acción Estratégico de México para el Decenio de las Ciencias Oceánicas

**Fuente:** Dirección de Estrategia Tecnológica, Conahcyt.

Finalmente, y con el objetivo de difundir información clave que facilite la investigación y la atención integral del fenómeno de arribazones de sargazo en México, el Conahcyt desarrolló y publicó el capítulo “Sargazo” dentro del Ecosistema Nacional Informático de Energía y Cambio Climático.<sup>3</sup> En este sitio es posible buscar de manera interactiva a los actores relevantes en distintos sectores (público, privado, gubernamental, sociedad civil), así como expertos nacionales que trabajan en diversos proyectos, estudios e iniciativas relacionadas con este fenómeno. También pueden consultarse las acciones que diferentes dependencias del gobierno han emprendido para atender este fenómeno a través de la Agenda Conahcyt como eje rector de estas acciones. Además, se cuenta con materiales de interés general como infografías, notas institucionales, resultados de proyectos financiados, artículos científicos de relevancia, así como enlaces hacia recursos externos enfocados al monitoreo satelital de esta macroalga.

<sup>3</sup> <https://energia.conahcyt.mx/sargazo>

## LOS PRIMEROS PASOS HACIA UNA NORMATIVA: SEMARNAT

La ruta hacia la gestión y aprovechamiento del sargazo ha sido larga, considerando que es un fenómeno atípico que requiere de un enfoque multidisciplinario e interinstitucional. Como parte del reconocimiento del problema asociado a los arribos masivos en las costas del Golfo de México y para definir acciones para su manejo y aprovechamiento adecuado, es indispensable el monitoreo de la recolección del sargazo y, por ende, la generación de datos referentes a las cantidades de biomasa que arriban al litoral mexicano.

El gobierno de México ha trabajado de manera coordinada en la atención a la problemática generada por los arribos masivos de sargazo. Uno de los esfuerzos realizados fue la publicación, en 2015, de los Lineamientos Técnicos para la Gestión Integral del Sargazo en el Mar Caribe y Golfo de México. Este documento fue el primer instrumento de fomento que se trabajó de forma interinstitucional, y conjuntó los primeros criterios para contribuir al manejo y gestión de los arribos masivos desde una perspectiva de protección y conservación de los ecosistemas marinos y costeros. Hasta el día de hoy, estos lineamientos siguen siendo considerados en la operación del manejo de sargazo.

En el año 2020, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), a solicitud de la Semar y con el apoyo de la Semarnat, coordinó la actualización de los lineamientos. Para esto, se contó con la participación del gobierno federal, del estado de Quintana Roo y de sus municipios costeros, así como de instituciones de investigación, representantes del sector hotelero y el Comité Técnico Asesor de Sargazo de Quintana Roo. Estas directrices tienen como objetivo orientar a las personas, entidades y organismos competentes que deseen sumarse de manera voluntaria a los esfuerzos para la contención y retiro de sargazo mediante el establecimiento de especificaciones técnicas y de manejo para su remoción (Semarnat, 2021).

## MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA: SEMARNAT Y CONABIO

Derivado de la necesidad de estimar las cantidades de sargazo que arriban a las costas, se hizo patente la necesidad de contar con un sistema que integrara la información de su recolección *in situ*. Por lo tanto, en el marco de los Lineamientos Técnicos para la Gestión Integral del Sargazo en el Mar Caribe y Golfo de México, la Semarnat desarrolló el Sistema de Monitoreo del Sargazo Recolectado (Simsar).<sup>4</sup> Este sistema representa un esfuerzo interinstitucional del gobierno federal para lograr la sistematización de la información del sargazo recolectado tanto en playa como en el mar (por parte de los actores que realizan esta actividad, incluidos hoteles, empresas recolectoras, organizaciones de la sociedad civil, autoridades municipales, estatales y federales), y generar una base de datos abiertos que contribuya a la investigación, entendimiento y manejo del fenómeno.

Este sistema genera información estadística, historiales e informes de la recolección del sargazo, permitiendo conocer las tendencias temporales y espaciales de mayor riesgo de acumulación de esta biomasa, así como la sistematización de los datos de arribazones por fechas y volúmenes recolectados en las costas mexicanas. Además, cuenta con el esquema de datos abiertos que facilita la consulta de su base de datos, lo que contribuye a la investigación y a la generación de conocimiento. Esto permite tomar mejores decisiones de manejo y diseñar mejores políticas públicas para la atención de este fenómeno.

La información del Simsar en materia de manejo y aprovechamiento es relevante porque permite conocer los puntos en el territorio costero que requieren mayor atención y esfuerzos para su recolección. Los datos generados por el sistema permiten sumar al modelo de trazabilidad en lo referente a la etapa de recolección, así como contribuir al cumplimiento

---

<sup>4</sup> <https://app.semarnat.gob.mx/sargazo>

de permisos y protocolos que favorezcan la regulación y protección de los ecosistemas costeros.

El desarrollo de la plataforma se realizó a lo largo de dos años, de 2021 a 2023. La información disponible en ella data de junio de 2022, hasta 2024, y a partir de los 5917 registros realizados por las 63 instituciones incorporadas al sistema (hoteles, empresas que recolectan sargazo, autoridades municipales, estatales y federales) se han reportado en el sistema la recolección de 33644 toneladas de sargazo.

Debido a que el Simsar es un instrumento de política pública de carácter voluntario, su implementación enfrenta diferentes retos en la adopción, por lo que se requieren grandes esfuerzos en temas de concientización y fortalecimiento institucional para poder incrementar el número de instituciones registradas. Además, los procesos de gestión y aprovechamiento del sargazo han ido evolucionando, y con ello, los requerimientos que los usuarios y las autoridades necesitan del Simsar, por lo que es fundamental mantener el proyecto abierto a la mejora continua.

Por otra parte, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) ha desarrollado el Sistema Satelital de Alerta Temprana de Sargazo (SATsum)<sup>5</sup> como parte del Sistema de Información y Análisis Marino Costero (Simar),<sup>6</sup> sobre la base del conocimiento de algoritmos bio-ópticos del color del océano (Cerdeira-Estrada et al., 2024).

El Simar es un explorador que incorpora algoritmos y herramientas tecnológicas de percepción remota, observación de la biodiversidad, geovisualización y análisis. Es una herramienta de acceso abierto para la toma de decisiones sobre la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad marina y costera en un contexto de cambio y variabilidad climática, permitiendo estudiar los cambios en los ecosistemas marinos costeros a corto y largo plazo mediante sistemas operacionales de alertas tempranas para la toma de decisiones de comunidades y gobiernos.

<sup>5</sup> <https://simar.conabio.gob.mx/alertas/#sargazo-satsum>

<sup>6</sup> <https://simar.conabio.gob.mx/>

La alerta satelital SATsum permite visualizar diariamente el sargazo pelágico a una resolución de 1 km, utilizando imágenes satelitales diarias de los sensores Modis a bordo de los satélites Aqua y Terra de la NASA. Mediante estas imágenes se obtiene el promedio diario del Índice Alternativo de Algas Flotantes para los siete días previos, lo que posteriormente permite la obtención de las toneladas de sargazo en el océano, a partir del promedio diario de biomasa de sargazo húmeda para los siete días previos. Este intervalo de tiempo es suficiente para proporcionar una estimación aceptable de biomasa, dada la velocidad con la que se desplazan las balsas de sargazo en altamar.

El SATsum permite la generación de la alerta satelital regional diaria por la presencia de sargazo flotante tanto para el Mar Caribe, el Golfo de México, como para cada Zona Económica Exclusiva de los países y territorios que integran el área de estudio del Simar desde el 2010. Dicha alerta incluye un boletín diario (descargable en formato PDF) con datos sobre la extensión estimada de sargazo (kilómetros cuadrados) y el peso húmedo estimado (toneladas), así como la publicación en un mapa de dicha información en la red social X (antes Twitter).<sup>7</sup>

En la actualidad, como parte del SATsum, se desarrolla la alerta de sargazo a 300 m utilizando los sensores Olci a bordo de los satélites Sentinel 3A y 3B, un producto experimental basado en el índice máximo diario de clorofila.

Para incentivar la ciencia ciudadana, como parte del SATsum, la Conabio desarrolló el proyecto “Sargazo en el Gran Caribe: registros de sargazo en mares y costas (SATsum-Collect)” que permite, dentro de la aplicación móvil y web gratuita Epicollect5, el registro voluntario de observaciones (formulario con fotos y videos) que documenta la acumulación de sargazo pelágico tanto en la costa (playa, litoral rocoso, manglar), como en los mares del Golfo de México y el Mar Caribe. La información recolectada es de acceso público y permite apoyar a los gobiernos a una adecuada

---

<sup>7</sup> <https://twitter.com/simarconabio>

toma de decisiones en temas de colecta y disposición final del sargazo, así como validar el SATsum.<sup>8</sup>

Otro de los proyectos de ciencia ciudadana del SATsum es el “Monitoreo de sargazo pelágico en el Atlántico mexicano”, que como parte de iNaturalist permite registrar fotografías geoposicionadas sobre la presencia de sargazo pelágico en el área marina y sus playas vecinas del Golfo de México y el Mar Caribe mexicano.<sup>9</sup> Ambos proyectos contribuyen a enriquecer el Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB) de la Conabio.<sup>10</sup>

La implementación tanto del Simsar como del SATsum-Simar ha permitido avanzar hacia una regulación fortalecida para la gestión del sargazo y, a partir de ello, brindar información a los diferentes niveles de gobierno que abonan a una trazabilidad integral del sargazo que arriba a las costas de México.

## ESTRATEGIAS

### MULTISECTORIALES: SEMA

Las acciones gubernamentales implementadas desde 2022, en conjunto con los proyectos del Comité Técnico del Fondo para la Recuperación, Conservación y Mantenimiento de Playas, así como para la atención integral de los efectos negativos provocados por los fenómenos naturales, están enfocadas en atender de manera integral la limpieza del sargazo ante su arribazón. Para ello, la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del estado de Quintana Roo (SEMA) ha desplegado esfuerzos económicos y humanos, llevando a cabo acciones de monitoreo, recolección en aguas abiertas y someras con la coordinación de la Semar, y limpieza en playas en conjunto con la Zofemat y los municipios. Asimismo, a coordinado esfuerzos con el sector hotelero para dar certeza en la transportación y disposición de residuos.

<sup>8</sup> <https://simar.conabio.gob.mx/alertas/#sargazo-epicollect5>

<sup>9</sup> <https://simar.conabio.gob.mx/alertas/#sargazo-naturalista>

<sup>10</sup> <https://www.snib.mx/>

En una suma de voluntades sin precedentes en los últimos años en gestión ambiental del estado, un grupo multisectorial coordinado por la SEMA se dio a la tarea de elaborar la Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del Sargazo en Quintana Roo (EIMAS), prevaleciendo el aspecto técnico y las experiencias de actores clave. El objetivo de esta estrategia es mitigar el impacto ambiental, social y económico, provocado por el arribo masivo de sargazo, de manera coordinada, programada y medible, que reduzca los costos y esfuerzos de su manejo e incremente las oportunidades de inversión.

Para el desarrollo de la EIMAS se realizaron tres talleres participativos con la asistencia de más de 100 participantes, así como múltiples reuniones con el Comité de Redacción de la EIMAS conformado por 11 integrantes. Durante siete meses se trabajó en la elaboración de la EIMAS a través de la Mesa de Trabajo de Sargazo de Quintana Roo, integrada por más de 60 especialistas, académicos, empresarios, consultores y funcionarios de los tres órdenes de Gobierno. Finalmente, en octubre de 2023, se publicó esta estrategia integral (Rodríguez-Martínez et al., 2023) en el *Periódico Oficial del Estado*.

Esta estrategia está integrada por siete ejes rectores y dos ejes transversales que delinear las rutas de acción necesarias para enfrentar los retos y satisfacer las necesidades futuras (figura 2).

A partir de la EIMAS se pretende construir procesos de solución que implican diversas interacciones y sistemas de control institucional, siendo un documento vivo, dinámico y adaptable. Su implementación es de carácter incremental, por lo que las acciones logradas serán generadoras de nuevas decisiones. La estrategia considera en todo momento medidas de mitigación y adaptación con soluciones basadas en la naturaleza, pensando en la salud de la ciudadanía, de los ecosistemas y de la vida silvestre. Uno de los aspectos destacados de esta EIMAS es la coordinación institucional y la planificación; en ellas se enuncian los procedimientos adecuados para alcanzar los objetivos, y se solicita información de calidad y oportuna. El trabajo que se derive de aplicar esta estrategia será utilizado para tomar decisiones de manera conjunta.

Figura 2. Ejes rectores y transversales de la EIMAS



Fuente: Rodríguez-Martínez et al., (2023).

La coordinación institucional entre la federación, el estado y los municipios costeros es fundamental para hacer que las cosas sucedan. El Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de Quintana Roo (Coplade) es un organismo público dotado de personalidad jurídica y con patrimonio propio, el cual dará seguimiento puntual a esta estrategia. Este organismo está integrado por instituciones de educación superior, cámaras empresariales, colegios de profesionistas, representantes del sector social y privado. Además, una herramienta indispensable para financiar acciones en el marco de la estrategia es el Fondo Zofemat, que sirve para la vigilancia, administración, mantenimiento, preservación y limpieza de las playas. En este sentido debe haber una coordinación operativa entre la Zofemat y el sector privado, que también realiza gran parte de las acciones de limpieza y traslado de sargazo.

En el marco de esta estrategia, también se trabajará de manera conjunta con el Consejo de Cuenca Península de Yucatán y sus órganos auxiliares como son los comités de Playas Limpias en el Estado, el Comité de Playas Limpias Cancún Riviera Maya y el Comité de Playas Limpias Costa Maya, coordinados por los ayuntamientos, así como por el Grupo Especializado de Trabajo en Saneamiento de Quintana Roo. Esta coordinación generará conocimiento compartido para optimizar las acciones de la EIMAS. Asimismo, los Programas de Ordenamiento Ecológico Local (POEL) y los Programas de Desarrollo Urbano Sustentable (PDUS) considerarán diversos elementos de esta EIMAS para generar opciones de uso de suelo en las zonas adecuadas para el manejo integral del sargazo y elaborar criterios técnicos que deben considerar las obras y actividades que se desarrollen, sobre todo en los sitios con mayor presencia estadística de alga. Estos instrumentos de política ambiental y urbana son necesarios para que se desarrolle una buena planeación del territorio respecto a la gestión integral del sargazo.

Finalmente, es prioritario contar con un plan de monitoreo de resultados continuo y evaluación de la EIMAS. Esto será un requisito clave para determinar si la estrategia está logrando sus objetivos y si los riesgos o condiciones imprevistas requieren que haya modificaciones.

## CONCLUSIONES

El gobierno de México, a través de sus dependencias a nivel federal y estatal, ha impulsado, coordinado e implementado diversos esfuerzos para hacer frente a la problemática de los arribos de sargazo. Aún queda mucho por hacer y conocer, pero, sin duda, se han sentado las bases y se ha trazado la ruta para hacer frente a este fenómeno tan complejo. Con la participación de todos los sectores de la sociedad, continuemos en el camino hacia la consolidación de un manejo integral y óptimo del sargazo, para el bienestar del pueblo de México.

## REFERENCIAS

- Cerdeira-Estrada, S., Martell-Dubois, R., Valdez, J., Rosique-de la Cruz, L., Caballero-Aragón, H., et al. (2024). *Satellite-based Early Warning of Sargassum System (SATsum). Marine-Coastal Information and Analysis System (Simar)*. Conabio.
- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) (2019). *Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México*. Gobierno de México.
- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Navarro-Guerrero, G., Amaro-Mauricio, E. J., Mora-Domínguez, G. y González-Rivera, L. I. (2023). *Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del sargazo (EIMAS) en Quintana Roo*. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Rosellón-Druker, J., Calixto-Pérez, E., Escobar-Briones, E., González-Cano, J., Masiá-Nebot, L. y Córdova-Tapia, F. (2022). A Review of a Decade of Local Projects, Studies and Initiatives of Atypical Influxes of Pelagic *Sargassum* on Mexican Caribbean Coasts. *Phycology*, 2(3), 254-279. <https://doi.org/10.3390/phycolgy2030014>.
- Secretaría de Marina (Semar) (2021). *La Secretaría de Marina-Armada de México mantiene acciones para la contención del fenómeno atípico del sargazo en el*

*Estado de Quintana Roo.* <https://www.gob.mx/semar/prensa/la-secretaria-de-marina-armada-de-mexico-mantiene-acciones-para-la-contencion-del-fenomeno-atipico-del-sargazo-en-el-estado-de-quintana-roo>.

Semar (2022). *Marina informa resultados en materia de seguridad y de atención al sargazo en el estado de Quintana Roo.* <https://www.gob.mx/semar/prensa/marina-informa-resultados-en-materia-de-seguridad-y-de-atencion-al-sargazo-en-el-estado-de-quintana-roo?idiom=fr>

Secretaría de 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.* Gobierno de México.

# Prólogo

EL DESAFÍO DEL SARGAZO:  
UN FARO DE ESPERANZA  
EN UN MAR DE INCERTIDUMBRE

La imponente presencia del sargazo en nuestras playas nos recuerda la complejidad y fragilidad de los ecosistemas marinos. Más allá de ser un desafío ambiental, este fenómeno nos brinda la oportunidad de reflexionar y aprender a actuar de manera colectiva frente a contecimientos complejos que se volverán más frecuentes en nuestro futuro incierto. Los arribazones de sargazo nos instan a transformar los desafíos en oportunidades, a convertir la adversidad en un impulso para el cambio. En la actualidad contamos con una serie de avances científicos, tecnológicos y sociales, así como con estrategias gubernamentales impulsadas por el Conahcyt y dependencias a nivel federal y local, que se han convertido en cimientos para un manejo integral.

Hoy en día, como sociedad mexicana, nos encontramos frente a desafíos cruciales: ¿optamos simplemente por subsanar los problemas para mantener una falsa sensación de calma y estabilidad, o nos comprometemos a abordarlos de manera sistémica y proactiva? ¿Podremos convertir estos desafíos en oportunidades o los dejaremos acumularse sin ser atendidos? ¿Qué necesitamos para enfrentar este y otros fenómenos que serán cada vez más recurrentes?

Los arribazones de sargazo son una evidencia más de las consecuencias del cambio climático global y constituyen una seria amenaza

económica, social y ambiental para la región. Este fenómeno se presenta como un recordatorio de la interconexión de nuestras actividades y la necesidad de enfoques sistémicos para enfrentar las consecuencias de nuestras propias acciones. Nos invita a poner a prueba nuestras habilidades colectivas y a enfrentar problemas que afectan a la sociedad en su conjunto. Nos desafía a pensar más allá de las soluciones temporales y a buscar estrategias integrales que nos permitan no sólo enfrentar estos fenómenos recurrentes, sino también aprovecharlos en nuestro beneficio. En lugar de simplemente afrontar los problemas a medida que surgen, necesitamos abordarlos de manera más profunda. Esto implica no sólo reaccionar ante las consecuencias inmediatas, sino también abordar las causas subyacentes y trabajar para fortalecer nuestra capacidad de resiliencia frente a escenarios inciertos.

A medida que se han explorado más a fondo las causas y repercusiones de este crecimiento masivo de algas, nos vemos obligados a repensar nuestra relación con el ambiente y considerar nuevas estrategias para enfrentar este desafío sin precedentes. El crecimiento desmedido ha llevado a la formación de arribazones que impactan las costas de México y otros países del Gran Caribe, generando preocupación y planteando retos a distintas escalas espaciales y temporales. La enorme cantidad de sargazo acumulado sobre las costas afecta gravemente a los ecosistemas marinos de altísimo valor, como el Sistema Arrecifal Mesoamericano, donde tanto el arrecife como las principales formas de vida marina se ven amenazadas. Al mismo tiempo, este fenómeno plantea desafíos económicos y sociales significativos para las comunidades costeras afectadas.

Es en la colaboración, la innovación y la visión a largo plazo donde encontramos la verdadera fuerza para superar los desafíos que enfrentamos como sociedad. A lo largo de este libro quedará demostrado que en México tenemos los recursos y las capacidades para asumir este reto con ingenio y determinación. En estas páginas, exploraremos el fenómeno del sargazo desde diversas perspectivas, desde su historia natural y origen hasta las estrategias para su monitoreo, manejo y aprovechamiento. Se

exploran tanto los riesgos socioambientales asociados al fenómeno como la relevancia del conocimiento local en la toma de decisiones. Se analizan sus usos potenciales para diversos fines, entre ellos la regeneración de energía, así como los avances en el establecimiento de cadenas de valor.

Desde el gobierno de México hasta la ciencia ciudadana y el conocimiento local, cada capítulo revela cómo se han ido conformando las bases necesarias para seguir avanzando hacia un manejo integral y óptimo del sargazo. Cada uno de los capítulos está coordinado por destacadas expertas y expertos en el campo, y en ellos se ofrece una mirada integral a uno de los desafíos más apremiantes de nuestro tiempo.

El tiempo revelará nuestra capacidad de adaptación, pero, por ahora, parece que contamos con el viento a nuestro favor. Afortunadamente, se han dado pasos decididos en la dirección correcta al establecer la agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México (Conahcyt, 2019) y la Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del Sargazo en Quintana Roo (EIMAS) (Rodríguez-Martínez et al., 2023), ambas descritas en el capítulo 1. Allí donde se establecen las necesidades científicas y tecnológicas, las acciones multisectoriales, los objetivos estratégicos y las metas a corto, mediano y largo plazo, y se esclarecen los roles de participación y corresponsabilidad de los actores involucrados. Ahora el reto será su seguimiento e implementación efectiva. Sin embargo, estas estrategias evidencian que el camino correcto es el esfuerzo conjunto de individuos comprometidos a contribuir a una causa compartida.

Como se describe en el capítulo 2, sobre historia natural y origen del sargazo, las especies pelágicas (también referidas como holopelágicas) *Sargassum natans* y *Sargassum fluitans* son organismos que habitan naturalmente las capas superficiales del océano, desempeñando funciones ecológicas cruciales al ser la base de redes alimenticias en el mar y proporcionar hábitat para refugio, alimentación y reproducción, así como una forma de transporte para una diversidad de formas de vida marina. Estas majestuosas masas flotantes de algas son testigos silenciosos de la

interconexión de la vida marina con las actividades en tierra firme y sus consecuencias globales.

Desde 2011, ha habido un crecimiento masivo y sostenido de estas poblaciones, formando el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, una enorme masa que se extiende desde las costas de África Occidental hasta el mar Caribe, alcanzando en 2018 una longitud de 8850 kilómetros. El viento y las corrientes marinas arrastran estas algas flotantes hasta las costas, donde se acumulan en grandes cantidades. En México, estas acumulaciones en playa comenzaron a percibirse de manera marcada a partir de 2014.

Sabemos que la recolección de sargazo en la playa no es deseable, ya que esta actividad se centra en mitigar la emergencia a corto plazo y genera otras problemáticas, tanto en las playas como tierra adentro (p. ej. erosión de las playas y disposición no adecuada). Sin una gestión apropiada, la biomasa varada seguirá causando problemas ecológicos, ambientales y de salud pública, incluidos los altos costos de pérdida de biodiversidad y resiliencia de los ecosistemas. Es necesario reforzar los esfuerzos hacia su adecuada recolección en el mar, previo a su arribo y descomposición en las playas. Para esto es necesario contar con sistemas de monitoreo remoto e *in situ*, como los descritos en los capítulos 3 y 4.

Desde el turismo hasta la pesca, el sargazo tiene un impacto profundo en la economía local y la calidad de vida de las personas, tema que se aborda con detalle en el capítulo 5. El sargazo colectado fresco ofrece oportunidades para la innovación y el desarrollo económico sostenible a través de la implementación de soluciones tecnológicas para aprovecharlo como un recurso nacional. Lo anterior se plasma con claridad en los capítulos 6 y 7, donde se abordan sus usos potenciales, establecimiento de cadenas de valor y desarrollo de biorrefinerías.

En todos estos procesos, la participación ciudadana y el conocimiento local son la clave para potenciar el éxito, como se muestra en el capítulo 8 y en el epílogo. Los impactos negativos en las costas y playas se minimizarán una vez que estas algas sean valoradas adecuadamente, al igual que cualquier otro recurso pesquero. En este sentido, para que México logre

apropiarse del sargazo como un recurso biótico es indispensable impulsar la consolidación de una industria nacional para su aprovechamiento.

En un estudio reciente recopilamos y revisamos el estado del arte del fenómeno en el Caribe mexicano, enfocándonos en proyectos, estudios e iniciativas que se han llevado a cabo en el país a lo largo de la primera década de arribazones, con el objetivo de identificar brechas y fortalezas en el conocimiento actual (Rosellón-Druker et al., 2022). Aunque se han implementado numerosas y valiosas iniciativas públicas y privadas para comprender y abordar este problema, persisten varios obstáculos que dificultan un manejo integral de la macroalga. Entre ellos se encuentran el reto de asegurar financiamiento continuo para la investigación y el desarrollo tecnológico y la concentración de esfuerzos en áreas de importancia turística en detrimento de zonas rurales, áreas naturales protegidas y zonas de pesca. Esto ha generado un desequilibrio en las acciones en diferentes áreas geográficas y del conocimiento que impide abordar este fenómeno de manera integral.

Además, se han enfrentado limitaciones logísticas, financieras y regulatorias que obstaculizan el progreso en la consolidación de estrategias efectivas de gestión. Pareciera que las acciones responden a los eventos de flujo masivo, sin contar necesariamente con planeación o continuidad a largo plazo. Para seguir superando estos desafíos, es esencial cambiar la perspectiva del sargazo como un "problema nacional" a un "recurso nacional", considerando y comprendiendo plenamente la importancia ecológica de esta macroalga como un ecosistema flotante y su potencial como recurso económico una vez que llega de forma masiva a las costas mexicanas.

La llegada del sargazo a lo largo de los años ha evidenciado de manera contundente la imperiosa necesidad de colaboración y acción coordinada entre todos los sectores y niveles. Este desafío resalta la importancia del Modelo Mexicano de Innovación Soberana para el Bienestar (MMISB), que emplea el modelo de la Pentahélice implementado por el Conahcyt, el cual implica la coordinación entre la academia, el gobierno, la industria y la sociedad para abordar problemáticas ambientales. Es evidente que hoy, más que nunca, estamos todos en el mismo barco, y es el impulso

de estas hélices lo que puede llevarnos hacia adelante. Podemos visualizar la pentahélice como la propela de un motor donde la fuerza propulsora es la acción colectiva. El gran reto consiste en utilizar esta fuerza para arribar a un faro de esperanza dentro de este mar de incertidumbre (Córdova-Tapia, 2018). Esta obra es un testimonio de nuestra capacidad colectiva para enfrentar desafíos aparentemente insuperables.

Que estas páginas sirvan como guía y fuente de inspiración, no sólo para aquellos que se embarcan en el desafío del sargazo, sino para todos los que enfrentan problemas socioecológicos y luchan por forjar un mundo mejor para las generaciones venideras. Este libro nos reta a pensar más allá de las soluciones temporales y a buscar estrategias integrales. Es un llamado a la acción para todas y todos aquellos que compartimos la visión de construir un mundo más resiliente frente a las incertidumbres del futuro. Los colectivos organizados en torno al sargazo nos están dejando aquí una lección invaluable, un ejemplo de cómo con determinación y colaboración podemos ir afrontando los fenómenos complejos que ocurren y seguirán ocurriendo en el futuro. En última instancia, el éxito en la gestión del sargazo dependerá de nuestra capacidad para trabajar juntos en aras de un objetivo común: proteger y preservar nuestros océanos para las generaciones futuras.

**Fernando Córdova Tapia**

## REFERENCIAS

- Conahcyt (2019). *Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México*. [https://conahcyt.mx/sargazo/images/Agenda/2020/Agenda\\_Conahcyt\\_Sargazo-2020\\_.pdf](https://conahcyt.mx/sargazo/images/Agenda/2020/Agenda_Conahcyt_Sargazo-2020_.pdf)
- Córdova Tapia, F. (2018). Hacia una política ambiental sistémica. En H. Beck y R. Lemus (eds.), *El futuro es hoy. Ideas radicales para México* (pp. 97-111). Editorial Biblioteca Nueva.

- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Navarro-Guerrero, G., Amaro-Mauricio, E. J., Mora-Domínguez, G. y González-Rivera, L. I. (2023). *Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del Sargazo (EIMAS) en Quintana Roo*. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Rosellón-Druker, J., Calixto-Pérez, E., Escobar-Briones, E., González-Cano, J., Masiá-Nebot, L. y Córdova-Tapia, F. (2022). A Review of a Decade of Local Projects, Studies and Initiatives of Atypical Influxes of Pelagic *Sargassum* on Mexican Caribbean Coasts. *Phycology*, 2(3), 254-279. <https://doi.org/10.3390/phycology2030014>



# Segunda Parte

CIMIENTOS CIENTÍFICOS



## 2. Historia natural, origen y proliferación del sargazo

Brigitta I. van Tussenbroek  
Julio Sheinbaum  
José Luis Godínez-Ortega

### INTRODUCCIÓN

El sargazo es una macroalga parda holopelágica, lo que significa que pasa toda su vida flotando en la superficie del océano. Desde tiempos históricos, el sargazo ha estado concentrado en giros oceánicos del Mar de los Sargazos y del Golfo de México (Acton et al., 2019), donde puede formar enormes balsas flotantes en la superficie marina. En el océano abierto, estas balsas tienen múltiples funciones ecológicas: son un refugio y zona de reproducción de muchos animales marinos, además de secuestrar carbono y nutrientes, entre otros (Laffoley et al., 2011).

Desde inicios del 2011, comenzó a observarse un incremento de estas macroalgas en el mar, pero desde finales de 2014, las playas mexicanas del Mar Caribe se han visto invadidas periódicamente por balsas inusualmente grandes de sargazo (Rodríguez-Martínez et al., 2016). Las cantidades que desde entonces han llegado a las playas mexicanas son gigantescas: hasta a 6000 m<sup>3</sup> por kilómetro de costa por mes (Rodríguez-Martínez et al., 2022), cubriendo áreas costeras de un color marrón, ocasionando problemas graves a los ecosistemas marinos y al turismo (van Tussenbroek et al., 2017; Chávez et al., 2020).

Este grave problema ambiental, social y económico, no sólo ocurre en México, sino también a lo largo de todo el Caribe, algunas costas del África tropical, Brasil y el sur de Estados Unidos (UNEP-CEP, 2021). Lo que estas costas tienen en común es que colindan con un área oceánica de nueva proliferación del sargazo en el Atlántico tropical (Gower et al., 2013), recientemente nombrado como el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GASB, por sus siglas en inglés) (Wang et al., 2019). Desde su origen en el Atlántico tropical en 2011, el fenómeno del sargazo ha propiciado una serie de investigaciones en el mundo, incluyendo México, con el objetivo de mitigar y controlar su impacto sobre las costas.

En este capítulo nos preguntamos: ¿desde cuándo se conoce el sargazo y cuál es su origen? ¿Podemos explicar cómo se originó la nueva proliferación de sargazo? Trataremos de contestar en lo posible algunas de estas preguntas, considerando la historia natural, aspectos ecológicos, y movimientos y proliferación de las balsas de sargazo en el océano.

## HISTORIA NATURAL Y ORIGEN DEL SARGAZO

### ORIGEN

Las balsas de sargazo están formadas por dos especies del género *Sargassum* (*S. fluitans* y *S. natans*), y su origen está relacionado con su evolución. Un análisis filogenético basado en un reloj molecular de Fucales y Sargassaceae (la familia del género *Sargassum*) señala que estos divergieron entre 18.2 y 39.6 millones de años, correspondientes a los periodos geológicos tempranos del Mioceno-Oligoceno y el Eoceno tardío (Zhang et al., 2022). Jerzmańska y Kotlarczyk (1976) describieron un registro fósil de algas con vejigas de aire insertadas en las ramificaciones, pero sin tallos completos, provenientes de lechos Carpathians (Cárpatos en Polonia) de la misma época del Oligoceno (figura 1b). El conjunto de estos fósiles con los de géneros de peces, pertenecientes al batipelágico superior, mostró una

similitud con la biota del Mar de los Sargazos actual, y este conjunto fue denominado “cuasi-sargazo” del Oligoceno.

Debido a que no se tienen registros fósiles en el Atlántico norte, Jerzmańska y Kotlarczyk (1976) presentaron la hipótesis que el conjunto “cuasi-sargazo” apareció probablemente en el Mar de Thetis y migró hacia el Océano Atlántico antes de que su hábitat principal fuera destruido por el plegamiento alpino al final del Mioceno (hace más 5.5 millones de años). Sin embargo, Yip y colaboradores (2020) realizaron un análisis combinado de filogenética y biogeografía, y sugirieron que el género *Sargassum* se originó desde hace 6.7 millones de años en el Indo-Pacífico central y que fue introducido en el Atlántico después del cierre del istmo de Panamá (hace ~3 millones de años). Independientemente de su origen, el género *Sargassum* se diversificó en uno de los géneros de macroalgas más ricos en especies, con una distribución cosmopolita (Guiry y Guiry, 2024).

## HISTORIA NATURAL

El registro escrito más antiguo que se conoce de las especies holopelágicas de *Sargassum* es el de Cristóbal Colón: cuando él se estaba acercando a las costas del continente americano en 1492, entró en una región del Atlántico oeste subtropical, que luego se conocería como el Mar de los Sargazos (figura 1a). En una misiva de sus *Relaciones y cartas*, fechada el 21 de septiembre de 1492, Cristóbal Colón menciona: “en amaneciendo hallaron tanta yerba que parecía ser la mar cuajada de ella, y venía del oeste”.

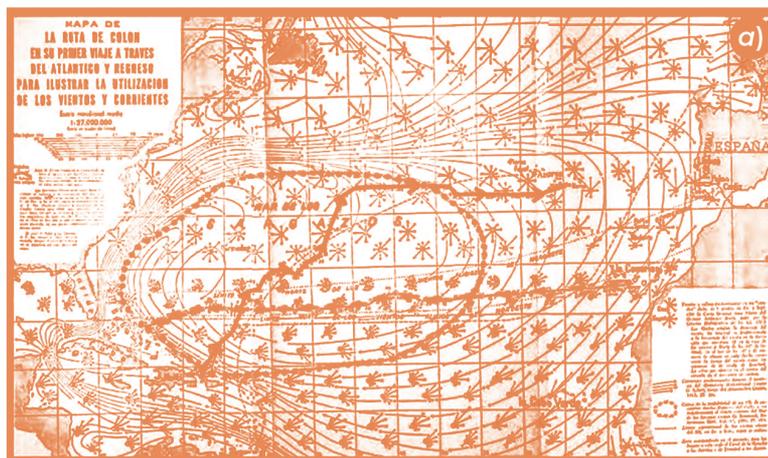
Los barcos portugueses se veían frenados por las algas y la falta de viento. Como estos hombres venían de un país donde abundan las uvas, a las vejigas de aire que le sirven al sargazo para flotar (neumatóforos) les denominaron *salgazo*, *sargacinha*, *sarga*, *sargaço* o *sargaçao* (The Nautical Magazine, 1832; Solano-Constâncio, 1836). Esto es una de las hipótesis de cómo adquirió su nombre el Mar de los Sargazos. En la descripción de Fernández de Oviedo de 1535 (1851) a “las grandes praderas de yerbas” las nombra *salgazos*. Por su parte Acosta (1578) apunta: “En la muy profunda

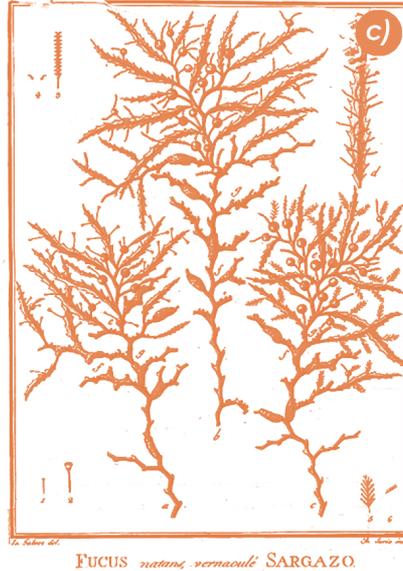
y larga mar de la muy nombrada, y no menos temida Vuelta del Sargazo aparece la mar llena de esta yerba, llamada sargazo”.

Hipólito Ruiz López, botánico español, publicó su estudio sobre el sargazo y señaló su distribución en el océano Atlántico, ilustró el *Fucus natans* confundiendo los epibiontes (hidrozoarios) con anteras y pistilos de plantas vasculares y los neumatóforos con semillas (figura 1c). Alexander von Humboldt (1769-1859) fue el primer científico en estudiar a detalle el Mar de los Sargazos. Humboldt interpretó este mar como una asociación vegetal, constituida por una especie de macroalga y una población animal (Humboldt, 1892).

La clasificación del género *Sargassum* se inició con el trabajo de C. Agardh (1820) y nació del *Fucus* de Linnaeus (1753) (figura 1c). El basónimo *Fucus natans* se aplicó principalmente al sargazo del océano Atlántico (donde domina hasta la fecha), mientras que *fluitans* (ahora *S. fluitans*) fue denominado como “hierba del golfo de dientes anchos”. El género *Sargassum* del orden de las Fucales es un género muy diverso con más de 356 especies (Guiry y Guiry, 2024). Esta alta diversidad complica la identificación de las especies, además de tener caracteres polimórficos y mostrar una alta plasticidad fenotípica (Mattio y Payri, 2011).

**Figura 1.** Registros históricos del sargazo





**Nota:** a) Mapa "oceanográfico" del libro que Salvador de Madariaga dedicó a la biografía de Cristóbal Colón). b) Algas pardas fósiles de lechos del Oligoceno con peces de los Cárpatos (República Checa, Polonia y Eslovaquia). Partes del talo que muestran vejigas aéreas y un fragmento de *Lepidopus isopleurus* (pez cinta). c) Lámina del sargazo "Fucus natans" (ahora *Sargassum natans* I). El desconocimiento de la biología de algas en la época llevó a identificar los epibiontes (hidrozoarios) como las anteras y pistilos de plantas con flores, y a los aerocistos como las semillas.  
**Fuente:** a) Madariaga (1956); b) Z. Satniewski; c) Ruiz López (1798).

Casi todas las especies de *Sargassum* (y macroalgas en general) se adhieren al fondo del mar (son bentónicas), y *S. fluitans* y *S. natans* son las únicas especies holopelágicas, que siempre flotan en la superficie del mar. Además, se conocen las estructuras reproductoras de casi todas las especies, pero estas aún no han sido detectadas en las especies holopelágicas. Børgesen (1914) señala que es probable que *S. fluitans* y *S. natans* sean taxones con variaciones fenotípicas de una o más especies arraigadas en el sustrato. Parr (1939) distinguió seis morfotipos pelágicos (*S. fluitans* III y X, y *S. natans* I, II, VIII y IX), y mencionó que "la clasificación ofrece otras dificultades especiales derivadas del hecho de que todavía no ha sido posible establecer afinidades específicas definidas entre las algas pelágicas y los parientes sésiles de los que deben haber derivado" (p. 12).

## CLASIFICACIÓN Y DESCRIPCIONES

Las macroalgas se dividen en tres grupos principales: verdes (*Chlorophyta*), pardas (*Phaeophyceae*) y rojas (*Rhodophyta*). Las algas pardas pertenecen al dominio *Eukarya*, se agrupan en el reino *Chromista* y se encuentran dentro la división *Heterokontophyta*, la cual incluye a varias clases de microalgas y macroalgas de la clase *Phaeophyceae*.

Las especies de *Phaeophyceae* son organismos fotosintéticos en su mayoría marinos, teniendo como pigmento principal la fucoxantina, que les otorga una tonalidad café o dorada, y las distingue de los otros dos grupos de macroalgas y de las plantas con flores. Esta clase comprende 21 órdenes, 50 familias, 270 géneros y 2200 especies. En este grupo se encuentran las algas gigantes como *Macrocystis pyrifera* y varias de las especies de *Sargassum*. Las especies de la clase *Phaeophyceae* poseen compuestos químicos útiles en muchos campos de aprovechamiento, como los alginatos y otras sustancias bioactivas. El género *Sargassum* pertenece al orden Fucales y familia *Sargassaceae*.

Las macroalgas en general, incluyendo las pardas, se diferencian de las plantas con flores al carecer de raíces verdaderas, tallos y hojas. Su cuerpo, sin mucha diferenciación de tejidos, se llama talo. Un talo puede poseer rizoides para adherirse a sustratos rocosos o arenosos, o estructuras similares a tallos y hojas llamadas estipes y láminas (filoides), respectivamente. En cuanto a su reproducción, las macroalgas pardas pueden reproducirse tanto sexual como asexualmente. La reproducción sexual implica la liberación de gametos masculinos y femeninos al agua, donde se fusionan para formar cigotos que eventualmente darán lugar a nuevas algas. La reproducción asexual ocurre a través de la fragmentación, donde una parte del alga se desprende y desarrolla un nuevo talo completo. El sargazo pelágico solamente se reproduce vegetativamente por fragmentación. El sargazo alcanza tasas de crecimiento muy altas y puede duplicar su peso en 5.5 días en condiciones óptimas (Leemans et al., manuscrito inédito).

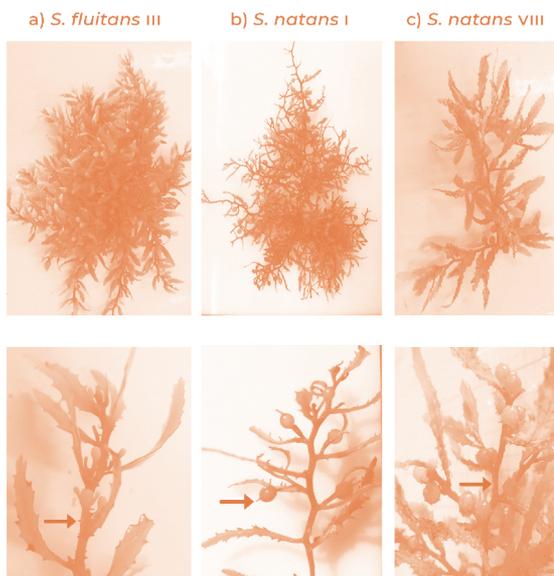
Tradicionalmente, la clasificación del género *Sargassum* se basa en la morfología de filoide (lámina) y su vena, el margen, los neumatóforos (vejigas llenas de aire), las ramificaciones y pequeñas cavidades en el talo, conocido como receptáculos (Mattio et al., 2010). Actualmente, la taxonomía también se basa en técnicas moleculares, sin embargo, cuando más se superponen la variabilidad intraespecífica y la divergencia interespecífica, menos eficiente es el marcador de código de barras. Los marcadores genéticos ITS-2 nuclear y el Rubisco cloroplástico parcial han sido ineficaces para identificar las especies de *Sargassum* (González-Nieto et al., 2020), y la diversidad de especies aún no ha sido reevaluada utilizando un enfoque molecular multigénico. Las investigaciones integradoras de análisis morfológicos, ecológicos y moleculares son esenciales para resolver la taxonomía de *Sargassum*.

Actualmente, *Sargassum fluitans* III, *S. natans* I y VIII son las especies y morfotipos más abundantes en las balsas de sargazo, por lo que se presentan sus características principales. Recientemente, Siuda y colaboradores (2024) propusieron una revisión de los nombres, con *Sargassum fluitans* var. *fluitans* (en vez de *S. fluitans* III), *S. natans* var. *natans* (en vez de *S. natans* I), y *S. natans* var. *wingei* (en vez de *S. natans* VIII), reconociendo que el estatus taxonómico de los morfotipos sigue siendo poco claro – en este trabajo seguimos utilizando la nomenclatura de Parr (1939)–. Es importante señalar que Parr entendió que su clasificación de morfotipos no cumplió con el Código Internacional de Nomenclatura Botánica, así que su esquema taxonómico se considera una clasificación oficialmente no reconocida.

- *Sargassum fluitans* (Børgesen) tipo III (figura 2a): especie pelágica de tamaño variable, con muchas ramificaciones y sin eje principal. Eje cilíndrico con pocas espinas, apical. Láminas lanceoladas con pedicelo corto y con una nervadura central, margen aserrado. Neumatóforos redondos a ovalados, sin espina con pedicelo. Ejemplares nunca fértiles.

- *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon tipo I (figura 2b): especie pelágica de tamaño variable, con muchas ramificaciones y sin eje principal. Eje cilíndrico sin espinas. Láminas lineares con el ápice agudo, margen aserrado con dientes agudos, nervadura central. Neumatóforos esféricos con un pedicelo y espina. Ejemplares nunca fértiles.
- *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon tipo VIII (figura 2c): especie pelágica de tamaño variable, ligeramente ramificada y generalmente presentando un eje principal sin espinas, indiferenciado. Láminas lanceoladas y anchas, con el ápice agudo, margen aserrado con dientes agudos, nervadura central. Neumatóforos esféricos con un pedicelo y espina. Ejemplares nunca fértiles.

**Figura 2.** Morfotipos dominantes de especies holopelágicas de *Sargassum* en el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GASB)



**Nota:** a) *S. fluitans* III: eje cilíndrico con espinas (flecha), láminas lanceoladas, margen aserrado y neumatóforos sin espina. b) *S. natans* I: eje cilíndrico sin espinas, láminas lineares, neumatóforos con espina (flecha). c) *S. natans* VIII: eje sin espinas (flecha), láminas lanceoladas y anchas, neumatóforos sin espina.

**Fuente:** Marta García-Sánchez.

## MORFOTIPOS DE SARGAZO

Los morfotipos de las especies de *Sargassum* holopelágicas son morfológicamente distinguibles (Parr, 1939), y también muestran divergencia genética utilizando secuenciaciones de genomas parciales y marcadores de cloroplasto y mitocondria (Amarral-Zettler et al., 2017; Dibner et al., 2022; Siuda et al., 2024). Además, estas especies/morfotipos (también denominados genotipos) muestran diferencias en respuestas fisiológicas como, por ejemplo, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes (Changeux et al., 2023; Corbin y Oxenford 2023; Hanisak y Samuel, 1987; Lapointe, 1986; Magaña-Gallegos et al., 2023a y 2023b;), y la capacidad diferencial de absorber metales y metaloides (Rodríguez-Martínez et al., 2020; Cipolloni et al., 2022).

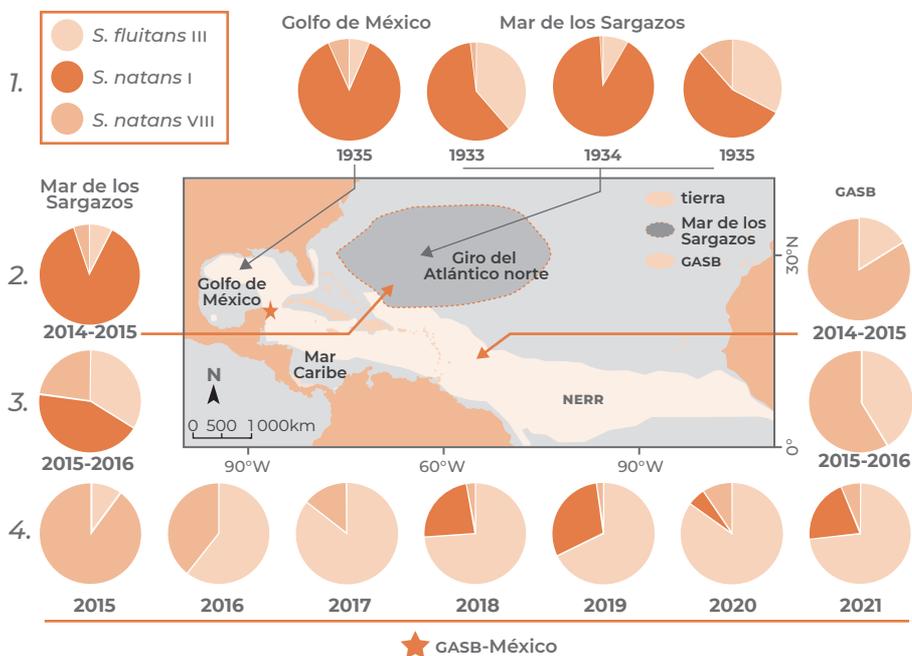
Tanto en el pasado (Parr, 1939) como en el presente (Schell et al., 2015; Martin et al., 2021), *S. natans* I ha sido el morfotipo dominante en el Mar de los Sargazos y *S. fluitans* III ha estado presente en menor abundancia relativa (figura 3). *S. natans* VIII siempre fue un morfotipo escaso, hasta que dominaba en los primeros años de proliferación de sargazo en el Atlántico tropical (Schell et al., 2015; Martin et al., 2021) (figura 3).

Lamentablemente, no hay registros de composición específica de las balsas de sargazo de 2011 hasta 2014 en esta nueva región de proliferación del Atlántico tropical, y la repentina dominancia de un morfotipo que jamás fue importante, sigue siendo un enigma. En el transcurso de desarrollo del GASB, *S. natans* VIII ha perdido importancia y *S. fluitans* III la ha ganado, con *S. natans* I ausente o presente en menor proporción (García-Sánchez et al., 2020) (figura 3). Esta composición de morfotipos sigue siendo la tendencia en el GASB hasta la fecha, aunque las proporciones de las especies y sus morfotipos muestran variaciones espaciales y estacionales. Por ejemplo, Alleyne y colaboradores (2023) encontraron que las balsas de sargazo llegando a Barbados tenían dos subrutas al cruzar el Atlántico: uno norteño más directo y otro más sureño y serpenteante. Estos autores vieron que la

abundancia estacional de las especies y sus morfotipos dependía de su ruta o subruta.

Las diferencias espaciales y temporales de las especies y morfotipos de sargazo probablemente son el resultado de una combinación de sus respuestas fisiológicas diferenciales a las condiciones ambientales, sus tasas de crecimiento (vegetativa) y sus trayectorias en el océano Atlántico; sin embargo, hasta la fecha no hay explicaciones precisas de los cambios en la composición específica de las balsas de sargazo.

**Figura 3.** Variaciones espaciales y temporales en la abundancia relativa de las especies de *Sargassum* holopelágicas y sus morfotipos dominantes



**Nota:** NERR es North Equatorial Recirculation Region, GASB es Great Atlantic Sargassum Belt. En (1), *S. natans* VIII, también puede incluir otros morfotipos. Los datos son de varias colectas en cada año, en el océano abierto (1, 2 y 3) o en la costa (4). **Fuente:** 1) Parr (1939); 2) Schell et al. (2015); 3) Martin et al. (2021); 4) García-Sánchez et al. (2020). Sobre la distribución de sargazo en Mar de los sargazos (Acton et al., 2019) y sobre el GASB (Putman y Hu, 2022).

## PROLIFERACIÓN (Y MOVIMIENTO) DEL SARGAZO EN EL OCÉANO ATLÁNTICO

La presencia masiva de sargazo en el Atlántico ecuatorial y tropical comenzó en 2011. Las causas que originaron este evento se siguen debatiendo y, en gran medida, son aún un misterio. Los autores que “bautizaron” al GASB (Wang et al., 2019) además de otros (Djakouré et al., 2017; Lapointe et al., 2021) sugieren que el origen de los afloramientos está ligado a un flujo anómalo de nutrientes asociado a las plumas de grandes ríos como el Amazonas, Orinoco y Congo, y es provocado por efectos antropogénicos (deforestación, uso de fertilizantes en agricultura, etc.), cuya presencia puede identificarse en el océano más allá de la costa. Sin embargo, otros estudios (Johns et al., 2021; Jouanno et al., 2021) indican que, aunque el efecto de estos ríos juega un papel importante en el crecimiento del sargazo, hay regiones alejadas de la influencia de los ríos (Atlántico central tropical, Zona intertropical de convergencia, la NERR; figura 3) con gran abundancia de macroalga.

Muy pocos estudios intentan explicar cómo es que el sargazo llegó a la zona tropical/ecuatorial del Atlántico, ya que antes de 2011 se concentraba esencialmente en el Mar de los Sargazos y el Golfo de México (Grober, 2013). Entre ellos destacan los de Johns y colaboradores (2020) y Jouanno y colaboradores (2024). Ambos utilizan fórmulas empíricas relativamente sencillas que combinan corrientes oceánicas y vientos para simular el movimiento del sargazo. Sin embargo, representar correctamente cómo se mueve el sargazo puede ser complicado (Berón-Vera y Miron, 2022). El trabajo de Johns y colaboradores (2021) utiliza “reanálisis” de corrientes y vientos (éste combina observaciones y modelos numéricos para tener una mejor estimación del estado del mar y la atmósfera) y hacen notar que el invierno de 2009-2010 fue un período muy anómalo. En este invierno, los llamados vientos contraalísios, que normalmente soplan de Norteamérica hacia Europa en dirección oeste-noreste entre los 30-40° N, se desplazaron hacia el sur, se intensificaron

y adquirieron una dirección más oeste-este hacia el norte de África en vez de Europa.

Estos cambios en los vientos están relacionados con la fase negativa de la Oscilación del Atlántico norte (NAO, por sus siglas en inglés). Las condiciones climáticas asociadas a la NAO se representan mediante un índice definido por la diferencia de presión atmosférica entre la alta presión de las Azores y la baja presión de Islandia (p. ej. la diferencia de presión atmosférica entre el Atlántico subtropical y el subpolar). Su variabilidad (índice positivo o negativo) se asocia con la dirección e intensidad del sistema de vientos en el Atlántico norte, además de las temperaturas en América y Europa (figura 4). La NAO es considerada uno de los fenómenos más importantes de variabilidad del clima terrestre, con impactos importantes en otras regiones.

Durante el invierno 2009-2010 la NAO presentó un récord extremo de su fase negativa, indicando valores extremos de la intensificación y desplazamiento al sur de los vientos contraalísios, lo que a su vez provocó anomalías en las corrientes oceánicas en los meses posteriores. Johns y colaboradores (2021) sugieren que el origen del sargazo tropical se produjo por la transportación de sargazo del mar de los sargazos hacia el este hasta las costas de África, donde posteriormente vientos y corrientes tropicales los desplazaron al oeste y hacia el sur, incorporándose al sistema de circulación tropical donde encontró mejores condiciones para su crecimiento y dispersión en una nueva zona de producción de sargazo, conocida como la Región Norecuatorial de Recirculación (NERR por sus siglas en inglés; figura 3), dando lugar al GASB.

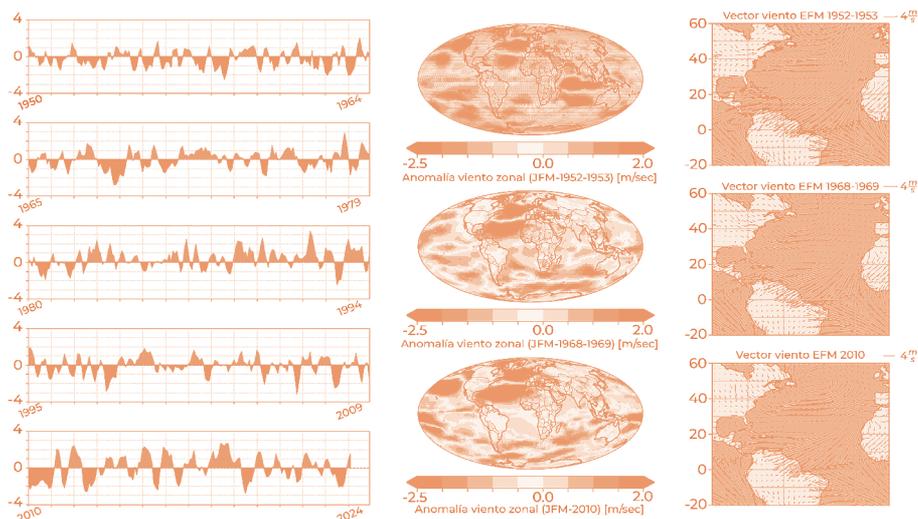
Por otro lado, Jouanno y colaboradores (2020, 2021a, 2021b, 2023) parten de principios básicos, muchos de ellos limitados por el rezago histórico en investigaciones sobre el sargazo, para formular y construir un modelo físico-biogeoquímico, que además incluye la modelación de la fisiología del sargazo. A pesar de sus limitaciones, el modelo es capaz de simular la variación estacional y, parcialmente, la interanual de biomasa de sargazo en el Atlántico, por lo que es una gran herramienta para

tratar de entender la evolución de gran escala del sargazo en tiempo y espacio, e incluso predecir su evolución estacional. Simulaciones con este modelo son consistentes con las conclusiones de Johns y colaboradores (2021) y encuentran que corrientes y vientos anómalos durante 2010-2011 parecen ser los responsables principales de la entrada de sargazo a la región tropical/ecuatorial durante 2011.

Los resultados de estos estudios no necesitan de fuentes anómalas de nutrientes para explicar el crecimiento del sargazo, que se produce por diferentes mecanismos “naturales” (mezcla vertical, transporte) asociados a la zona intertropical de convergencia, incluyendo fuentes de fosfato del hemisferio sur, fijación de nitrógeno y radiación solar en combinación con temperaturas favorables. Sin duda, se trata de resultados importantes; sin embargo, también surge la pregunta: ¿por qué esto no había pasado antes?

La figura 4 muestra la evolución temporal suavizada (promedios corridos de tres meses) de la NAO desde 1950 a la fecha, donde claramente se pueden identificar eventos relativamente similares a los de 2010-2011, en los que la NAO tuvo períodos largos e intensos en su fase negativa durante otros años. En la misma figura, se comparan las anomalías (diferencias respecto al promedio climatológico) del viento zonal (componente oeste-este) durante los meses de enero, febrero y marzo de los inviernos 1952-1953, 1968-1969 y 2010 y los vientos totales durante los mismos períodos. Lo importante aquí es sólo apreciar la similitud entre las figuras correspondientes a diferentes años. Si los cambios en los vientos y corrientes (no se muestran figuras para corrientes) fueron relativamente similares a los de 2010, ¿por qué no hubo transporte de sargazo a la zona tropical? O, si lo hubo, ¿por qué no ocurrió el crecimiento masivo en la zona tropical en esos períodos? No hay por el momento estudios ni respuestas a estas preguntas.

Figura 4. Oscilación del Atlántico norte



**Nota:** su fase negativa se relaciona con la intensificación de los vientos contra-Alisios y su desplazamiento al sur. Las anomalías en los vientos ocurridas durante 2010-2011 asociadas con esta oscilación se han utilizado para explicar el inicio de los florecimientos de sargazo en la zona tropical durante 2011; sin embargo, anomalías prolongadas similares ocurrieron también en 1952-1953 y 1968-1969, sin florecimientos.  
**Fuente:** Centro de Predicción del Clima de la NOAA de Estados Unidos.<sup>1</sup>

La incertidumbre alrededor de diferentes aspectos básicos asociados al origen y causas de la proliferación masiva de sargazo en los trópicos se refleja en otros aspectos. Skliris y colaboradores (2022) sugieren que además de la NAO, el crecimiento del sargazo puede relacionarse con otro modo de variación climática, denominado Modo de variación Meridional del Atlántico, relacionado con anomalías de temperatura superficial del mar (TSM), precipitación y desplazamientos de la zona intertropical de convergencia.<sup>2</sup> En dicho estudio se plantea que los florecimientos masivos de sargazo de 2015 y 2018 estuvieron relacionados con

<sup>1</sup> [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao\\_ts.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao_ts.shtml)

<sup>2</sup> <https://psl.noaa.gov/data/timeseries/monthly/AMM/>

anomalías negativas de la TSM en la zona tropical central (10-30°N). Sin embargo, los florecimientos masivos posteriores de 2021 y 2023 coinciden con anomalías positivas (temperaturas arriba del promedio) en la misma zona. Esto indica que la respuesta del sargazo a temperatura, radiación solar, abundancia de nutrientes, además de las influencias de huracanes, vientos y corrientes, apenas empieza a estudiarse y entenderse.

## CONCLUSIONES

Desde que Cristóbal Colón llamó “sargazo” al sargazo y Linneo, quien lo nombró *Fucus natans* (debido a que era una especie flotante), el sargazo ha sido estudiado por una amplia comunidad de taxónomos. Sin embargo, las técnicas moleculares combinadas con métodos clásicos no han podido esclarecer todas las dudas respecto al origen evolutivo y la taxonomía del género *Sargassum*.

Después de más de una década de que las playas caribeñas se vieron inundadas por las enormes masas de sargazo, la ciencia ha avanzado considerablemente sobre el conocimiento de este fenómeno. Algo en lo que casi todos los científicos coinciden es que dichos florecimientos probablemente continuarán en el futuro y su impacto nocivo se verá reflejado en otros ecosistemas, particularmente y con gran preocupación, en los arrecifes del Sistema Arrecifal Mesoamericano.

Es necesario seguir realizando ciencia básica de calidad para responder a un problema de gran relevancia y aplicación inmediata para los ecosistemas y la población ligada a ellos. Aunque se han hecho avances científicos muy importantes, todavía tenemos más preguntas que respuestas sobre casi todos los aspectos relacionados con el origen de las proliferaciones del sargazo en el Atlántico tropical. Abajo planteamos algunos puntos clave, pero aún hay muchos más por abordar:

- Esclarecer el origen evolutivo de las especies holopelágicas de *Sargassum* (desde hace cuánto tiempo existen).

- Determinar cuántas especies holopelágicas de *Sargassum* existen realmente en el océano Atlántico.
- Concluir si las especies holopelágicas de *Sargassum* sólo se reproducen asexualmente.
- Explicar la dominancia de *S. natans* tipo VIII, anteriormente siempre escaso, en las proliferaciones tempranas en el Atlántico tropical.
- Determinar cuáles son las respuestas del sargazo a variaciones en temperatura, radiación solar, presencia abundante de nutrientes y su biota asociada.
- Las anomalías en los vientos ocurridas en 2010 y 2011 asociadas con la NAO se han utilizado para explicar el inicio de los florecimientos de sargazo en las zonas tropicales durante 2011. Sin embargo, han habido períodos similares en el pasado, por lo que se debe explicar por qué no llevaron a florecimientos similares a los de esos años.

## REFERENCIAS

- Acosta, C. (1578). *Tractado de las drogas y medicinas de las Indias Orientales, con sus Plantas debuxadas albiuo*. Martín de Victoria impressor de su Magestad.
- Acton, L., Campbell, L. M., Cleary, J., Gray, N. J. y Halpin, P. N. (2019). What is the Sargasso Sea? The Problem of Fixing Space in a Fluid Ocean. *Political Geography*, 68, 86-100.
- Agardh, C. A. (1820). *Species algarum rite cognitae, cum synonymis, differentiis specificis et descriptionibus succinctis* (vol. 1). Berling.
- Alleyne, K. S., Johnson, D., Neat, F., Oxenford, H. A. y Vallès H. (2023). Seasonal Variation in Morphotype Composition of Pelagic *Sargassum* Influx Events is Linked to Oceanic Origin. *Scientific Reports*, 13, 3753.
- Amaral-Zettler, L. A., Dragone, N. B., Schell, J., Slikas, B., Murphy, L. G. et al. (2017). Comparative Mitochondrial and Chloroplast Genomics of a Genetically Distinct form of *Sargassum* Contributing to Recent “Golden Tides” in the Western Atlantic. *Ecology and Evolution*, 7, 516-525.

- Berline, L. y Desclotres, J. (2021). *Cartes de répartition des couvertures de Sargasses dérivées de Modis sur l'Atlantique*. AERIS/ICARE - CNES/TOSCA. <https://doi.org/10.12770/8fe1cdcb-f4ea-4c81-8543-50f0b39b4eca>
- Berline, L., Ody, A., Jouann, J., Chevalier, C., André, J. M., Thibaut, T y Ménard, F. (2020). Hindcasting the 2017 Dispersal of *Sargassum* Algae in the Tropical North Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111431.
- Beron-Vera, F. J. y Miron, P. (2020) A Minimal Maxey-Riley Model for the Drift of *Sargassum* Rafts. *Journal of Fluid Mechanics*, 904, A8.
- Børgesen, F. (1914). The Marine Algae of the Danish West Indies. Part 2. *Dansk Botanisk Arkiv*, 2, 1-68.
- Changeux, T., Berline, L., Podlejski, W., Guillot, T., Stiger-Pouvreau, V. et al. (2023). Variability in Growth and Tissue Composition (CNP, Batural Isotopes) of the Three Morphotypes of Holopelagic *Sargassum*. *Aquatic Botany*, 187, 103644.
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I. et al. (2020). Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12, 2908.
- Cipolloni, O. C., Gigault, J., Dassié, E. O., Baudrimont, M., Gourves, P. Y. et al. (2022). Metals and Metalloids Concentrations in Three Genotypes of Pelagic *Sargassum* from the Atlantic Ocean Basin-scale. *Marine Pollution Bulletin*, 178, 113564.
- Colón, C. (1892). *Relaciones y Cartas*. Librería de la Viuda de Hernando y C<sup>a</sup>.
- Corbin, M. y Oxenford, H. A. (2023). Assessing Growth of Pelagic *Sargassum* in the Tropical Atlantic. *Aquatic Botany*, 187, 103654.
- Dibner, S., Martin, L., Thibaut, T., Aurelle, D., Blanfuné, A. et al. (2022). Consistent Genetic Divergence Observed Among Pelagic *Sargassum* Morphotypes in the Western North Atlantic. *Marine Ecology*, 43, e12691.
- Fernández de Oviedo y Valdés, G. (1851). *Historia general y natural de las Indias, islas y tierra-firme del mar océano*. Imprenta de la Real Academia de la Historia.
- 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.
- González-Nieto, D., Cabral-Oliveira, M., Núñez-Reséndiz, M., Dreckmann, K., Mateo-Cid, L. E. y Senties, A. (2020). Molecular Assessment of the Genus *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae) from the Mexican Coasts of the Gulf of Mexico and Caribbean, with the Description of *S. xochitlae* sp. nov. *Phytotaxa*, 461, 254-274.
- Gower, J. y King, S. (2020). The Distribution of Pelagic *Sargassum* Observed with OLCI. *International Journal of Remote Sensing*, 41, 5669-5679.
- Gower, J., Young, E. y King, S. (2013). Satellite Images Suggest a New *Sargassum* Source Region in 2011. *Remote Sensing Letters*, 4, 764-773.
- Guiry, M. D. y Guiry, G. M. (2024). AlgaeBase. World-Wide Electronic Publication. <https://www.algaebase.org>
- Hanisak, M. D. (1983). The Nitrogen Relationship of Marine Macroalgae. En E. J. Carpenter y D. G. Capone (eds.), *Nitrogen in the Marine Environment* (pp. 699-730). Academic Press.
- Hanisak, M. D. y Samuel, M. A. (1987). Growth Rates in Culture of Several Species of *Sargassum* from Florida, USA. *Twelfth International Seaweed Symposium*, Springer.
- Humboldt, A. (1892). *Cristóbal Colón y el descubrimiento de América: historia de la geografía del Nuevo Continente y de los progresos de la astronomía náutica en los siglos xv y xvi*. Tomo II. Librería de la Viuda de Hernando y C<sup>ª</sup>.
- Jerzmańska, A. y Kotlarczyk, J. (1976). The Beginnings of the Sargasso Assemblage in the Tethys? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 20, 297-306.
- Johns, E. M., Lumpkin, R., Putman, N. F., Smith, R. H., Müller-Karger, F. et al. (2020). The Establishment of a Pelagic *Sargassum* Population in the Tropical Atlantic: Biological Consequences of a Basin-Scale Long Distance Dispersal Event. *Progress in Oceanography*, 182, 102269.
- Jouanno, J. y Benschila, R. (2020). *Sargassum Distribution Model Based on the NEMO Ocean Modelling Platform (0.0)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4275901>

- Jouanno, J., Benshila, R., Berline, L., Soulié, A., Radenac, M. H. et al. (2021a). A NEMO-Based Model of *Sargassum* Distribution in the Tropical Atlantic: Description of the Model and Sensitivity Analysis (NEMO-Sarg1.0). *Geoscientific Model Development*, 14, 4069-4086.
- Jouanno, J., Moquet, J. S., Berline, L., Radenac, M. H., Santini, W. et al. (2021b). Evolution of the Riverine Nutrient Export to the Tropical Atlantic Over the Last 15 Years: is there a Link with *Sargassum* Proliferation? *Environmental Research Letters*, 16, 034042.
- Jouanno, J., Morvan, G., Berline, L., Benshila, R., Aumont, O. et al. (2023). Skillful Seasonal Forecast of *Sargassum* Proliferation in the Tropical Atlantic. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL105545.
- Laffoley, D. d'A., Roe, H. S. J., Angel, M. V., Ardron, J., Bates, N. R. et al. (2011). *The Protection and Management of the Sargasso Sea: The Golden Floating Rainforest of the Atlantic Ocean. Summary Science and Supporting Evidence Case*. Sargasso Sea Alliance/Government of Bermuda.
- Lapointe, B. E. (1986). Phosphorus-Limited Photosynthesis and Growth of *Sargassum Natans* and *Sargassum Fluitans* (Phaeophyceae) in the Western North Atlantic. *Deep Sea Research, Part A. Oceanographic Research Papers*, 33(3), 391-399.
- Lapointe, B. E. (1995). A Comparison of Nutrient-Limited Productivity in *Sargassum Natans* from Neritic vs. Oceanic Waters of the Western North Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 40(3), 625-633.
- Lapointe, B. E., Brewton, R. A., Herren, L. W., Wang, M., Hu, C. et al. (2021). Nutrient Content and Stoichiometry of Pelagic *Sargassum* Reflects Increasing Nitrogen Availability in the Atlantic Basin. *Nature Communications*, 12(3060).
- Lapointe, B. E., West, L. E., Sutton, T. T. y Hu, C. (2014). Ryther Revisited: Nutrient Excretions by Fishes Enhance Productivity of Pelagic *Sargassum* in the Western North Atlantic Ocean. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 458, 46-56.
- Leemans, L., Magaña, E., van Katwijk, M. J. M., Lamers, L. P. M., Smolders, A. J. P. et al. (2025). Iron Co-Limitation of *Sargassum Fluitans* by Iron. *Aquatic Botany*, 126, 103807.

- Linnaeus, C. (1753). *Species plantarum, exhibentes plantas rite cognitatas, ad genera relatas, cum differentiis specificis, nominibus trivialibus, synonymis selectis, locis natalibus, secundum systema sexuale digestas*. Vol. 2. Impensis Laurentii Salvii.
- Madariaga, S. de (1956). *Vida del muy magnifico señor don Cristóbal Colón*. Editorial Sudamericana.
- Madec, G., the NEMO System Team (2023). *NEMO Ocean Engine Reference Manual*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8167700>
- Magaña-Gallegos, E., García-Sánchez, M., Graham, C., Olivos-Ortiz, A., Siuda, A. N. y van Tussenbroek, B. I. (2023a). Growth rates of Pelagic *Sargassum* Species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*, 185, 103614.
- Magaña-Gallegos, E., Villegas-Muñoz, E., Salas-Acosta, E. R., Barba-Santos, M. G., Silva, R. y van Tussenbroek, B. I. (2023b). The Effect of Temperature on the Growth of Holopelagic *Sargassum* Species. *Phycology*, 3(1), 138-146.
- Martin, L. M., Taylor, M., Huston, G., Goodwin, D. S., Schell, J. M. y Siuda, A. N. (2021). Pelagic *Sargassum* Morphotypes Support Different Rafting Motile Epifauna Communities. *Marine Biology*, 168(115).
- Mattio, L., Payri, C. E., Verlaque, M. y Reviere, B. (2010). Taxonomic Revision of *Sargassum* Sect. *Acanthocarpicae* (Fucales, Phaeophyceae). *Taxon*, 59(3), 896-904.
- Mattio, L. y Payri, C. E. (2011). 190 Years of *Sargassum* Taxonomy, Facing the Advent of DNA Phylogenies. *The Botanical Review*, 77, 31-70.
- McGillicuddy Jr., D. J., Morton, P. L., Brewton, R. A., Hu, C., Kelly, T. B. et al. (2023). Nutrient and Arsenic Biogeochemistry of *Sargassum* in the Western Atlantic. *Nature Communications*, 14(1), 6205.
- Ménesguen, A., Cugier, P. y Leblond, I. (2006). A new Numerical Technique for Tracking Chemical Species in a Multisource, Coastal Ecosystem, Applied to Nitrogen Causing Ulva Blooms in the Bay of Brest (France). *Limnology and Oceanography*, 51(1), 591-601.
- Mercator Ocean International (2023). *Operational Analysis and Forecast System (01/01/2009->) of the Global Ocean Biogeochemistry with Data Assimilation with a Weekly Update of the Ocean Fields*. <https://www.mercator-ocean.eu/en/solutions-expertise/accessing-digital-data/>

- Parr, A. E. (1939). Quantitative Observations on the Pelagic *Sargassum* Vegetation of the Western North Atlantic. With Preliminary Discussion of Morphology and Relationships. *Bulletin of the Bingham Oceanographic Collection*, 6(7), 1-94.
- Perrot, T., Rossi, N., Ménesguen, A. y Dumas, F. (2014). Modelling Green Macroalgal Blooms on the Coasts of Brittany, France to Enhance Water Quality Management. *Journal Marine Systems*, 132, 38-53.
- Putman, N. F., Lumpkin, R., Olascoaga, M. J., Trinanes, J. y Goni, G. J. (2020). Improving Transport Predictions of Pelagic *Sargassum*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 529, 151398.
- Putman, N. y Hu, C. (2022). Sinking *Sargassum*. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100189.
- Rodríguez-Martínez, R., Tussenbroek, B. y Jordán-Dahlgren, E. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015). En E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggia, A. Olivos-Ortiz y E. J. Núñez-Vázquez (eds.), *Florecimientos algales nocivos en México*. CICESE.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S. et al. (2020). Element Concentrations in Pelagic *Sargassum* Along the Mexican Caribbean Coast in 2018-2019. *PeerJ*, 8, e8667.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Jordán-Dahlgren, E. y Hu, C. (2022). Spatio-Temporal Variability of Pelagic *Sargassum* Landings on the Northern Mexican Caribbean. Remote Sensing Applications. *Society and Environment*, 27, 100767.
- Rosellón-Druker, J., McAdam-Otto, L., Suca, J.J., Seary, R., Gaytán-Caballero, A. et al. (2023). Local Ecological Knowledge and Perception of The Causes, Impacts and Effects of *Sargassum* Massive Influxes: A Binational Approach. *Ecosystems and People*, 19(1), 2253317.
- Ruiz López, H. (1798). *De vera fuci natantis fructificatione. Commentarius*. Matriti: apud viduam e filium Petri Marin.
- Schell, J. M., Goodwin, D. S. y Siuda, A. N. (2015). Recent *Sargassum* Inundation Events in the Caribbean: Shipboard Observations Reveal Dominance of a Previously Rare Form. *Oceanography*, 28(3), 8-11.

- Siuda, A. N., Blanfuné, A., Dibner, S., Verlaque, M., Boudouresque, C. F. et al. (2024). Morphological and Molecular Characters Differentiate Common Morphotypes of Atlantic Holopelagic *Sargassum*. *Phycology*, 4(2), 256-275.
- Skliris, N., Marsh, R., Appeaning Addo, K. y Oxenford, H. (2022). Physical Drivers of Pelagic *Sargassum* Bloom Interannual Variability in the Central West Atlantic Over 2010-2020. *Ocean Dynamics*, 72, 383-404.
- Solano-Constâncio, F. (1836). *Novo dicionario critico e etymologico da lingua portugueza*. Na Officina Typographica de Casimir.
- Solidoro, C., Pecenik, G., Pastres, R., Franco, D. y Dejak, C. (1997). Modelling Macroalgae (*Ulva rigida*) in the Venice Lagoon: Model Structure Identification and First Parameters Estimation. *Ecological Modeling*, 94, 191-206.
- The Nautical Magazine (1832). *Hydrography: Maritime paper, Reviews of voyages I. Sargasso weed*, 175-179.
- United Nations Environment Programme (UNEP) y Caribbean Environment Programme (CEP) (2021). *Sargassum White Paper: Turning the Crisis into an Opportunity. Ninth Meeting of the Scientific and Technical Advisory Committee (STAC) to the Protocol Concerning Specially Protected Areas and Wildlife (SPA) in the Wider Caribbean Region*.
- Van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Ávalos, J., Canizales-Flores, H. M. et al. (2017). Severe Impacts of Brown Tides Caused by *Sargassum* spp. on Near-Shore Caribbean Seagrass Communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122, 272-281.
- Wang, M. y Hu, C. (2016). Mapping and Quantifying *Sargassum* Distribution and Coverage in the Central Western Atlantic Using MODIS Observations. *Remote Sensing of Environment*, 183, 350-67.
- Wang, M. y Hu, C. (2017). Predicting *Sargassum* Blooms in the Caribbean Sea from MODIS Observations. *Geophysical Research Letters*, 44(7), 3265-3273.
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B. y Montoya, J. P. (2019). The Great Atlantic *Sargassum* Belt. *Science*, 365, 83-87.

- Yip, Z. T., Quek, R. Z. y Huang, D. (2020). Historical Biogeography of the Widespread Macroalga *Sargassum* (Fucales, Phaeophyceae). *Journal of phycology*, 56(2), 300-309.
- Zhang, S., Liang, Y., Zhang, J., Draisma, S. G. y Duan, D. (2022). Organellar Genome Comparisons of *Sargassum Polycystum* and *S. Plagiophyllum* (Fucales, Phaeophyceae) with Other *Sargassum* Species. *BMC Genomics*, 23(1), 629.



### 3. Monitoreo remoto, modelación y alerta temprana: estado del arte en México

Abigail Uribe Martínez, Christian M. Appendini, Julio A.  
Lara Hernández, María Eugenia Allende Arandía, Sheila  
Estrada Allis, Xavier Flores Vidal

#### INTRODUCCIÓN

Desde que el sargazo comenzó a visualizarse como un problema creciente, se hizo notoria la necesidad de ensamblar sistemas modernos de monitoreo y pronóstico para prevenir a la población en caso de arribazones, estableciéndose como una prioridad internacional (IOC, 2018). Los métodos para el entendimiento de los procesos, la observación, el monitoreo y el pronóstico de sargazo han aumentado de forma exponencial, particularmente a partir de 2018, cuando se tuvieron indicios claros de que los arribazones serían ahora un problema más recurrente y agresivo, que impactaría las costas de los, ya de por sí, vulnerables ecosistemas de Quintana Roo.

La diversidad de insumos, métodos y experiencias, aunado a la gran variabilidad y compleja dinámica del sargazo, sobre todo en la zona costera, han provocado que, al menos en México, los esfuerzos también se hayan diversificado, resultando en una gran variedad de proyectos enfocados a atender esa necesidad de monitoreo y alertamiento temprano.

Los arribazones están influenciados por diversos factores como la cantidad y forma de los parches de sargazo, las corrientes, el viento sobre la superficie del mar, así como las mareas y el oleaje. La complejidad de estos arribazones radica en la intrincada interacción de estos factores, exacerbados por los procesos de flotabilidad del sargazo y de la superficie que está expuesta a la atmósfera (Berón-Vera et al., 2020; 2022). Una consideración es que estos factores influyen en el desplazamiento y deriva del sargazo de forma regionalizada, ya que cerca de la costa y dentro de las lagunas arrecifales estas macroalgas se desplazarán y acumularán obedeciendo procesos que intrínsecamente son más relevantes cerca de la costa (p. ej. oleaje, viento, batimetría) en relación con los procesos oceánicos de mayor escala que dictan el transporte de sargazo en las zonas alejadas de las costas.

La observación, monitoreo y alertamiento de arribazones enfrenta diversos desafíos, principalmente debido al limitado conocimiento del fenómeno en todas sus dimensiones, resultado de su reciente y abrupta intensificación. Hasta 2013, los estudios sobre el sargazo en todas sus dimensiones eran bastante escasos (de la Barrera-Bautista et al., 2023). Ante la necesidad de monitorear esta amenaza, los actores involucrados en la atención y contención de la emergencia han recurrido a la información disponible y confiable, en particular la relacionada con la detección de sargazo mediante imágenes satelitales, como los índices de algas flotantes propuestos por el Laboratorio de Oceanografía Óptica de la Universidad del Sur de la Florida (USF) (Hu, 2009; Wang y Hu, 2016).

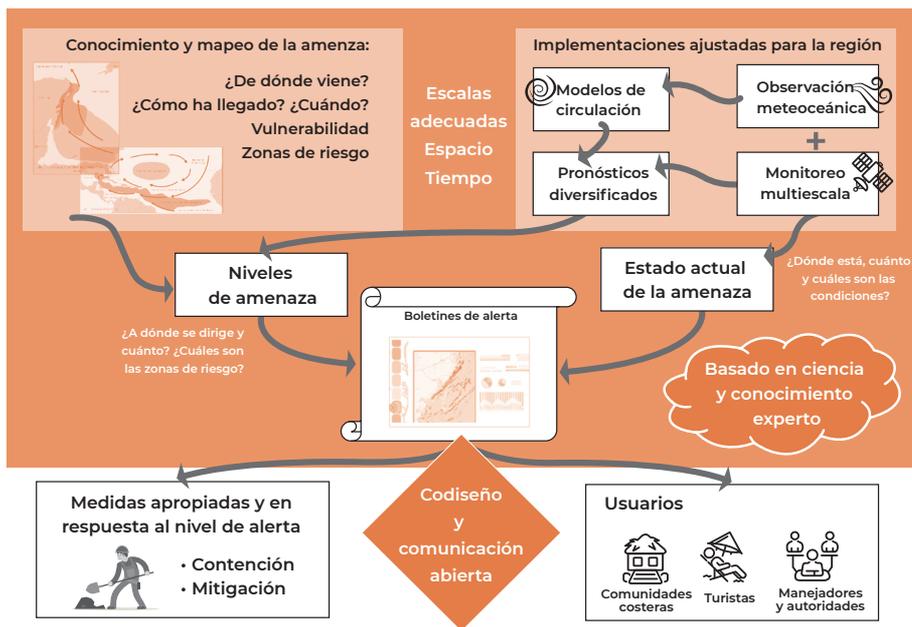
Sin embargo, la incorporación de esta información a los procesos de atención no siempre considera las limitaciones de estas técnicas de observación (explicadas a profundidad en secciones posteriores), lo que puede afectar negativamente tanto la interpretación de los resultados como su aplicación en procesos de mitigación. Como consecuencia del uso de insumos o métodos inapropiados para determinados contextos espaciales o temporales, se han difundido datos erróneos, lo que ha generado desconfianza entre los usuarios. El siguiente desafío implica generar y poner a

disposición información confiable y adecuada que responda a las necesidades de los distintos actores en las escalas espaciotemporales pertinentes.

En este capítulo adoptamos la definición de sistema de alerta temprana (SAT) planteado por la Secretaría Interinstitucional de la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (EIRD-ONU). De acuerdo con esta definición, un SAT se describe como la “Provisión de información oportuna y eficaz a través de instituciones y actores claves, que permita, a individuos expuestos a una amenaza, la toma de acciones a fin de evitar o reducir su riesgo y prepararse para una respuesta efectiva”. Esta definición establece que los sistemas de alerta temprana constan de cuatro elementos fundamentales: 1) conocimiento y mapeo de amenazas; 2) monitoreo y pronóstico de eventos; 3) procesos y difusión de alertas claras para autoridades y población general, y 4) adopción de medidas apropiadas y oportunas en respuesta a tales alertas (EIRD-ONU, 2004).

Bajo este marco, un SAT requiere más que el monitoreo *per se* de la amenaza. Es fundamental contar con conocimiento científico y empírico para definir umbrales de la amenaza y estimar el riesgo, así como para generar pronósticos en escalas espaciales y temporales adecuadas. Además, es crucial implementar métodos efectivos de disseminación e incorporación de la información en la toma de decisiones, con una intercomunicación fluida entre los diferentes actores (figura 1). Sin embargo, en México, la conciliación de los sectores e instituciones involucrados en atender cada elemento necesario para un SAT ha sido complicada bajo los lineamientos, reglamentaciones y mandatos actuales, resultando en diversas iniciativas dispersas. Esta realidad ha detonado el desarrollo paralelo de diferentes implementaciones para atender la necesidad de información en México, expandiendo así el abanico de soluciones, desde la incorporación de datos obtenidos de instancias internacionales como la USF (por mucho la más utilizada), hasta investigaciones y diseños mexicanos, incluyendo colaboraciones internacionales.

**Figura 1.** Modelo de un sistema de alerta temprana adaptado para arribazones de sargazo, con base en la definición de las Naciones Unidas



**Fuente:** elaboración propia con base en (EIRD-ONU, 2004).

A pesar de que este escenario no es eficiente debido a la duplicidad de esfuerzos y la segregación de recursos, México lidera en Latinoamérica las acciones para entender, atender y mitigar las contingencias generadas por el sargazo, con múltiples instituciones gubernamentales y académicas involucradas en la atención, adaptación, mitigación y usos de estas macroalgas.<sup>1</sup>

En este capítulo presentamos una revisión de los avances nacionales en la implementación de tecnologías para un SAT, con una visión diferenciada de las escalas (espaciales y temporales) en las que se debe

<sup>1</sup> <https://energia.conahcyt.mx/sargazo/>

observar y predecir el fenómeno del sargazo. Resumimos principalmente diversas perspectivas de la observación local, satelital y la modelación de la deriva del sargazo. El objetivo es destacar los alcances y limitaciones de las distintas técnicas utilizadas para, finalmente, evaluar los elementos de un SAT incorporado actualmente en varios sistemas mexicanos de monitoreo y alertamiento de arribazones.

### CONOCIMIENTO DE LA AMENAZA

El conocimiento de la amenaza que representan los arribazones de sargazo para la zona costera del Caribe mexicano, tanto las playas como los ecosistemas sumergidos, debe ser en relación al entendimiento de los procesos y distribución espacio-temporal de la génesis, crecimiento, acarreo, acumulación e impactos (en múltiples dimensiones sociales y ecológicas). También es necesario estimar la vulnerabilidad socioambiental para, finalmente, llegar a conocer las zonas de riesgo, toda vez que se pueda estimar la probabilidad de ocurrencia de la amenaza de forma diferenciada por zonas. En México se han realizado muy diversas investigaciones en estos tópicos (Rosellón-Druker et al., 2021). En este capítulo nos enfocamos en presentar el conocimiento con una visión multiescala en términos del acarreo desde el Nuevo cinturón de sargazo en el Atlántico central (Wang et al., 2019), hasta los patrones espaciotemporales de acumulación en el Caribe mexicano, mientras que otros temas relacionados al monitoreo, la atención, impactos, etc., se abordan en otros capítulos de este libro.

### DEL ATLÁNTICO ECUATORIAL HACIA EL MAR CARIBE (MC)

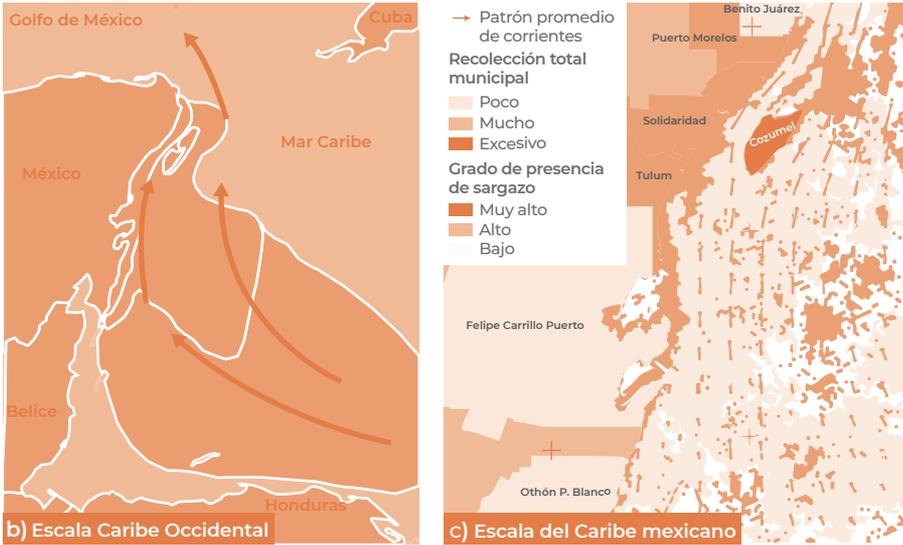
El sargazo suele encontrarse en la superficie del mar, parcialmente sumergido, lo que hace que su transporte, arribo y distribución dependan directamente de la circulación marina, los vientos y el oleaje. La magnitud en la que influye cada una de estas condiciones es multifactorial y regionalizada.

Las corrientes oceánicas desempeñan un papel crucial en el desplazamiento del sargazo desde el Atlántico hasta el Caribe mexicano. De estas corrientes destacan la Corriente Ecuatorial Norte (CEN), la Corriente del Norte de Brasil (CNB) y la Corriente del Caribe, que son los principales flujos que acarrearán el sargazo de forma general del este al noroeste del Atlántico. Esta configuración de corrientes delinea el transporte general del sargazo desde su nueva distribución en el llamado Nuevo cinturón de sargazo (Wang et al., 2019) hasta las costas del Caribe mexicano (figura 2).

Allende-Arandía y colaboradores (2023) identificaron cuatro regiones de trayectorias persistentes: 1) cerca de la costa de Brasil, Surinam y las costas de la Guayana Francesa asociadas con la Corriente de Guayana (GC) y la CNB, 2) las Antillas Menores, 3) el canal entre Honduras y Jamaica, y 4) la región desde el Canal de Yucatán hasta la península de Florida (asociada con la Corriente del Lazo, la Corriente de Florida y la Corriente del Golfo). Estas regiones sirven como autopistas para cualquier material flotante o suspendido, como el sargazo, y también pueden actuar como barreras naturales al transporte (Duran et al., 2018; Gough et al., 2019; Gouveia et al., 2021).

**Figura 2.** Patrones de distribución y flujo general del sargazo en tres escalas





**Nota:** escala del Atlántico (a), del Caribe occidental (b) y del Caribe mexicano (c). En la escala de Caribe mexicano se presentan tres niveles en la cantidad de sargazo recolectado en playas municipales. **Fuente:** elaboración propia con datos de Simar; distribución en agua (modificado de Uribe-Martínez et al., 2022) y promedio general de corrientes para la zona (datos derivados del modelo Hycom).

Estas corrientes mencionadas exhiben una clara variabilidad estacional a diferentes escalas. Durante el verano y el otoño, una parte importante de la CNB se fusiona en la CEN, mientras que en primavera esta última se debilita y se invierte superficialmente. En algunos casos, la CNB y la corriente límite occidental se unen al norte para formar parte del giro de gran escala del Atlántico norte, el cual se desplaza hacia el noroeste, incluyendo el Mar Caribe (Garzoli et al., 2003; Johns et al., 2002).

Además de las corrientes oceánicas, la circulación atmosférica determina en gran parte la trayectoria de objetos flotantes en la superficie marina (Johns et al., 2020; Müller-Karger et al., 1989; Putman et al., 2018). La variabilidad atmosférica en la región ecuatorial y zonas adyacentes está dominada por la estacionalidad de los vientos alisios de velocidades típicas de 4 a 8 m/s (Chadee y Clarke, 2015), que a su vez son modulados

por la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la llegada de frentes fríos y la variabilidad de la Corriente de Chorro del Caribe (CCC) (Aliaga Nestares et al., 2022; Haffke et al., 2016; Henke et al., 2012; Skliris et al., 2022). La CCC es una extensión de los vientos del este que se intensifica estacionalmente y tiene una dirección casi este-oeste (García-Martínez y Bollasina, 2020; Hidalgo et al., 2015).

Esta dinámica atmosférica resulta en dos estaciones climáticas bien definidas: una más ventosa y seca de diciembre a marzo, y otra de lluvias de agosto a noviembre. Los meses de mayo a junio y de septiembre a octubre son períodos de transición, donde los vientos alisios tienden a debilitarse y la variabilidad de la CCC se intensifica (García-Martínez y Bollasina, 2020; Hidalgo et al., 2015; Orfila et al., 2021). Estas condiciones atmosféricas tienen efectos en el propio desplazamiento del sargazo, pero también se pueden esperar cambios en su crecimiento y aglomeración (Guzmán-Ramírez et al., 2019; Magaña-Gallegos et al., 2023). Durante los períodos de vientos débiles, el sargazo se desplaza hacia la región oeste del Caribe usando la ruta de transporte definida por la zona central del canal Honduras-Jamaica (considerándose la continuación de la Corriente del Caribe) y desplazándose hacia el Canal de Yucatán.

Cuando el viento se intensifica, el sargazo llega a la península de Yucatán mediante las corrientes que fluyen sobre la plataforma continental de las regiones de Honduras y Belice. En invierno, los fuertes vientos del norte, asociados a frentes fríos (Allende-Arandía et al., 2020) provocan que el sargazo sea menos propenso de acercarse a la costa de Quintana Roo (García-Sánchez et al., 2020; Aguilera-Méndez et al., 2023; Uribe-Martínez et al., 2022; Lara-Hernández, 2023; Lara-Hernández et al., 2024). En verano, la región es propensa a la actividad de huracanes, especialmente de junio a noviembre (Miret-Villaseñor et al., 2019), lo que también altera los patrones costeros donde la acumulación disminuye por la alta energía presente en las playas (Rutten et al., 2021).

El sargazo que llega a las costas mexicanas se ha desplazado de cuatro a ocho meses desde el Atlántico ecuatorial, dependiendo de los meses en los

que comienza su trayectoria hacia el norte. Durante el otoño e invierno, cuando el sargazo se desplaza hacia el noroeste desde la región ecuatorial, sólo será necesario el 1% de la intensidad del viento para que llegue a las costas mexicanas en la primavera del año siguiente. Por otro lado, cuando comienza su desplazamiento en la primavera, se requiere al menos el 2% de la intensidad del viento (que incluye el efecto del oleaje) para que el sargazo llegue a México en el verano del mismo año (Allende-Arandía et al., 2023), lo que coincide con la llegada de mayores cantidades de sargazo al Caribe mexicano durante el verano.

#### CIRCULACIÓN CARIBE OCCIDENTAL Y CARIBE MEXICANO

En el mar Caribe occidental, que incluye al Caribe mexicano, la circulación oceánica de mayor escala está dominada por dos secciones de la Corriente del Caribe: la Corriente Caimán y la Corriente de Yucatán. La Corriente Caimán es un flujo hacia el oeste que pasa al norte de Honduras hasta llegar al Caribe mexicano. Eventualmente, la Corriente Caimán gira hacia el norte, al interactuar con la costa oriental de la península de Yucatán, convirtiéndose en la Corriente de Yucatán, la cual puede alcanzar velocidades altas cercanas a los 2 m/s (Centurioni y Niiler, 2003; Cetina et al., 2006). El mar Caribe presenta pequeños giros de recirculación frente a las costas, desde Panamá hasta el sur del Canal de Yucatán, los cuales interactúan con la batimetría provocando una compleja dinámica marina de transporte.

Así, el sargazo que llega al Caribe mexicano generalmente proviene del este junto con la Corriente Caimán y, eventualmente, fluye hacia el norte junto con la Corriente de Yucatán, mientras que los vientos del este lo empujan hacia la costa, favoreciendo su arribo a las playas. Cerca de la costa la circulación marina de menor escala se vuelve compleja debido a la interacción de diversos factores como oleaje, marea, vientos locales, batimetría de plataforma continental, descargas de agua

continental, remolinos y corrientes marinas (Carrillo et al., 2015; Parra et al., 2014, 2015; Miret-Villaseñor et al., 2019; Cahuich-López et al., 2020).

A nivel local, las corrientes costeras actúan como barreras, dificultando el transporte perpendicular a la costa, pero cuando el viento tiene esta misma dirección, añade un componente transversal sobre las corrientes superficiales, haciendo que se debiliten las barreras y permitiendo que el sargazo tenga una trayectoria hacia la costa. Considerando el fuerte componente de viento del norte durante los frentes fríos, éstos podrían influir en el transporte del sargazo, desplazándolo hacia el sureste e impidiendo que lleguen a la península de Yucatán, evitando la acumulación del alga en las costas de Quintana Roo.

Particularmente, en el Caribe mexicano la presencia de lagunas arrecifales constituye un elemento adicional de complejidad, pues la circulación dentro de estos cuerpos de agua está principalmente influenciada por la rompiente de olas en las barreras arrecifales. La circulación dentro de las lagunas se activa en presencia de viento y oleaje intenso, lo que genera un mayor flujo de agua por encima de la barrera arrecifal hacia el interior de la laguna. Este flujo tiende a equilibrarse rápidamente mediante la generación de corrientes de salida a través de las aberturas en la barrera arrecifal (Coronado et al., 2007). Dicho estado de circulación activa dentro de las lagunas, típicamente se asocia con procesos de remoción natural de sargazo, mientras que durante periodos de calma en la circulación se asocia a procesos de deposición de sargazo sobre las playas (Rutten et al., 2021; Uribe-Martínez et al., 2022).

Recientemente, Lara-Hernández y colaboradores (2023, 2024) caracterizaron las rutas de dispersión que sigue el sargazo en aguas del Caribe noroccidental para arribar a las costas del Caribe mexicano. Encontraron que una parte importante del sargazo que arriba en la zona flota por las cercanías de Banco Chinchorro y, a partir de ahí, alcanza una sección amplia de la costa tras un periodo de aproximadamente cinco días, fluyendo hacia el noroeste. Este hallazgo es crucial para cuestiones de prevención y mitigación de arribos masivos ya que, si se implementan medidas de

monitoreo y contención de sargazo en la zona de Banco Chinchorro, se podría atacar gran parte del problema de manera efectiva antes de que el sargazo arribe a las playas de Quintana Roo.

La compleja dinámica de la circulación en la zona nerítica demanda un conocimiento detallado de los diferentes factores que intervienen en la deriva del sargazo una vez que alcanza la franja costera. En el caso del Caribe mexicano, este conocimiento es aún limitado.

#### PATRONES DE ACUMULACIÓN DE SARGAZO EN EL CARIBE MEXICANO

Los patrones de acumulación del sargazo dependen de la escala de observación, ya que existe una muy alta variabilidad de la forma, aglomeración y desplazamiento del sargazo –que varía entre regiones– de acuerdo con los procesos físicos que lo transportan y agregan (Rutten et al., 2021; Uribe-Martínez et al., 2022; Lara-Hernández et al., 2024). En el mar, esta biomasa se aglomera en balsas que flotan superficial y sub-superficialmente (Berón-Vera et al., 2020). Hemos observado que el sargazo se agrega en forma de parches de diferentes tamaños, abarcando decenas de kilómetros cuadrados, que pueden estar consolidados o dispersos pero que se presentan principalmente alargados. Estos filamentos son más bien delgados de algunos metros de ancho (<50 m) pero pueden ser tan largos que llegan a medir más de 150 km, como los observados en las inmediaciones de Quintana Roo (Uribe-Martínez, et al., 2022).

En la actualidad existen pocos estudios enfocados en reconstruir la historia reciente de la distribución espacial y temporal del sargazo en los mares del Caribe mexicano a una escala suficientemente detallada para esta región. Sin embargo, gracias a la observación sistemática cada 16 días con imágenes de alta resolución (Cuevas et al., 2018), hemos logrado obtener información espacialmente explícita sobre la recurrencia e intensidad de los eventos de arribazón de sargazo (Chavez et al., 2022; Uribe-Martínez et al., 2023), que se asemeja a un muestreo sistemático temporal.

Hasta el momento hemos observado que, de manera general, toda la costa de Quintana Roo ha sido afectada por la presencia de esta alga en mayor o menor cantidad y frecuencia. Sin embargo, existen regiones donde la acumulación de biomasa es mucho más intensa, así como áreas donde su presencia es más frecuente, o ambas condiciones se combinan. En el Caribe mexicano, en términos generales, la presencia recurrente de sargazo en el mar disminuye de norte a sur, aunque con dos excepciones, ya que existen importantes concentraciones del alga al sur, en las inmediaciones de la reserva de Sian Ka'an y, por otro lado, una importante disminución al norte de Cancún (Uribe-Martínez, et al., 2023).

El desplazamiento del sargazo que proviene del sur y del sureste, en interacción con la morfología y orientación de la costa, provoca que el norte del municipio de Tulum y el sur de Solidaridad sean de las zonas más impactadas de manera intensa y en forma recurrente. Aquí la biomasa se acumula en las playas, aparentemente por un efecto secundario derivado de presencia de la isla de Cozumel en combinación con la orientación de la costa, que provocan un efecto de “embudo”, constriñendo las balsas de sargazo sobre el canal del mismo nombre y provocando su varamiento.

Regularmente, debido al flujo predominante, la biomasa tiende a acumularse considerablemente más en la costa continental que en la parte oeste de la isla de Cozumel, donde la acumulación es generalmente menor, aunque en invierno se revierte el patrón, con acumulaciones en la isla y no en continente (Uribe-Martínez et al., 2022). En la zona este, norte y sur de la isla de Cozumel se observa que una porción del sargazo no ingresa por el canal y se desplaza alrededor de la isla, no obstante, su permanencia es corta debido a la alta energía en las playas de esa zona.

Estacionalmente, estas macroalgas en el Caribe mexicano tienen patrones diferenciados entre lo que se observa en el mar y lo que se acumula y recolecta en las playas. Lo que se ha observado con detecciones satelitales de alta calidad (Cuevas et al., 2018), en una serie de tiempo sistemática de 2014 a 2022, es que la presencia de sargazo en el mar ocurre

prácticamente en todas las épocas del año, incluso con picos importantes en invierno, lo que contrasta por momentos con el concepto oficialmente establecido y socializado como la “temporada de sargazo” Secretaría de Marina (Semar, 20 de marzo de 2024). Con estos datos, se observó que la presencia de biomasa más intensa sucedió entre febrero de 2018 y octubre de 2019, con una cantidad acumulada de sargazo (la suma de todo lo observado) mayor que todo lo detectado entre 2014-2017 y 2020-2022.

Al considerar las condiciones que influyen en el transporte y acumulación de macroalgas se presume que, en la temporada invernal, más que un cambio en la disponibilidad del alga, lo que ocurre es un cambio en los patrones atmosféricos y oceanográficos que limitan el arribo de sargazo a las playas. En teoría esto puede deberse a que la barrera de transporte formada por la Corriente de Yucatán se debilita con el viento y prácticamente desaparece cuando éste aumenta su intensidad y las condiciones de alta energía en la playa impiden también su acumulación (Rutten et al., 2021). El problema de limitar una temporada de sargazo a las estaciones es que, si se conjugan grandes cantidades del alga en el mar (como las observadas en los inviernos del 2014-2015, 2018-2019 y 2021-2022) con las condiciones meteorológicas que transportan estas macroalgas a la playa, (como sucedió en el invierno de 2022-2023), se podrían tener cantidades importantes de acumulaciones en playa en temporadas invernales de años atípicos.

## TÉCNICAS DE MONITOREO Y PRONÓSTICO

### DETECCIÓN REMOTA DEL SARGAZO

La piedra angular de cualquier sistema de monitoreo o alerta de sargazo es la observación remota de estas balsas en mar abierto, que representen una potencial amenaza de arribar y acumularse en zonas sensibles o vulnerables. La percepción remota se refiere a cualquier técnica de adquisición de datos sin estar en contacto directo con el objeto de estudio.

En otras palabras, se refiere a la ciencia y la tecnología relacionadas con la adquisición de imágenes con sensores a bordo de satélites, avionetas y drones.

La observación del sargazo a través de imágenes satelitales ha sido fundamental para entender su distribución y dinámica, sobre todo de forma global y regional, es decir, a escala del Atlántico y del Caribe (Hu et al., 2015; Wang y Hu, 2016; Johns et al., 2020; Berline et al., 2021; Wang et al., 2019; Uribe-Martínez, et al., 2022 y Rodríguez-Martínez et al., 2023). A pesar de su utilidad, todas las técnicas de percepción remota para la detección del sargazo tienen limitaciones, ya sea por su alcance y resolución espacial, o por la capacidad de observar el mismo lugar regularmente, lo que impacta en el resultado del monitoreo y su interpretación. Sin embargo, sus ventajas como observaciones sistemáticas, visión sinóptica y gratuidad, convierten a las imágenes satelitales en uno de los insumos más utilizados en sistemas de alertamiento ante arribazones.

Detectar el sargazo mediante el uso de imágenes satelitales ha sido posible desde hace más de una década, con la implementación de algoritmos de detección de algas pelágicas con una amplia gama de sensores. Se han utilizado diversos algoritmos como el Índice de Clorofila Máxima o MCI (Gower et al., 2008), el Modis Red Edge o MRE (Gower et al., 2013) y el Índice de Algas Flotantes o FAI (Hu, 2009). La mayoría han sido implementados esencialmente para utilizarse con imágenes de baja o moderada resolución espacial (tamaño de píxel mayor a 1 km), lo que permite cubrir extensas áreas en una sola escena y de manera frecuente. Estas aproximaciones se mantienen en los alcances de los insumos originales para los que fueron diseñados, pues algunos sensores pueden tener una buena respuesta en ambientes oceánicos mientras que sufren de saturación en los ambientes costeros (Hu et al., 2023).

Actualmente, existe una cantidad importante de sensores instalados en plataformas satelitales que, junto a la utilización de otros localizados en la costa como cámaras, radares y vehículos autónomos no tripulados (VANT), proveen de una vasta diversidad de características

espaciales y temporales para observar el fenómeno del sargazo en las diferentes escalas que cada proceso de preparación y manejo requieren. Mientras los sensores satelitales, particularmente aquellos de acceso abierto, pueden proveer información de la ubicación de acumulaciones de macroalgas cubriendo grandes áreas como el mar Caribe y el Atlántico central con diferentes niveles de detalle (desde kilómetros hasta metros), los sensores instalados en tierra (*in situ*) ayudan a observar el arribo y dispersión de sargazo con un gran detalle y, en algunos casos, con muy alta frecuencia sobre la costa. A estos se les suman las capacidades de detección multiespectral de muy alta resolución que proveen los VANT, que aportan información con mucho detalle, sobre todo en las zonas costeras donde los sensores satelitales de resolución moderada pierden definición.

Las características generales de los datos adquiridos de manera remota se centran en la capacidad de observar los detalles de las formas (resolución espacial), el tiempo en que se vuelve a adquirir una toma del mismo sitio (resolución espacial o tiempo de revisita), características espectrales (que definen la capacidad de cada sensor de diferenciar la respuesta del “color”) y la cobertura que alcanzan en cada toma o escena.

La detección del sargazo mediante sensores remotos contempla ventajas y desventajas en cada técnica e instrumento utilizado. Los sensores multiespectrales están sujetos a la visibilidad que permitan las nubes (no se puede observar sargazo por debajo de las nubes gruesas, ver figura 3). Además, los sensores de moderada resolución espacial (cientos de metros) proporcionan imágenes diarias con detecciones considerablemente precisas en mar abierto, aunque tienen el problema de que las estimaciones de concentración de sargazo cercanas a la costa no son confiables (Cuevas et al., 2018; Hu et al., 2023) ya que se saturan por la interferencia con el piso oceánico y otros elementos presentes en el agua, provocando fuertes confusiones en la interpretación del resultado.

Por otro lado, los de mayor resolución espacial pueden resolver mucho mejor las detecciones costeras, incluso detectando el sargazo que

ha arribado a la playa (Laval et al., 2023), pero su período de revisita es mayor (cinco días en el mejor de los casos) y presentan retos de diferenciación espectral de los objetos que se confunden con el sargazo (Hu et al., 2023). Teóricamente, los sensores de radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) tienen el potencial de realizar observaciones sin el inconveniente de la obstrucción por cobertura de nubes, que en el Caribe mexicano aumenta considerablemente durante la mayor temporada de arribazón entre mayo y octubre. Sin embargo, las técnicas para detección de sargazo con estos instrumentos se encuentran en desarrollo y las misiones de acceso gratuito tienen actualmente un período de revisita largo (>10 días).

La mayoría de las implementaciones de detección satelital ha utilizado variaciones de los índices de algas flotantes propuestos inicialmente por el equipo de la Universidad del Sur de Florida (Hu, 2009; Hu et al., 2015; Wang y Hu., 2016). Estos índices están diseñados para sensores de muy alta resolución espectral y radiométrica que, al ser implementados con sensores de otras características espectrales, presentan retos en la desagregación de los objetos presentes en una escena. Para contrarrestar este efecto, Cuevas y colaboradores (2018) propusieron la detección de sargazo con una aproximación multiíndice, es decir, un conjunto de índices que al ser interpretados de manera conjunta aumentan significativamente la precisión de la detección con imágenes de alta resolución espacial como las Landsat y Sentinel-2. Con este desarrollo, se ha logrado generar una base cartográfica depurada de 10 años de la distribución de balsas de sargazo en escala fina, con una confianza del 97%, para la costa de Quintana Roo, y que funciona como un muestreo sistemático y homologado en distintas condiciones ambientales (Uribe-Martínez et al., 2022).

Otra aproximación, tanto para la observación de muy alta resolución como para la validación y calibración de las observaciones satelitales y modelos de pronóstico, es la adquisición de imágenes aéreas utilizando VANT, los cuales permiten adquirir imágenes georreferenciadas aun a varios kilómetros de la costa. Estos sistemas de observación aérea son

especialmente útiles para la observación de sargazo en playa y fuera de la costa en áreas de alto interés (incluso a más de 15 km mar adentro), ya que, a diferencia de las imágenes satelitales multiespectrales, la cobertura nubosa no limita sus detecciones, su costo es relativamente bajo en comparación con misiones comerciales (por ejemplo, PlanetScope) y la captura de imágenes puede realizarse a discreción.

En la actualidad se desarrollan en México VANT de largo alcance, con amplia versatilidad de despegue y aterrizaje vertical sin asistencia humana, una cámara 4K acoplada a un GPS de alta resolución (RTK) y un sistema para compensar el movimiento, además de contar con la capacidad de enviar imágenes georreferenciadas en tiempo cuasi real a distintos sistemas de asimilación de datos (Gudiño et al., 2023). Esta tecnología abre la posibilidad de implementar sistemas de observación local que, de manera sistemática y operados por personal de apoyo no especializado, adquiera imágenes de muy alta resolución durante los arribazones de sargazo, en complementariedad con imágenes obtenidas con imágenes satelitales y cámaras en costa.

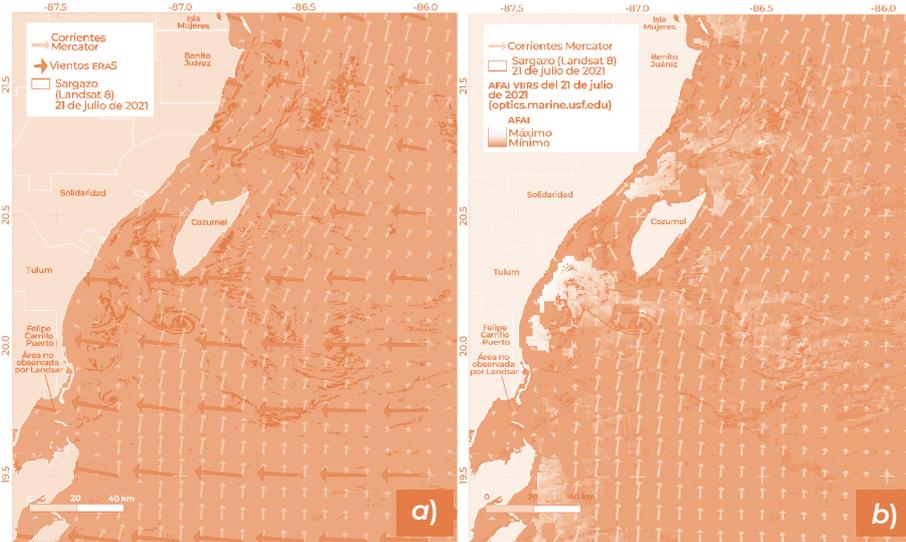
En el otro extremo de cobertura y resolución, los sensores instalados en tierra, como las videocámaras, permiten observar el sargazo con una muy alta frecuencia y gracias a los actuales avances en la automatización de su procesamiento, presentan muy pocas confusiones con otros objetos y posibilitan ver su desplazamiento con capturas continuas (minutos), aunque su alcance sea de máximo 5 km desde la costa a lo largo de una playa de hasta 2 km (Rutten et al., 2021). Con este tipo de cámaras se ha podido cuantificar de manera objetiva el sargazo que arriba a la playa de Puerto Morelos, cerca de la unidad académica de la UNAM, y correlacionar con las condiciones ambientales (vientos, corrientes y energía del oleaje) a fin de realizar un modelo conceptual para el arribazón y remoción natural en esta playa (Rutten et al., 2021). Actualmente el costo de las cámaras se ha reducido considerablemente y es posible replicar el monitoreo del sargazo a lo largo de la costa. Más adelante en este libro se abunda en las diferentes técnicas utilizadas para el monitoreo en playa.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores en términos de la escala de detección del sargazo, proponemos que esta debe ser atendida en una visión multiescala/multiplataforma que incorpore las fortalezas de las imágenes de alta frecuencia de revisita (diarias) y de moderada resolución espacial (cientos de metros), con el detalle espacial de imágenes de menor frecuencia (tres a cinco días) pero mayor detalle en la detección (<30 m) (figura 3), complementadas con observaciones con sensores desde la costa, además de incorporar datos de recolección sobre sitios puntuales.

Una de las grandes ventajas de tener observaciones de sargazo en distintas escalas espaciales que potencialmente pueden ocurrir al mismo tiempo es la capacidad de realizar intercalibraciones, en las que un producto de observación pueda respaldar y validar otro. A la vez, se establecen rangos de certidumbre y cantidad, densidad y biomasa que los diferentes sensores pueden detectar, es decir, se instaura la sensibilidad de cada sistema. Este enfoque permite que las estimaciones de los parámetros tengan un fundamento estadístico y así poder delimitar con mayor claridad los alcances y las limitaciones de la información que se está generando.

Al conjuntar las diversas fuentes de datos de acceso libre o bien de bajo costo, se podría contar con un SAT económicamente sustentable (Uribe-Martínez et al., 2020), se mejoraría la cobertura de observación temporal y espacial, y se podría generar información con la calidad necesaria para el manejo y toma de decisiones en distintos contextos. En dicho SAT sería posible obtener los datos de detección de balsas de sargazo más adecuados para diferentes escalas espaciales y temporales, que a su vez servirían para inicializar, ajustar y validar modelos numéricos, los cuales podrían calibrarse y validarse con observaciones puntuales *in situ* y con otros tipos de datos generados por diversas disciplinas.

**Figura 3.** Detección de sargazo de alta resolución con imagen Landsat-OLI 8



**Nota:** Landsat-OLI 8. En *a)* se presentan vectores de corrientes (flechas) derivados del sistema Mercator Global Ocean,<sup>2</sup> vectores de vientos superficial (10 m) de ERA5<sup>3</sup> y la trayectoria de una boya o derivador superficial liberado en el canal de Chinchorro (punto blanco). En *b)* la detección de sargazo se acompaña con una imagen de AFAI derivado de VIIRS de la misma fecha (21 de julio de 2021) para contrastar dos detecciones de diferente resolución espacial (VIIRS = 1km; Landsat = 30 m).  
**Fuente:** Cuevas y colaboradores (2018).

## MONITOREO AMBIENTAL

El monitoreo de las condiciones ambientales como vientos, oleaje y corrientes a diferentes escalas espaciales nos permite relacionar estas condiciones con los arribazones de sargazo a las playas. Considerando los mecanismos de transporte y acumulación expuestos anteriormente, es esencial contar con observaciones de las variables biofísicas relacionadas con el fenómeno o amenaza, por lo que se requiere instrumentación que permita adquirir, de

<sup>2</sup> <https://doi.org/10.48670/moi-00016>

<sup>3</sup> <https://doi.org/10.24381/cds.67e8eeb7>

forma continua e idealmente ininterrumpida, mediciones sinópticas con la escala espacial y temporal adecuadas de oleaje, marea, viento, descargas de agua, remolinos y corrientes marinas superficiales, corrientes costeras, así como conocer a detalle la batimetría de plataforma y talud continental.

Las observaciones de datos meteoceánicos (meteorológicos y oceanográficos) tanto a nivel local, como regional adquiridos por sensores remotos aportan elementos en al menos tres aspectos: 1) generar conocimiento acerca de los factores que intervienen en las trayectorias de deriva y acumulación (remoción) del sargazo en playa, incluyendo modelos físicos; 2) calibrar y validar modelos de dispersión de sargazo, contrastando lo modelado contra lo observado, y 3) contar con datos operacionales de las condiciones en tiempo real que se puedan asimilar por los sistemas de pronóstico, particularmente en modelaciones de escala fina para la costa, y con ello desarrollar sistemas de alerta eficaces.

Para avanzar en el conocimiento de los factores de deriva, Cuevas y colaboradores (en preparación) documentan trayectorias preferenciales dentro del Caribe mexicano a partir de los datos obtenidos con una serie de boyas de deriva liberadas al sur de Quintana Roo. Lo que han observado es que estos derivadores típicamente corren a lo largo de la franja costera (hasta 40 km fuera de la línea de costa) del Caribe mexicano, desde la porción más sureña Chetumal-Xcalak, hasta la parte más norteña Cancún-Isla Mujeres, en periodos que van de tres a 10 días. Durante su travesía hacia el norte, los objetos de deriva pueden recalar en la playa o entrar en zonas de recirculación y remolinos, particularmente al sur de Tulum, en la entrada del Canal de Cozumel (figura 3a).

Los procesos costeros de escala fina presentan una gran variabilidad espacial y temporal, debido a la influencia del viento y corrientes marinas costeras, por lo que monitorear esta variación sinóptica de escala fina (algunos cientos de metros y horas) es sumamente relevante tanto para entender el proceso como para estimar el pronóstico de recale de sargazo. Para atender esta necesidad de observaciones locales, en diciembre de 2022 se instalaron dos radares HFR (*High Frequency Radar*) en las

localidades de Xcalak y Punta Herrero (Flores-Vidal et al., 2020) para mapear las corrientes marinas costeras (observadas, no modeladas) de hasta ~150 km de la costa desde ambas localidades.

Con estos datos se ha observado la corriente costera (a ~10 km de la costa) que se interconecta con la corriente de Yucatán (Candela et al., 2002; Cetina et al., 2006) pero que obedece también a la dinámica local, así como la presencia de remolinos costeros en Tulum que atrapan el sargazo y favorecen su recale en las costas.<sup>4</sup> El proyecto en el que se enmarca este esfuerzo también trabaja en generar, como parte de sus resultados, estimaciones de trayectorias preferenciales, velocidades de deriva y la integración de detecciones de sargazo con imágenes satelitales para proveer información pertinente, a fin de realizar un pronóstico de zonas y tiempos de arribo de sargazo en Quintana Roo.<sup>5</sup>

Otros instrumentos costeros para el monitoreo de las condiciones oceanográficas, meteorológicas y biogeoquímicas que se asocian al sargazo también suman información pertinente para apoyar la toma de decisiones en medidas de mitigación, limpieza y contención, por el arribo masivo de sargazo, como estaciones meteorológicas y anclajes. El reporte de esas condiciones también debería ser integrado en las salidas y boletines de un SAT de sargazo. En este conjunto se pueden considerar también las cámaras costeras descritas a profundidad en el siguiente capítulo, pues de éstas también se genera información sobre la circulación costera a alta resolución espacial y temporal, lo cual permite una mejor toma de decisiones.

#### MODELOS DE DISPERSIÓN Y TRANSPORTE DE SARGAZO

El avance de sistemas computacionales y de los modelos de predicción han proporcionado una amplia gama de herramientas numéricas para el seguimiento de partículas en la superficie del mar. Los modelos que

<sup>4</sup> <https://oorco.ens.uabc.mx/deteccion-sargazo>

<sup>5</sup> <https://apps.apple.com/mx/app/oorco/id6463189154>

pronostican la trayectoria del sargazo se basan en los campos de velocidades de modelos hidrodinámicos. Entre los más utilizados para estudiar el transporte del sargazo se encuentran el modelo Hycom (*Hybrid Coordinate Ocean Model*), el modelo Mercator y el modelo ROMS (*Regional Ocean Modeling System*). Estos han demostrado su eficacia para simular las corrientes oceánicas a diferentes escalas espaciales y temporales, lo que los convierte en herramientas valiosas para comprender las afectaciones en la distribución del sargazo en el Caribe mexicano.

El modelo Hycom emplea una combinación de coordenadas para representar de manera precisa la estructura tridimensional de los océanos, lo que lo hace especialmente útil para estudiar fenómenos a gran escala como el transporte del sargazo a lo largo de las cuencas oceánicas. Por otro lado, el modelo Mercator, desarrollado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés), se utiliza ampliamente para la predicción oceánica y la asimilación de datos satelitales, lo que permite una representación precisa de las corrientes superficiales y la variabilidad oceanográfica.

En cuanto al modelo ROMS, conocido por su capacidad para simular la circulación oceánica regional con alta resolución espacial, es adecuado para estudiar procesos costeros y la interacción entre corrientes y fenómenos atmosféricos locales que pueden influir en el transporte del sargazo en la región del Caribe mexicano. Estos modelos proporcionan una base sólida para investigar y comprender mejor los patrones de distribución del sargazo y su comportamiento en el océano.

La precisión de los modelos hidrodinámicos es fundamental para simular correctamente el transporte de partículas en el océano. Sin embargo, además de las corrientes, otros factores como el viento y el oleaje, a través de la deriva de Stokes, también pueden desplazar el sargazo, incluso llevándolo a diferentes regiones oceánicas donde puede cambiar su trayectoria y llegar a zonas muy distintas. Por esta razón, se han llevado a cabo numerosos estudios para determinar el efecto del viento y el oleaje en el transporte del sargazo.

La mayoría de estos estudios concluyen que se debe tener en cuenta

entre el 1 y el 2% del viento en el campo de corrientes para compensar el impacto que generan el viento y la deriva de Stokes sobre la deriva de partículas (Clarke y Van Gorder, 2018; Putman et al., 2020; Johns et al., 2020; Allende-Arandia et al., 2023). Esta compensación es crucial para mejorar la precisión de los modelos y lograr una representación más fiel del movimiento del sargazo en el océano. Cabe mencionar que algunos modelos hidrodinámicos, como Mercator, incluyen la deriva de Stokes en sus bases de datos, la cual se puede utilizar directamente, dando buenos resultados (Quintana-Barranco et al., 2023).

Los modelos de dispersión de partículas, que son sistemas lagrangianos, son altamente adaptables y pueden simular el movimiento del sargazo a diversas escalas espaciales y temporales, desde áreas locales hasta cuencas oceánicas enteras, permitiendo estimar trayectorias a lo largo de horas, días, meses o incluso años (Marsh et al., 2021). Estos modelos han demostrado ser herramientas valiosas para el seguimiento de partículas derivadas por corrientes e influenciadas por el viento y el oleaje, cuando se combinan con observaciones *in situ* y satelitales. En la mayoría de los casos estas partículas se consideran inertes o pasivas, lo que significa que no reaccionan con el medio circundante o entre sí. Esta suposición de flotación pasiva aplica al caso de derrames de hidrocarburos, búsqueda y rescate, y deriva de plásticos.

Los sistemas o modelos lagrangianos que se han utilizado para simular las dinámicas del sargazo son similares en su mayoría, pero suelen presentar diferencias que radican principalmente en el grado de complejidad del sistema y su capacidad para capturar diferentes aspectos del fenómeno. Por ejemplo, se han usado sistemas para estimar trayectorias de sargazo únicamente como función de las corrientes marinas (Franks et al., 2016; Xu et al., 2022).

Otros sistemas más complejos añaden otros procesos como el arrastre por efecto directo del viento, efectos inerciales, oleaje y crecimiento o mortalidad de sargazo en función de variables ambientales (Brooks et al., 2018, 2019; Marsh et al., 2021; Aguilera-Méndez et al., 2023; Uribe-Martínez et al., 2023; Lara-Hernández et al., 2024). La selección

de procesos a considerar depende de los objetivos, la región y la escala espacio-temporal del estudio, buscando generar modelos eficientes que produzcan resultados precisos con tiempos de cómputo mínimos, especialmente para los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) que se utilizarán operacionalmente (Lara-Hernández, 2023; Lara-Hernández et al., 2024).

Es importante tener en cuenta que, aunque la deriva de partículas inertes ha sido útil para caracterizar los patrones de transporte del sargazo en el Caribe mexicano, existen otros factores, como los procesos biogeoquímicos, que podrían incorporarse en la modelación para mejorar su precisión. Sin embargo, debido a las incertidumbres en la fisiología del sargazo, todavía queda mucho por hacer para integrar estos modelos en los SAT de manera efectiva.

En cuanto a los sistemas de seguimiento de partículas en modo de pronóstico, es fundamental considerar pronósticos probabilistas en lugar de deterministas para aumentar la robustez de los resultados. Todos los modelos presentan cierto grado de incertidumbre, tanto aleatoria como epistémica, debido a errores asociados con los campos vectoriales de corrientes y la posición inicial de las partículas. Para abordar esto, los pronósticos probabilistas se basan en múltiples simulaciones para reducir el sesgo asociado al transporte del sargazo, y la inicialización puede realizarse utilizando diversas técnicas, como el sembrado de partículas en todo el dominio o en regiones específicas identificadas a través de imágenes satelitales.

Es importante destacar que, si bien los modelos hidrodinámicos ofrecen una representación general de las corrientes oceánicas a diferentes escalas espaciales y temporales, su resolución actual, que oscila entre 4 y 12 km, no es suficiente para simular con precisión los procesos cercanos a la costa. Esto implica que la determinación exacta de las zonas de arribo del sargazo sigue siendo un desafío. Aunado a esto, hay una incertidumbre importante en la estimación de las trayectorias, principalmente debido a que no se sabe con precisión cuál es el factor de viento que se debe usar para modelar el transporte (Lara-Hernández, 2023). El grado de flotabilidad de las balsas de sargazo, su espesor y densidad

son variables que afectan al factor de viento, y no las podemos determinar mediante detección satelital, por lo que predecir con exactitud a qué playa en concreto arribará el sargazo es todavía un gran reto.

Para abordar estas limitaciones y aumentar la certidumbre en los modelos lagrangianos, algunos grupos de investigación en México y los Estados Unidos exploran la teoría de estructuras coherentes. Las estructuras coherentes lagrangianas permiten identificar zonas de atracción y repulsión en el océano, lo que teóricamente puede contribuir a evaluar la certidumbre de dichos modelos. Así, esta línea de investigación ha dado lugar a varios trabajos que buscan mejorar la precisión de los modelos lagrangianos (Allende-Arandia et al., 2021; Berón-Vera y Mirón, 2020; Berón-Vera et al., 2022; Quintana Barranco et al., 2023).

Es fundamental tener en cuenta las múltiples incertidumbres que rodean el comportamiento del sargazo, que incluyen aspectos como la forma en que se desplaza en la superficie, la complejidad de su movimiento tridimensional y su crecimiento, entre otros. Debido a estas incertidumbres, no existe un modelo de pronóstico único que sea considerado como el más preciso para predecir el movimiento de estas macroalgas.

Los modelos de predicción utilizados para estimar su trayectoria, que incluyen la circulación oceánica, atmosférica y del oleaje, generan productos que pueden ser similares en algunos aspectos, pero muy diferentes en otros. Cada modelo tiene sus propias ventajas y desventajas, y la precisión que brindan sólo se puede validar una vez que los eventos hayan ocurrido. Por lo tanto, predecir el movimiento del sargazo se convierte en un problema estadístico en el que se pueden combinar los resultados de múltiples simulaciones, realizadas con uno o varios modelos, para hacer una estimación probabilista de su trayectoria. Esta metodología, que se utiliza en los centros operacionales de predicción atmosférica y oceánica, se puede emplear de manera que implique el uso de un conjunto de varias simulaciones para proporcionar pronósticos que incluyan regiones con mayor probabilidad de ser afectadas por arribos, así como sus tiempos esperados. Analizando las características de este conjunto de simula-

ciones, sería posible obtener estimaciones de la incertidumbre asociada a las predicciones, lo que proporcionaría información valiosa para la toma de decisiones y la gestión de riesgos relacionados con el sargazo.

Con respecto a pronósticos estacionales de la distribución de sargazo a escala del Atlántico y hasta con seis meses de anticipación, solamente existe el proyecto “Foresea”,<sup>6</sup> en el cual participan varios científicos mexicanos. En este sistema se utiliza un ensamble de simulaciones de un modelo de circulación oceánica forzado por un ensamble de simulaciones estacionales atmosféricas generadas por el ECMWF e incorporando un modelo fisiológico simple del sargazo (Jouanno et al., 2021). Asimismo, existen otros grupos en México que exploran la relación de los patrones de transporte con índices climáticos, buscando realizar pronósticos estacionales con base en dichos índices (González Cano et al., 2023).

Por otro lado, es necesario implementar modelos costeros que puedan resolver al menos una franja de aproximadamente 20 km de la costa, con una resolución de decenas de metros, la trayectoria del sargazo desde el océano hasta las playas, tomando en cuenta los procesos que ocurren en la costa. Para este fin se podrían utilizar modelos como el Fvcom, Adcirc, Delft3d y Mike 21.

#### SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA DE ARRIBAZONES DE SARGAZO PARA MÉXICO

Un SAT de sargazo debe responder preguntas esenciales como: ¿cuáles son los patrones recurrentes de acumulación y transporte de sargazo?, ¿dónde está ahora?, ¿cuánto hay?, ¿en cuánto tiempo arribará a costa?, ¿cuánto arribará?, ¿a dónde?

<sup>6</sup> <https://sargassum-foresea.cnrs.fr/>

En México, existen diversos esfuerzos enfocados a generar conocimiento e implementar algún elemento de monitoreo y SAT para proveer información oportuna y preventiva de arribazones. De los sistemas públicos, actualmente existen desde aquellos que expresan la cobertura de sargazo en mar obtenida con imágenes satelitales de diferentes resoluciones, hasta los que se basan en observaciones de biomasa en playa, ya sea por ciencia ciudadana o recolección directa, para emitir algún grado de alertamiento.

Aún no se cuenta con un sistema institucional de alertamiento de arribazones en el Caribe mexicano que contemple todos los elementos que debe poseer y que provea información oportuna y eficaz, no sólo de la distribución actual o pasada del sargazo, sino de la probabilidad y el riesgo de arribazones a la escala y temporalidad adecuada para la región. Lo anterior puede deberse a que aún no existe el conocimiento necesario o a que este conocimiento se encuentre disperso o no consolidado.

En atención a estas limitaciones, en 2021 el Conahcyt promovió la primera etapa de un proyecto denominado “Sistema de observación y alerta temprana del sargazo (proyecto piloto)” cuyo objetivo fue lograr la integración, vinculación y coordinación de más de 80 investigadores de instituciones mexicanas con experiencia en materia de monitoreo, modelación y pronóstico. Este grupo creó las bases de un prototipo de sistema integral de observación y alerta temprana de arribazones de sargazo.

Este sistema aún no es operacional pero refleja la importancia de impulsar proyectos que, desde su origen, contemplen la integración de capacidades nacionales multiinstitucionales y multisectoriales, en aras de resolver un problema complejo. A continuación, se presenta una recapitulación de los sistemas operacionales mexicanos disponibles de manera pública y gratuita, como pautas de los avances nacionales hacia un SAT integral de arribazones.

- Boletín de la Semar sobre el seguimiento y pronóstico de *Sargassum* en el Mar Caribe.<sup>7</sup> Es un esfuerzo realizado en el Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe perteneciente a la Secretaría de Marina. En su página específica que utiliza herramientas y plataformas de oceanografía operacional disponibles, así como las estimaciones de la Universidad del Sur de Florida. Su principal objetivo es informar al mando naval periódica y oportunamente de la condición del sargazo proveniente del Atlántico central occidental que tiene el potencial de desplazarse hacia las costas del Caribe mexicano.

Aunque en su conceptualización utiliza el término “pronóstico”, no se encontraron evidencias de los métodos numéricos utilizados para tal fin, si bien en su boletín se incluyen características de cantidad, corrientes y vientos superficiales y una interpretación cualitativa del posible escenario futuro, con base en una “Escala para la presencia aproximada de sargazo en el Caribe mexicano y criterios para la evaluación del nivel de recale de sargazo en la zona costera”. También presenta una estimación de “Los niveles de recale de sargazo en la zona costera”, aunque no se detalla el origen de los datos o la metodología utilizada para calcularlos.

- Sistema de Monitoreo de Sargazo Recolectado (Simsar) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).<sup>8</sup> Éste se describe con amplitud en uno de los capítulos previos de este libro. Es un sistema considerablemente útil, ya que permite el uso de datos recopilados *in situ* de una forma sistematizada, clara y sencilla.
- Sistema Satelital de Alerta Temprana de Sargazo (SATsum).<sup>9</sup> Es una implementación de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Conabio, que forma parte del Sistema de Monitoreo Marino. Según la información en su portal, se ha

<sup>7</sup> <https://digaohm.semar.gob.mx/OpSargazo/BoletinesSargazo.html>

<sup>8</sup> <https://app.semarnat.gob.mx/sargazo/>

<sup>9</sup> <https://simar.conabio.gob.mx/alertas/#sargazo>

implementado sobre la base del conocimiento de algoritmos bio-ópticos del color del océano, como lo son el MCI (*Maximum Chlorophyll Index*) (Gower et al., 2011), el AFAI (*Alternative Floating Algae Index*) (Wang y Hu, 2016) y promedios temporales de estos, desarrollados por el Instituto de Ciencias Oceánicas de Canadá y la Universidad del Sur de Florida e implementados localmente. En esta implementación se utiliza la descarga operacional de imágenes diarias de los sensores Modis (satélites Aqua y Terra de la NASA), de 1 km de resolución espacial y de OLCI (*Ocean and Land Color Instrument*, a bordo de los satélites Sentinel 3) de 300 m de resolución espacial. Se menciona que cuentan con una estimación de biomasa determinada a partir de ecuaciones simples calibradas para la Florida (Wang et al., 2018), aunque no se presentan estudios de calibración y validación para la zona.

Este sistema también tiene la funcionalidad de emitir un boletín diario de la Alerta Satelital Regional de Sargazo dividido en dos áreas de cobertura, Golfo de México y Caribe, aunque es emitido a través de una plataforma comercial (requiere pago de suscripción). SATsum también cuenta con proyectos de ciencia ciudadana para la recopilación de observaciones puntuales georeferenciadas a través de dos aplicaciones, Epicollect5 y el proyecto “Monitoreo de sargazo pelágico en el Atlántico mexicano” de la plataforma iNaturalist Mexico.<sup>10</sup>

- Monitoreo de Sargazo del Laboratorio Nacional de Observación de la Tierra (Lanot).<sup>11</sup> Sistema con algoritmo propio para detectar sargazo en la zona marítima, que utiliza las bandas 8, 8A, B4 y B11, con imágenes derivadas de los satélites Sentinel-2 de la Constelación Copernicus de la Agencia Espacial Europea. En su portal se puede encontrar la visualización de imágenes en color real y de los

<sup>10</sup> <https://mexico.inaturalist.org/projects/monitoreo-de-sargazo-pelagico-en-el-atlantico-mexicano>

<sup>11</sup> <http://www.lanot.unam.mx/home/sargazo/>

polígonos detectados con sargazo, así como una representación de alguna información relacionada con las corrientes derivadas del modelo Hycom. Según datos de su portal, cuentan con un “pronóstico de la dinámica de sargazo”, aunque no se dan mayores detalles y estos datos no están disponibles a la fecha de esta publicación.

- Seguimiento de Sargazo en el Mar Caribe del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).<sup>12</sup> Es el resultado de esfuerzos realizados por un grupo de trabajo conformado por investigadores del IMTA, Cicimar-IPN y de la Universidad de Florida que busca desarrollar herramientas para la detección e investigación sobre la dinámica y trayectoria del sargazo en el mar Caribe. En este portal se pone a disposición un pronóstico de hasta cinco días de trayectorias del sargazo detectado en imágenes Modis utilizando el acumulado de sargazo de tres días determinado por AFAI con un umbral de 0.00017. El pronóstico es realizado con un modelo lagrangiano de partículas y datos de corriente obtenidos del modelo Hycom y los de viento del NCEP. El arrastre del sargazo inducido por el viento se parametriza como un 2% de la intensidad del viento. Este portal genera información para todo el Caribe.
- Dispersión de Sargazo Pelágico en el Caribe mexicano.<sup>13</sup> Esfuerzo particular encabezado por el doctor Julio Lara con el objetivo de proporcionar estimaciones casi en tiempo real de las vías de dispersión que podrían estar siguiendo el sargazo pelágico (si es que se encuentra presente en el mar) para arribar a las costas del Caribe mexicano. Esta implementación es resultado de varios años de investigación para el entendimiento de los mecanismos de desplazamiento y dispersión del sargazo a escala local (Lara-Hernández et al., 2024). De estos resultados se generan y publican en este portal las estimaciones generales que dan

<sup>12</sup> <https://sargazo.imta.mx/sargazo/>

<sup>13</sup> <https://sargazo-caribemexico.neocities.org/>

una idea de cómo se dispersa el sargazo para la región del Caribe mexicano, así como estimaciones por localidad de por dónde tendría que venir el sargazo pelágico para arribar a una localidad en particular. En este trabajo también se presentan detecciones satelitales de sargazo generadas por el Lanot.

- Observatorio Ciudadano del Sargazo en Quintana Roo.<sup>14</sup> Es un esfuerzo que se sostiene de la recopilación de datos actualizados, con la participación de la población en general que comparten fotografías y testimonios sobre el estado de las playas. Presentan una representación gráfica de las estimaciones de sargazo derivadas de la Universidad del Sur de la Florida y en su portal indican que también utilizan datos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), del Simar de la Conabio, así como imágenes satelitales públicas obtenidas del Sentinel y datos oficiales de la Semar, aunque no presentan elementos de pronóstico.
- Red de Monitoreo de Sargazo de Quintana Roo.<sup>15</sup> Emite un boletín diario en la red social Facebook con un semáforo de cinco categorías para las playas del centro y norte de Quintana Roo. En la Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del Sargazo<sup>16</sup> en Quintana Roo se indica que este semáforo de “probabilidades” resulta del análisis de imágenes satelitales, pero no se especifica con certeza el tipo de sensores utilizados, la metodología con la que se genera o el proceso con el que se estima la semaforización.

Existen otros esfuerzos realizados por instituciones mexicanas en colaboración con otros países, aunque estos proyectos no cumplen con las características de ser públicos, de acceso libre o estar desarrollados a escala

<sup>14</sup> [https://www.facebook.com/ObservatorioSargazo?locale=es\\_LA](https://www.facebook.com/ObservatorioSargazo?locale=es_LA)

<sup>15</sup> [www.facebook.com/RedSargazo](http://www.facebook.com/RedSargazo)

<sup>16</sup> <https://eimas.semaqroo.gob.mx/>

local. Entre ellos se encuentra el proyecto internacional “Foresea”,<sup>17</sup> mencionado anteriormente. También está el proyecto “SargAssure” de SaSaMS, servicio que proporcionaría información de escala fina en tiempo real sobre localización del sargazo en playas y aguas costeras del Caribe mexicano, generada a partir de imágenes comerciales de muy alta resolución PlanetScope. En éste participaron algunas instituciones mexicanas, aunque hasta el momento no se tiene acceso abierto a esta información.<sup>18</sup>

Con la información recabada de los diferentes sistemas de monitoreo y alerta temprana se realizó un ejercicio numérico para visibilizar qué elementos necesarios para un SAT de sargazo han sido atendidos nacionalmente, a la vez que se observa cuáles de ellos son considerados por cada sistema. En las columnas de la figura 4 se presentan los elementos generales de un SAT de sargazo, con el monitoreo y pronóstico de manera separada, dado que actualmente estos aspectos no se han atendido de forma integral, y se segmentan por subtema o escala. En esta figura las filas indican los proyectos descritos anteriormente, clasificados por sector. Se contabiliza de cuántos elementos se tiene evidencia pública que son atendidos por proyecto, dando un valor de 0.5 si el elemento es atendido, pero no es claro el método o resultado. La sumatoria de las columnas indica entonces el “grado” de atención que cada elemento de un SAT ha sido abordado nacionalmente (figura 4).

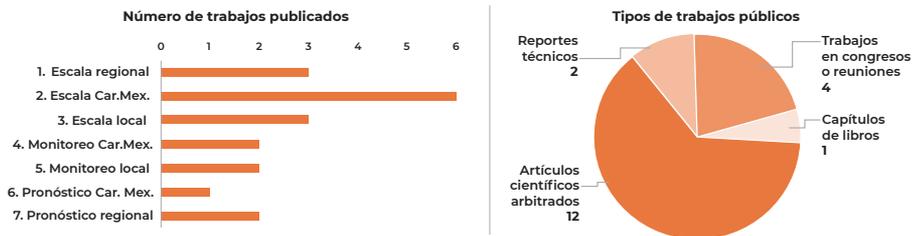
<sup>17</sup> <https://sargassum-foresea.cnrs.fr>

<sup>18</sup> [https://uon.technologypublisher.com/files/sites/21-0001\\_sargassure.pdf](https://uon.technologypublisher.com/files/sites/21-0001_sargassure.pdf)

**Figura 4.** Componentes de un sistema de alerta temprana (SAT) de sargazo atendidos en México

Proyectos públicos	Conocimiento		Monitoreo			Pronóstico			Difusión		Planes de respuesta	Elementos atendidos (max = 11)	
	Genera/ Provee	Se basa en	Caribe	Caribe mexicano	Local	Regional	Caribe mexicano	Local	Reportes	Alertas claras			
Gobierno	Boletín Digaohm	x		x		?		?	?	x	x	x	6.5
	Simsar, Semarnat	x	x		x	x							4
	SATsum Conabio			x		x				?			2.5
	Seguimiento sargazo IMTA/Cicimar-IPN/UF		?	x			x						2.5
Academia	Lanot				x								1
	Foresea		x				x			x			3
	SargAssure / SaSaMS		x			x				?			2.5
Independientes	Dispersión de sargazo pelágico en el Caribe mexicano		x		x	x		x	x	x			6
	Observatorio Ciudadano del Sargazo		x	x		x				x			4
	Red de monitoreo de sargazo						?			x			1.5
Nivel de atención (0-1)	0.2	0.55	0.4	0.3	0.6	0.2	0.15	0.15	0.6	0.1	0.1		

**Conocimiento generado para un SAT de sargazo en México**



**Nota:** numeralia de los componentes o elementos de un SAT (con base en la definición de EIRD-ONU, 2004) atendidos en los sistemas públicos de monitoreo y alerta temprana para México a la fecha (marzo del 2024). Los elementos atendidos se sumaron con un valor de 1 si el proyecto atiende la necesidad y 0.5 si la atiende parcialmente o no es claro cómo se genera.

**Fuente:** elaboración propia.

Resalta que la escala local del monitoreo y la generación de reportes públicos son los aspectos mayormente atendidos en México, mientras que el pronóstico a escalas pertinentes para el Caribe mexicano, la emisión de alertas claras, la incorporación de planes de respuesta y la generación de conocimiento, son los elementos menormente atendidos en el país. El producto generado por la Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología (Digaohm) de Semar es el que tiene un SAT más completo, pues integra el monitoreo, el pronóstico y planes de respuesta, a pesar de que los dos primeros no los procesa localmente o no es claro el método utilizado. También es relevante que dos de tres sistemas implementados de forma independiente son bastante robustos al basarse en conocimiento y proveer monitoreo y pronóstico a escalas pertinentes para México. Los aspectos menormente atendidos en los sistemas analizados son la emisión de alertas claras, contar con planes de respuesta y la generación y diseminación de conocimiento.

Es importante señalar que en esta sección se presentan los sistemas diseñados para proveer información para México que, a la fecha (marzo de 2024), son públicos y operacionales, pero además de estos se sabe que existen muy diversos esfuerzos por parte de instituciones académicas para generar conocimiento e implementaciones que aporten elementos de calidad a un SAT de sargazo. Además de las investigaciones presentadas en el trabajo de Rosellón-Druker y colaboradores (2022), actualmente se desarrollan trabajos de investigación que serán de gran utilidad para configurar un SAT de sargazo para México basado en ciencia (Flores-Vidal et al., 2020; Quintana-Barranco et al., 2023; Uribe-Martínez et al., 2023; de Santos et al., 2023).

## CONCLUSIONES

En este capítulo se presentó una revisión de los avances más prominentes en cuanto al conocimiento de los patrones y mecanismos que operan el transporte y acumulación de sargazo, así como de diversas implementaciones

realizadas por grupos de trabajo tanto académicos, gubernamentales y, muy exitosamente también, iniciativas sociales. Todos estos avances muestran un panorama que, de manera conjunta, constituyen bases sólidas para un Sistema de Alerta Temprana de Sargazo para México.

El conocimiento generado en relación con la distribución y desplazamiento del sargazo a nivel Atlántico y Caribe occidental nos da un buen panorama de los procesos de gran escala que participan en la configuración actual del Nuevo cinturón de sargazo. Particularmente para el Caribe mexicano, ya se han alcanzado avances importantes en el estudio y entendimiento de la circulación de escala fina (Carrillo et al., 2015; Flores-Vidal et al., 2023), así como ya se cuenta con atisbos de los procesos de acumulación y dispersión de sargazo para esta zona (Chavez et al., 2020; Rodríguez-Martínez et al., 2022; Uribe-Martínez et al., 2022; Lara-Hernández et al., 2024). Por lo anterior podemos concluir que México cuenta con información suficiente, si bien no exhaustiva, para constituir un SAT sustentado en conocimiento científico.

Sin embargo, aún quedan oportunidades para profundizar en el conocimiento de los impactos y vulnerabilidad ante estas contingencias para las dimensiones ecológicas, sociales, de salud pública e inclusive económicas, que provean datos para estimar los riesgos ante la llegada de cantidades importantes de sargazo a la zona costera. Con estos elementos atendidos se podrían configurar estrategias para emitir una alerta clara y sustentada en conocimiento (EIRD-ONU, 2004), de las zonas en las que se debe concentrar la atención.

Como parte del breve análisis que se presenta en este capítulo también se evidencia que hay grandes oportunidades para fortalecer la vinculación entre la institución oficialmente encargada de atender el problema del sargazo, con los avances científicos y tecnológicos nacionales. Un reto para México y el mundo es fortalecer la transferencia de conocimiento a los tomadores de decisiones y que el país camine hacia un manejo de los mares y costas basado en ciencia (Guan et al., 2023; Unesco, 2023).

Para lograr lo anterior, es imprescindible considerar la importancia de la complementariedad entre las diferentes aproximaciones, escalas y dimensiones en las que se desarrolla este fenómeno. Esta integración potencializará tanto el conocimiento que se deriva y su aplicación, no sólo desde la multi e interdisciplina, sino desde los actores encargados del manejo y contención de un fenómeno que resulta complejo, masivo y desafortunadamente, recurrente y de grandes implicaciones.

Un componente importante para solventar este reto para la implementación de un SAT eficaz es crear estrategias de comunicación de dos vías entre los diferentes actores y con los distintos niveles de usuarios, para entender sus necesidades, restricciones y requerimientos, y entonces proveer información que les resulta confiable, adecuada y que responda, en la medida de lo posible, en las escalas espaciotemporales correctas. Asimismo, la articulación multidisciplinaria e interinstitucional seguirá siendo fundamental para el establecimiento de un SAT nacional de arribazones de sargazo.

## REFERENCIAS

- Aguilera-Méndez, J., Juárez-Toledo, C., Tapia-Fabela, J., Martínez-Carrilo, I. y Hernández-Grajes, R. V. (2023). Modelación numérica de la trayectoria del sargazo pelágico utilizando ecuaciones brownianas con aplicación a las aguas de la península de Yucatán, México. *Ingeniería del agua*, 27(1), 45-58.
- Aliaga Nestares, V. J., Rodríguez Zimmermann, D. F. y Quispe Gutiérrez, N. (2022). Behavior of ITCZ. Second Band Near the Peruvian Coast During the 2017 Coastal El Niño. *Atmósfera*, 36(1), 23-39. <https://doi.org/10.20937/atm.53017>
- Allende-Arandía, M. E., Durán, R., Sanvicente-Añorve, L. y Appendini, C. M. (2023). Lagrangian Characterization of Surface Transport from the Equatorial Atlantic to the Caribbean Sea Using Climatological Lagrangian Coherent Structures and Self-Organizing Maps. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128(7), e2023JC019894.

- Allende-Arandía, M. E., Zavala-Hidalgo, J., Torres-Freyermuth, A., Appendini, C. M., Cerezo-Mota, C. y Taylor-Espinosa, N. (2020). Sea-Land Breeze Diurnal Component and Its Interaction with a Cold Front on the Shore of Sisal, Yucatán: A Case Study. *Atmospheric Research*, 244(1), 105051.
- Appendini, C. M., Hernández-Lasheras, J., Meza-Padilla, R. y Kurczyn, J. A. (2018). Effect of Climate Change on Wind Waves Generated by Anticyclonic Cold Front Intrusions in the Gulf of Mexico. *Climate Dynamics*, 51, 3747–3763.
- Appendini, C. M., Torres-Freyermuth, A., Salles, P., López-González, J. y Mendoza, E. T. (2014). Wave Climate and Trends for the Gulf of Mexico: A 30-Yr Wave Hindcast. *Journal of Climate*, 27(4), 1619–1632. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00206.1>
- Beron-Vera, F. J. y Miron, P. (2020). A Minimal Maxey–Riley Model for the Drift of *Sargassum* Rafts. *Journal of Fluid Mechanics*, 904, A8.
- Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Putman, N. F., Triñanes, J., Goni, G. J. y Lumpki, R. (2022). Dynamical Geography and Transition Paths of *Sargassum* in the Tropical Atlantic. *AIP Advances*, 12(10), 105107. <https://doi.org/10.1063/5.0117623>
- Brooks, M., Coles, V. y Coles, W. (2019). Inertia Influences Pelagic *Sargassum* Advection and Distribution. *Geophysical Research Letters*, 46(5), 2610–2618.
- Brooks, M., Coles, V., Hood, R. y Gower, J. (2018). Factors Controlling the Seasonal Distribution of Pelagic *Sargassum*. *Marine Ecology Progress Series*, 599, 1–18.
- Cahuich-López, M., Mariño-Tapia, I., Souza, A., Gold-Bouchot, G., Cohen, M. y Valdés-Lozano, D. (2020). Spatial and Temporal Variability of Sea Breezes and Synoptic Influences Over the Surface Wind Field of the Yucatán Peninsula. *Atmósfera*, 33(22), 123–142.
- Cao, Y., Li, C. y Dong, C. (2020). Atmospheric Cold Front-Generated Waves in the Coastal Louisiana. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/jmse8110900>
- Carrillo, L., Johns, E., Smith, R., Lamkin, J. T. y Largier, J. L. (2015). Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation. *Continental Shelf Research*, 109, 164–176.
- Caviedes, C. N. (1991). Five Hundred Years Of Hurricanes in the Caribbean: Their Relationship with Global Climatic Variabilities. *GeoJournal*, 23(4), 301–310. <https://doi.org/10.1007/BF00193603>

- Centurioni, L. y Niiler, P. (2003). On the Surface Currents of the Caribbean Sea. *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1279.
- Cetina, P., Candela, J., Sheinbaum, J., Ochoa, J. y Badan (2006). Circulation Along the Mexican Caribbean Coast. *Journal of Geophysical Research*, 111(c8), C08021.
- Chadee, X. y Clarke, R. (2015). Daily Near-Surface Large-Scale Atmospheric Circulation Patterns Over the Wider Caribbean. *Climate Dynamics*, 44, 2927-2946.
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I. et al. (2020). Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014-2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12(10), 2908.
- Chérubin, L. M. y Richardson, P. L. (2007). Caribbean Current Variability and the Influence of the Amazon and Orinoco Freshwater Plumes. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 54(9). <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2007.04.021>
- Chérubin, L. M., Sturges, W. y Chassignet, E. P. (2005). Deep Flow Variability in the Vicinity of the Yucatan Straits from a High-Resolution Numerical Simulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(4). <https://doi.org/10.1029/2004JC002280>
- Clarke, A. J. y Van Gorder, S. (2018). The Relationship of Near-Surface Flow, Stokes Drift and the Wind Stress. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(7), 4680-4692.
- Coronado, C., Candela, J., Iglesias-Prieto, R., Sheinbaum, J., López, M. y Ocampo-Torres, F. J. (2007). On the Circulation in the Puerto Morelos Fringing Reef Lagoon. *Coral Reefs*, 26(1), 149-163.
- Cuevas, E., Uribe-Martínez, A. y Liceaga-Correa, M. D. L. Á. (2018). A Satellite Remote-Sensing Multi-Index Approach to Discriminate Pelagic *Sargassum* in the Waters of the Yucatan Peninsula, Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 39(11), 3608-3627.
- De la Barrera-Bautista, B., Metcalfe, S. E., Smith, G., Sjögersten, S., Boyd, D. S. et al. (2023). Monitoring Holopelagic *Sargassum* spp. Along The Mexican Caribbean Coast: Understanding and Addressing User Requirements for Satellite Remote Sensing. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1166000.

- De Santos Medina, A. L., Estrada-Allis, S. y Guerrero-Moreno, L. (2023). *Estudio numérico de la distribución del sargazo en el Caribe mexicano a distintas resoluciones*. Reunión Anual UGM 2023.
- DiMego, G. J., Bosart, L. F. y Endersen, G. W. (1976). An Examination of the Frequency and Mean Conditions Surrounding Frontal Incursions into the Gulf of Mexico and Caribbean Sea. *Monthly Weather Review*, 104(6), 709–718. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1976\)104<0709:aeotfa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1976)104<0709:aeotfa>2.0.co;2)
- Duran, R., Beron-Vera, F. J. y Olascoaga, M. J. (2018). Extracting Quasi-Steady Lagrangian Transport Patterns from the Ocean Circulation: An Application to the Gulf of Mexico. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23121-y>
- Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas (EIRD-ONU). (2004). *Vivir con el riesgo. Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres versión 2004*. <https://www.eird.org/vivir-con-el-riesgo/index2.htm>
- Flores-Vidal, X., Cuevas, E., Uribe-Martínez, A., Carrillo-Bibriezca, L., Saldaña-Bencomo, J. et al. (2020). *Sistema de monitoreo en tiempo real de corrientes marinas y presencia de sargazo en el Caribe mexicano*. Proyecto Fordecyt-Pronaces/2030852/2020.
- Franks, J., Johnson, D. y Ko, D. (2016). Pelagic *Sargassum* in the Tropical North Atlantic. *Gulf and Caribbean Research*, 27(1), SC6-SC11.
- García-Martínez, I. M. y Bolasina, M. A. (2020). Sub-Monthly Evolution of the Caribbean Low-Level Jet and its Relationship with Regional Precipitation and Atmospheric Circulation. *Climate Dynamics*, 54(9-10). <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05237-y>
- García-Sánchez, M., Graham, C., Vera, E., Escalante-Mancera, E., Alvarez-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.
- Garzoli, S. L., Field, A. y Yao, Q. (2003). North Brazil Current Rings and the Variability in the Latitude of Retroflexion. *Elsevier Oceanography Series*, 68(C), 357-373. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(03\)80154-X](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(03)80154-X)

- González Cano, J. M., Arreguín Sánchez, F. y García Zúñiga, J. E. (19 de marzo de 2023). En búsqueda de patrones en la dinámica poblacional del sargazo. *La Jornada*. <https://ecologica.jornada.com.mx/2023/03/19/en-busqueda-de-patrones-en-la-dinamica-poblacional-del-sargazo-1390.html>
- Gough, M. K., Beron-Vera, F. J., Olascoaga, M. J., Sheinbaum, J., Jouanno, J. y Duran, R. (2019). Persistent Lagrangian Transport Patterns in the Northwestern Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography*, 49(2), 353-367. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0207.1>
- Gouveia, M. B., Duran, R., Lorenzetti, J. A., Assireu, A. T., Toste, R. et al. (2021). Persistent Meanders and Eddies Lead to Quasi-Steady Lagrangian Transport Patterns in a Weak Western Boundary Current. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79386-9>
- Gower, J. F. y King, S. A. (2011). Distribution of Floating *Sargassum* in the Gulf of Mexico and the Atlantic Ocean Mapped Using Meris. *International Journal of Remote Sensing*, 32(7), 1917-1929.
- Gower, J., King, S. y P. Goncalves (2008). Global Monitoring of Plankton Blooms Using MERIS MCI. *International Journal of Remote Sensing*, 29(21), 6209-6216. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160802178110>
- Gower, J., Young, E. y King, S. (2013). Satellite Images Suggest a New *Sargassum* Source Region in 2011. *Remote Sensing Letters*, 4(8), 764-773.
- Guan, S., Qu, F. y Qiao, F. (2023). United Nations Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030): From Innovation of Ocean Science to Science-Based Ocean Governance. *Frontiers in Marine Science*, 9, 1091598.
- Gudiño Elizondo, N., Cuevas, E. y Uribe Martínez, A. (marzo de 2023). Veo, veo... ¿Qué ves? sargazo hoy, y mañana también. *La Jornada ecológica*. Número especial, 263.
- Guzmán-Ramírez, A. A., Uribe-Martínez, A., García-Castro, C. y Cuevas, E. (27 y 29 de noviembre de 2019). *Caracterización espacial de figuras de sargazo pelágico formadas por el viento en el canal de Yucatán*. V Congreso sobre los Recursos Acuáticos del Golfo de México y Mar Caribe. Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma del Carmen.

- Haffke, C., Magnúsdóttir, G., Henke, D., Smyth, P. y Peings, Y. (2016). Daily States of the March-April East Pacific ITCZ in Three Decades of High-Resolution Satellite Data. *Journal of Climate*, 29(8). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0224.1>
- Henke, D., Smyth, P., Haffke, C. y Magnúsdóttir, G. (2012). Automated Analysis of the Temporal Behavior of the Double Intertropical Convergence Zone over the East Pacific. *Remote Sensing of Environment*, 123, 418-433. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.022>
- Hidalgo, H. G., Durán-Quesada, A. M., Amador, J. A. y Alfaro, E. J. (2015). The Caribbean Low-Level Jet, the Inter-Tropical Convergence Zone and Precipitation Patterns in the Intra-Americas Sea: A Proposed Dynamical Mechanism. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 97(1), 41-59. <https://doi.org/10.1111/geoa.12085>
- Hu, C. (2009). A Novel Ocean Color Index to Detect Floating Algae in the Global Oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10), 2118-2129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>
- Hu, C., Zhang, S., Barnes, B. B., Xie, Y., Wang, M., Cannizzaro, J. P. y English, D. C. (2023). Mapping and Quantifying Pelagic *Sargassum* in the Atlantic Ocean Using Multi-Band Medium-Resolution Satellite Data and Deep Learning. *Remote Sensing of Environment*, 289(1), 113515.
- Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). (2018). *Sargassum and Oil Spills Monitoring Pilot Project for the Caribbean and Adjacent Regions Workshop, Mexico DF, Mexico, 2-4 May 2018*. Unesco.
- IOC (2023). *Ocean Decade Data & Information Strategy*. The Ocean Decade Series, 45. Unesco.
- Johns, E. M., Lumpkin, R., Putman, N. F., Smith, R. H., Muller-Karger, F. E. et al. (2020). The Establishment of a Pelagic *Sargassum* Population in the Tropical Atlantic: Biological Consequences of a Basin-Scale Long Distance Dispersal Event. *Progress in Oceanography*, 182. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102269>
- Johns, W. E., Townsend, T. L., Fratantoni, D. M. y Wilson, W. D. (2002). Erratum: On the Atlantic Inflow to the Caribbean Sea. *Deep-Sea Research*

- Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(7). [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(02\)00026-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00026-2)
- Johns, W. E., Zantopp, R. J. y Goni, G. J. (2003). Cross-Gyre Transport by North Brazil Current Rings. *Elsevier Oceanography Series*, 68(C), 411-441. [https://doi.org/10.1016/S0422-9894\(03\)80156-3](https://doi.org/10.1016/S0422-9894(03)80156-3)
- Jouanno, J., Benshila, R., Berline, L., Soulié, A., Radenac, M.-H. et al. (2021). A NEMO-Based Model of *Sargassum* Distribution in the Tropical Atlantic: Description of the Model and Sensitivity Analysis (NEMO-Sarg1.0). *Geoscientific Model Development*, 14(6) 4069–4086.
- Lara-Hernández, J. A. (2023). *Dinámica del transporte de sargazo pelágico en el Caribe mexicano*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México].
- Lara-Hernández, J. A., Enríquez, C., Zavala-Hidalgo, J., Cuevas, E., van Tussenbroek, B. y Uribe-Martínez, A. (2024). *Sargassum* Transport Towards Mexican Caribbean Shores: Numerical Modeling for Research and Forecasting. *Journal of Marine Systems*, 241, 103923.
- Laval, M., Belmouhcine, A., Courtrai, L., Descloitres, J., Salazar-Garibay, A. et al. (2023). Detection of *Sargassum* from Sentinel Satellite Sensors Using Deep Learning Approach. *Remote Sensing*, 15(4), 1104.
- Magaña-Gallegos, E., García-Sánchez, M., Graham, C., Olivos-Ortiz, A., Siuda, A. N. y van Tussenbroek, B. I. (2023). Growth Rates of Pelagic *Sargassum* Species in the Mexican Caribbean. *Aquatic Botany*, 185, 103614.
- Marsh, R., Addo, K. A., Jayson-Quashigah, P.-N., Oxenford, H.A., Maxam, A. et al. (2021). Seasonal Predictions of Holopelagic *Sargassum* Across the Tropical Atlantic Accounting for Uncertainty in Drivers and Processes: The SARTRAC Ensemble Forecast System. *Frontiers in Marine Science*, 8, 722524.
- Marsh, R., Oxenford, H. A., Cox, S.-A. L., Johnson, D. R. y Bellamy, J. (2022). Forecasting Seasonal *Sargassum* Events Across the Tropical Atlantic: Overview and Challenges. *Frontiers in Marine Science*, 9, 914501.
- Miret-Villaseñor, D., Enriquez, C., Mariño-Tapia, I., Silva, R. y Ruiz, G. (2019). Interactions Between Nearshore and Shelf Dynamics Under Hurricane Conditions: Implications for Exposed and Reef Protected Beaches. *Journal of Coastal Research*, 92, 55-67.

- Müller-Karger, F. E., McClain, C. R., Fisher, T. R., Esaias, W. E. y Varela, R. (1989). Pigment Distribution in the Caribbean Sea: Observations from Space. *Progress in Oceanography*, 23(1). [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(89\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0079-6611(89)90024-4)
- Orfila, A., Urbano-Latorre, C. P., Sayol, J. M., González-Montes, S., Cáceres-Euse, A. et al. (2021). On the Impact of the Caribbean Counter Current in the Guajira Upwelling System. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.626823>
- Ortiz-Royero, J. C., Otero, L. J., Restrepo, J. C., Ruiz, J. y Cadena, M. (2013). Cold Fronts in the Colombian Caribbean Sea and their Relationship to Extreme Wave Events. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), 2797-2804. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-2797-2013>
- Parra, S., Mariño-Tapia, I., Enríquez, C. y Valle-Levinson, A. (2014). Variations in Turbulent Kinetic Energy at a Point Source Submarine Groundwater Discharge in a Reef Lagoon. *Ocean Dynamics*, 64, 1601-1614.
- Parra, S., Valle-Levinson, A., Mariño-Tapia, I. y Enríquez, C. (2015). Salt Intrusion at a Submarine Spring in a Fringing Reef Lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(4), 2736-2750.
- Putman, N. F., Triñanes, J., Lumpkin, R., Olascoaga, M. J. y Goni, G. J. (2020). Improving Transport Predictions of Pelagic *Sargassum*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 529(5), 151398.
- Putman, N., Goni, G. y Gramer, L. (2018). Simulating Transport Pathways of Pelagic *Sargassum* from the Equatorial Atlantic into the Caribbean Sea. *Progress in Oceanography*, 165, 205-214.
- Quintana-Barranco, R., Allende-Arandía, M. A., Durán, R. y Appendini, C. (29 de octubre a 3 de noviembre de 2023). *Influencia de factores físicos en el transporte de sargazo en el Mar Caribe y su arribo a las costas de Quintana Roo, México*. Reunión Anual UGM 2023.
- Rhein, M., Kirchner, K., Mertens, C., Steinfeldt, R., Walter, M. y Fleischmann-Wischnath, U. (2005). Transport of South Atlantic Water Through the Passages South of Guadeloupe and Across 16°N, 2000-2004. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 52(12), 2234-2249. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2005.08.003>

- Rodríguez-Martínez, R. E., Jordán-Dahlgren, E. y Hu, C. (2022). Spatio-Temporal Variability of Pelagic *Sargassum* Landings on the Northern Mexican Caribbean. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100767.
- Rosellón-Druker, J., Calixto-Pérez, E., Escobar-Briones, E., González-Cano, J., Masiá-Nebot, L. y Córdova-Tapia, F. (2022). A Review of a Decade of Local Projects, Studies and Initiatives of Atypical Influxes of Pelagic *Sargassum* on Mexican Caribbean Coasts. *Phycology*, 2(3), 254-279.
- Rutten, J., Arriaga, J., Montoya, L., Mariño-Tapia, I., Escalante-Mancera, E. et al. (2021). Beaching and Natural Removal Dynamics of Pelagic *Sargassum* in a Fringing-Reef Lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(11), E2021JC017636.
- Secretaría de Marina (Semar) (20 de marzo de 2024). *La Secretaría de Marina informa apertura de la temporada para la atención al sargazo 2024, en Quintana Roo. Comunicado de prensa: 033/2024*. <https://www.gob.mx/semar/prensa/la-secretaria-de-marina-informa-apertura-de-la-temporada-para-la-atencion-al-sargazo-2024-en-quintana-roo>
- Skloris, N., Marsh, R., Appeaning Addo, K. y Oxenford, H. (2022). Physical Drivers of Pelagic *Sargassum* Bloom Interannual Variability in the Central West Atlantic Over 2010–2020. *Ocean Dynamics*, 72(6). <https://doi.org/10.1007/s10236-022-01511-1>
- Uribe-Martínez, A. y Appendini, C. M. (2023). *Configuración espacial y atributos de forma para mejorar la confianza de la detección satelital del sargazo pelágico*. Reunión Anual UGM 2023.
- 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 et al. (eds.), *Gobernanza y manejo de las costas y mares ante la incertidumbre: una guía para tomadores de decisiones* (pp. 801-826). Universidad Autónoma de Campeche/Ricomar.
- Wang, M. y Hu, C. (2016). Mapping and Quantifying *Sargassum* Distribution and Coverage in the Central West Atlantic Using MODIS Observations. *Remote Sensing of Environment*, 183(18), 350-367.

- 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.
- Xu, H., Morell, J., Roarly, H., Chardon, P., Canals, M. y Evens, C. (2022).  
Improvement of Sargassum Seaweed Tracking in Puerto Rico and Virgin  
Islands Using High-Resolution FVCOM. *Oceans 2022*, 1-7.



## 4. ¿Cuánto sargazo hay en la playa?

Hugo E. Lazcano-Hernández  
Javier Arellano-Verdejo  
Laura Carrillo

El monitoreo del sargazo en las playas es una tarea que involucra una amplia gama de disciplinas. Esta macroalga, conocida por formar densas acumulaciones en la costa, presenta una serie de características y comportamientos que hacen que su estudio sea fascinante y, al mismo tiempo, desafiante. Desde su capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales, hasta su impacto en la diversidad biológica costera y su relación con fenómenos naturales como corrientes marinas y mareas, el monitoreo de esta biomasa nos lleva a explorar el maravilloso mundo marino. Comprender estos aspectos es importante, ya que vastas cantidades de sargazo afectan las playas y los ecosistemas costeros de diversas maneras. Es esencial que como sociedad trabajemos juntos para adquirir el conocimiento que nos permita gestionar los arribazones masivos, y así contribuir a disminuir el daño en las playas y ecosistemas costeros.

### ANTECEDENTES DEL MONITOREO DE SARGAZO EN LA PLAYA

El sargazo que llega a la costa del Caribe mexicano ha tenido una larga trayectoria antes de acumularse en la playa. La dinámica del océano y la

atmósfera han jugado un papel determinante en el movimiento de estas macroalgas en el mar abierto, por lo que se ha buscado modelar su transporte mediante modelos numéricos que toman en cuenta a las corrientes marinas y los vientos (Berline et al., 2020; Putman et al., 2020; Lara-Hernández et al., 2024). Sin embargo, conforme el sargazo se aproxima a la costa, los procesos a menor escala vinculados con la influencia continental, como el aporte de nutrientes, oleaje, mareas, brisas marinas, cambios batimétricos, cobran una importancia particular. Aunque la comprensión orientada a procesos del transporte de sargazo en mar abierto ha aumentado, se requiere incrementar el conocimiento de los mecanismos dominantes de su transporte en la zona costera.

Por otro lado, también hacen falta estudios para el mejor entendimiento de las rutas de transporte desde aguas oceánicas hacia la zona costera. Al acercarse el sargazo a la costa desde la zona oceánica, se encuentran cambios en la circulación. En la zona costera, la menor profundidad y la interacción con factores como la marea, el viento local y el oleaje, junto con la presencia de arrecifes de coral, aumentan la complejidad del modelado de desplazamiento de sargazo hacia la playa (Carrillo y Sheinbaum, 2020).

El Caribe mexicano se caracteriza por la presencia de las Corrientes de Yucatán y Caimán (Sheinbaum et al., 2002) y por tener en general una plataforma continental estrecha (de 2 a 3 km) delimitada en su gran parte por la barrera arrecifal (Carrillo et al., 2015). Los remolinos de mesoescala (del orden de ~100 km) (Andrade et al., 2022) y submesoescala (del orden de ~10 km), como al sur de Cozumel, las contracorrientes costeras (Carrillo et al., 2015; Carrillo et al., 2017) aunado a los aportes de agua dulce subterránea a la masa de agua superficial del Caribe (Carrillo et al., 2016), contribuyen a la complejidad de la circulación costera, actualmente en investigación.

Los vientos predominantes generan corrientes superficiales que impulsan el sargazo hacia la costa, como ocurre en el Caribe mexicano, donde la costa este de la península de Yucatán recibe la biomasa transportada por la Corriente de Caimán y los vientos alisios (Lara-Hernández

et al., 2024). Además, el oleaje, producido por la acción del viento sobre la superficie del mar, juega un papel significativo en el transporte del sargazo hacia la costa. Tanto la altura del oleaje como su dirección influyen en la cantidad y distribución del sargazo que llega a la playa (Rutten et al., 2021). En esta región del Caribe, el oleaje es caracterizado por condiciones de baja energía con una altura significativa entre 0.5 y 1.5 m, con una dirección este-sureste. Sin embargo, condiciones de alta energía se observan durante temporadas de tormentas tropicales y el paso de frentes fríos, el oleaje puede llegar a alturas de 2 a 3 m.

En el Caribe mexicano la marea es de un régimen micro mareal, es decir, con una amplitud de escasos 30 cm. Sin embargo, durante la marea alta este pequeño aumento en el nivel del mar facilita que la biomasa llegue a la costa. Por el contrario, durante las mareas bajas el sargazo puede quedar varado en la playa, donde se expone al sol y al aire, lo que acelera su descomposición y liberación de gases. En un estudio reciente se propone que el sargazo arriba a la playa bajo condiciones de poca energía del oleaje y viento (como las mencionadas anteriormente), mientras que condiciones de mayor energía de oleaje, viento y un mayor nivel del mar (mayores a 1 m por encima de su media), como ocurre con las tormentas, genera una resuspensión de estas macroalgas que se encuentran en la playa y son acarreadas fuera de la costa (Rutten et al., 2021).

Para una mayor comprensión de las corrientes costeras, de la intensidad y dirección del viento, de las mareas, del oleaje, de los procesos de acumulación y de cómo los procesos a mayor escala (la variabilidad en las corrientes de Yucatán y Caimán, el paso de remolinos de mesoescala y submesoescala) podrían modular factores locales que a su vez influyen en el transporte del sargazo hacia la costa desde el mar abierto, son necesarias redes de observación locales u observatorios costeros para el monitoreo de procesos físicos a lo largo de la costa durante los arribazones. Esto implica el desarrollo de capacidades que permitan el uso más amplio de sensores *in-situ* y remotos que ayuden en el registro, descripción y entendimiento del transporte del sargazo.

Recientemente, se han implementado sistemas de observación de los océanos como una necesidad para comprender y prever desastres impulsados por fuerzas antropogénicas y naturales, entre ellos, las llegadas masivas de sargazo (Herguera et al., 2023). Esto puede derivar en sistemas de observación y alerta temprana del sargazo, como, por ejemplo, la red interinstitucional de observación y los esfuerzos de modelado, liderados por el Consorcio de Investigación para el Golfo de México (Cigom). Estos esfuerzos han implicado el uso de instrumentación oceanográfica tales como correntímetros, derivadores lagrangianos, boyas oceanográficas instrumentadas, así como el uso de radares como Radio Escaterómetros Oceanográficos (Flores-Vidal et al., 2015), radares de apertura sintética<sup>1</sup> y radares marinos banda-X, capaces de proporcionar observaciones en tiempo real de las corrientes oceánicas superficiales, así como de las balsas de sargazo hacia la costa.

#### MÉTODOS DE MONITOREO DE SARGAZO EN LA PLAYA

El monitoreo *in situ* del sargazo depositado a lo largo de las playas es de utilidad para la validación de las observaciones ofrecidas por las plataformas satelitales, ya que facilitan la calibración de modelos y complementan vacíos de información debidos a factores físicos y biológicos que se describirán en las siguientes secciones. Además, la cuantificación *in situ* en las playas facilita la gestión, uso y disposición final de esta macroalga, lo que contribuye al diseño de protocolos para minimizar los impactos ecológicos y socioeconómicos de este fenómeno. En suma, esto sentaría las bases para un sistema de alerta temprana.

Debido a las enormes cantidades de sargazo, depositado a lo largo de varios kilómetros de playa, cuantificarlo es un verdadero desafío. Es

---

<sup>1</sup> [https://tarso.cicese.mx/sargazo\\_tarso.html](https://tarso.cicese.mx/sargazo_tarso.html)

por ello que la comunidad científica emplea diversas metodologías, las cuales se pueden agrupar en dos grandes grupos: directas e indirectas. Como ejemplo de una metodología directa se encuentra la artesanal, es decir, la recolección, limpieza, secado y pesado del sargazo que se realiza manualmente. Como es de esperarse, este es un arduo trabajo que requiere de muchas personas para poder cuantificar la biomasa en amplias extensiones de playa. Por otro lado, como ejemplo de metodología directa se encuentra la percepción remota, la cual puede aplicarse a diferentes escalas, sin embargo, también presenta desafíos muy interesantes. A continuación, se describen algunos aspectos relevantes de ambas metodologías.

#### MÉTODOS DE MONITOREO DIRECTO

En la cuantificación del sargazo, es fundamental distinguir entre los siguientes conceptos: área de cobertura, volumen y biomasa. Cada uno de ellos proporciona información única y complementaria sobre la distribución espacial y la cantidad de estas macroalgas en un área determinada (García-Sánchez et al., 2020).

El área de cobertura se refiere al espacio específico ocupado por el sargazo, expresado en unidades de metros o kilómetros cuadrados, o como porcentaje de la superficie total. El volumen de sargazo se refiere a la cantidad de espacio tridimensional ocupado por la masa de sargazo expresado en unidades de volumen (por ejemplo, metros cúbicos). Mientras que el área de cobertura indica la extensión espacial del sargazo en la superficie del agua o en su distribución en la playa, el volumen ofrece una perspectiva más completa. La biomasa de sargazo puede ser referida en peso húmedo o peso seco y generalmente es expresada en  $\text{kg}/\text{m}^2$  o  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Cuando se estima de manera directa la cantidad de sargazo, es importante considerar dónde y cómo se realiza la medición. No es lo mismo cuantificar el sargazo flotante en mar abierto o el que ha arribado a la playa. Estimaciones directas en mar abierto se han realizado mediante arrastres

de redes superficiales, como las redes Neuston (Butler y Stoner, 1984). Estas redes son arrastradas varios kilómetros en la superficie del mar, prácticamente en el primer metro de la columna de agua y van colectando el sargazo. La biomasa total se cuantifica dividiendo el peso húmedo total recolectado en la red por el área total de la superficie oceánica recorrida, expresada en gramos sobre metros cuadrados (Butler y Stoner, 1984).

Estas mediciones en altamar son muy importantes para la calibración de estimaciones indirectas de la biomasa por medio de percepción remota (Ody et al., 2019). Recientemente, se ha observado una alta variabilidad en la forma, tamaño, grosor, profundidad y densidad de biomasa de las balsas de sargazo observadas, por lo que se debe tener precaución al utilizar mapas de distribución y estimación de biomasa obtenidos por sensores remotos (Ody et al., 2019).

El contenido de humedad es un parámetro importante a tener en cuenta al emplear la biomasa, ya que puede variar significativamente en el caso del sargazo, oscilando entre el 82 y el 87% de la biomasa total (Milledge et al., 2020). Una estimación de peso seco de biomasa por un metro cúbico de sargazo húmedo es de aproximadamente 84 kg (Rodríguez-Martínez et al., 2016). En el caso del sargazo depositado a lo largo de la línea de costa, este empieza a degradarse y perder humedad rápidamente (van Tussenbroek et al., 2017). Para obtener resultados más precisos, es recomendable llevar a cabo las mediciones en el sitio de la biomasa cuando este se encuentra en su estado más fresco. Una metodología propone seleccionar diferentes puntos de monitoreo a lo largo de la línea de costa, y durante marea baja, medir en un metro cuadrado la cantidad de sargazo dorado y fresco acumulado en la playa durante las mareas altas anteriores (García-Sánchez et al., 2020).

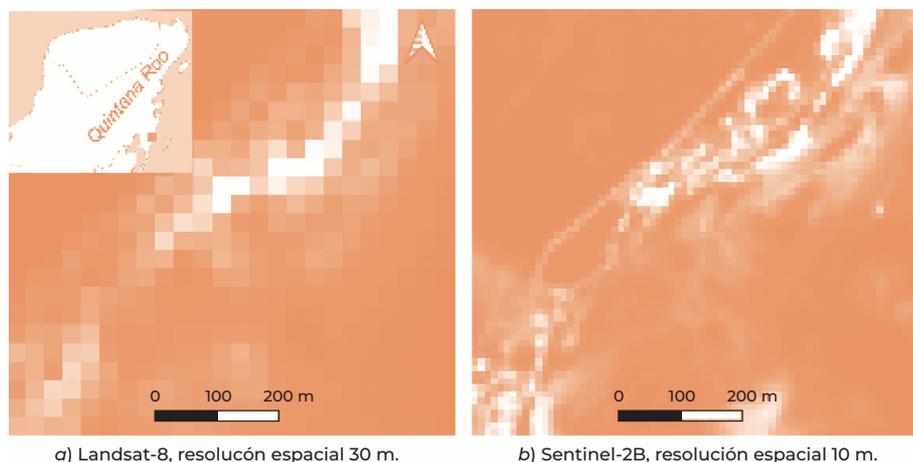
Otro aspecto a considerar en la cuantificación o estimación de la biomasa de sargazo es que éste no es una entidad homogénea, sino que existen varios morfotipos, es decir formas distintas de esta especie (García-Sánchez et al., 2020). Las masas acumuladas pueden estar compuestas por diferentes proporciones de estos morfotipos. Por ejemplo,

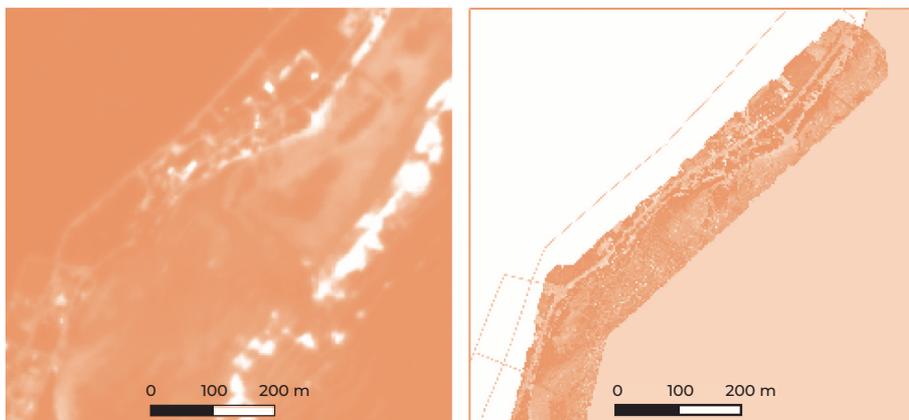
*S. fluitans* III es una de las formas predominantes, comprendiendo en promedio >60% de la biomasa total húmeda (García-Sánchez et al., 2020). Las observaciones directas (manuales o artesanales) ofrecen la ventaja de permitir la identificación y caracterización de estos diferentes morfotipos, aunque presentan la desventaja de ser imprácticas ante un arribazón masivo, por lo que es recomendable realizarlas en diversos puntos a lo largo de la playa.

#### MÉTODOS DE MONITOREO INDIRECTO

Como se ha comentado en el capítulo destinado al monitoreo del sargazo que hace uso de la percepción remota, el monitoreo oceánico mediante el análisis de imágenes de satélite utilizando índices, enfrenta dos grandes desafíos: los retos físicos debidos a la atmósfera terrestre (refracción, reflexión y absorción de las ondas electromagnéticas) y los desafíos técnicos intrínsecos a los sensores remotos (resolución espectral y radiométrica) y plataformas satelitales (resolución espacial y temporal). En la figura 1 se muestra un ejemplo de la resolución espacial entre cuatro diferentes imágenes.

**Figura 1.** Monitoreo de sargazo en una localidad de Mahahual, Quintana Roo, México





c) Planet, resolución espacial 3 m.

d) Ortofoto aérea, resolución espacial 3 cm.

**Nota:** se muestran escenas desde diferentes plataformas a diferentes resoluciones espaciales: a) 30 m Landsat-8 (usgs, 2021); b) 10 m (Sentinel-2, 2012); c) 3 m (Planet, 2017)z y d) 3 cm foto aérea.

**Fuente:** elaboración propia.

Aunado a lo anterior, la observación del sargazo en costas y playas desde el espacio se ve afectada por la biodiversidad de la región y la transparencia de las aguas poco profundas, lo que genera un menor contraste con su entorno, e incrementa el reto de su observación y monitoreo. Es por ello que, a pesar de la utilidad en mar abierto de los índices FLH, FAI y AFAI, no se emplean en el monitoreo costero (Lazcano-Hernández et al., 2023).

#### MÉTODOS COMPLEMENTARIOS PARA EL MONITOREO DEL SARGAZO EN LA PLAYA

El monitoreo del sargazo en las playas es crucial para comprender su distribución, cantidad y efectos en los ecosistemas costeros y las actividades humanas, así como para la toma de decisiones informadas por parte de las autoridades que tienen como tarea el manejo de esta macroalga cuando llega a las playas. Esto implica la recopilación sistemática de datos sobre la cantidad, distribución y características del sargazo que llega a las costas. Este proceso, además de ser crucial para comprender mejor el

impacto del sargazo en los ecosistemas costeros y la actividad humana, también es fundamental para tomar medidas preventivas y de gestión adecuadas. En este contexto, el monitoreo del sargazo en las playas se ha convertido en un área de investigación y acción interdisciplinaria, que involucra el uso de diversas técnicas y herramientas, que van desde observaciones en el terreno hasta el uso de tecnologías de percepción remota, ciencia de datos y la participación ciudadana.

#### REDES DE CÁMARAS

La percepción remota tradicional basada en imágenes satelitales proporciona una visión general de las áreas costeras, lo que puede ser de utilidad para identificar patrones generales de distribución del sargazo a gran escala. Sin embargo, debido a su baja resolución espacial y temporal, estas imágenes a menudo no capturan detalles importantes, como la densidad y la distribución exacta del sargazo en las playas. Por lo tanto, es importante explorar enfoques complementarios, como el uso de imágenes de alta resolución espacial y temporal, así como sistemas de teledetección aérea, para mejorar la capacidad de monitoreo del sargazo en las playas. Estas tecnologías pueden proporcionar datos más detallados y precisos que complementen la información obtenida a través de la percepción remota tradicional.

Una primera aproximación para el monitoreo del sargazo acumulado en la playa consiste en el uso de una red de cámaras, la cual puede ser una herramienta útil en ciertas circunstancias, ya que las cámaras pueden proporcionar imágenes en tiempo real de muy alta resolución. Una de las ventajas del uso de imágenes adquiridas por medio de estas cámaras es que, mediante su análisis, es posible capturar detalles visuales específicos de estas macroalgas, como su cantidad, densidad y ubicación en la playa, lo que puede ayudar a los científicos a comprender mejor los patrones de acumulación y su relación con factores ambientales como el oleaje, las corrientes marinas y la meteorología.

En este sentido, Rutten y colaboradores (2021) llevaron a cabo un estudio para entender cómo el sargazo varía con el tiempo en la laguna arrecifal de Puerto Morelos, Quintana Roo. Durante aproximadamente 5.2 años, desde septiembre de 2015 hasta noviembre de 2022, tomaron fotos cada hora para ver cómo influían los desbordamientos, la energía de las olas, el nivel del agua y la velocidad del viento en la cantidad de biomasa en la playa. Con toda esta información, los investigadores crearon un modelo matemático para explicar cómo se limpia naturalmente el sargazo acumulado en la playa.

Aunque esta aproximación es factible, es importante tener en cuenta que el uso de cámaras para el monitoreo del sargazo también tiene limitaciones. Por ejemplo, la calidad de las imágenes puede variar dependiendo de las condiciones de iluminación y del ángulo de visión. Además, las cámaras pueden no ser adecuadas para monitorear áreas extensas de manera eficiente, especialmente en entornos costeros con acceso limitado. En áreas remotas, existen limitaciones en la disponibilidad de los servicios de energía eléctrica y de Internet necesarios para la operación y conectividad de estos aparatos. De igual manera, existen limitaciones en el presupuesto necesario para cubrir los costos de mantenimiento y vigilancia indispensables para maximizar la vida útil de estos equipos y evitar saqueos. También es importante comentar que la instalación de redes de cámaras debe sortear un riguroso proceso para ser aprobada su instalación en zonas naturales protegidas.

#### CIENCIA DE DATOS Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA PARA EL MONITOREO DE SARGAZO

El monitoreo del sargazo no sólo debería recaer en los científicos y las autoridades, también debería involucrar a la población local y a los visitantes de las playas. La colaboración de la comunidad puede ser fundamental para recopilar datos sobre la cantidad, distribución y efectos del sargazo en las playas. Aquí nos enfocamos en el caso del binomio de

nuevas tecnologías y la ciencia ciudadana. En los últimos años y gracias al creciente uso de dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes y tabletas, así como la mejora constante de la infraestructura que los interconecta con Internet, se ha potenciado el desarrollo de la ciencia ciudadana como herramienta complementaria para el estudio y monitoreo de fenómenos emergentes.

Hasta el año 2021, el monitoreo del sargazo en las playas se había centrado principalmente en métodos tradicionales llevados a cabo por científicos y autoridades locales. En ese año se publicó el estudio *Collective View*, realizado en El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur) (Arellano-Verdejo y Lazcano-Hernández, 2021). En este trabajo se aplicó una nueva perspectiva, al involucrar a la comunidad local a través de una aplicación móvil diseñada para capturar y enviar fotografías del sargazo acumulado en las playas. Esta iniciativa de ciencia ciudadana permitió la participación activa de voluntarios, quienes contribuyeron con la recopilación de datos de manera colaborativa. La aplicación móvil facilitó la recopilación de un conjunto de datos significativo, que incluyó 2400 fotografías etiquetadas, la mitad con presencia de sargazo y la otra mitad sin él. Estos datos fueron fundamentales para entrenar, probar y validar algoritmos de clasificación basados en inteligencia artificial, los cuales permitieron la clasificación automática de las imágenes en dos clases: con y sin sargazo.

Uno de los aspectos más destacados de este estudio fue la creación del primer conjunto de datos de imágenes geo-etiquetadas relacionadas con la presencia de sargazo en las playas de Quintana Roo. Esta información, además de permitir la generación de mapas detallados de la distribución del sargazo en la región (figura 2a), también incentivó la participación de otros investigadores y la colaboración en el desarrollo de nuevos algoritmos para el monitoreo del sargazo.

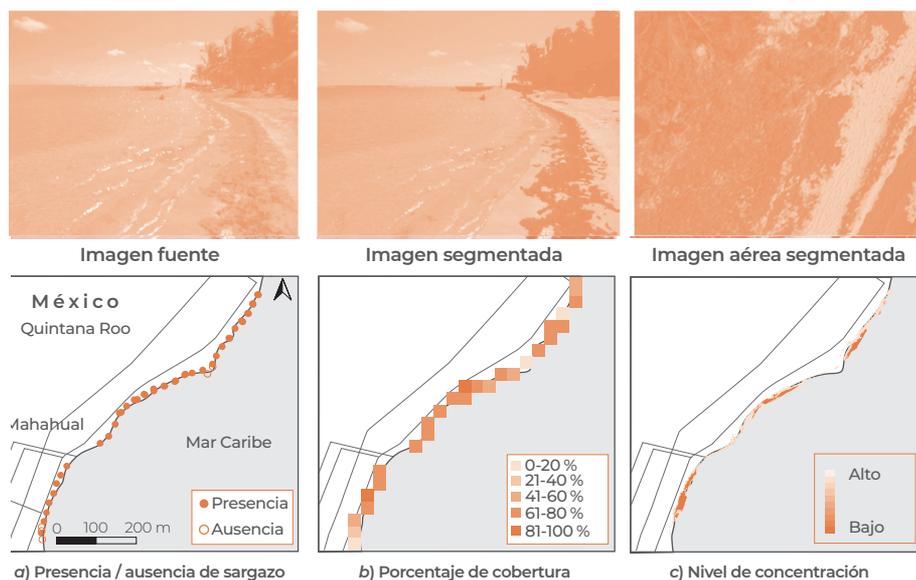
Por ejemplo, en el año 2022, con base en el conjunto de datos ciudadanos del proyecto “Collective View”, se elaboró un método de clasificación automática de imágenes para construir conjuntos de datos para estudiar la presencia de sargazo a lo largo de las playas (Santos-Romero et al., 24 de

agosto de 2022). Esta propuesta aprovecha técnicas de clasificación automática para clasificar a las imágenes en dos clases: perspectiva lineal en profundidad y sin perspectiva lineal. Esta clasificación permitió distinguir entre imágenes que mostraban una acumulación lineal de sargazo a lo largo de la playa y aquellas que no lo mostraban. Al desarrollar este método de clasificación automática, se pudieron generar conjuntos de datos que proporcionaron información valiosa sobre la distribución del sargazo a lo largo de las playas, lo que contribuyó significativamente al avance del conocimiento en este campo.

En ese mismo año se publicó otro trabajo que hace uso de las fotografías ciudadanas (Arellano-Verdejo et al., 2022). Este nuevo estudio empleó la segmentación semántica como base de una nueva metodología para estimar la cobertura de sargazo en playas. La segmentación semántica es un proceso que se utiliza en la inteligencia artificial y la visión por computadora para entender y dividir una imagen en partes significativas. En lugar de simplemente detectar objetos en una imagen, la segmentación semántica asigna una etiqueta a cada píxel de la imagen, indicando a qué clase o categoría pertenece. Por ejemplo, si se segmenta una imagen de la escena de una calle, la segmentación semántica identificaría cada píxel como parte de una categoría específica, como automóviles, personas, árboles, edificios, aceras, entre otros. Esto proporciona una comprensión más detallada y precisa de la composición de la imagen.

Esta metodología muestra cómo la segmentación semántica beneficia significativamente la generación de mapas de sargazo más precisos en la playa, al proporcionar una manera cuantitativa de identificar y clasificar áreas específicas donde se acumula esta macroalga (figura 2b). Además, este procedimiento podría ayudar potencialmente a distinguir entre diferentes tipos de sargazo (como el fresco del descompuesto), lo que proporciona información adicional sobre la edad y la calidad del sargazo acumulado en la playa. Esto es crucial para comprender mejor los patrones de acumulación del sargazo y sus posibles impactos en el ecosistema costero.

**Figura 2.** Mapas de sargazo para la localidad de Mahahual



**Nota:** tipos de imágenes necesarias para elaborar cada mapa: a) Imagen tomada a nivel de playa: permite elaborar mapas de presencia/ausencia; b) Imagen segmentada: permite la elaboración de mapas de porcentaje de cobertura; c) Imagen aérea segmentada: permite elaborar mapas de área de cobertura de sargazo.

**Fuente:** Arellano-Verdejo y Lazcano-Hernández (2024).

La precisión de los mapas de sargazo generados mediante segmentación semántica también permite una mejor planificación y gestión de recursos para abordar el problema del sargazo en las playas. Por ejemplo, ayuda a identificar áreas prioritarias para la limpieza y remoción del sargazo, así como para la implementación de medidas de mitigación y prevención.

Al emplear la ciencia ciudadana como herramienta para el estudio y monitoreo del sargazo en las playas, existen varios desafíos importantes que deben abordarse para garantizar la eficacia y la precisión de los datos recopilados. Uno de los principales desafíos es garantizar la calidad de la información recabada por los ciudadanos. Esto puede incluir la variabilidad en la precisión de las observaciones, diferencias en la interpretación de los datos y la posibilidad de errores humanos. Es importante

proporcionar capacitación adecuada a los participantes para estandarizar los métodos de observación y asegurar la calidad de los datos.

Adicionalmente, atraer y mantener la participación de los ciudadanos es otro gran reto. Para abordarlo, es importante involucrar a la comunidad desde el principio y comunicar de manera efectiva la importancia del proyecto y cómo su participación podría marcar la diferencia. También se pueden implementar incentivos, como reconocimiento público o recompensas, para fomentar la participación continua.

Desde el punto de vista operativo, la gestión de grandes volúmenes de datos recopilados por una gran cantidad de ciudadanos puede ser compleja. Es importante contar con sistemas adecuados para almacenar, gestionar, analizar y verificar la precisión y validez de los datos de manera eficiente. Esto puede incluir el desarrollo de plataformas en línea o aplicaciones móviles específicamente diseñadas para recopilar y gestionar datos de ciencia ciudadana. Finalmente, integrar los datos de ciencia ciudadana con otros conjuntos de datos, como los satelitales o aquellos recopilados por sensores remotos, puede ser complejo, pero es crucial para obtener una imagen completa y precisa de la distribución y cantidad de sargazo en las playas.

Para abordar estos desafíos es importante contar con una estrategia integral que incluya la capacitación y el apoyo continuo a los participantes, el desarrollo de herramientas y plataformas adecuadas para la recopilación y gestión de datos, y la colaboración con expertos en la validación y análisis de datos. Además, la transparencia y la comunicación abierta son fundamentales para construir confianza y fomentar la participación de la comunidad en el estudio y monitoreo del sargazo en las playas mediante la ciencia ciudadana.

De lo anterior podemos concluir que la ciencia ciudadana y la ciencia de datos se han revelado como herramientas poderosas para el monitoreo del sargazo en las playas. La participación de ciudadanos en la recopilación de datos, utilizando tecnologías como aplicaciones móviles y plataformas en línea, ha permitido obtener información detallada y precisa sobre la distribución y cantidad de sargazo en las costas. Este

enfoque colaborativo amplía la cobertura espacial y temporal de los datos, se promueve la conciencia pública sobre el problema del sargazo y se fomenta la acción comunitaria.

Sin embargo, el uso de la ciencia ciudadana en el monitoreo del sargazo no está exento de desafíos. La calidad de los datos, la participación y el compromiso de la comunidad, la gestión y validación de datos, así como su integración, son aspectos que requieren atención. Es fundamental proporcionar capacitación adecuada a los participantes, desarrollar herramientas y plataformas eficientes para la recopilación y gestión de datos, y establecer mecanismos de validación y verificación de la información obtenida.

A pesar de estos desafíos, la ciencia ciudadana en el monitoreo del sargazo ofrece una serie de oportunidades significativas como el fortalecimiento de la capacidad ciudadana en la observación y respuesta ante eventos de acumulación de sargazo, el incremento en la toma de conciencia y comprensión del problema, y el fomento a la colaboración entre científicos, autoridades y ciudadanos en la búsqueda de soluciones sostenibles.

Como ejemplo de ello se encuentran los trabajos de saneamiento comunitario realizados en el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak (PNAX), en Quintana Roo, México, durante 2019 y 2021, en donde la comunidad participó en el monitoreo y saneamiento de playas (Carrillo Bibriezca et al., 2021), así como los esfuerzos de monitoreo promovidos por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad de Southampton en el marco del proyecto *Sartrac*.<sup>2</sup>

## CONCLUSIONES

El monitoreo y cuantificación del sargazo en sus diferentes escalas –y en particular en la playa– es una tarea que ha desafiado a la comunidad científica. Las metodologías empleadas para el monitoreo y

---

<sup>2</sup> <https://sartrac.org/>

cuantificación del sargazo presentan limitaciones. Por un lado, las técnicas directas conllevan un trabajo arduo con procesos susceptibles al error humano, que además no pueden escalarse ni automatizarse fácilmente. Por otro lado, las técnicas indirectas como la percepción remota en sus diferentes esquemas y escalas, enfrentan varios desafíos físicos y biológicos intrínsecos a las características de la observación y de los instrumentos utilizados para medir (sensores).

Es por ello que se está explorando la implementación de sistemas híbridos de monitoreo. La cuantificación de los encallamientos masivos de sargazo requiere del trabajo en conjunto de la comunidad científica y de la sociedad en general. Es esencial que trabajemos juntos para entender ampliamente este fenómeno y podamos encontrar mejores formas para su cuantificación, recolección, uso y disposición final. De esta forma estaremos contribuyendo a la conservación de las playas y ecosistemas costeros importantes para la vida tal como la conocemos.

## REFERENCIAS

- Andrade-Canto, F., Beron-Vera, F. J., Goni, G. J., Karrasch, D., Olascoaga, M. J. y Triñanes, J. (2022). Carriers of *Sargassum* and Mechanism for Coastal Inundation in the Caribbean Sea. *Physics of Fluids*, 34(1).
- Arellano-Verdejo, J. y Lazcano-Hernández, H. E. (2021). Collective View: Mapping *Sargassum* Distribution Along Beaches. *PeerJ Computer Science*, 7, e528.
- Arellano-Verdejo, J. y Lazcano-Hernández, H. E. (2024). Towards Sustainable Coastal Management: Aerial Imagery and Deep Learning for High-Resolution *Sargassum* Mapping. *PeerJ Computer Science*, 12, e18192.
- Arellano-Verdejo, J., Santos-Romero, M. y Lazcano-Hernández, H. E. (2022). Use of Semantic Segmentation for Mapping *Sargassum* on Beaches. *PeerJ Computer Science*, 10, e13537.
- Berline, L., Ody, A., Jouanno, J., Chevalier, C., André, J.-M., Thibaut, T. y Ménard, F. (2020). Hindcasting the 2017 Dispersal of *Sargassum* Algae in the Tropical North Atlantic. *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111431.

- Butler, J. N. y Stoner, A. W. (1984). Pelagic *Sargassum*: Has its Biomass Changed in the Last 50 Years? *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 31(10), 1259-1264.
- Carrillo Bibriezca L. E., Alcérreca Huerta J. C., Reyes Mendoza O. F. y González Garduño V. (2021). *Informe de asesoría técnica a proyecto PROREST/cc/258/2021. Saneamiento de ecosistemas acuáticos en el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.
- Carrillo, L., Johns, E. M., Smith, R. H., Lamkin, J. T. y Largier, J. L. (2015). Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 1: Circulation. *Continental Shelf Research*, 109, 164-176.
- Carrillo, L., Johns, E. M., Smith, R. H., Lamkin, J. T. y Largier, J. L. (2016). Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System Part 2: Water Masses and Thermohaline Structure. *Continental Shelf Research*, 120, 41-58.
- Carrillo, L., Lamkin, J. T., Johns, E. M., Vásquez-Yeomans, L., Sosa-Cordero, F. et al. (2017). Linking Oceanographic Processes and Marine Resources in the Western Caribbean Sea Large Marine Ecosystem Subarea. *Environmental development*, 22, 84-96.
- Carrillo, L. y Sheinbaum-Pardo, J. (2020). Sargazo en movimiento. *Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 71(4), 20-28.
- Equipo Planeta (2017). *Interfaz del programa de aplicación Planet: en el espacio para la vida en la Tierra*. <https://api.planet.com>.
- Flores Vidal, X., Flament, P., de Almeida, S. A., Bibriezca, C., Valencia, T. y Liera, G. (2015). Hacia la creación de una red multinstitucional de radares oceanográficos para la medición de corrientes superficiales en el Golfo de México. *Revista de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Nueva Época*, 1(1), 29-49.
- 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.
- Herguera, J. C., Peters, E. M., Sheinbaum, J., Pérez-Brunius, P., Magar, V. et al. (2023). Ocean Monitoring and Prediction Network for the Sustainable Development of the Gulf of Mexico and the Caribbean. *Oceanography*, 36(1), 58-63.

- Lara-Hernández, J. A., Enríquez, C., Zavala-Hidalgo, J., Cuevas, E., van Tussenbroek, B. y Uribe-Martínez, A. (2024). *Sargassum* Transport Towards Mexican Caribbean Shores: Numerical Modeling for Research and Forecasting. *Journal of Marine Systems*, 241, 103923.
- Lazcano-Hernández, H. E., Arellano-Verdejo, J. y Rodríguez-Martínez, R. E. (2023). Algorithms Applied for Monitoring Pelagic *Sargassum*. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1216426.
- Milledge, J. J., Maneein, S., 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.
- Ody, A., Thibaut, T., Berline, L., Changeux, T., André, J.-M. et al. (2019). From *In Situ* to Satellite Observations of Pelagic *Sargassum* Distribution and Aggregation in the Tropical North Atlantic Ocean. *PLoS One*, 14(9), e0222584.
- Putman, N. F., Lumpkin, R., Olascoaga, M. J., Trinanés, J. y Goni, G. J. (2020). Improving Transport Predictions of Pelagic *Sargassum*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 529, 151398.
- Resiere, D., Valentino, R., Nevière, R., Banydeen, R., Gueye, P. et al. (2019). *Sargassum* Seaweed on Caribbean Islands: An International Public Health Concern. *The Lancet*, 392(10165), 2691.
- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. y Jordán-Dahlgren, E. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015). En E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggia, A., Olivos-Ortiz y E. J. Núñez-Vázquez (eds.), *Florecimientos algales nocivos en México* (pp. 352-365). CICESE.
- Rutten, J., Arriaga, J., Montoya, L. D., Mariño-Tapia, I. J., Escalante-Mancera, E. et al. (2021). Beaching and Natural Removal Dynamics of Pelagic *Sargassum* in a Fringing-Reef Lagoon. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(11). <https://doi.org/10.1029/2021jc017636>
- Santos-Romero, M., Arellano-Verdejo, J., Lazcano-Hernández, H. E. y Reyes, P. D. (24 de agosto de 2022). *Automatic Classification of Images with Beach*

*Linear Perspective Using Convolutional Neural Networks. 2022 IEEE Mexican International Conference on Computer Science (ENC).* <https://doi.org/10.1109/enc56672.2022.9882952>

Sentinel-2, ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services (2012). *European Space Agency.* [https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2\\_SP-1322\\_2.pdf](https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf)

Sheinbaum, J., Candela, J., Badan, A. y Ochoa, J. (2002). Flow Structure and Transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, 29(3), 10-11.

Van Tussenbroek, B. I., Hernández Arana, H. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M., et al. (2017). Severe Impacts of Brown Tides Caused by *Sargassum* spp. on Near-Shore Caribbean Seagrass Communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1-2), 272-281.



## 5. Caracterización de los riesgos socioambientales y económicos asociados al fenómeno de sargazo

Rosa Elisa Rodríguez Martínez

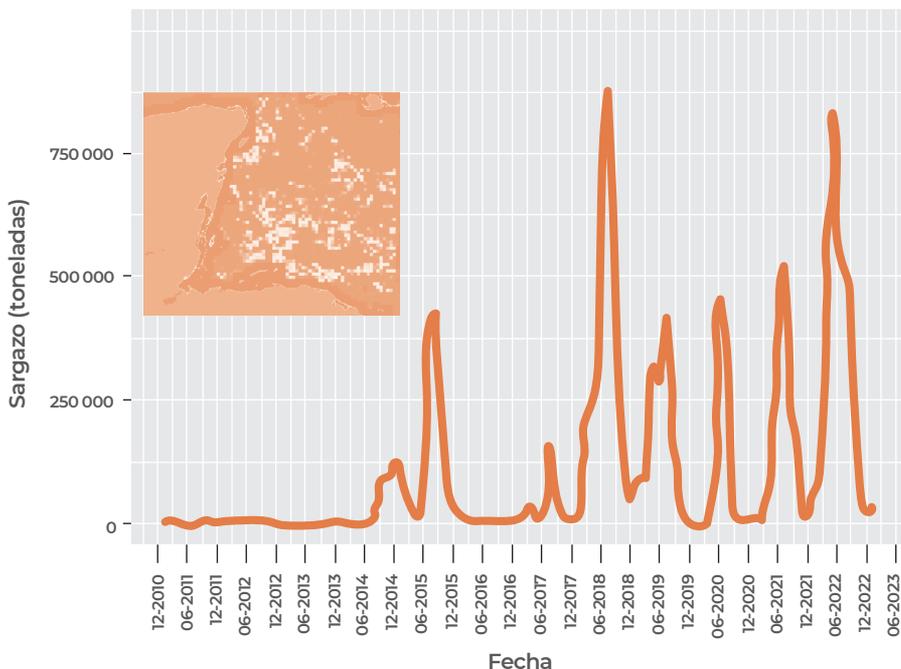
Desde 2011, más de 30 países en el Atlántico tropical han sido afectados por la llegada masiva de macroalgas pardas flotantes del género *Sargassum* (*S. fluitans* y *S. natans*), conocidas como sargazo. Este fenómeno ha tenido repercusiones importantes en los ecosistemas costeros, la economía, la salud y el modo de vida de las comunidades afectadas.

Los arribos de sargazo varían en intensidad entre los años, dependiendo de su abundancia en el mar, la dirección y velocidad del viento y la geomorfología costera (Rodríguez-Martínez et al., 2022). Sin embargo, datos obtenidos a partir de imágenes de satélite sugieren una tendencia hacia un aumento en la biomasa en el tiempo. Por ejemplo, frente al Caribe mexicano, una de las zonas más afectadas por la llegada masiva y recurrente de sargazo, la biomasa en los meses pico de 2015 y 2018 se incrementó de 439 118 a 885 276 toneladas (figura 1).

Se desconoce cuánto del sargazo que se mide en imágenes de satélite recalca en las playas y cuánto llega a cada uno de los países afectados, ya que no se han desarrollado programas de monitoreo regionales estandarizados. La información recabada en México sugiere valores anuales que oscilan entre 10 105 y 40 932 metros cúbicos por kilómetro

(Rodríguez-Martínez et al., 2023). Generalmente, los mayores arribos (figura 2a) suelen ocurrir durante la primavera y el verano, aunque en algunos años han llegado volúmenes importantes desde febrero.

**Figura 1.** Toneladas de sargazo pelágico registradas frente al Caribe mexicano



**Nota:** coordenadas 22° y 15° latitud norte y 82° y 90° longitud oeste en imágenes Modis entre enero de 2011 y enero de 2023.

**Fuente:** elaboración propia con datos proporcionados por el Laboratorio de Oceanografía Óptica de la Universidad del Sur de Florida.

Dado que se trata de un fenómeno relativamente reciente, la investigación científica sobre la biología, ecología e impactos de los arribos aún es incipiente. A continuación, se resumen los hallazgos más relevantes sobre los riesgos ambientales, económicos y sociales de la llegada masiva de sargazo pelágico en los países afectados.

## RIESGOS AMBIENTALES

El impacto más evidente del arribo masivo de sargazo es una drástica transformación de las playas. Las arenas blancas y suaves que caracterizan a las costas del Caribe mexicano, ahora se encuentran cubiertas por montañas de algas en descomposición, emitiendo un olor desagradable (figura 2b). La acumulación de estas macroalgas y el uso continuo de maquinaria pesada para su remoción han desencadenado una erosión severa en muchas áreas costeras (figura 2c). Estudios indican que, del material removido con maquinaria, entre el 40 y el 70% puede ser arena (Rodríguez-Martínez et al., 2016; Chávez et al., 2020). Además, esta maquinaria compacta la arena, lo que puede interferir con el proceso de anidación de tortugas marinas (Maurer et al., 2015) y afectar a otras especies habitantes de playas y dunas.

A pesar de los esfuerzos de los gobiernos y hoteles por mantener las playas libres de sargazo, la capacidad y los recursos disponibles se ven desbordados por los volúmenes que llegan. Por ejemplo, en México se estima que sólo el 15% de las playas del estado recibe la atención y los recursos necesarios para hacer frente a esta crisis ambiental.

En las playas que quedan sin atención, el sargazo inicia su descomposición en aproximadamente 48 horas, generando lixiviados y materia orgánica que eventualmente llegan al mar. Esto ocasiona una coloración café oscuro en el agua (figura 2d), dando lugar al fenómeno conocido como “marea marrón” (van Tussenbroek et al., 2017). Este cambio en la tonalidad del agua afecta la estética, reduce la penetración de luz solar y aumenta la temperatura. Además, la acumulación de materia orgánica en el fondo marino lo transforma de arenoso a lodoso, afectando su biodiversidad. El exceso de materia orgánica favorece el crecimiento de bacterias anaerobias que causan reducciones importantes en la concentración de oxígeno disuelto (van Tussenbroek et al., 2017). En conjunto, estos cambios en la calidad del agua costera han causado mortalidades masivas de flora y fauna, provocando cambios de fase en los ecosistemas costeros.

Por ejemplo, en el Caribe mexicano, desde el primer arribo masivo de sargazo en 2015, se observó una elevada mortalidad de praderas de pastos marinos cercanas a la costa y de organismos asociados, incluyendo corales (van Tussenbroek et al., 2017). A partir de 2018, también se reportó la mortalidad masiva de organismos pertenecientes a 78 especies de fauna móvil, principalmente peces, crustáceos, moluscos y equinodermos (Rodríguez-Martínez et al., 2019). Cabe mencionar que esto no ocurre en todas las playas en las que llega sargazo, presentándose generalmente en aquellas en las que su acumulación es excesiva durante períodos de temperaturas elevadas con poco viento y oleaje (figura 2e). La causa de la mortalidad se asoció a un efecto combinado de altas concentraciones de amoníaco y ácido sulfhídrico, junto con condiciones de hipoxia.

La “marea marrón” también puede acidificar el agua marina costera, afectando especialmente a las especies marinas que producen esqueletos y conchas de carbonato de calcio, como corales, moluscos y equinodermos y, que, por lo tanto, son los principales productores de arena.

**Figura 2.** Efectos ambientales del sargazo





**Nota:** a) fotografía aérea de una mancha de sargazo arribando al Caribe mexicano; b) limpieza de sargazo en la playa de Puerto Morelos; c) erosión en la playa de Bahía Petempich en donde se perdieron aproximadamente 10 metros de longitud y un metro de altura; d) marea marrón de sargazo; e) mortalidad masiva de fauna asociada al arribo masivo de sargazo en 2021; f) residuo hospitalario acarreado por sargazo a la playa.  
**Fuente:** a) L. Álvarez-Filip; b-f) R. E. Rodríguez-Martínez.

Otro problema potencial asociado a los arribazones es la introducción de especies no nativas. En el océano, las extensas acumulaciones de estas macroalgas conforman un ecosistema habitado por una amplia gama de especies, desde organismos macroscópicos hasta microscópicos. Algunas de estas especies encuentran en el sargazo un refugio temporal, mientras que otras lo usan de hábitat permanente hasta que alcanzan las costas.

Sin embargo, el sargazo también actúa como portador de especies no autóctonas que podrían representar amenazas como depredadores o competidores para las especies locales, o incluso ser vectores de enfermedades. Este fenómeno podría desencadenar impactos significativos en la ecología de los ecosistemas costeros de las naciones afectadas. Por ejemplo, en el Caribe mexicano se ha observado un cambio notable en la diversidad y riqueza de especies de macrocrustáceos entre 2015 y 2020, que se ha vinculado a la llegada masiva de sargazo en conjunto con

una epidemia que afectó a los corales duros en 2018 y la ocurrencia de tres huracanes en ese período (Dubé et al., 2023). Cabe destacar que los invertebrados móviles, especialmente los crustáceos, representan componentes vitales de las cadenas tróficas en los arrecifes coralinos y pastizales marinos, y son fundamentales para mantener la biodiversidad y el equilibrio ecológico de estos ecosistemas.

Por otra parte, algunas especies asociadas al sargazo podrían ser beneficiosas. Por ejemplo, entre las especies adheridas a estas macroalgas hay algunas que tienen esqueletos carbonatados, como los briozoarios, gusanos serpúlidos y algas rojas. La presencia de estos organismos podría beneficiar a las playas por el aporte de sedimentos carbonatados. Según un estudio realizado en el Caribe mexicano, estos organismos podrían contribuir con un promedio de 179 kilogramos de carbonato de calcio por metro de playa en un año (Salter et al., 2020), lo que podría ayudar a mitigar la erosión costera. De hecho, en Quintana Roo ya se registró un caso de éxito de restauración de playa utilizando sedimentos recuperados del sargazo. No obstante, se necesitan investigaciones adicionales para evaluar el impacto de estos aportes en la composición química de la arena de las playas.

Desafortunadamente, las enormes acumulaciones de sargazo también atrapan basura que encuentran en su recorrido por el océano Atlántico y el Caribe, transportándola hacia las costas. Esta basura puede incluir residuos hospitalarios (figura 2f) y objetos punzocortantes que podrían pasar desapercibidos, representando un peligro tanto para residentes como para turistas. Además, cada metro cúbico de estas macroalgas puede contener casi medio millón de microplásticos, según investigaciones recientes (Aldana Arana et al., 2024). Estos diminutos fragmentos pueden tener un impacto devastador en las especies de los ecosistemas costeros, incluyendo aquellas que forman parte de la dieta humana. Los microplásticos pueden afectar los sistemas digestivos y respiratorios de animales marinos. La contaminación del sargazo con microplásticos también podría limitar su uso como fertilizante, composta y complemento de alimento para animales.

Los microplásticos incluso pueden ser portadores de contaminantes como metales pesados y productos químicos orgánicos nocivos, además de servir como sustrato para organismos patógenos como virus y bacterias. Entre las bacterias, destacan las del género *Vibrio*, que pueden causar enfermedades tanto en seres humanos como en la fauna marina (Michotey et al., 2020).

Otra limitante para que el sargazo sea utilizado por diferentes industrias es que absorbe elementos tóxicos del mar, como metales pesados (p. ej. cadmio, plomo y mercurio), semimetales (p. ej. arsénico), hidrocarburos y pesticidas (p. ej. clordecona) (Milledge et al., 2020; Rodríguez-Martínez et al., 2020; Devault et al., 2022). Estos contaminantes pueden ingresar a las cadenas alimenticias en los ecosistemas costeros, incluyendo especies de consumo humano (Olguin-Maciél et al., 2022; Modestin et al., 2022).

### RIESGOS SOCIALES

La llegada masiva de sargazo plantea una serie de preocupaciones, entre las cuales destaca su impacto en la salud humana. Aproximadamente 48 horas después de su arribo a la playa, se inicia un proceso de descomposición que resulta en la liberación de gases. Entre los gases potencialmente dañinos se encuentran el amoníaco y el ácido sulfhídrico.

Hasta el momento, la concentración de amoníaco producida por el sargazo ha sido poco monitoreada, a excepción de la isla de Martinica, donde no se han registrado niveles preocupantes para la salud humana. Sin embargo, se ha establecido que si las concentraciones de amoníaco superan los 8.3 partes por millón (ppm), las personas deben alejarse de la zona debido a sus efectos irritantes en los ojos y el sistema respiratorio, que pueden causar tos, dificultad para respirar, fatiga y úlceras en el tracto respiratorio superior.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <https://www.madininair.fr/Les-algues-Sargasses?lang=fr>

El ácido sulfhídrico es un gas incoloro y de "olor a huevo podrido" que es detectable por el olfato en concentraciones desde 0.02 ppm. Puede ingresar al cuerpo por la respiración, aunque cantidades menores también se pueden absorber por la piel. Los efectos en la salud varían según la concentración, desde dificultades respiratorias (concentraciones de 2 ppm), hasta dolores de cabeza e irritación ocular y de garganta (concentraciones de 1 a 5 ppm) (WHO, 2003). Concentraciones mayores pueden tener otras implicaciones serias en la salud, dependiendo del tiempo de exposición.

Mediciones realizadas en el Caribe mexicano indican que la concentración de ácido sulfhídrico bajo las pilas de sargazo superaba las 5 ppm en casi una cuarta parte de las mediciones, con valores ocasionalmente superiores a 100 ppm (Rodríguez-Martínez et al., 2024). Esto representa un riesgo potencial para la salud de los trabajadores que limpian esta biomasa, quienes podrían estar expuestos a concentraciones peligrosas durante una cuarta parte de su jornada laboral, que comúnmente es de ocho horas diarias, seis días a la semana, durante seis a ocho meses al año.

A la fecha, se desconoce el impacto potencial en la salud de la exposición crónica a concentraciones relativamente bajas de ácido sulfhídrico. Sólo dos grupos de trabajo han publicado artículos científicos sobre el tema. Resiere y colaboradores (2021) encontraron efectos respiratorios y neurológicos en personas expuestas de manera crónica, incluso a concentraciones bajas. Por otro lado, De Lanlay y colaboradores (2022) observaron que las mujeres embarazadas expuestas crónicamente al gas tienen un mayor riesgo de preeclampsia.

Otro riesgo para la salud humana asociado al sargazo es la presencia de organismos urticantes, como los hidrozoarios, que a veces cubren hasta el 70% de las frondas de estas macroalgas (Mendoza-Becerril et al., 2020) y pueden causar reacciones cutáneas en contacto con la piel, cuya severidad dependerá de la sensibilidad de cada individuo. Además, entre el sargazo ocasionalmente se encuentran otros organismos tóxicos, como la fragata portuguesa (*Physalia physalis*) (Torres-Conde, 2022), cuyos tentáculos contienen toxinas que pueden provocar una

variedad de reacciones en humanos, incluyendo dolor intenso, problemas respiratorios y paro cardíaco (Martínez et al., 2010).

Finalmente, la disposición inadecuada de esta biomasa en la selva, terrenos baldíos, calles y sascaberas, puede contaminar el acuífero con nutrientes y elementos tóxicos, representando un riesgo para la calidad del agua dulce, especialmente en lugares donde el acuífero es la única fuente de agua, como en el estado de Quintana Roo. Sin embargo, se requieren más estudios para comprender completamente estos posibles impactos.

### RIESGOS ECONÓMICOS

En el Caribe la industria turística se encuentra entre las más vulnerables ante la presencia de los arribazones, dado que su expansión está estrechamente ligada a la belleza de sus playas y aguas costeras. En 2017, esta industria contribuyó con aproximadamente 57 000 millones de dólares a la economía caribeña, con proyecciones de crecimiento hasta alcanzar los 83 mmd para 2027 (Thompson et al., 2020).

La presencia del sargazo en las costas plantea una serie de desafíos que van desde la disminución del turismo hasta el aumento de los costos de mantenimiento y limpieza, así como la devaluación de las propiedades costeras. Esta situación también afecta la reputación de las cadenas hoteleras en plataformas digitales, lo que puede resultar en una reducción de las futuras reservas y la valoración de la marca (Rodríguez-Martínez et al., 2023). Según Schling y colaboradores (2022), la presencia de estas macroalgas en el Caribe mexicano ha causado una reducción del 11.6% en el producto bruto local.

Tanto los gobiernos como los hoteles se ven obligados a destinar recursos significativos para contrarrestar los impactos del arribo masivo de esta biomasa. Un estudio reciente realizado en el Caribe mexicano reveló que los costos asociados con la limpieza del sargazo varían entre 19 y 85 dólares por metro cúbico, dependiendo de las estrategias de gestión implementadas (Rodríguez-Martínez et al., 2023). Esto implica un

gasto anual que oscila entre 0.3 y 1.5 millones de dólares por kilómetro de playa, fluctuando según la cantidad de sargazo y las tácticas de manejo utilizadas. Por ejemplo, en Miami, el presupuesto anual para limpiar 24 kilómetros de playa es de 45 millones de dólares (Braun, 2020).

Además de estos costos directos de limpieza de playas, los hoteles enfrentan pérdidas por cancelaciones y compensaciones, así como gastos extras en reparaciones de equipos eléctricos corroídos por los gases emitidos durante la descomposición del sargazo. Para contrarrestar los impactos ambientales, algunos hoteles realizan inversiones en la restauración de los ecosistemas costeros, como playas y pastizales marinos, para mantener la atracción turística de la zona.

La presencia de esta biomasa también altera las experiencias turísticas y las interacciones sociales con el entorno costero. Al no poder disfrutar de las playas, los turistas se ven obligados a buscar alternativas, como visitar zonas arqueológicas, parques naturales o turísticos y cenotes. Esta reorientación de actividades no sólo afecta la economía local, sino que también puede influir en la percepción general del destino turístico y, en última instancia, en su atractivo para los visitantes futuros (McAdam-Otto, 2022).

El impacto económico del sargazo se extiende a la industria pesquera. Estas algas tienden a enredarse en los aparejos de pesca y las hélices de las embarcaciones, lo que aumenta los costos de mantenimiento. Además, estas acumulaciones reducen las áreas de pesca disponibles, lo que se traduce en una disminución de los ingresos para los pescadores. En el Caribe mexicano se han documentado casos de mortalidad de especies clave para la pesca, como la langosta espinosa del Caribe, en áreas afectadas por la “marea marrón”. Este fenómeno se atribuye a la disminución del oxígeno y al aumento de la temperatura del agua, lo que afecta negativamente la viabilidad de estas poblaciones pesqueras (Rosellón-Druker et al., 2023).

El manejo del fenómeno del sargazo es sumamente complejo y requiere una respuesta coordinada de todos los sectores involucrados, incluyendo el gobierno, la academia, la sociedad y las empresas. Es esencial que los países afectados cuenten con estrategias de manejo y recursos económicos suficientes para implementarlas. Dada la persistencia del problema, es crucial implementar medidas de mitigación como la recolección temprana, el uso de barreras y maquinaria adecuada, así como la gestión adecuada de los residuos.

Para lograr un manejo efectivo se necesitan más investigaciones científicas que estudien los factores que desencadenan este fenómeno, mejorar el monitoreo satelital para comprender la variabilidad espacial y temporal del sargazo, así como identificar factores influyentes para desarrollar modelos que permitan predecir su arribo a las costas. También es necesario evaluar los impactos en diversos ecosistemas y en la sociedad, y buscar formas más efectivas de gestionar y utilizar esta biomasa (Rosellón-Druker et al., 2022).

Explorar usos alternativos del sargazo en diversas industrias puede reducir los costos de limpieza y mitigar los impactos socioeconómicos y ambientales asociados. Sin embargo, a la fecha, los esfuerzos realizados en investigación y estudios piloto, así como la creación de pequeñas industrias en varios países del Caribe para elaborar productos a partir de estas macroalgas (Derochers et al., 2022), son insuficientes para procesar los cientos de miles de toneladas que llegan anualmente a las costas del Atlántico tropical.

Dado que se trata de un fenómeno que provoca impactos regionales, es indispensable que las instituciones encargadas del tema en los diferentes países tengan objetivos y responsabilidades claras, la capacidad de cooperar y actuar de manera coordinada, y que cuenten con fondos para implementar estrategias de manejo.

## REFERENCIAS

- Aldana Arana, D., Gil Cortés, T. P., Castillo Escalante, V. y Rodríguez-Martínez, R. E. (2024). Pelagic *Sargassum* as a Potential Vector for Microplastics into Coastal Ecosystems. *Phycology*, 4(1), 139-152. <https://doi.org/10.3390/phycoology4010008>
- Braun, G. E. (2020). *Cost-benefit Analysis of Macroalgal Harvesting for Nitrogen Abatement*. [Tesis de maestría, Harvard University]. <https://www.proquest.com/pagepdf/2480423482?accountid=14598>.
- Chávez, V., Uribe-Martínez, A., Cuevas, E., Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I. et al. (2020). Massive Influx of Pelagic *Sargassum* spp. on the Coasts of the Mexican Caribbean 2014-2020: Challenges and Opportunities. *Water*, 12(10), 2908. <https://doi.org/10.3390/w12102908>
- De Lanlay, D. B., Monthieux, A., Banydeen, R., Jean-Laurent, M., Resiere, D. et al. (2022). Risk of Preeclampsia Among Women Living in Coastal Areas Impacted by *Sargassum* Strandings on the French Caribbean Island of Martinique. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 94, 103894. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103894>
- Desrochers, A., Cox, S. A., Oxenford, H. A. y van Tussenbroek, B. (2022). Pelagic *Sargassum*-A Guide to Current and Potential Uses in the Caribbean. *FAO. Fisheries and Aquaculture Technical*, 686. <https://policycommons.net/artifacts/3328201/pelagic-sargassum/4126944/>
- Devault, D. A., Massat, F., Lambourdière, J., Maridakis, C., Dupuy, L. et al. (2022). Micropollutant Content of *Sargassum* Drifted Ashore: Arsenic and Chlordecone Threat Assessment and Management Recommendations for the Caribbean. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29, 66315–66334. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20300-3>.
- Dubé, M. K., Barradas-Ortiz, C., Negrete-Soto, F., Álvarez-Filip, L., Lozano-Álvarez, E. y Briones-Fourzán, P. (2023). A Shift in Communities of Conspicuous Macrocrustaceans Associated with Caribbean Coral Reefs Following a Series of Environmental Stressors. *Diversity*, 15(7), 809. <https://doi.org/10.3390/d15070809>

- Fidai, Y. A., Dash, J., Tompkins, E. L. y Tonon, T. (2020). A Systematic Review of Floating and Beach Landing Records of *Sargassum* Beyond the Sargasso Sea. *Environmental Research Communications*, 2(12), 122001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/abd109>
- Lapointe, B. E. (1995). A Comparison of Nutrient-Limited Productivity in *Sargassum Natans* From Neritic vs. Oceanic Waters of the Western North Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography*, 40(3), 625-633.
- Lapointe, B. E., Brewton, R. A., Herren, L. W., Wang, M., Hu, C. et al. (2021). Nutrient Content And Stoichiometry of Pelagic *Sargassum* Reflects Increasing Nitrogen Availability in the Atlantic Basin. *Nature Communications*, 12(1), 3060. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23135-7>
- Littler, D. S. y Littler, M. M. (2000). *Caribbean Reef Plants: An Identification Guide to the Reef Plants of Caribbean, Bahamas, Florida and Gulf of Mexico*. Offshore Graphics.
- Martínez Ramírez, M., Villena Zálvez, M. E., Marín Jara, I. y Monedero La Orden, J. (2010). Picadura por Carabela Portuguesa, una "medusa" algo especial. *Revista clínica de medicina de familia*, 3(2), 143-145.
- Maurer, A. S., De Neef, E. y Stapleton, S. (2015). *Sargassum* Accumulation May Spell Trouble for Nesting Sea Turtles. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(7), 394-395.
- McAdam-Otto, L. K. (2023). "It's All about the Beaches": *Sargassum* Algae, Tourism, and Coastal Transformations Along the Mexican Caribbean. *Coastal Studies and Society*, 2(4), 356-377.
- Mendoza-Becerril, M. A., Serviere-Zaragoza, E., Mazariegos-Villarreal, A., Rivera-Perez, C., Calder, D. R. et al. (2020). Epibiont Hydroids on Beachcast *Sargassum* in the Mexican Caribbean. *PeerJ*, 8, e9795. <https://doi.org/10.7717/peerj.9795>
- Michotey, V., Blanfune, A., Chevalier, C., Garel, M., Diaz, F. et al. (2020). *In Situ* Observations and Modelling Revealed Environmental Factors Favoring Occurrence of *Vibrio* in Microbiome of the Pelagic *Sargassum* Responsible for Strandings. *Science of the Total Environment*, 748, 141216. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141216>

- Milledge, J. J., Maneein, S., 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. <https://doi.org/10.3390/en13061523>
- Modestin, E., Devault, D. A., Baylet, A., Massat, F. y Dolique, F. (2022). Arsenic in Caribbean Bivalves in the Context of *Sargassum* Beachings: A New Risk for Seafood Consumers. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194, 553. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10230-5>.
- Monroy-Velázquez, L. V., Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Aguiar, T., Solís-Weiss, V. y Briones-Fourzán, P. (2019). Motile Macrofauna Associated with Pelagic *Sargassum* in a Mexican Reef Lagoon. *Journal of Environmental Management*, 252, 109650. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109650>
- Olguin-Maciel, E., Leal-Bautista, R. M., Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J. y Tapia-Tussell, R. (2022). Environmental Impact of *Sargassum* spp. Landings: An Evaluation of Leachate Released from Natural Decomposition at Mexican Caribbean Coast. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 91071-91080. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22123-8>.
- Resiere, D., Mehdaoui, H., Florentin, J., Gueye, P., Lebrun, T. et al. (2021). *Sargassum* Seaweed Health Menace in the Caribbean: Clinical Characteristics of a Population Exposed to Hydrogen Sulfide During the 2018 Massive Stranding. *Clinical Toxicology*, 59(3), 215-223. <https://doi.org/10.1080/15563650.2020.1789162>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Gómez Reali, M. A., Torres-Conde, E. G., Bates, M. N. (2024). Temporal and Spatial Variation in Hydrogen Sulfide (H<sub>2</sub>S) Emissions During Holopelagic *Sargassum* spp. Decomposition on Beaches. *Environmental Research*, 247, 118235. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118235>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Jordán-Dahlgren, E. y Hu, C. (2022). Spatio-Temporal Variability of Pelagic *Sargassum* Landings on the Northern Mexican Caribbean. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100767>

- Rodríguez-Martínez, R. E., Medina-Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L. V., Almazán-Becerril, A. et al. (2019). Faunal Mortality Associated with Massive Beaching and Decomposition of Pelagic *Sargassum*. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 201-205. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.06.015>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S. et al. (2020). Element Concentrations in Pelagic *Sargassum* Along the Mexican Caribbean Coast in 2018-2019. *PeerJ*, 8, e8667. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Torres-Conde, E. G. y Jordán-Dahlgren, E. (2023). Pelagic *Sargassum* Cleanup Cost in Mexico. *Ocean y Coastal Management*, 237, 106542. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106542>
- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. y Jordán-Dahlgren, E. (2016). Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe mexicano (2014-2015). En E. García-Mendoza, S. I. Quijano-Scheggia, A. Olivos-Ortiz y E. J. Núñez-Vázquez (eds.), *Florecimientos algales nocivos en México* (pp. 352-365). CICESE.
- Rosellón-Druker, J., Calixto-Pérez, E., Escobar-Briones, E., González-Cano, J., Masiá-Nebot, L. y Córdova-Tapia, F. (2022). A Review of a Decade of Local Projects, Studies and Initiatives of Atypical Influxes of Pelagic *Sargassum* on Mexican Caribbean Coasts. *Phycology*, 2(3), 254-279. <https://doi.org/10.3390/phycolgy2030014>
- Rosellón-Druker, J., McAdam-Otto, L., Suca, J. J., Seary, R., Gaytán-Caballero, A. et al. (2023). Local Ecological Knowledge and Perception of the Causes, Impacts and Effects of *Sargassum* Massive Influxes: A Binational Approach. *Ecosystems and People*, 19(1), 2253317. <https://doi.org/10.1080/26395916.2023.2253317>
- Ryther, J. H. (1956) The Sargasso Sea. *Scientific American*, 194(1), 98-108.
- Salter, M. A., Rodríguez-Martínez, R. E., Álvarez-Filip, L., Jordán-Dahlgren, E. y Perry, C. T. (2020). Pelagic *Sargassum* as an Emerging Vector of High-Rate Carbonate Sediment Import to Tropical Atlantic Coastlines. *Global and Planetary Change*, 195, 103332. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103332>

- Schling, M., Compeán, R. G., Pazos, N., Bailey, A., Arkema, K. y Ruckelshaus, M. (2022). *The Impact of Sargassum: Evidence from the Mexican Coast*. Inter-American Development Bank. IDB Working Paper Series No IDB-WP-01384. <http://dx.doi.org/10.18235/0004470>
- Theirlynck, T., Mendonça, I. R. W., Engelen, A. H., Bolhuis, H., Collado-Vides, L. et al. (2023). Diversity of the Holopelagic *Sargassum* Microbiome from the Great Atlantic *Sargassum* Belt to Coastal Stranding Locations. *Harmful Algae*, 122, 102369. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102369>
- Thompson, T. M., Young, B. R. y Baroutian, S. (2020). Pelagic *Sargassum* for Energy and Fertiliser Production in the Caribbean: A Case Study on Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109564. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109564>
- Torres-Conde, E. G. (2022). Is Simultaneous Arrival of Pelagic *Sargassum* and *Physalia Physalis* a New Threat to the Atlantic Coasts? *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 275, 107971. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107971>
- Turner, R. E. y Rabalais, N. N. (1994). Coastal Eutrophication Near the Mississippi River Delta. *Nature*, 368, 619–621.
- Van Tussenbroek, B. I., Arana, H. A. H., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M. et al. (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>
- 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. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
- World Health Organization (WHO) (2003). *International Programme on Chemical Safety and World Health Organization*. Concise International Chemical Assessment Document, 53. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/42638/9241530537.pdf?sequence=1>

# Tercera Parte

CIMIENTOS TECNOLÓGICOS Y DE INNOVACIÓN



## 6. Usos potenciales del sargazo: panorama en México

Raúl Tapia-Tussell, Edgar Olguin-Maciel, Liliana Alzate-Gaviria, Elda Isaura España-Gamboa, Beatriz Escobar-Morales, Eréndira Quintanar-Orozco, Karla J. Azcorra-May, Rosa María Leal-Bautista, Silvia Argelia Peraza-Ku, José Manuel Cervantes-Uc, Jorge Alonso Uribe-Calderón, Jorge Carlos Ruiz Ruiz

El arribo masivo de sargazo pelágico a nuestras costas ya no es un fenómeno esporádico. Las cantidades anuales que llegan dependen, entre otros factores aún por entender, de las condiciones ambientales (corrientes marinas y vientos) y actividades antropogénicas (descarga de nutrientes proveniente de actividades agrícolas) (Johns et al., 2020). Una alternativa para la mitigación de los problemas ambientales, económicos y de salud humana que generan los arribazones, es el aprovechamiento de la biomasa para la obtención de productos de valor agregado. El género *Sargassum* abre una ventana de oportunidades en la creación de nuevas empresas, ya que se reconoce que estas macroalgas contienen compuestos de interés, como polisacáridos sulfatados y oligosacáridos, los cuales son reconocidos por sus aplicaciones en la salud humana y de animales (Lee et al., 2023).

En este capítulo, presentamos un panorama general de los usos de sargazo en México con base en el estudio y caracterización de la macroalga, así como las principales limitantes para una valorización industrial.

## IMPORTANCIA DE LA CARACTERIZACIÓN DEL SARGAZO

El aprovechamiento del sargazo podría contribuir a mitigar los problemas asociados a este fenómeno. Es por ello que diversos emprendedores se han enfocado en la obtención de productos a partir de esta biomasa, como zapatos, libretas, material de construcción, fertilizantes, alginatos, fucooidanos, biocombustibles, entre otros (Rosellón-Druker et al., 2022).

En el proyecto Semar-Conahcyt “Estudios técnicos de caracterización de sargazo orientados a la generación de normatividad asociada a riesgos y a su potencial aprovechamiento productivo”, el cual fue liderado por el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), se determinó la composición proximal del sargazo, la cual permite establecer las mejores rutas de manejo y aprovechamiento sostenible de la biomasa.

Se demostró que la composición del sargazo proveniente del Gran Cinturón de Sargazo Atlántico (GASB por sus siglas en inglés), varía en función a la temporalidad y sitio de colecta (Davis et al., 2021; Vázquez-Delfín et al., 2021), adicionalmente, se encontró que la variación también se presenta en transectos perpendiculares a la línea de playa (playa, antes y después de la barrera y mar abierto). Es por ello que es necesario continuar con el monitoreo de la composición proximal de esta macroalga para tomar las mejores decisiones en cuanto a su valorización.

En la tabla 1 se muestran los resultados referentes a la composición del sargazo en diferentes temporalidades (Azcorra-May et al., 2022 y Azcorra-May et al., 2023). Encontramos que la biomasa posee carbohidratos que pueden ser aprovechados en la obtención de biocombustibles, o en la extracción de compuestos bioactivos como los alginatos y fucooidanos.

**Tabla 1.** Caracterización proximal del sargazo

PARÁMETROS (%)	INVIERNO 2020	VERANO 2022	VERANO 2023
Humedad	15.98 ± 0.31	14.39 ± 0.37	16.57 ± 0.34
Cenizas	21.13 ± 0.25	19.25 ± 0.20	16.36 ± 0.21
Lignina	29.52 ± 0.18	28.25 ± 0.43	26.43 ± 0.94
Glucosa	7.80 ± 1.61	5.22 ± 0.72	5.83 ± 0.40
Xilosa	3.51 ± 0.05	1.99 ± 0.31	1.63 ± 0.15
Fucosa	6.26 ± 0.08	2.63 ± 0.31	1.09 ± 0.02
Carbono	31.87 ± 1.82	34.87 ± 0.02	37.62 ± 0.08
Hidrógeno	4.92 ± 0.09	4.81 ± 0.01	5.07 ± 0.02
Nitrógeno	1.16 ± 0.02	0.73 ± 0.01	0.98 ± 0.12
Azufre	0.98 ± 0.03	1.08 ± 0.03	0.78 ± 0.03
Relación C:N*	27.47	47.77	38.39

\*Valor adimensional.

**Nota:** en el caso de la fucosa, es especialmente importante conocer su contenido si se pretende utilizar para la extracción de fucooidanos, ya que, como podemos observar, los valores presentan marcadas variaciones. Otro parámetro importante es la relación C:N, ya que este valor es clave para la toma de decisiones en un proceso de digestión anaerobia para la producción de biocombustibles.

**Fuente:** elaboración propia.

## LIMITANTES PARA EL APROVECHAMIENTO

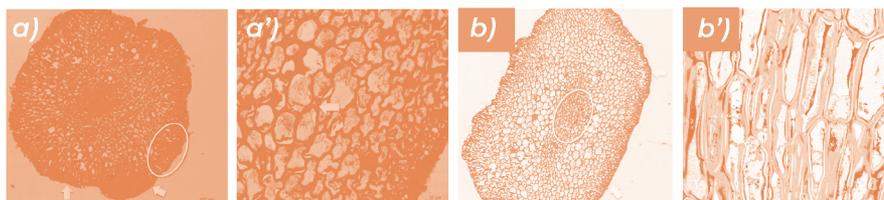
Existen limitantes para el aprovechamiento de esta biomasa, las cuales se relacionan con la presencia de altos contenidos de un material recalcitrante (lignina). La lignina es un biopolímero formado por una red

polifenólica, su función se relaciona con aportar rigidez y protección a las plantas vasculares (Chávez-Sifontes y Domine, 2013). Aunque este compuesto no suele asociarse con las macroalgas, hemos identificado, por primera vez, la presencia de una pared secundaria compuesta por células lignificadas en el sargazo colectado en playas de Quintana Roo (figura 1) (Alzate-Gaviria et al., 2021).

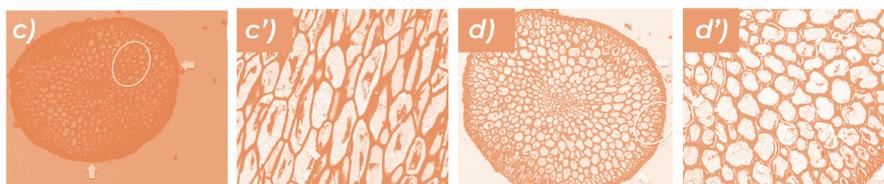
También se identificaron compuestos fenólicos precursores de monolignoles involucrados en la biosíntesis de la lignina (Azcorra-May et al., 2022). Estos resultados indican que la biomasa proveniente del GASB presenta características diferenciadas a algas del género *Sargassum* presentes en el golfo de México, esto debido a que las macroalgas del GASB están sometidas a un estrés abiótico durante su trayectoria. La recalcitrancia de esta biomasa hace necesario la aplicación de pretratamientos para su valorización.

**Figura 1.** Células lignificadas en el sargazo

### *Sargassum natans*



### *Sargassum fluitans*



**Nota:** secciones transversales teñidas con safranina O del *S. natans* (a, a') y *S. fluitans* (c, c'). Secciones transversales teñidas de azul de toluidina del tallo de *S. natans* (b, b') y *S. fluitans* (d, d').

**Fuente:** Alzate-Gaviria et al. (2021).

Otra limitante para la valorización es la presencia de metales como el arsénico, cadmio, aluminio y níquel, entre otros, los cuales pueden interferir en los procesos de transformación del alga y, a su vez, limitar la aplicación de los productos con valor agregado obtenidos de esta materia prima (Milledge et al., 2020; Olguin-Maciel et al., 2022; Rodríguez-Martínez et al., 2020). Es por ello que es importante realizar el seguimiento o trazabilidad de metales durante la obtención de compuestos con valor agregado (Azcorra-May et al., 2022).

### USOS POTENCIALES DEL SARGAZO

En función de la composición de esta biomasa, se pueden establecer las estrategias más adecuadas para su aprovechamiento. Dependiendo de su composición química y bioquímica, así como del grado de descomposición, es que el sargazo puede considerarse un residuo o una materia prima.

Aunque existen numerosos estudios científicos que se han enfocado en determinar su potencial en la producción de alginatos, fucoidanos, biofertilizantes, biocarbón, bioetanol y biogás, entre otros (Oxenford et al., 2021), se debe tomar en cuenta la sostenibilidad de los procesos de valorización. Tomando en cuenta lo anterior, y con base en los resultados del mencionado proyecto Semar-Conahcyt, describimos a continuación los principales productos que se pueden obtener a partir de esta biomasa. Para fines prácticos, los compuestos con valor agregado fueron clasificados en bioproductos y biocombustibles.

#### BIOPRODUCTOS

##### *Alginato*

El alginato es un polímero natural que se encuentra en las algas pardas y ha sido usado en la industria química, textil, gastronómica y farmacéutica, entre otras, debido a su biocompatibilidad y baja toxicidad (Nogueira

et al., 2022). También ha sido empleado en forma de hidrogeles para la curación de heridas, en la ingeniería de tejidos y en el sistema de liberación de fármacos.

El alginato extraído de las algas del género *Sargassum* spp. ha demostrado tener propiedades excepcionales en la formación de películas biodegradables; su caracterización revela una composición química rica en grupos funcionales carboxilo e hidroxilo, así como una estructura que permite la formación de redes tridimensionales con otros polímeros o compuestos. Estas películas han mostrado potencial para ser usadas como recubrimientos en la industria alimentaria con el fin de mejorar la conservación de productos perecederos. Además, desde el punto de vista biológico, sus propiedades antioxidantes y antimicrobianas las hacen adecuadas para una variedad de aplicaciones en la industria biomédica.

La caracterización fisicoquímica y biológica de películas biodegradables obtenidas a partir de alginato de algas del género *Sargassum* destaca en su potencial para una amplia gama de aplicaciones industriales y agrícolas. Estos materiales ofrecen propiedades mecánicas y de barrera deseables, son biocompatibles y se degradan en el ambiente, contribuyendo así a disminuir la contaminación por uso de plásticos.

En cuanto al uso farmacéutico de los alginatos como vehículo de liberación de medicamentos, estudiamos su uso para la liberación del 5-fluorouracilo. Este fármaco es usado en el tratamiento de diferentes tipos de cáncer, y es administrado durante las quimioterapias, principalmente por vía intravenosa. Sin embargo, se busca encontrar medios de administración más accesibles y menos invasivos para el paciente, y que a su vez logren un uso más eficiente de los fármacos para incrementar la efectividad del tratamiento (Claudio-Rizo et al., 2021; Maghsoudi et al., 2020; Wu et al., 2020).

Una forma de lograr lo anterior es la microencapsulación del fármaco en hidrogeles de polímeros naturales como el alginato y el quitosano, pues estos tienen la capacidad de liberar fármacos en respuesta a estímulos externos como los cambios en el pH, luz, temperatura, campo eléctrico, campo magnético y ultrasonido (Berger et al., 2004). Este último tiene la

ventaja de no ser invasivo, ionizante y, además, puede traspasar tejidos con una precisión espacio-temporal aceptable (Bawa et al., 2009).

Se produjeron microesferas de doble capa de alginato-quitosano. Estas microesferas contienen el fármaco 5-fluorouracilo y su liberación se ha estimulado con ultrasonido como una alternativa para administrar fármacos anticancerígenos. Los alginatos utilizados en este estudio se extrajeron del sargazo recolectado en el Caribe mexicano (Puerto Morelos, Quintana Roo). El rendimiento de la extracción alcalina de alginato a partir de sargazo fue del 45%. Se caracterizó este biopolímero mediante técnicas de espectrometría infrarroja (FTIR) y análisis RMN<sup>-1</sup>H; se encontró que posee una composición del 46% de unidades manurónicas y el 54% de unidades gulurónicas con una masa molar de  $3.81 \times 10^5$  g/mol.

Las microesferas se obtuvieron utilizando una solución de alginato-5-fluorouracilo sobre una solución de cloruro de calcio, las cuales se recubrieron con una capa de quitosano entrecruzada con citrato de sodio. El diámetro promedio de las microesferas de alginato se estimó en 120 nm, con una eficiencia de encapsulación del 25% y una capacidad de carga del fármaco de 44%. Se determinó que los estímulos de ultrasonido indujeron una liberación pulsátil del fármaco a partir de las microesferas, generando perfiles de liberación escalonado controlados por el ultrasonido.

Esto demuestra que es posible elaborar sistemas de liberación controlada por estímulos externos como el ultrasonido, con la elección adecuada del binomio polímero-fármaco, para su aplicación en tratamientos contra el cáncer. Estos resultados indican que el alginato extraído del sargazo es un polímero capaz de generar geles con potenciales aplicaciones en encapsulación celular, especialmente útil en áreas biomédicas y ambientales.

### *Biocarbón*

El biocarbón posee amplias aplicaciones, entre las que destacan su uso en el tratamiento de aguas residuales o efluentes industriales (Çómez et al., 2024; Kwoczynski et al., 2024); en la alimentación de ganado

(Zhao et al., 2023), en la industria de la construcción por su funcionalidad como un material aislante (Song et al., 2023), en la captura y almacenamiento de carbono en entornos industriales, así como en el proceso de purificación de biogás para la captura de CO<sub>2</sub> (He et al., 2023; Yuan et al., 2022).

Asimismo, el biocarbón puede tener aplicaciones en la generación de energía al ser usado como material de electrodo en baterías de iones de litio, en celdas de combustible, supercondensadores y como catalizador o material de soporte para producir nuevos materiales funcionales. En ese sentido, las aplicaciones de biocarbón dependen de sus propiedades, las cuales se encuentran vinculadas a la fuente de la cual se obtenga.

Se obtuvo un biocarbón a partir de sargazo con un área superficial estimada de 1319 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>; este fue utilizado para elaborar un biofiltro, ya que debido a su área superficial demostró ser funcional para la absorción de gases de efecto invernadero como sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono. El biocarbón representa un área de oportunidad a lo que por ahora es un problema ambiental por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Además de su aplicación en la elaboración de biofiltros, al ser un material microporoso, el biocarbón de sargazo puede ser utilizado como un catalizador libre de metales nobles en las reacciones de reducción de oxígeno en celdas de combustible alcalinas, donde se han obtenido buenos desempeños al compararlos con catalizadores comerciales.

Las curvas de los biocarbones sintetizados exhiben propiedades que indican que hay un vasto potencial no explorado de estos materiales como electrodos en capacitores, aplicaciones de purificación de agua, adsorción de CO<sub>2</sub> y metales, así como en el almacenamiento de hidrógeno. No obstante, es necesario evaluar la sostenibilidad en el proceso de producción y uso del biocarbón.

### *Hemicelulosa*

La hemicelulosa es un polisacárido que tiene múltiples aplicaciones, entre ellas su conversión a energía. A partir de un pretratamiento de

despolimerización hemos podido obtener este polisacárido con un rendimiento del 2.74% en base seca (Azcorra-May et al., 2023). Después de obtener el compuesto, se caracterizó para conocer su composición estructural, mediante técnicas cromatográficas (HPLC) y espectroscópicas (FT-IR), donde se identificaron los monómeros estructurales, glucosa y xilosa, los cuales son característicos de la hemicelulosa; al igual que la presencia de grupos funcionales (grupos hidroxilo, carbonilo) asociados a este compuesto.

### *Compuestos fenólicos*

La lignina, como hemos mencionado anteriormente, es una red polifenólica, que por su alto contenido de carbono puede ser utilizada para la obtención de biocarbones o para la extracción de compuestos fenólicos precursores en la síntesis de compuestos químicos de interés comercial. Caracterizamos esta lignina y encontramos grupos funcionales como grupos carbonilo, hidroxilo, así como enlaces C=C de anillos aromáticos, los cuales son característicos de los polifenoles.

De igual forma, corroboramos la recalcitrancia de este compuesto utilizando técnicas termogravimétricas (TGA), las cuales demostraron que la descomposición de este compuesto polifenólico se lleva a cabo a temperaturas superiores a 500°C, lo que confirma que el bioproducto es lignina. La despolimerización de este compuesto nos permitió identificar los compuestos fenólicos presentes en la lignina, los compuestos identificados fueron ácido vainillínico, ácido p-coumárico y ácido gálico (Azcorra-May et al., 2022).

Estos compuestos fenólicos tienen numerosas aplicaciones como reactivo químico (estándar), como precursor en la síntesis verde de otros compuestos de interés como los alcaloides, los cuales pueden ser utilizados en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria, entre otros. Asimismo, por su alto contenido de carbono, la lignina puede ser pirolizada para la obtención de biocarbón.

### *Biofertilizantes*

Durante la digestión anaerobia del sargazo se genera un residuo sólido denominado digestato. En nuestro grupo de trabajo estamos ocupados en la caracterización de este residuo, obteniendo resultados prometedores en el análisis elemental orgánico, encontrando que hay un incremento del 60% en el contenido de nitrógeno en el digestato respecto al sargazo fresco; esto es muy importante para el tratamiento de suelos erosionados con déficit de nitrógeno. En su aplicación como biofertilizantes, los metales presentes pueden fungir como micronutrientes (minerales esenciales) que promueven la retención de agua y enriquecen las características agronómicas de los suelos, mejorando la productividad de los cultivos (Thompson et al., 2020).

### *Biocombustibles*

En los últimos años el consumo energético global ha incrementado a la par de la urbanización. La mayor parte de la energía necesaria para satisfacer las necesidades humanas se obtiene de combustibles fósiles, lo que ha ocasionado un aumento en la concentración de GEI, responsables del incremento de la temperatura global y, por tanto, del cambio climático (Su et al., 2015). La proliferación de las mareas doradas de sargazo se debe, entre otras cosas, al incremento de la temperatura del océano, lo cual se atribuye al cambio climático.

Por ello, es fundamental encontrar nuevas alternativas de materia prima para la producción de energía, que sean amigables con el ambiente y económicamente viables. En este contexto, el uso del sargazo para la producción de biocombustibles contribuye a la mitigación de los impactos negativos que provoca la descomposición de la macroalga y se disminuye la dependencia a los combustibles fósiles (Aparicio et al., 2020; Thompson et al., 2020). Diversas investigaciones se han centrado en el uso de estas macroalgas como materia prima para la obtención de bioenergéticos, no

obstante, en esta sección nos centraremos en los biocombustibles que presentan un mayor potencial de ser obtenidos en el corto y mediano plazo, ya que cuentan con un mayor grado de maduración en la tecnología.

### *Biogás*

El biogás es una opción de combustible amigable con el ambiente. Se obtiene a partir de la digestión anaerobia de diferentes materias primas orgánicas, como residuos agrícolas, la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, aguas residuales domésticas o industriales, entre otros. Durante la digestión anaerobia, un conjunto de microorganismos se encarga de transformar la materia orgánica mediante cuatro etapas (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) en ausencia de oxígeno, produciendo un biogás constituido principalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (20-40%) (Thompson et al., 2020).

Durante la primera etapa, los compuestos de gran tamaño como las proteínas, grasas y carbohidratos son transformados en compuestos solubles de menor tamaño como son los aminoácidos, ácidos grasos y azúcares simples. En la acidogénesis, los microorganismos transforman la materia orgánica en ácidos orgánicos de cadena corta, también se producen otros compuestos como dióxido de carbono, hidrógeno o alcoholes, entre otros. La acetogénesis se caracteriza por la transformación de los ácidos grasos de cadena corta en precursores del metano (acetato, hidrógeno y dióxido de carbono). En la última etapa los microorganismos (arqueas metanogénicas) producen el metano a partir del acetato, hidrógeno y dióxido de carbono (Oibileke et al., 2021).

Para superar la barrera fermentativa bioquímica y mejorar los rendimientos y calidad del metano durante la digestión anaeróbica, se puede promover la transferencia directa de electrones (DIET por sus siglas en inglés) entre microorganismos, utilizando materiales conductores atractivos por costo/beneficio como el carbón granular, biocarbón, nanomagnetita y minerales, entre otros (Holmes et al., 2016; Malvankar

y Lovley, 2014). Los materiales eléctricamente conductores podrían sustituir pilas o citocromos para intercambiar electrones entre los microorganismos (Rotaru et al., 2014). El empleo de DIET depende de las características del sustrato; ya que, en algunos casos, el uso de carbón no aumenta el rendimiento, debido a la adsorción de inhibidores e incluso ácidos grasos de cadena corta (Shanmugam et al., 2017).

La selección adecuada de la materia prima es primordial en la producción de biogás. En este sentido, el sargazo ha ganado mucha atención por su amplia disponibilidad, así como por el alto contenido de humedad que posee (Yuhendra et al., 2021). Para poder utilizar estas macroalgas como materia prima, es importante conocer la cantidad de sólidos volátiles que contienen, ya que estos representan la materia orgánica que los microorganismos son capaces de transformar en biogás.

Mediante la digestión anaerobia del sargazo se logró producir entre 41 y 387 litros de metano por cada kilogramo de sólidos volátiles del sargazo (Chikani-Cabrera et al., 2022; Salgado-Hernández et al., 2022). Este intervalo tan amplio se debe a que esta biomasa posee compuestos difíciles de degradar como fibras insolubles, lignina, polifenoles, metales pesados y sales, los cuales limitan la etapa de la hidrólisis de la digestión anaerobia. Es por ello que, para obtener mejores rendimientos en la producción de metano, es importante realizar pretratamientos a las macroalgas, donde se rompan las estructuras que son de difícil acceso para los microorganismos y liberar los compuestos que son más fáciles de degradar. Los principales pretratamientos se clasifican en químicos (uso de ácidos, bases u oxidantes fuertes), físicos (empleo de temperatura o reducción del tamaño de la partícula de sargazo) y biológicos (uso de enzimas ligninolíticas que disminuyen la recalcitrancia de la biomasa).

El sargazo es una materia prima prometedora para la producción de un biocombustible como el biogás, lo que ayudaría a resolver los problemas de contaminación en el Caribe mexicano. Sin embargo, aún falta investigar el rendimiento en la producción de metano a mayores escalas.

## Bioetanol

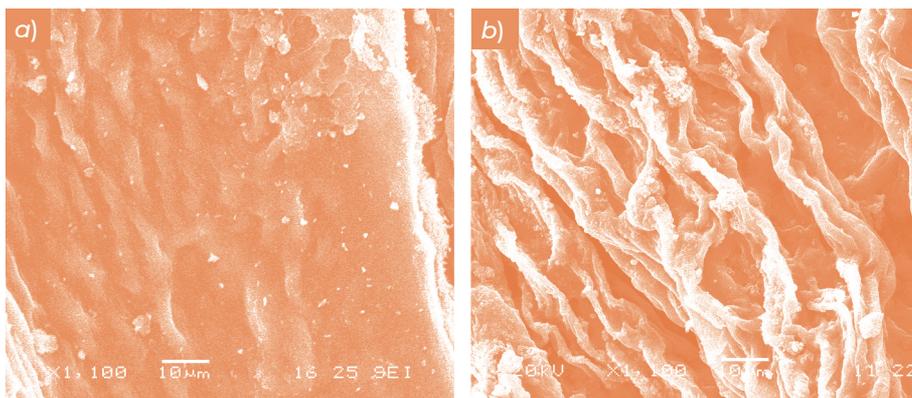
Otra alternativa de uso en la obtención de biocombustibles es el bioetanol. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, la estructura recalcitrante del sargazo impide el acceso a los compuestos de interés que se quieran transformar (holocelulosa).

En ese sentido se ha explorado la tecnología *High-pressure* (TH-P), que permite la ruptura de la estructura del sargazo para obtener sólidos enriquecidos en glucanos. A su vez, el glucano es una estructura aún considerada compleja para la obtención de bioetanol, por lo que debe ser transformado en una estructura más simple, como la glucosa. A este proceso de conversión se le denomina hidrólisis enzimática que, una vez aplicada, permite obtener glucosa disponible para ser transformada en bioetanol a través del proceso de fermentación (Aparicio et al., 2021).

Los tratamientos más aplicados a esta materia prima son los hidrotérmicos, sin embargo, estos procesos se caracterizan por utilizar altas temperaturas y presiones, lo que se traduce en altos requerimientos energéticos, además de grandes volúmenes de agua, ya que, para el tratamiento de un solo kilogramo de sargazo, se utilizan 20 litros del líquido (Aparicio et al., 2021; Thompson et al., 2019).

Es por lo anterior que se buscó desarrollar metodologías sostenibles que permitan el aprovechamiento para la obtención de bioetanol y otros compuestos precursores (polioles) para la síntesis de biocombustibles, como el combustible sostenible de aviación (SAF, por sus siglas en inglés).

Tomando en cuenta lo anterior, se desarrolló un proceso para la transformación del sargazo, el cual remueve el 70% del material recalcitrante, modificando su estructura y facilitando el acceso a los compuestos de interés. En la figura 2 se pueden observar cambios estructurales mediante las micrografías electrónicas de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) del sargazo antes y después del pretratamiento. Este proceso es sostenible y cuenta con una maduración tecnológica (TRL, por sus siglas en inglés) de cinco.

**Figura 2.** Micrografías del sargazo

**Nota:** a) antes del tratamiento y b) después del tratamiento.

**Fuente:** Azcorra-May et al. (2023).

Como hemos podido demostrar, el sargazo puede ser utilizado para la obtención de diferentes productos con valor agregado, sin embargo, la recuperación de estos debe ser económicamente rentable y sostenible. Debido a su compleja estructura, la recuperación de un solo producto no es rentable en la mayoría de los casos, por lo que el aprovechamiento integral bajo un esquema de biorrefinería, explicado en amplitud en el siguiente capítulo, es la alternativa más prometedora para su uso (Saldarriaga-Hernández et al., 2020) y lo que contribuiría realmente a cambiar el paradigma del sargazo: de ser un residuo a un recurso.

## REFERENCIAS

Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J., Chablé-Villacís, R., Olguin-Maciel, E., Leal-Bautista, R. M. et al. (2021). Presence of Polyphenols Complex Aromatic “Lignin” in *Sargassum* spp. from Mexican Caribbean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.3390/jmse9010006>

- Aparicio, E., Rodríguez-Jasso, R. M., Lara, A., Loredó-Treviño, A., Aguilar, C. N. et al. (2020). Biofuel's Production of Third Generation Biorefinery from Macroalgal Biomass in the Mexican Context: An Overview. *Sustainable Seaweed Technologies*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817943-7.00015-9>
- Aparicio, E., Rodríguez-Jasso, R. M., Pinales-Márquez, C. D., Loredó-Treviño, A., Robledo-Olivo, A. et al. (2021). High-Pressure Technology for *Sargassum* spp Biomass Pretreatment and Fractionation in the Third Generation of Bioethanol Production. *Bioresource Technology*, 329, 124935. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124935>
- Azcorra-May, K. J., Olguin-Maciél, E., Domínguez-Maldonado, J., Toledano-Thompson, T., Leal-Bautista, R. M. et al. (2022). *Sargassum* Biorefineries: Potential Opportunities Towards Shifting from Wastes to Products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 1837-1845.
- Azcorra-May, K. J., Olguin-Maciél, E., Leal-Bautista, R. M., Canche-Escamilla, G., Alzate-Gaviria, L. et al. (2023). *Sargassum* Delignification: A First Step to Mitigate the Socio-Economic and Environmental Impacts in the Caribbean Through its Sustainable Exploitation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-12.
- Bawa, P., Pillay, V., Choonara, Y. E. y Du Toit, L. C. (2009). Stimuli-Responsive Polymers and Their Applications in Drug Delivery. *Biomedical Materials*, 4(2), 22001.
- Berger, J., Reist, M., Mayer, J. M., Felt, O., Peppas, N. A. y Gurny, R. (2004). Structure and Interactions in Covalently and Ionically Crosslinked Chitosan Hydrogels for Biomedical Applications. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 57(1), 19-34.
- Chávez-Sifontes, M. y Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en ciencias e ingeniería*, 4(4), 15-46.
- Chikani-Cabrera, K. D., Fernandes, P. M. B., Tapia-Tussell, R., Parra-Ortiz, D. L., Hernández-Zárate, G. et al. (2022). Improvement in Methane Production from Pelagic *Sargassum* Using Combined Pretreatments. *Life*, 12(8), 1214.

- Claudio-Rizo, J. A., Cano Salazar, L. F., Flores-Guía, T. E., y Cabrera-Munguía, D. A. (2021). Estructuras metal-orgánicas (MOFs) nanoestructuradas para la liberación controlada de fármacos. *Mundo nano. Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 14(26).
- Çómez, F. Ö., Sochacki, A., Vacula, J., Bárta, J., Zídková, L. et al. (2024). Biochar as a Superior Material for Enhancing the Performance and Microbial Diversity in Biofilters Treating Greywater. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 105066.
- Davis, D., Simister, R., Campbell, S., Marston, M., Bose, S. et al. (2021). Biomass Composition of the Golden Tide Pelagic Seaweeds *Sargassum Fluitans* And *S. Natans* (Morphotypes I And VIII) to Inform Valorization Pathways. *Science of the Total Environment*, 762, 143134.
- Dickson, R., Ryu, J. H. y Liu, J. (2020). Optimal Design of Macroalgae-Based Integrated Biorefinery: Economic and Environmental Perspective. *Computer Aided Chemical Engineering*, 48, 793-798. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50133-6>
- Filote, C., Santos, S. C. R., Popa, V. I., Botelho, C. y Volf, I. (2021). Biorefinery of Marine Macroalgae into High-Tech Bioproducts: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), 969-1000.
- He, J.-T., Yao, N., Sun, Z.-Y., Li, F., Cai, H.-Q. et al. (2023). Improved Biogas Production from Tobacco Processing Waste Via Biochar-Assisted Thermophilic Anaerobic Digestion. *Industrial Crops and Products*, 202, 117038.
- Heredia-Guerrero, J. A., Benítez, J. J., Domínguez, E., Bayer, I. S., Cingolani, R. et al. (2014). Infrared and Raman Spectroscopic Features of Plant Cuticles: A Review. *Frontiers in Plant Science*, 5, 305.
- Holmes, D. E., Dang, Y., Walker, D. J. F. y Lovley, D. R. (2016). The Electrically Conductive Pili of Geobacter Species are a Recently Evolved Feature for Extracellular Electron Transfer. *Microbial Genomics*, 2(8), e000072.
- Johns, E. M., Lumpkin, R., Putman, N. F., Smith, R. H., Muller-Karger, F. E. et al. (2020). The Establishment of a Pelagic *Sargassum* Population in the Tropical Atlantic: Biological Consequences of a Basin-Scale Long Distance Dispersal Event. *Progress in Oceanography*, 182, 102269.

- Kostas, E. T., Adams, J. M. M., Ruiz, H. A., Durán-Jiménez, G. y Lye, G. J. (2021). Macroalgal Biorefinery Concepts for the Circular Bioeconomy: A review on Biotechnological Developments and Future Perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111553. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111553>
- Kwoczynski, Z., Burdová, H., Al Souki, K. S. y Čmelík, J. (2024). Extracted Rapeseed Meal Biochar Combined with Digestate as a Soil Amendment: Effect on Lettuce (*Lactuca Sativa L.*) Biomass Yield and Concentration of Bioavailable Element Fraction in the Soil. *Scientia Horticulturae*, 329, 113041.
- Lee, M. C., Yeh, H. Y., Chang, C. M., Liou, Y. F., Nan, F. H. y Wungen-Sani, J. (2023). Tracking and Utilizing *Sargassum*, an Abundant Resource from the Caribbean Sea. *Water*, 15(15), 2694.
- Maghsoudi, S., Taghavi Shahraki, B., Rabiee, N., Fatahi, Y. et al. (2020). Burgeoning Polymer Nano Blends for Improved Controlled Drug Release: A Review. *International Journal of Nanomedicine*, 4363-4392.
- Malvankar, N. S. y Lovley, D. R. (2014). Microbial Nanowires for Bioenergy Applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 27, 88-95.
- Milledge, J. J., Maneein, S., Arribas, 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, 1523.
- Nogueira, M. T., Chica, L. R., Yamashita, C., Nunes, N. S. S., Moraes, I. C. F. et al. (2022). Optimal Conditions for Alkaline Treatment of Alginate Extraction from the Brown Seaweed *Sargassum Cymosum* C. Agardh by Response Surface Methodology. *Applied Food Research*, 2(2) 100141.
- Obileke, K., Nwokolo, N., Makaka, G., Mukumba, P. y Onyeaka, H. (2021). Anaerobic Digestion: Technology for Biogas Production as a Source of Renewable Energy-A review. *Energy & Environment*, 32(2), 191-225.
- Olguin-Maciel, E., Leal-Bautista, R. M., Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J. y Tapia-Tussell, R. (2022). Environmental Impact of *Sargassum* spp. Landings: An Evaluation of Leachate Released from Natural Decomposition at Mexican Caribbean Coast. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(60), 91071-91080. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22123-8>.

- Oxenford, H. A., Cox, S.-A., van Tussenbroek, B. I. y Desrochers, A. (2021). Challenges of Turning the Sargassum Crisis into Gold: Current Constraints and Implications for the Caribbean. *Phycology*, 1(1), 27-48.
- Resiere, D., Mehdaoui, H., Florentin, J., Gueye, P., Lebrun, T. et al. (2020). *Sargassum seaweed* Health Menace in the Caribbean: Clinical Characteristics of a Population Exposed to Hydrogen Sulfide During the 2018 Massive Stranding. *Clinical Toxicology*, 59(3), 215-223. <https://doi.org/10.1080/15563650.2020.1789162>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Torres-Conde, E. G. y Jordán-Dahlgren, E. (2023). Pelagic *Sargassum* Cleanup Cost in Mexico. *Ocean y Coastal Management*, 237.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Roy, P. D., Torrescano-Valle, N., Cabanillas-Terán, N., Carrillo-Domínguez, S. et al. (2020). Element Concentrations in Pelagic *Sargassum* Along the Mexican Caribbean Coast in 2018-2019. *PeerJ*, 8, e8667. <https://doi.org/10.7717/peerj.8667>
- Rosellón-Druker, J., Calixto-Pérez, E., Escobar-Briones, E., González-Cano, J., Masiá-Nebot, L. y Córdova-Tapia, F. (2022). A Review of a Decade of Local Projects, Studies and Initiatives of Atypical Influxes of Pelagic *Sargassum* on Mexican Caribbean Coasts. *Phycology*, 2(3), 254-279.
- Rotaru, A.-E., Shrestha, P. M., Liu, F., Shrestha, M., Shrestha, D. et al. (2014). A New Model for Electron Flow During Anaerobic Digestion: Direct Interspecies Electron Transfer to Methanosaeta for the Reduction of Carbon Dioxide to Methane. *Energy y Environmental Science*, 7(1), 408-415.
- Saldarriaga-Hernández, S., Hernández-Vargas, G., Iqbal, H. M. N. et al. (2020). Bioremediation Potential of *Sargassum* spp. Biomass to Tackle Pollution in Coastal Ecosystems: Circular Economy Approach. *Science of the Total Environment*, 715. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136978>
- Salgado-Hernández, E., Ortiz-Ceballos, Á. I., Martínez-Hernández, S., Rosas-Mendoza, E. S., Dorantes-Acosta, A. E. et al. (2022). Methane production of *Sargassum* spp. Biomass from the Mexican Caribbean: Solid-Liquid Separation and Component Distribution. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 219.

- Shanmugam, S. R., Adhikari, S., Wang, Z. y Shakya, R. (2017). Treatment of Aqueous Phase of Bio-Oil by Granular Activated Carbon and Evaluation of Biogas Production. *Bioresource Technology*, 223, 115-120.
- Song, S., Liu, Z., Liu, G., Cui, X. y Sun, J. (2023). Application of Biochar Cement-Based Materials for Carbon Sequestration. *Construction and Building Materials*, 405, 133373.
- Su, Y., Zhang, P. y Su, Y. (2015). An Overview of Biofuels Policies and Industrialization in the Major Biofuel Producing Countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 991-1003. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.032>
- Thompson, T. M., Young, B. R. y Baroutian, S. (2020). Pelagic *Sargassum* for Energy and Fertiliser Production in the Caribbean: A Case Study on Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109564. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109564>
- Thompson, T. M., Young, B. R. y Baroutian, S. (2019). Advances in the Pretreatment of Brown Macroalgae for Biogas Production. *Fuel Processing Technology*, 195, 106151. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106151>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148852>
- Wang, M., Hu, C., Barnes, B. B., Mitchum, G., Lapointe, B. y Montoya, J. P. (2019). The Great Atlantic *Sargassum* Belt. *Science*, 364(6448), 83-87. <https://doi.org/10.1126/science.aaw7912>
- Wu, J., Zhang, Z., Zhou, W., Liang, X., Zhou, G. et al. (2020). Mechanism of a Long-Term Controlled Drug Release System Based on Simple Blended Electrospun Fibers. *Journal of Controlled Release*, 320, 337-346.
- Yuan, X., Xiao, J., Yilmaz, M., Zhang, T. C. y Yuan, S. (2022). N, P Co-doped Porous Biochar Derived From Cornstalk for High Performance CO<sub>2</sub> Adsorption and Electrochemical Energy Storage. *Separation and Purification Technology*, 299, 121719.

- Yuhendra, A. P., Farghali, M., Mohamed, I. M. A., Iwasaki, M., Tangtaweewipat, S. et al. (2021). Potential of Biogas Production from the Anaerobic Digestion of *Sargassum Fulvellum* Macroalgae: Influences of Mechanical, Chemical, and Biological Pretreatments. *Biochemical Engineering Journal*, 175, 108140.
- Zhao, H., Wang, Z., Liang, Y., Wu, T., Chen, Y. et al. (2023). Adsorptive Decontamination of Antibiotics from Livestock Wastewater by Using Alkaline-Modified biochar. *Environmental Research*, 226, 115676.

## 7. Biorrefinerías del sargazo pelágico en el contexto mexicano

Alejandra Cabello-Galindo, K.D. González-Gloria, David R. Segura-García, Rosa M. Rodríguez-Jasso, Héctor A. Ruiz

### INTRODUCCIÓN

Hoy en día la sociedad y el mundo experimentan cambios constantes, y uno de ellos, sin lugar a duda, es el cambio climático. Una parte de estos cambios ambientales está relacionada al uso de energía proveniente de materias primas fósiles como el petróleo y carbón, el uso de químicos en la agricultura y la contaminación en los mantos acuíferos. En este contexto, el desarrollo de alternativas y procesos sustentables son necesarios para implementar en un mundo productivo con crecimiento exponencial.

El concepto llamado *biorrefinería* es una filosofía que tiene sus orígenes desde hace más de 40 años. Este concepto propone un sistema análogo a las refinerías convencionales de petróleo, donde el objetivo principal es desarrollar procesos sustentables y usar materias primas renovables, como las biomásas provenientes de diferentes fuentes (vegetales o animales). Las biorrefinerías se han clasificado dependiendo de su origen. Las de primera generación emplean caña de azúcar y maíz como materia prima. Las de segunda generación usan residuos de la agroindustria como son residuos de maíz (tallos, hojas y olote), bagazo de caña de azúcar, paja de trigo, bagazo

de agave –como las pencas– o residuos del sorgo, entre otros; y las de tercera generación incluyen micro y macroalgas como el sargazo pelágico.

Uno de los objetivos principales de las biorrefinerías es separar los principales componentes de la pared celular de las biomásas mencionadas para producir compuestos de interés industrial que se puedan aplicar a diferentes industrias como la alimentaria, de materiales, cosmética, de salud, así como en la producción de bioenergías como bioetanol, biogás, biobutanol, biohidrógeno y biocombustibles sólidos.

Debido a que el sargazo pelágico ha llegado a las costas del Caribe mexicano en grandes cantidades y volúmenes en la última década (Aparicio et al., 2021; National Geographic, 20 de marzo de 2024), es de suma importancia buscar alternativas a su uso, mediante los conceptos de biorrefinería y economía circular, las cuales son estrategias para el procesamiento de la biomasa en la producción de biocombustibles y compuestos de alto valor agregado, usando tecnologías amigables con el medio ambiente.

El objetivo de este capítulo es mostrar, en términos generales, las diferentes etapas en el procesamiento de sargazo como materia prima en la producción de compuestos de interés usando tecnología de altas presiones, como los procesos hidrotérmicos para romper la pared celular de las macroalgas y obtener azúcares fermentables y subsecuentemente la producción de estos compuestos. Hemos probado esta tecnología del procesamiento a diferentes escalas, desde laboratorio (5 gramos) hasta escala piloto (1 kilogramo base seca), demostrando la factibilidad técnica en la conversión del sargazo en compuestos de interés para la sociedad.

## BIORREFINERÍAS Y SUS GENERACIONES

### PRIMERA GENERACIÓN

Las biorrefinerías de primera generación se caracterizan por emplear como materia prima la biomasa obtenida de cultivos que originalmente son destinados para el consumo humano. Por ejemplo, en los Estados

Unidos se produce bioetanol a partir de maíz, alcanzando una producción anual cercana a los 15400 millones de galones de este biocombustible (Renewable Fuels Association, 2023).

Diversos estudios han evidenciado que el proceso de producción de bioetanol de primera generación resulta ser altamente eficaz, pero ha generado amplias controversias, especialmente en el debate entre el uso de cultivos destinados para alimentación o para la generación de combustibles, y las preocupaciones sobre la sostenibilidad ambiental. Esto se debe a que el uso de biomasa de cultivos en estas biorrefinerías puede tener consecuencias negativas para la seguridad alimentaria, propiciar la deforestación y resultar en balances energéticos poco eficientes (Haji et al., 2020). Adicionalmente, su operación demanda grandes cantidades de fertilizantes, agua dulce y vastas extensiones de terreno, lo cual contribuye al incremento de las emisiones de carbono y a la acumulación de sustancias contaminantes en la atmósfera, en el suelo y en diversos ecosistemas.

### SEGUNDA GENERACIÓN

Las biorrefinerías de segunda generación se especializan en el procesamiento de biomasa lignocelulósica, que consiste en materia vegetal no destinada al consumo humano, frecuentemente derivada de desechos agroindustriales provenientes de la agricultura, la silvicultura y otros sectores industriales como la cascarilla de arroz, el bagazo de caña, el bagazo de sorgo, el rastrojo de maíz, el bagazo de agave y el pseudotallo de plátano, entre otros. Estos recursos, que no compiten con la cadena alimentaria humana, se destacan por su potencial para disminuir los contaminantes que afectan al clima y contribuir significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el ambiente.

La segunda generación de biorrefinerías está dedicada a la creación de productos de alto valor añadido, con la que se ofrecen beneficios como costos reducidos, la reutilización de residuos y el uso de una biomasa

ampliamente disponible (Shiva et al., 2022). Los materiales lignocelulósicos que son utilizados en las biorrefinerías de segunda generación se caracterizan por su composición química rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, las cuales están formadas por unidades de azúcares y otros compuestos que les aportan resistencia y rigidez a las paredes celulares de las plantas (Cai et al., 2017). Esta composición varía según el tipo de planta y es determinada por varios factores, como la edad de la planta, el clima, los nutrientes de la tierra de cultivo y la región geográfica. La biomasa lignocelulósica puede transformarse en combustibles líquidos o gaseosos a través de la degradación a carbohidratos como glucosa, arabinosa y xilosa.

### TERCERA GENERACIÓN

La tercera generación de biorrefinerías aprovecha la biomasa de plantas acuáticas, tanto de macroalgas como microalgas, debido a su rica composición en lípidos, proteínas y carbohidratos. Esta biomasa se transforma en una diversidad de productos con alto valor, e incluye proteínas, pigmentos, azúcares con propiedades antioxidantes, bioetanol, polisacáridos sulfatados y otros compuestos, variando según el tipo y la especie de alga (Barboza-Rodríguez et al., 2024).

Las macroalgas emergen como fuertes candidatas para ser usadas como materia prima en la producción de biocombustibles, destacándose por ser una biomasa considerada sostenible. Esto se debe a que su producción no necesita de suelo arable, agua de riego, extensas áreas ni fertilizantes. Asimismo, al utilizar algas acuáticas se evita la competencia con cultivos destinados a la alimentación humana, un problema presente en las primeras generaciones de biorrefinerías (Raheem et al., 2018). Esto representa una ventaja significativa en su desarrollo, posicionando a las algas acuáticas –como el sargazo que arriba masivamente al Caribe mexicano– como un recurso prometedor para la obtención de bioproductos renovables en las biorrefinerías de tercera generación.

### ANTECEDENTES PARA LAS BIORREFINERÍAS DEL SARGAZO PELÁGICO

#### ¿QUÉ SON LAS ALGAS?

Las algas son organismos que pertenecen al reino protista y abarcan una amplia gama de formas de vida, desde microorganismos unicelulares conocidos como microalgas, hasta organismos multicelulares más grandes, denominados macroalgas. Estos organismos pueden encontrarse en diversos hábitats acuáticos, incluidos lagos, estanques, ríos y el océano. Gracias a su capacidad fotosintética, desempeñan un papel de funciones cruciales en los ecosistemas acuáticos al utilizar  $\text{CO}_2$  en la generación de su biomasa como parte biológica del carbono y en su conjunto producen dos terceras partes de  $\text{O}_2$  del planeta, además de servir como la base de la cadena alimentaria de estos ecosistemas (Pereira, 2021).

Las macroalgas son reconocidas por su contenido de clorofila, aunque también presentan otros pigmentos fotosintéticos que les confieren una variedad de tonalidades. Por esta razón, se clasifican en tres grupos principales según su color: las algas verdes (phylum *Chlorophyta*), las algas rojas (phylum *Rhodophyta*) y las algas pardas (phylum *Phaeophyceae*) (Filote et al., 2021). El sargazo pelágico es una macroalga perteneciente al grupo de las algas pardas. Conocer los componentes fisicoquímicos del sargazo (específicamente el depositado en las costas) nos abre un abanico de oportunidades para su aplicación en diversas áreas de la industria.

#### UN VISTAZO A LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL SARGAZO PELÁGICO

Como vimos en el capítulo anterior, el sargazo exhibe una composición química diversa que incluye una variedad de compuestos con propiedades bioactivas. La variación del porcentaje de estos compuestos depende tanto de factores de su estado y grado de descomposición, fisiológico y

funcional. El sargazo típicamente contiene del 4% al 68% de carbohidratos, entre un 9 y 20% de proteínas y desde un 0.5% a un 3-9% de lípidos.

Además, es importante resaltar que estas macroalgas son una fuente rica en vitaminas como retinol y ácido ascórbico, así como grasas poliinsaturadas y fibras (Espinosa-Antón et al., 2024; Flores-Contreras et al., 2023; López Miranda et al., 2021), convirtiéndolas en un recurso promisorio para ser aplicado en diferentes áreas como la alimentación animal o el uso para el crecimiento en plantas. Sin embargo, es importante tener en cuenta la presencia de algunos elementos tóxicos como el arsénico, por lo que su cuantificación se vuelve un paso imprescindible para cualquier posible uso (Cabrera et al., 2021).

El sargazo también contiene una notable fuente de minerales como el calcio, fósforo, magnesio, potasio y yodo, que son esenciales para el metabolismo y la salud humana como animal (Carillo et al., 2012; Nava y Sánchez, 2020). Como se ha mencionado previamente, el sargazo, al igual que la mayoría de las algas, posee clorofila, pero además presenta un pigmento característico llamado fucoxantina, el cual le confiere su color pardo-marrón característico. Este pigmento posee diversas propiedades bioactivas, como su capacidad antioxidante, antiinflamatoria y hepatoprotectora. Varios estudios sugieren que la fucoxantina podría ser útil en la prevención y tratamiento de enfermedades crónicas como la diabetes, la obesidad y el cáncer (Bae et al., 2020).

Unos de los principales compuestos de interés de esta macroalga son los polisacáridos estructurales de su pared celular. La celulosa y la hemicelulosa desempeñan un papel crucial como componentes estructurales en la pared celular de las algas, sin embargo, a diferencia de las plantas terrestres, las macroalgas contienen porcentajes menores de estos polisacáridos, alrededor del 2% de celulosa y 6% de hemicelulosa (Kumar et al., 2015).

La pared celular de las macroalgas pardas se compone principalmente por otra clase de polisacáridos como el alginato y el fucoidano, cuya principal función es proveer fuerza y flexibilidad a la estructura de esta.

El alginato representa el polisacárido más abundante de la pared celular, constituyendo entre el 12 y el 47% de la biomasa en peso seco (Tonon et al., 2022; Vázquez-Delfín et al., 2021). Los alginatos tienen una composición química que consta de ácido manurónico y ácido gulurónico. Al ser un polímero no tóxico, biodegradable, biocompatible y con buena solubilidad en agua, su versatilidad lo convierte en un componente con inmensas aplicaciones que ha sido utilizado en distintas industrias como la alimenticia, textil, farmacéutica, biomédica y en diversos campos de la bioingeniería.

Los alginatos han mostrado interesantes propiedades bioactivas como la antibacterial; además, diversos estudios señalan su capacidad de ser auxiliares en tratamientos como obesidad, hipercolesterolemia, diabetes y para el tratamiento de padecimientos gastrointestinales como gastritis y úlceras (Holdt y Kraan, 2011).

Por otro lado, el fucoidano es considerado un componente de refuerzo de la pared celular, pertenece al grupo de los polisacáridos sulfatados, y su estructura y composición varía dependiendo de la especie de alga. Consiste principalmente de fucosa y unidades de grupos sulfatados; además, puede contener pequeñas cantidades de otros monosacáridos como galactosa, manosa, xilosa y ácidos urónicos (Filote et al., 2021). Aunque no se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza, el fucoidano proviene predominantemente de algas pardas y llega a constituir entre el 25 y 30% del peso seco dependiendo de la especie, la temporada y el estado en el que se recolecta la biomasa. También se encuentra presente en otros organismos marinos.

Este polisacárido ha despertado el interés de la comunidad científica debido a sus efectos terapéuticos y amplias propiedades bioactivas, como los son sus efectos prebióticos, antitumorales, antioxidantes, anticoagulantes, antitrombóticos, inmunomoduladores, antivirales y antiinflamatorios (Rodríguez-Jasso et al., 2011), que lo ha llevado a su aplicación, principalmente en industrias como la farmacéutica, nutracéutica y cosmética. Estas actividades biológicas están estrechamente

relacionadas con su estructura química, como su peso molecular, grado de sulfatación y grupos carboxílicos, y esta estructura, a su vez, puede variar dependiendo del método de extracción y de purificación al que se someta.

El sargazo también posee fuentes de reserva de energía en forma de polisacáridos y monosacáridos. El manitol es un compuesto monomérico producto de la fotosíntesis, considerado como un alcohol de azúcar correspondiente a la manosa. El contenido de manitol en la macroalga, al igual que los compuestos anteriormente mencionados, estará sujeto a las variaciones estacionales y medioambientales, pero puede representar del 1 al 12% del peso seco del alga (Zubia et al., 2008).

Se le considera un compuesto osmorregulador, esto quiere decir que ayuda a regular el equilibrio osmótico, es decir, controla la cantidad de agua y solutos dentro de las células de la macroalga para mantener las condiciones internas estables. Las aplicaciones comerciales del manitol son muy diversas y van desde tabletas nutricionales, alimentos para diabéticos o goma de mascar, hasta la industria de los barnices, la industria textil y papelera (Suutari et al., 2015).

Otro polisacárido de la pared celular y de reserva presente en el sargazo es el laminado, es una molécula altamente ramificada que, al igual que el manitol, sirve como una forma de almacenamiento de carbohidratos para las algas y se encuentra en concentraciones de entre el 5 y el 35% de la biomasa seca. Está conformado principalmente por unidades de glucosa y podría decirse que posee una estructura similar al almidón de las plantas terrestres, pero con una disposición diferente de enlaces glucosídicos (Xuan, 2020).

El laminaran, además de servir como reserva de energía, posee una función principal estructural, ya que proporciona rigidez a las paredes celulares de la macroalga. Este compuesto puede ser soluble o insoluble en agua dependiendo de su grado de ramificación, y su estructura influye en la actividad biológica del mismo. A tal biocompuesto se le atribuyen propiedades como actividad antitumoral, antioxidante y antiinflamatoria,

también se han hecho estudios donde el laminaran es fácilmente fermentado por la microbiota intestinal, sugiriendo que puede servir como un agente prebiótico (Cui et al., 2021).

### CADENAS DE VALOR DEL SARGAZO Y DESARROLLO DE BIOREFINERÍAS

Para aprovechar y valorizar el sargazo como materia prima de alto valor comercial es necesario el establecimiento y optimización de cadenas de valor. Éstas involucran una serie de procesos (monitoreo, contención y limpieza, transporte de la biomasa, procesamiento, biorrefinación y comercialización de productos) que abordaremos a continuación.

#### MONITOREO

Es crucial saber cuándo y cuánto sargazo llegará a ciertas zonas costeras para contar con estrategias efectivas de manejo y aprovechamiento. En capítulos previos se han descrito a profundidad diferentes iniciativas de monitoreo de estas macroalgas en mar y playa. México tendrá que seguir apostando al desarrollo tecnológico y de infraestructura para contar con un sólido sistema nacional de sargazo (Aldana, 2020) que, sin duda, es uno de los pasos primordiales hacia la consolidación de las cadenas de valor.

#### CONTENCIÓN Y LIMPIEZA

Para un óptimo manejo del sargazo es importante retenerlo en el mar y reducir su llegada a las costas (Maldonado, 2020). Esto disminuiría de manera significativa los efectos negativos en los ecosistemas costeros (Rodríguez-Martínez y van Tussenbroek, 2020). El uso de buques sargaceros, así como la puesta de barreras de contención, son ejemplos de acciones para lograrlo. En cuanto a la limpieza del sargazo en playas, se han establecido métodos tanto manuales (p. ej. uso de palas y rastrillos)

como con maquinaria especializada (p. ej. tractores o barredoras). En ambos casos sigue siendo fundamental entender y caracterizar los efectos que estas estrategias tienen en el ecosistema marino y costero (p. ej. captura de macrofauna en barreras o la erosión de las playas por el uso de maquinaria pesada y extracción no controlada de arena) (Hernández, 2020; Caballero, Acosta y Hernández, 2020).

#### TRANSPORTE

Después de su colecta, el sargazo se transporta a sitios de acopio, procesamiento o disposición final. Los primeros son temporales (generalmente muy cerca del lugar de colecta) y el sargazo no puede permanecer allí por más de 72 horas. Posteriormente, esta biomasa se transporta en camiones o remolques, ya sea a sitios de procesamiento (que pertenecen a empresas privadas que le dan algún uso específico) o a sitios de disposición final (donde es tratada como un residuo). Todos estos sitios deben de contar con características especiales (p. ej. geomembranas) para evitar la contaminación del manto freático por la producción de lixiviados.

#### PROCESAMIENTO

Una vez colectado y transportado a un sitio de procesamiento, el sargazo es sometido a un lavado y secado. Estos procedimientos eliminan impurezas como exceso de sales, arena, microorganismos patógenos, macrobiota asociada y residuos plásticos que podrían interferir en los procesos posteriores. El lavado se realiza con abundante agua para dejar la biomasa lo más limpia posible. Luego, se somete a un secado, por lo general en estufas u hornos de convección a temperaturas entre 60 y 70 °C, con el objetivo de eliminar el agua contenida de manera natural y la adherida durante el lavado, lo que evita un proceso de degradación y descomposición.

Después, la biomasa se muele, un proceso esencial para su aprovechamiento. La trituración o pulverización del sargazo seco hasta obtener

un polvo fino o partículas más pequeñas se realiza con un molino. Esto homogeneiza la biomasa, aumenta su superficie para los procesos de biorrefinería, reduce los tiempos de procesamiento y facilita la extracción de componentes.

### FRACCIONAMIENTO DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES Y PROCESAMIENTO DEL SARGAZO PELÁGICO

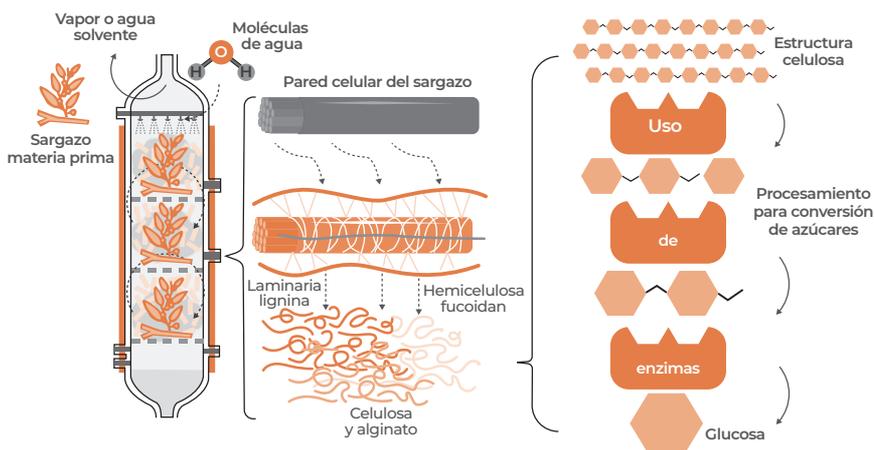
En una biorrefinería se aplican procesos y tecnologías innovadoras para el fraccionamiento de la biomasa, buscando la ruptura de la pared celular para la extracción y obtención de diferentes compuestos (González-Gloria et al., 2021; Kostas et al., 2021). Las biorrefinerías incluyen etapas para la producción de bioproductos, como el fraccionamiento de la pared celular y procesos como fermentación, hidrólisis y destilación para obtención de bioetanol. Antes de estos procesos, se realiza el fraccionamiento de la materia prima hasta obtener el producto deseado (González-Gloria et al., 2021).

Para el fraccionamiento del sargazo, se emplean tratamientos mecánicos y químicos, que incluyen procedimientos físicos (como uso de microondas, ultrasonido y tratamientos hidrotérmicos), químicos (utilización de compuestos ácidos y alcalinos) y biológicos (uso de enzimas) (del Río et al., 2021; Aparicio et al., 2021). Los procesos hidrotérmicos utilizados en el sargazo seco y molido rompen la estructura de la pared celular sin usar componentes químicos; reducen contaminantes ambientales como gases de efecto invernadero, productos químicos como el ácido sulfúrico, desechos sólidos; y sobre todo promueven un enfoque ecológico que contribuye a la conservación y protección de los ecosistemas naturales. Estos procesos presentan como característica principal el uso de agua como solvente bajo condiciones de altas temperaturas (150-200°C) y presiones (5-20 bares). Bajo estas condiciones de operación, el agua cambia su estructura química acidificando el medio, lo que, en conjunto con las altas presiones, promueve la ruptura de los principa-

les componentes de la pared celular (Aparicio et al., 2020).

El uso de agua como catalizador para el fraccionamiento del sargazo representa un proceso respetuoso con el ambiente, de bajo costo y no tóxico, en comparación con el uso de otro tipo de solventes como lo son el hexano, diclorometano y cloroformo (Alzate-Gaviria et al., 2021) (figura 1). Estos procesos aumentan el rendimiento de liberación de azúcares en etapas posteriores al fraccionamiento mediante la aplicación de procesos enzimáticos (González-Gloria et al., 2021; Lara et al., 2020). Se ha investigado el uso de enzimas en los procesos biológicos para el fraccionamiento de la pared celular del sargazo, principalmente en aquellas producidas por hongos filamentosos. Las enzimas catalizan la ruptura de la pared celular, por lo que se considera como uno de los métodos más apropiados para la despolimerización de biopolímeros (rompe enlaces químicos entre las moléculas de azúcares). Estas enzimas tienen una acción concreta, esto quiere decir que actúan en sitios específicos de los polisacáridos promoviendo su ruptura; algunos tipos incluyen a las algininasas, laminarinasas y fucosidasas (Cabello-Galindo et al., 2020; Arturo Siller-Sánchez et al., 2019). Este tipo de tratamientos presentan numerosas ventajas, como un menor **gasto energético y menor impacto ambiental.**

**Figura 1.** Procesamiento del pretratamiento del sargazo como materia prima



**Fuente:** elaboración propia.

## ESTRATEGIAS DE DESARROLLO DE PRODUCTOS DE INTERÉS INDUSTRIAL

Los diferentes procesos aplicados al sargazo varían según los bioproductos que se quieren extraer y obtener de esta biomasa acuática. Estos productos presentan un elevado potencial económico, por ejemplo, los carbohidratos (polisacáridos), a partir de los cuales se pueden obtener oligosacáridos y azúcares simples (monosacáridos) que son utilizados para la elaboración de aditivos y formulación de alimentos, tal como la glucosa, xilosa, galactosa, fucosa y manosa. Estos son usados como edulcorantes naturales en alimentos y bebidas, especialmente en productos para personas con restricciones dietéticas o que buscan alternativas más saludables al azúcar refinada (Bonilla-Loaiza et al., 2022; Sarmiento-Padilla et al., 2023). Estos azúcares también pueden ser utilizados como suplementos alimenticios, proporcionando una fuente de energía fácilmente digerible.

Además, el sargazo se ha convertido en una fuente prometedora para la creación de biofertilizantes y bioestimulantes con aplicación en la agricultura. Se aprovechan diversos componentes de la macroalga; los principales son macro y micronutrientes como el nitrógeno, fósforo, potasio, hierro y manganeso, además de polisacáridos como ácidos algínicos que ayudan a mejorar la estructura del suelo y aumentar la capacidad de retención de agua. También se aprovechan compuestos bioactivos presentes en el sargazo como fitohormonas y compuestos antioxidantes que pueden estimular el crecimiento de algunas plantas y mejorar su resistencia a enfermedades, además de hormonas vegetales como las auxinas, citoquininas y giberelinas que regulan procesos como la germinación de la semilla, crecimiento de las raíces y desarrollo del fruto (Muniswami et al., 2023).

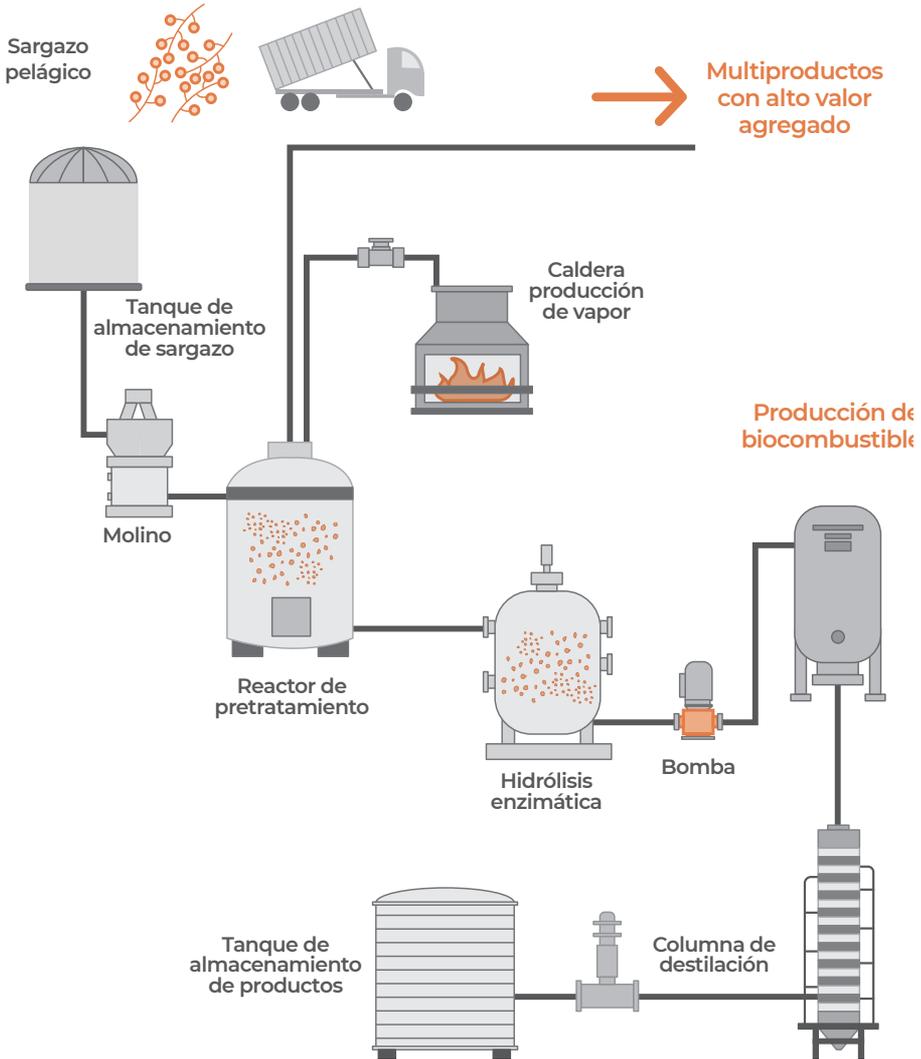
Otra aplicación de los compuestos del sargazo es el fucoidano, utilizado en la industria cosmética debido a sus propiedades hidratantes, antioxidantes y antiinflamatorias, que lo hacen útil en productos cosméticos

o de belleza como cremas hidratantes, lociones, sueros y mascarillas faciales, los cuales poseen la capacidad de retrasar el envejecimiento (Rodríguez-Jasso et al., 2011).

A partir del sargazo, también es posible extraer pigmentos. El que más ha llamado la atención en la investigación debido a sus propiedades es la fucoxantina. Este pigmento carotenóide es el responsable del color marrón-amarillento característico de esta alga (Sarmiento-Padilla et al., 2023). La fucoxantina tiene propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y potencialmente anticancerígenas en estudios *in vitro* y en modelos animales (Lourenço-Lopes et al., 2021). Además, se ha sugerido que la fucoxantina podría tener efectos beneficiosos en la regulación del metabolismo de lípidos y la pérdida de peso, lo que ha llevado a su inclusión en algunos suplementos dietéticos destinados a promover la salud metabólica (Sarmiento-Padilla et al., 2023).

En la figura 2 se muestra un esquema de procesamiento de sargazo bajo el concepto de una biorrefinería. En la actualidad ya existen algunas tecnologías mexicanas a nivel piloto donde se ha procesado esta biomasa en términos de biorrefinería. González-Gloria y colaboradores (2023) procesaron sargazo en un reactor tubular hidrotérmico para la producción de bioetanol y compuestos de interés industrial y reportaron una concentración de  $14.85 \pm 2.69$  g/L, y una conversión del 71.73% de azúcares provenientes de estas macroalgas en etanol. En este tipo de tecnología los procesos hidrotérmicos operan en condiciones entre 150–230 °C y presiones elevadas de 4.9–20 bares entre cinco y 50 minutos. En la figura 3 se muestran fotografías de reactores a nivel laboratorio (desde 190 ml hasta 1 litro) y piloto para el procesamiento de sargazo (1 kg base seca) desarrollados en la Universidad Autónoma de Coahuila.

**Figura 2.** Producción de compuestos de interés industrial y biocombustibles a partir de un concepto de biorrefinería



**Fuente:** elaboración propia.

**Figura 3.** Desarrollo de tecnología para el procesamiento de sargazo

**Nota:** desarrollo de tecnología para el procesamiento de sargazo para la producción de compuestos de interés industrial y biocombustibles a nivel laboratorio y piloto desarrollado por el grupo de biorrefinería de la Universidad Autónoma de Coahuila.  
**Fuente:** elaboración propia.

## BIOTECNOLOGÍA AZUL

En un mundo caracterizado por cambios constantes y un rápido crecimiento de la población humana, las demandas de recursos alcanzan niveles cada vez más desafiantes. En este contexto, es de suma importancia explorar estrategias innovadoras que nos conduzcan al desarrollo de tecnologías capaces de satisfacer las crecientes necesidades de la humanidad. La *biotecnología azul* surge como una alternativa prometedora. Esta rama de la biotecnología ofrece una amplia gama de posibilidades para abordar las problemáticas actuales centrándose en la utilización sostenible de recursos acuáticos, desde el aprovechamiento de microorganismos (como las microalgas) hasta organismos mayores como las macroalgas. La biotecnología azul representa una poderosa herramienta para garantizar un futuro sostenible para nuestra sociedad.

Para el desarrollo sostenible de las biorrefinerías de tercera generación es importante no perder el enfoque sobre la conservación de

ecosistemas marinos, la mitigación del cambio climático y los principios de bioeconomía circular. En términos ambientales, el cultivo de microalgas y macroalgas puede actuar como remediador de la contaminación al absorber el CO<sub>2</sub>, al transformarlas, almacenarlas como biomasa y liberar oxígeno de una manera más eficiente que las plantas terrestres (Gao y Beardall, 2022). Aun así, uno de los principales obstáculos del desarrollo de biorrefinerías de tercera generación recae en la viabilidad tecno-económica. Para que una planta de biorrefinería sea sostenible y funcional tiene que considerar el uso de procesos eficientes, tanto productiva como energéticamente, priorizando la mínima generación de residuos y el máximo aprovechamiento de la materia prima.

La integración de tecnologías en la biorrefinería es una estrategia que permite la producción simultánea de varios productos, tales como biocombustibles y compuestos de alto valor agregado. Seguir esta estrategia aumenta la rentabilidad y viabilidad económica de los procesos. ¿Cómo se puede lograr esto? Con el uso de procesos secuenciales o de cascada, esto quiere decir que los subproductos de una etapa de producción pueden ser utilizados como materias primas para la siguiente etapa.

Tanto las biomásas de macroalgas como de microalgas son de suma importancia para las biorrefinerías de tercera generación, por lo que encontrar un punto para la producción y aprovechamiento simultáneo en cascada es primordial. Dentro del procesamiento del sargazo existen etapas en las cuales se generan residuos, como en el proceso de lavado. Aquí se generan líquidos ricos en sales, minerales y otros compuestos solubles. Saxena y colaboradores (2022) evaluaron el potencial de este “residuo” para su utilización como medio de cultivo para el crecimiento de la microalga *Spirulina platensis* con resultados favorables.

Por otro lado, diversas investigaciones en México se han llevado a cabo utilizando tratamientos hidrotérmicos para el fraccionamiento del sargazo y la obtención de polisacáridos que pueden ser fermentados para la producción de bioetanol. En este proceso se agrega una fracción de biomasa (sólida) con un solvente (agua) y se somete a altas temperaturas

y presiones. Comúnmente la fracción sólida es empleada y fermentada para la producción de bioetanol. La fracción líquida, además de ser rica en minerales y compuestos solubles como ciertos polisacáridos, posee los nutrientes esenciales que las microalgas requieren para su crecimiento y reproducción, por lo que podría servir como un medio alternativo de cultivo.

La abundancia del sargazo pelágico en el Atlántico tropical y subtropical y la capacidad de las nuevas tecnologías verdes para la obtención de biocompuestos de interés, como los tratamientos hidrotérmicos, convergen dentro del marco de la química verde hacia el potencial desarrollo de nuevos procesos biotecnológicos con valor agregado.

## PERSPECTIVAS Y CONCLUSIONES

La biomasa de macroalgas como el sargazo es un gran reto y oportunidad en el contexto mexicano para tratar de mitigar todos los problemas que conlleva su arribo masivo. Hoy en día, existen muchos desafíos tecnológicos para su manejo, desde la recolección en mar abierto y playas, el monitoreo constante de su composición química, el almacenamiento, el preprocesamiento, hasta la implementación de procesos sustentables y económicamente viables para su aprovechamiento final.

Desde la perspectiva de implementación de biorrefinerías de tercera generación, el desarrollo de ingeniería mexicana para el diseño, construcción e implementación de equipos para el procesamiento de esta biomasa todavía son necesarios. Las características químicas del sargazo lo hacen una materia prima interesante en la producción de compuestos de interés industrial y bioenergéticos. Comprender cómo esta biomasa se va fraccionando en sus componentes más importantes, así como entender la interacción con las condiciones de operación, por ejemplo, en los procesos hidrotérmicos, es fundamental para lograr disminuir consumos energéticos y de agua. Sin lugar a duda, la ingeniería juega un papel muy importante en el desarrollo tecnológico y de implementación de biorrefinerías de tercera generación.

Una alternativa para el desarrollo que demanda el gran volumen de sargazo que se encuentra en el mar o en las costas, es poder implementar tecnología que mundialmente ya se encuentra disponible. Por ejemplo, se podría replicar lo logrado en biorrefinerías de primera generación en la producción de bioetanol en los Estados Unidos y Brasil; sin embargo, esto representaría altos costos de inversión. Estudios y desarrollos en la cadena de valor de sargazo, como análisis tecno-económicos y de ciclo de vida, pueden ser una herramienta interesante para implementar procesos sustentables en el contexto mexicano.

Además, es importante recalcar que, a pesar de todas estas limitantes, hoy en día existen empresas legalmente constituidas en México que ya procesan y le dan un uso específico a la biomasa del sargazo. Algunos ejemplos son:

- CarbonWave. Transforma el sargazo en productos valiosos para la industria agrícola y cosmética, como los bioestimulantes y los emulgentes cosméticos, respectivamente.<sup>1</sup>
- The Seas We Love. Se enfoca en la contención y recolección del sargazo en altamar, para luego darle un uso productivo y sustentable, principalmente en el sector energético para la producción de biogás.<sup>2</sup>
- Dianco México. Transforma el sargazo principalmente en biofertilizantes y bioestimulantes. Además, cuenta con su propio sitio de disposición y planta de procesamiento.<sup>3</sup>
- Alquimar. Obtiene alginato de sodio con aplicaciones en la industria textil, alimentaria y farmacéutica. Además, ha desarrollado suplementos alimenticios con base en fucoidano.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> <https://carbonwave.com>

<sup>2</sup> <https://www.tswl.mx/>

<sup>3</sup> <https://diancomexico.com>

<sup>4</sup> <https://alquimar.com.mx>

- Dakatso. Desarrolla tecnologías para la contención y limpieza de sargazo en mar y playa, además de diversos productos que incluyen bloques de construcción y biofertilizantes.<sup>5</sup>

Sin lugar a dudas, todos estos productos son promesas que se pueden concretar a nivel piloto e industrial debido a la cantidad y volumen de biomasa de sargazo recolectado en términos de lo necesario para una biorrefinería en el contexto mexicano.

En conclusión, en este capítulo mostramos que las biorrefinerías de tercera generación pueden ser una importante alternativa en el aprovechamiento sostenible del sargazo a nivel nacional, a través de la producción de compuestos de interés industrial y bioenergéticos. Lo anterior conllevaría un impacto positivo en la sociedad. Darle un uso alternativo a esta macroalga disminuiría problemas ambientales asociados a los arribazones y ayudaría a la creación de empresas y empleo para zonas rurales del estado de Quintana Roo y de todo el país.

## REFERENCIAS

- Alves Lopes, I., Coelho Paixão, L., Souza da Silva, L. J., Almeida Rocha, A., Allan, A. K. y Amorim Santana, A. (2020). Elaboration and Characterization of Biopolymer Films with Alginate and Babassu Coconut Mesocarp. *Carbohydrate Polymers*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115747>
- Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J., Chablé-Villacís, R., Olguin-Maciel, E., Leal-Bautista, R. M. et al. (2021). Presence of Polyphenols Complex Aromatic “Lignin” in *Sargassum* spp. From Mexican Caribbean. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), 1-10. <https://doi.org/10.3390/jmse9010006>

<sup>5</sup> <https://www.dakatso.com.mx>

- Amador-Castro, F., García-Cayuela, T., Alper, H. S., Rodríguez-Martínez, V. y Carrillo-Nieves, D. (2021). Valorization of Pelagic *Sargassum* Biomass into Sustainable Applications: Current Trends and Challenges. *Journal of Environmental Management*, 283. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112013>
- Aparicio, E., Pinales-Márquez, C., Aguilar, C., Kostas, E. T., Robledo-Olivo, A. et al. (2021). High-Pressure Technology for *Sargassum* spp Biomass Pretreatment and Fractionation in the third Generation of Bioethanol Production. *Bioresource Technology*, 329, 124935. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124935>
- Aparicio, E., Rodríguez-Jasso, R. M., Lara, A., Loredó-Treviño, A. et al. (2020). Biofuels Production of Third Generation Biorefinery from Macroalgal Biomass in the Mexican Context: An Overview. *Sustainable Seaweed Technologies*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817943-7.00015-9>
- Bae, M., Kim, M. B., Park, Y. K. y Lee, J. Y. (2020). Health Benefits of Fucoxanthin in the Prevention of Chronic Diseases. *Biochimica et Biophysica Acta - Molecular and Cell Biology of Lipids*, 1865(11). <https://doi.org/10.1016/j.bbailip.2020.158618>
- Barboza-Rodríguez, R., Rodríguez-Jasso, R. M., Rosero-Chasoy, G., Rosales Aguado, M. L. y Ruiz, H. A. (2024). Photobioreactor Configurations in Cultivating Microalgae Biomass for Biorefinery. *Bioresource Technology*, 394, 130208. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130208>
- Barros, S. (2022). *Biofuels Annual*. United States Department of Agriculture (USDA)/ Global Agricultural Information Network (GAIN). [https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual\\_Sao%20Paulo%20ATO\\_Brazil\\_BR2022-0047.pdf](https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_BR2022-0047.pdf)
- Bonilla Loaiza, A. M., Rodríguez-Jasso, R. M., Belmares, R., López-Badillo, C. M., Araújo, R. G. et al. (2022). Fungal Proteins From *Sargassum* spp. Using Solid-State Fermentation as a Green Bioprocess Strategy. *Molecules*, 27(12), 3887. <https://doi.org/10.3390/molecules27123887>
- Cabello-Galindo, A., Ruiz, H. A., Nobre, C., Prado-Barragán, L. A., Rodríguez-Herrera, R. et al. (2019). Biological Catalysts of Brown Seaweed:

- Biochemical Properties, Production, and Applications. En M. L. Chavez-Gonzalez, N. Balagurusamy y C. Aguilar (eds.), *Advances in Food Bioproducts and Bioprocessing Technologies* (pp. 81-96). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429331817>
- Cabrera, R., Díaz-Larrea, J., Areces, A. J., Nuñez-García, L., Cruz-Aviña, J. R. y Radulovich, R. (2021). Registro de arribazón de *Sargassum* (Phaeophyceae) para la costa Atlántica de Costa Rica. *Hidrobiológica*, 31(1), 31-42. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2021v31n1/Cabrera>
- Cai, J., He, Y., Yu, X., Banks, S. W., Yang, Y. et al. (2017). Review of Physicochemical Properties and Analytical Characterization of Lignocellulosic Biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.072>
- Carillo, S., Bahena, A., Casas, M., Carranco, M. E., Calvo, C. C. et al. (2012). The Alga *Sargassum* spp. as Alternative to Reduce EGG Cholesterol Content. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 46(2), 181-186.
- Cui, Y., Zhu, L., Li, Y., Jiang, S., Sun, Q. et al. (2021). Structure of a Laminarin-Type  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3)-Glucan from Brown Algae *Sargassum Henslowianum* and its Potential on Regulating Gut Microbiota. *Carbohydrate Polymers*, 255, 117389. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117389>
- Del Río, P. G., Gullón, B., Pérez-Pérez, A., Romaní, A. y Garrote, G. (2021). Microwave Hydrothermal Processing of the Invasive Macroalgae *Sargassum Muticum* Within a Green Biorefinery Scheme. *Bioresource Technology*, 340. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125733>
- Espinosa-Antón, A. A., Jesús, R., Ferrer, L. y Ramírez-Linares, N. J. (2024). Arribazón de sargazo pelágico: ¿utilidad o problema para la agricultura local? *Bioagrocencias*, 17(1). <https://doi.org/10.56369/BAC.5360>
- Filote, C., Santos, S. C. R., Popa, V. I., Botelho, C. M. S. y Volf, I. (2021). Biorefinery of Marine Macroalgae into High-Tech Bioproducts: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(2), 969-1000. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01124-4>
- Flores-Contreras, E. A., Araújo, R. G., Rodríguez-Aguayo, A. A., Guzmán-Román, M., García-Venegas, J. C. et al. (2023). Polysaccharides from the *Sargassum*

- and Brown Algae Genus: Extraction, Purification, and Their Potential Therapeutic Applications. *Plants*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/plants12132445>
- Flórez-Fernández, N., Illera, M., Sánchez, M., Lodeiro, P., Torres, M. D. et al. (2021). Integrated Valorization of *Sargassum Muticum* in Biorefineries. *Chemical Engineering Journal*, 404, 125635. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894720317630>
- Gao, K. y Beardall, J. (2022). Using Macroalgae to Address UN Sustainable Development Goals Through CO<sub>2</sub> Remediation and Improvement of the Aquaculture Environment. *Applied Phycology*, 3(1), 360-367. <https://doi.org/10.1080/26388081.2022.2025617>
- González-Gloria, K. D., Rodríguez-Jasso, R. M., Shiva, Aparicio, E., Chávez González, M. L., Kostas, E. T. y Ruiz, H. A. (2021). Macroalgal Biomass in Terms of Third Generation Biorefinery Concept: Current Status and Techno-Economic Analysis - A review. *Bioresource Technology Reports*, 16, 100863. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100863>
- González-Gloria, K. D., Rodríguez-Jasso, R. M., Rosero-Chasoy, G., Kostas, E. T., Aparicio, E., Sánchez, A. y Ruiz, H. A. (2023). Scale-Up of Hydrothermal Processing: Liquid Hot Water and Pilot-Scale Tubular Steam Explosion Batch Reactor for Bioethanol Production Using Macroalgae *Sargassum* spp Biomass. *Bioresource Technology*, 369, 128448. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128448>
- Haji Esmaeili, S. A., Sobhani, A., Szmerekovsky, J., Dybing, A. y Pourhashem, G. (2020). First-Generation vs. Second-Generation: A Market Incentives Analysis for Bioethanol Supply Chains with Carbon Policies. *Applied Energy*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115606>
- Holdt, S. L. y Kraan, S. (2011). Bioactive Compounds in Seaweed: Functional Food Applications and Legislation. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 543-597. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>
- Kostas, E. T., Adams, J. M. M., Ruiz, H. A., Durán-Jiménez, G. y Lye, G. J. (2021). Macroalgal Biorefinery Concepts for the Circular Bioeconomy: A Review on Biotechnological Developments and Future Perspectives. *Renewable*

- and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111553. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111553>
- Kumar, S., Sahoo, D. y Levine, I. (2015). Assessment of Nutritional Value in a Brown Seaweed *Sargassum Wightii* and their Seasonal Variations. *Algal Research*, 9, 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.02.024>
- Lara, A., Rodríguez-Jasso, R. M., Loredó-Treviño, A., Aguilar, C. N., Meyer, A. S. y Ruiz, H. A. (2020). Enzymes in the Third Generation Biorefinery for Macroalgae Biomass. En S. P. Singh, R. R. Singhanía, Z. Li, A. Pandey y C. Larroche (eds.), *Biomass, Biofuels, Biochemicals*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819820-9.00017-X>
- López Miranda, J. L., Celis, L. B., Estévez, M., Chávez, V., van Tussenbroek, B. I. et al. (2021). Commercial Potential of Pelagic *Sargassum* spp. in Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.768470>
- Lourenço-Lopes, C., Fraga-Corral, M., Jiménez-López, C., Carpena, M., Pereira, A. G. et al. (2021). Biological Action Mechanisms of Fucoxanthin Extracted from Algae for Application in Food and Cosmetic Industries. *Trends in Food Science y Technology*, 117, 163-181. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.012>
- Muniswami, D. M., Chinnadurai, S., Sachin, M., Jithin, H., Ajithkumar, K. et al. (2023). Comparative Study of Biofertilizer/Biostimulant from Seaweeds and Seagrass in *Abelmoschus Esculentus* Crop. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01881-4>
- National Geographic (20 de marzo de 2024). ¿Por qué se produce el sargazo en México? [www.nationalgeographiccla.com/medio-ambiente/2023/06/por-que-se-produce-el-sargazo-en-mexico](http://www.nationalgeographiccla.com/medio-ambiente/2023/06/por-que-se-produce-el-sargazo-en-mexico)
- Nava, I. A. J. y Sánchez, H. H. (2020). El sargazo del mar Caribe mexicano. *Ciencia*, 71(4), 58-61.
- Pereira, L. (2021). Macroalgae. *Encyclopedia*, 1(1), 177-188. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1010017>
- Raheem, A., Prinsen, P., Vuppaladiyam, A. K., Zhao, M. y Luque, R. (2018). A Review on Sustainable Microalgae Based Biofuel and Bioenergy Production: Recent Developments. *Journal of Cleaner Production*, 181, 42-59. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.125>

- Renewable Fuels Association (2004). *Annual Ethanol production*. <https://ethanol-rfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>
- Rodríguez-Jasso, R. M., Mussatto, S. I., Pastrana, L., Aguilar, C. N. y Teixeira, J. A. (2011). Microwave-Assisted Extraction of Sulfated Polysaccharides (Fucoïdan) from Brown Seaweed. *Carbohydrate Polymers*, 86(3), 1137-1144. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.006>
- Sarmiento-Padilla, A. L., Morales-Contreras, B. E., Saxena, R., Belmares, R., Loaiza, A. B. et al. (2023). Innovative Extraction Methods to Obtain Bioactive Compounds from Aquatic Biomass. En A. K. Patel, R. R. Singhanía, C.-D. Dong y A. Pandey (eds.), *Sustainable Marine Food and Feed Production Technologies* (pp. 21-34). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003326946>
- Saxena, Rohit (2022). Producción de bioetanol a partir de *Spirulina platensis* integrando biorrefinerías de 2a y 3a generación [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Coahuila].
- Shiva, Climent Barba, F., Rodríguez-Jasso, R. M., Sukumaran, R. K. y Ruiz, H. A. (2022). High-Solids Loading Processing for an Integrated Lignocellulosic Biorefinery: Effects of Transport Phenomena and Rheology - A review. *Bioresource Technology*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127044>
- Siller-Sánchez, A., Ruiz, H. A., Aguilar, C. N. y Rodríguez-Jasso, R. M. (2019). Biorefinery Approach for Red Seaweeds Biomass as Source for Enzymes Production: Food and Biofuels Industry. En B. Parameswaran, S. Varjani y S. Raveendran (eds.), *Green Bio-processes: Enzymes in Industrial Food Processing* (pp. 413-446). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-3263-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-13-3263-0_2)
- Suutari, M., Leskinen, E., Fagerstedt, K., Kuparinen, J., Kuuppo, P. y Blomster, J. (2015). Macroalgae in Biofuel Production. *Phycological Research*, 63(1). <https://doi.org/10.1111/pre.12078>
- Tonon, T., Machado, C. B., Webber, M., Webber, D., Smith, J., Pilsbury, A., Cicéron, F., Herrera-Rodríguez, L., Jimenez, E. M., Suarez, J. V., Ahearn, M., Gonzalez, F. y Allen, M. J. (2022). Biochemical and Elemental Composition

- of Pelagic *Sargassum* Biomass Harvested across the Caribbean. *Phycology*, 2(1), 204-215. <https://doi.org/10.3390/phycolgy2010011>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148852>
- Xuan Cuong, D. (2020). Laminarin (Beta-Glucan) of Brown Algae *Sargassum mcclurei*: Extraction, Antioxidant Activity, Lipoxygenase Inhibition Activity, and Physicochemistry Properties. *World Journal of Food Science and Technology*, 4(1), 31. <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20200401.15>
- Zubia, M., Payri, C. y Deslandes, E. (2008). Alginate, Mannitol, Phenolic Compounds and Biological Activities of Two Range-Extending Brown Algae, *Sargassum Mangarevense* and *Turbinaria Ornata* (Phaeophyta: Fucales), from Tahiti (French Polynesia). *Journal of Applied Phycology*, 20(6), 1033-1043. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9303-3>

# Cuarta Parte

CIMIENTOS SOCIALES



## 8. Arribazones de sargazo: conocimiento local para atender y entender sus efectos en el bienestar humano

Judith Rosellón Druker

Aunque la llegada masiva y sostenida de sargazo a Quintana Roo comenzó en 2011 con la formación del Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (Wang et al., 2019), no fue sino hasta 2014-2015 donde la cantidad de sargazo varado en las playas de Quintana Roo fue tan grande que se percibió a este fenómeno como un punto de inflexión (Rosellón-Druker et al., 2023) con consecuencias mayoritariamente negativas para los ecosistemas y comunidades locales del estado (p. ej. van Tussenbroek et al., 2017; Rodríguez-Martínez et al., 2019; Casas-Beltrán et al., 2020). No obstante, el conocimiento científico existente (determinado por evidencia empírica) sobre la magnitud y dirección de los efectos del sargazo, especialmente en lo económico y social a diversas escalas espaciales (municipal y estatal), es nulo o muy limitado (Fraga y Robledo, 2022).

Siempre que sea necesario avanzar en el conocimiento de un fenómeno natural, sobre todo en aquellos casos donde los vacíos en su entendimiento son amplios, formas alternativas de los saberes (p. ej. ancestral, tradicional, local o comunitario) pueden proporcionar datos útiles (p. ej. biodiversidad, cambios en el ecosistema, cambios en el bienestar humano, prioridades de conservación) y ser primordiales en la toma de decisiones para el desarrollo de políticas públicas (Gilchrist et al., 2005). Además, conjuntar la

ciencia con otros tipos de saberes puede derivar en una coproducción o elaboración colectiva de conocimiento entre diferentes grupos y sectores que puede traducirse en decisiones de manejo costero que sean sostenibles, integrales, efectivas y equitativas (Palacios-Agundez et al., 2013; Wadsworth et al., 2014) (figura 1).

Las comunidades locales de Quintana Roo han desarrollado estrategias propias para abordar el fenómeno de arribazones de sargazo, ya que las acciones de un solo sector (p. ej. gubernamental) frecuentemente no son suficientes para prevenir o mitigar los riesgos socio-ecológicos asociados. Estas estrategias de manejo surgen de un profundo conocimiento que las comunidades tienen sobre su ecosistema local, basado en la interacción con el ambiente y en la observación diaria y la experiencia práctica (Ingram et al., 2018). A este se le conoce como conocimiento ecológico local (CEL) (Olsson y Folke 2001; Ingram et al., 2018).

**Figura 1.** Integración del conocimiento local y científico para la toma óptima de decisiones



**Fuente:** elaboración propia.

El objetivo de este capítulo es demostrar que, a partir del conocimiento local y perspectivas de las comunidades locales del estado de Quintana Roo, no sólo es posible caracterizar y entender los efectos del sargazo en el bienestar humano, sino también incluir este conocimiento local en la toma de decisiones y acciones dentro de otros sectores de la población. Esto es fundamental para avanzar hacia el manejo integral de este fenómeno.

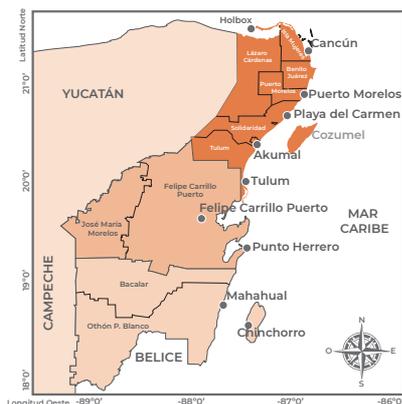
Para recopilar el CEL de las comunidades de Quintana Roo, tuvimos la oportunidad de visitar la mayoría de los municipios costeros de enero a marzo de 2022. Estos municipios se pueden agrupar en tres regiones: zona norte, maya y sur (figura 2), las cuales se han determinado con base en características geográficas, integración territorial, actividades productivas, actividades culturales y sociales señaladas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2021). Además, las condiciones socioeconómicas en cada zona varían, lo cual puede traducirse en un nivel de riesgo y vulnerabilidad (ante cualquier fenómeno natural, incluyendo el sargazo) muy diferenciado por zona. Por ejemplo, en la zona norte el 37.7% de su población se encuentra en situación de pobreza moderada y el 10.2% en situación de pobreza extrema, mientras que en la zona maya estos porcentajes son 52.6 y 28%, respectivamente (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social [Coneval], 2020).

Recopilamos el CEL en estas comunidades, entre otros objetivos, para caracterizar la afectación de los arribazones de sargazo al bienestar, a partir de entrevistas individuales semiestructuradas y talleres participativos (la metodología completa puede consultarse en Rosellón-Druker et al., 2023). Para estas entrevistas y talleres elegimos a participantes de diversos grupos, incluidos investigadores locales, educadores, industria privada, hoteleros, tomadores de decisiones (gobierno municipal), promotores turísticos, organizaciones no gubernamentales (ONG) y pescadores.

Para caracterizar las afectaciones del sargazo, solicitamos a los participantes que nos describieran cómo el sargazo había tenido (o no) un efecto en su vida diaria. Estas menciones fueron contabilizadas y

asignadas a una categoría y componente del bienestar humano previamente descritos por Breslow y colaboradores (2016). También registramos la dirección (positiva o negativa) del vínculo entre el sargazo y el efecto, ya que no todos los efectos fueron negativos.

**Figura 2.** Mapa que muestra las comunidades de estudio en las distintas zonas geográficas del estado de Quintana Roo



**Nota:** el color naranja oscuro comprende los municipios de la zona norte, el naranja medio los municipios de la zona maya y el naranja claro los municipios de la zona sur. Holbox se tomó como una comunidad de control, ya que no es afectada por el sargazo sino por pasto marino.

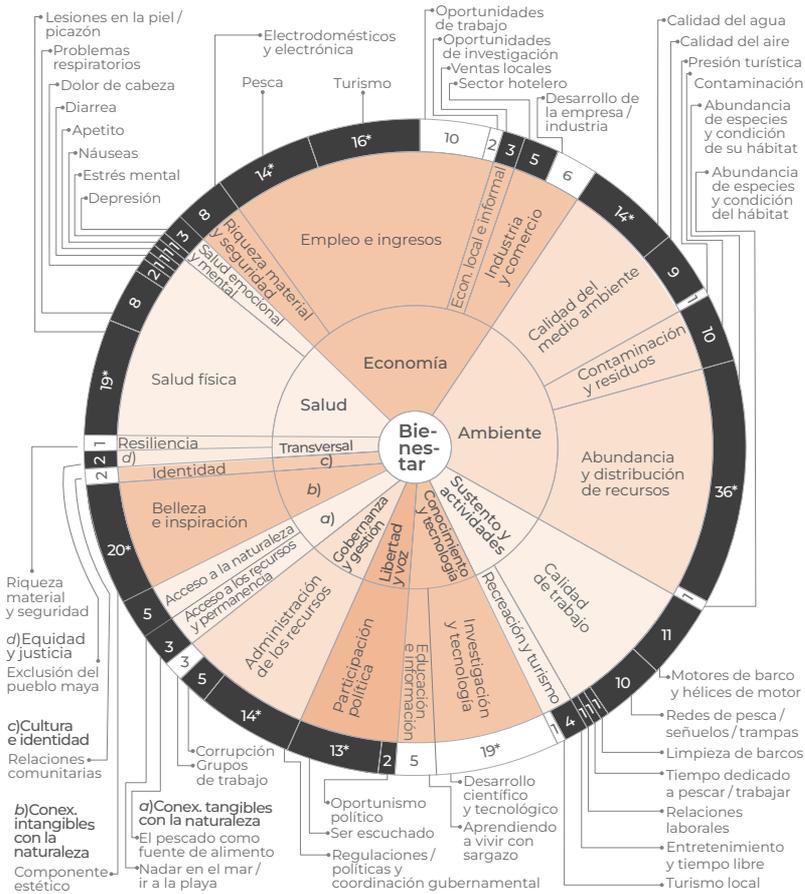
**Fuente:** elaboración propia.

A continuación, describimos cada una de las consecuencias del fenómeno de los arribazones en el bienestar (figura 3). Estos efectos son variados y permitirían a diversos sectores de la población, como la academia y el gobierno, desarrollar líneas de investigación con un alto impacto social, así como el desarrollo de mejores políticas públicas que influyan en la calidad de vida de estas comunidades. En cada una de las categorías del bienestar proponemos algunas de estas acciones basadas en las respuestas de los participantes.

Empezamos describiendo las categorías del bienestar mayormente afectadas, de acuerdo con los participantes de este estudio: 1) ambiente, 2) economía y 3) salud. Después, describimos las demás categorías del bienestar humano que, aunque con menos menciones, son de relevancia ya que proveen

información, por ejemplo, de afectaciones a participantes de comunidades mayas. Esto puede traducirse en información vital para la equidad e inclusión de diversas comunidades cuando se planea un manejo integral del sargazo.

**Figura 3.** Categorías y componentes del bienestar humano afectados por los arribazones masivos de sargazo



**Nota:** categorías (círculo interno) y componentes (círculo medio) del bienestar humano afectados por el fenómeno de los arribazones masivos de sargazo, según el conocimiento local y perspectivas de participantes de Quintana Roo. Se enlistan los efectos positivos (blanco) y negativos (negro) del sargazo (círculo externo). También se muestra el número de menciones de cada efecto, y los efectos mayormente mencionados por los participantes se encuentran señalados con un asterisco.

**Fuente:** reproducida y traducida de Rosellón-Druker et al. (2023).

## CATEGORÍA AMBIENTE

De manera transversal a todas las comunidades, hubo un gran énfasis en cómo los arribazones han tenido un impacto negativo en los ecosistemas locales. La mayoría de las menciones dentro del componente de calidad del ambiente indicaron que el sargazo está afectando la calidad del agua en las playas locales. Por ejemplo, en Mahahual comentaban que “La temperatura del agua aumenta muchísimo cuando éste se acumula”.

En casi todas las comunidades se mencionó que, con el sargazo, “el agua se contamina”. Los comentarios sobre la calidad del agua se enfocaron principalmente en dos vertientes: la primera, relacionada con una baja cantidad de oxígeno en el agua cuando estas macroalgas están presentes; la segunda, relacionada con sus lixiviados. Dentro de este mismo componente los participantes mencionaron también que el sargazo está teniendo un efecto negativo en la calidad del aire debido a los gases que produce durante su descomposición.

Todos los efectos del sargazo dentro de este componente fueron negativos, con una excepción. El efecto positivo mencionado por un participante se refería a que, cuando hay mucho sargazo en la playa se reduce la presión turística (es decir, la afluencia de personas) en dicho ecosistema, lo cual puede ser benéfico en el corto y mediano plazo.

Dentro del componente de *contaminación y residuos*, algunos participantes mencionaron que los arribazones traen consigo basura, lo cual crea un “paisaje contaminado”. Algunos participantes también aludieron a que las acciones para coleccionar las macroalgas en el mar y en la playa son contaminantes porque las maquinarias para hacerlo “consumen mucho diésel y producen más contaminación”. Todos los efectos del sargazo se consideraron negativos dentro de este componente.

En el componente de *abundancia y distribución de recursos*, encontramos el efecto negativo mencionado por todos los participantes: el sargazo

ha disminuido la abundancia de diversas especies marinas, relacionado a su vez a una disminución de la calidad del hábitat de estas especies. Es importante notar que este efecto negativo fue incluso más mencionado por los participantes en comparación con los efectos en el turismo o la economía. En un evento de arribazón masivo “todo muere a lo largo de la costa” y “hay un deterioro de la costa”, de acuerdo con los participantes.

En la zona norte varios participantes refirieron haber experimentado cambios en ciertas especies. Por ejemplo, en el caso de las tortugas nos comentaron: “era común que los hoteles organizaran visitas con sus huéspedes para ver tortugas desovando, o para presenciar diversas aves dentro de sus predios. Ahora eso ya no sucede”. En las zonas centro y sur, pescadores tanto de Punta Herrero como de Banco Chinchorro nos comentaron que las langostas mueren irremediablemente “si están en contacto con lo que suelta el alga”. Dentro de este componente, un participante de la zona sur refirió un posible efecto positivo del sargazo, especificando que trae consigo “larvas de muchos peces”, lo cual puede ser bueno para las pesquerías locales.

**Tabla 1.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría ambiente

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Privado y académico	Desarrollar programas de medición de impacto ambiental de acciones de contención, colecta y limpieza del sargazo
Académico	Ampliar el conocimiento existente sobre el impacto de arribazones en la abundancia y diversidad de especies marinas, así como en la alteración del ecosistema costero (p. ej. calidad del agua, erosión de playas). Además, es importante regionalizar estos análisis con un énfasis en zonas rurales o no turísticas

**Fuente:** elaboración propia.

Gobierno

Coordinar esfuerzos multisectoriales para la medición de vulnerabilidad, exposición y riesgo para cada zona o comunidad del estado, en relación con el fenómeno del sargazo. Lo anterior permitiría hacer un uso más efectivo de los recursos disponibles en comunidades con un mayor riesgo socioambiental

Desarrollar un sistema nacional de indicadores ambientales que permita un monitoreo sistemático de diversas variables ambientales y ecológicas para cuantificar las afectaciones asociadas a este fenómeno

## CATEGORÍA ECONOMÍA

La mayoría de los participantes en esta categoría hablaron sobre los efectos del sargazo en el componente de *empleo e ingresos*. Los efectos negativos fueron mayormente percibidos en lo referente al turismo y a las actividades pesqueras. Por ejemplo, en Mahahual, la mayoría de los participantes del sector hotelero y restaurantero han experimentado los arribazones como algo que “les cambió la vida”. Expresaron que a muchas personas de la comunidad esto los dejó en quiebra (varios negocios cerraron en 2018) y que, si no hubiera sido por los esfuerzos comunitarios para hacer frente al fenómeno (p. ej. la puesta de barreras artesanales para contener la biomasa en el mar, evitando que inunde las playas), Mahahual “hubiera dejado de existir”.

En esta comunidad también nos expresaron que, durante los arribazones, los turistas que llegan en crucero no bajan al pueblo y por lo tanto no hay derrama económica, pero sí una afectación ambiental por la llegada de enormes cantidades de basura y agua de lastre de estos cruceros. En general, los hoteleros de todas las zonas del estado nos comentaron que “los turistas no quieren quedarse en playas y hoteles donde hay mucho sargazo, por lo que se pierden ingresos”. También tienen que lidiar de manera constante con “turistas que presentan quejas e incluso demandan un reembolso de su estadía”. También existe la percepción entre los participantes de la zona norte de que, durante los

arribazones, los turistas cambian de actividades. Por ejemplo, en vez de buscar quedarse en la playa realizan “turismo de alberca”, por lo cual prefieren quedarse en hoteles que cuenten con esas comodidades.

En el caso de la actividad pesquera, los pescadores de Banco Chinchorro y Punta Herrero afirmaron que “el sargazo tiene un enorme impacto en nuestras pesquerías”. Las cooperativas entrevistadas se dedican principalmente a la pesca de langosta y todos los participantes coincidieron en que las cantidades masivas de estas macroalgas se relacionan con una disminución de la producción pesquera. Los pescadores se refirieron principalmente a dos tipos de afectaciones en la pesquería de langosta:

1. El sargazo “mata” a las langostas en las trampas que se encuentran en el mar cuando los lixiviados del sargazo entran en contacto con ellas.
2. El sargazo “mata” a las langostas en los chiquereros (lugar en donde los pescadores depositan a la langosta viva una vez que las traen a la costa) cuando el alga cubre estos contenedores.

Aproximadamente un 29% de las menciones dentro de este mismo componente se relacionaron con efectos positivos del sargazo. Estos efectos se refieren a que la presencia de sargazo ha creado nuevas fuentes de empleo. Por ejemplo:

1. Los “sargaceros”, personas a quienes se les paga por limpiar el sargazo en las playas de manera manual (con rastrillo y carretillas).
2. Trabajadores en empresas de manejo del sargazo para, entre otras acciones, operar las embarcaciones y maquinarias pesadas (p. ej. tractores, bandas transportadoras, etc.).
3. Trabajadores en empresas de transporte que llevan el sargazo a sitios de disposición final.
4. Investigadores que ahora enfocan sus líneas de estudio al entendimiento y manejo de esta problemática.

Dentro del componente de *riqueza material y seguridad*, los participantes refirieron que los arribazones pueden tener un efecto negativo en sus activos materiales y, por lo tanto, repercutir en su capacidad de consumo general. Esto lo relataron principalmente pescadores (zona centro y sur) que viven gran parte del año en pueblos pesqueros frente al mar. Varios de los pescadores indicaron que sus aparatos electrónicos como radio, televisor y refrigerador se estropean constantemente. Esto lo adjudican a “los gases que suelta el sargazo y que corroe todo”.

Dentro del componente de *economía local e informal* pescadores de Punta Herrero indicaron que antes llegaban más turistas a su pueblo pesquero y que aprovechaban su llegada para venderles algún “recuerdito” o alimento. Sin embargo, esta actividad desapareció por completo una vez que empezaron los arribazones.

En el componente de *industria y comercio*, un poco más de la mitad de los efectos del sargazo se consideraron positivos. Estos efectos se refirieron principalmente a la creación de empresas que han valorizado esta biomasa y a las empresas que han incursionado en el desarrollo tecnológico e innovación para maquinaria de recolección y limpieza con bajo impacto ambiental. Los efectos negativos en este componente se centraron en el sector hotelero, donde los participantes de todas las zonas especificaron que “tenemos que gastar mucho dinero para mantener limpias nuestras playas y esto representa una enorme carga económica anual. Estamos casi arruinados por eso”.

**Tabla 2.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría economía

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Privado y académico	Desarrollar estudios de impacto económico del sargazo en diversos sectores, incluido el turístico

---

Académico	<p>Aunque ya existen algunas evidencias científicas de un posible desplazamiento del turismo de playa a otro tipo de turismo en Quintana Roo (p. ej. turismo de cenotes, Casas-Beltrán et al., 2020), es necesario ampliar el conocimiento sobre otros posibles desplazamientos, por ejemplo, a zonas arqueológicas o parques recreativos</p> <p>El nivel de corrosión en varios objetos domésticos y metálicos descrito por los pescadores pudiera indicar una exposición a niveles potencialmente tóxicos de sulfuro de hidrógeno. La exposición a estos gases en comunidades pesqueras ha sido muy poco estudiada, por lo que se requieren estudios enfocados en estas comunidades</p>
<b>Fuente:</b> elaboración propia.	

---

Gobierno	<p>Desarrollar un sistema nacional de indicadores económicos que permitan un monitoreo sistemático de diversas variables económicas y sociales para cuantificar las afectaciones asociadas a este fenómeno</p> <p>Crear campañas de concientización dirigidas a los turistas para un mayor entendimiento de qué es el sargazo y por qué se encuentra en las playas</p>
----------	--

---

## CATEGORÍA SALUD

En el componente de *salud física*, todos los efectos del sargazo se consideraron negativos. La mayoría de las menciones (sobre todo por pescadores de la zona centro y sur) se enfocaron en las afectaciones a la piel, específicamente cuando se nada en aguas inundadas por estas algas. Los pescadores nos contaban que cuando tienen que meterse al agua para recuperar las trampas de langosta, el sargazo les “producía mucha picazón, dejando la piel muy roja”. Algunos participantes incluso dijeron que “es como ácido para la piel” y que “genera llagas y ampollas por más de dos semanas”. La mayoría de los pescadores atribuían estas afectaciones a los “químicos que suelta el alga podrida” (lixiviados). También comentaban que, si un pescador entra al agua con alguna herida previa en la piel, “es casi seguro que la herida se infecte”.

Otro problema de salud recurrentemente mencionado por los participantes fueron los problemas respiratorios. Estos fueron transversales a

todas las zonas. En general los participantes indicaban que “no se puede respirar bien cuando hay mucho sargazo”. Además, se aludía constantemente a un olor insoportable que causa otros problemas de salud como dolores de cabeza, falta de apetito o náuseas.

Los participantes que mencionaron efectos del sargazo relacionados con el componente de *salud mental* estaban en la zona sur, concretamente en Mahahual. En cuestión de estrés mental un participante mencionó que “nos preocupamos constantemente de que las generaciones futuras tengan acceso a un medio ambiente sano y limpio”. La depresión también fue algo mencionado por algunos de los participantes; por ejemplo, un restaurantero comentó que “no hay esperanza. Estamos desesperados porque nuestros negocios están cerrando. Un colega tenía depresión y esto le provocó diabetes”. Esta afirmación podría indicar que los efectos negativos del sargazo en la salud mental también pudieran estar influyendo en los aspectos de la salud física.

**Tabla 3.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría salud

**Fuente:** elaboración propia.

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Académico	Desarrollar sistemas de monitoreo de la calidad del aire para obtener mediciones de las concentraciones de gases liberados durante la descomposición del sargazo. La localización de estos sistemas debe priorizarse según el nivel de riesgo de las diversas comunidades
Gobierno	Coordinar, a través de diversas instancias de salud pública, una evaluación integral de los efectos de arribazones en la salud humana, incluyendo componentes psicológicos

## CATEGORÍA SUSTENTO Y ACTIVIDADES

En el componente *calidad de trabajo*, la mayoría de los participantes (todos pescadores de la zona centro y sur) indicaron que los arribazones han tenido efectos perjudiciales en la pesquería y han impactado el esfuerzo pesquero.

Durante época de arribazón se requiere un mayor número de horas o días dedicados a pescar. Por ejemplo, los motores de las embarcaciones tienden a enredarse con el alga, lo que implica detener la embarcación constantemente para removerla. En cuanto a las redes de pesca, los pescadores nos comentaron que éstas se llenan de sargazo y se enredan o rompen fácilmente. Los pescadores de langosta también expresaron que las trampas para langostas deben estar cada vez más alejadas de la costa, para evitar el contacto con el agua en donde ya hay sargazo en estado de descomposición: “tenemos que viajar más lejos para recuperar las trampas y eso implica tiempo y dinero”.

Finalmente, algunos pescadores indicaron que la presencia del sargazo también ha generado rencillas entre ellos, ya que no todos quieren trabajar horas extra para limpiarlo, lo cual es necesario cuando hay mucho recale porque, de lo contrario, “inundaría sus casas”.

En el componente de *recreación y turismo*, participantes de todas las zonas aludieron a un efecto negativo del sargazo sobre su tiempo libre y la calidad de sus actividades de recreación. Por ejemplo, en temporada de arribazón las salidas a la playa ya no se llevan a cabo o no se disfrutan como antes. En la zona maya algunos participantes mencionaron un efecto positivo del sargazo dentro de este componente. Consideraron que las oportunidades para visitar un parque acuático, un club de playa o un hotel son más asequibles económicamente para ellos durante los arribazones, cuando el turismo internacional podría reducirse.

**Tabla 4.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales.  
Categoría sustento y actividades

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Académico	Realizar estudios de afectación económica del sargazo en el sector pesquero del estado

**Fuente:** elaboración propia.

Gobierno

Promover y garantizar que los pueblos pesqueros tengan la capacidad de limpiar sus playas. Se podría reimplementar, por ejemplo, el programa de trabajo temporal de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp) de 2018. A través de este programa, los pescadores limpiaban el sargazo de sus playas a cambio de una compensación económica, lo cual implicaba un incentivo para limpiar el sargazo y a la vez contar con un ingreso económico adicional que les permitía quedarse más tiempo al lado de sus familias durante temporada de veda (Rosellón-Druker y Rosellón-Hernández, 2023)

## CATEGORÍA CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA

Esta fue la única categoría del bienestar en donde todos los participantes describieron al sargazo como algo positivo dentro del componente único de *investigación y tecnología*. En todas las zonas coincidieron en que la presencia masiva de estas macroalgas se ha traducido en la creación de nuevas vertientes de investigación científica y desarrollo tecnológico, lo cual desemboca en la existencia de varios proyectos productivos y la generación de conocimiento. Además, algunos participantes mencionaron que el tema ha levantado interés en los jóvenes del estado, algunos de los cuales han incursionado en investigaciones relacionadas con los usos potenciales de esta biomasa. Por ejemplo, en la zona maya, las instituciones de educación superior cuentan con varios grupos de trabajo realizando investigación sobre el fenómeno e incluso se han desarrollado emprendimientos a partir de algunos de estos proyectos, como es el caso de la empresa Bioremar (Rosellón-Druker et al., 2022).

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 5.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría conocimiento y tecnología

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Gobierno	Fomentar el desarrollo de la ciencia y tecnología en niños y jóvenes del estado para que propongan estrategias de manejo y uso del sargazo

### CATEGORÍA LIBERTAD Y VOZ

En esta categoría los participantes concordaron en que este fenómeno afectó negativamente el componente de *participación política* con relación a la interacción de las comunidades con sus autoridades municipales y estatales. En general, los participantes aluden a la condición de “no ser escuchados por las autoridades, así como a la falta de coordinación de las instituciones gubernamentales para tener regulaciones claras para el manejo y uso del sargazo”. Ciertos participantes también aludieron al oportunismo político ya que “algunas autoridades sólo aprovechan los arribazones para tomarse fotos y prometer una solución que nunca llega”. También explicaron que la atención a esta problemática sólo existe durante eventos de arribazón y que cuando llega poco sargazo es como “si el problema hubiera desaparecido”.

**Tabla 6.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales.  
Categoría Libertad y Voz

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Gobierno	<p>Coordinar la generación de una norma oficial mexicana (o marco normativo similar) para el manejo integral del sargazo</p> <p>Proveer oportunidades financieras multianuales para atender el fenómeno de manera continua y no sólo en épocas de arribazón</p> <p>Incluir a las comunidades locales en la toma de decisiones a nivel municipal y estatal</p>

## CATEGORÍA GOBERNANZA Y GESTIÓN

Esta categoría incluye el componente de *administración de recursos*. Varios participantes en todas las zonas comentaron que “existe una burocracia que impide la industrialización del sargazo”. Por ejemplo, mencionaron que hay personas interesadas en darle un uso inmediato al alga, pero, por disposición oficial, no se puede retirar la biomasa del mar o de la playa sin contar con una serie de permisos. Además, comentaron que “no hay coordinación entre la Semar, el estado y el municipio”. También comentaron que hay una mala gobernanza con relación a los sitios de disposición, ya que “los sitios que existen están llenos a su total capacidad y no hay dónde poner tanto sargazo”. Los participantes también mencionaron que el sargazo ha traído consigo problemas de corrupción en el estado. Por ejemplo, algunos participantes comentaron que “hay un desvío de dinero asignado para actividades de limpieza y no sabemos a dónde va a parar ese recurso”.

Tabla 7. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales.  
Categoría gobernanza y gestión

Dentro de este mismo componente hubo participantes que también refirieron un efecto positivo del sargazo. Percibieron que la formación de grupos multidisciplinarios para la atención de este fenómeno ha sido algo positivo porque ha incrementado la comunicación no sólo entre diversos sectores, sino también entre diversos países. Por lo tanto, ven al sargazo como un área de oportunidad para conjuntar esfuerzos y capacidades nacionales e internacionales en busca de soluciones a un desafío compartido.

Fuente: elaboración propia.

SECTOR

ACCIONES PROPUESTAS

Gobierno	<p>Desarrollar un manual de procedimientos (delinear jurisdicción, procedimientos administrativos y costos en cada una de las etapas de la cadena de valor) dirigido a actores interesados en desarrollar un uso sustentable del sargazo. Lo anterior permitiría reducir las incertidumbres y aclarar rutas hacia la comercialización de un producto final</p> <p>Determinar con claridad la localización y características de sitios de disposición en el estado</p> <p>Crear estaciones de transferencia a nivel municipal con el objetivo general de contar con puntos de distribución de sargazo como materia prima</p>
----------	---

## CATEGORÍA CONEXIONES

**Tangible con la Naturaleza**  
 Tabla 8. Operación Atunero: vínculo local a acciones multisectoriales.  
 Categoría conexiones tangibles con la naturaleza

En relación con los componentes de *acceso a los recursos naturales* y *acceso a la naturaleza*, las comunidades del centro y sur han visto un cambio sustancial a partir del inicio de los arribazones. Por ejemplo, en Punta Herrero, un pescador contó lo siguiente: “era común pescar afuera de mi casa para desayunar o comer, pero con la llegada del sargazo ya no hay peces en la orilla o en el mangle”. También nos dijeron que “los niños ya no pueden bañarse en el mar porque a ellos les afecta más el sargazo”.

Mientras tanto, uno de los participantes de Banco Chinchorro nos comentó que “era muy común que, por las tardes, después de trabajar, saliámos a pasear por toda la orilla del banco. Era muy bonito. Ahora casi ya no lo hacemos porque no nos gusta caminar sobre el sargazo. Es como caminar sobre un lodo que te llega a las rodillas”. Esto sin duda refleja un cambio drástico en la relación de estas comunidades con su ecosistema.

SECTOR

ACCIONES PROPUESTAS

Academia

Desarrollo de estudios de impacto social con énfasis en comunidades de alto riesgo

## CATEGORÍA CONEXIONES INTANGIBLES CON LA NATURALEZA

**Fuente:** elaboración propia.

Varios participantes de todas las zonas aludieron a un efecto negativo del sargazo en el componente de *belleza natural e inspiración*, específicamente en relación con las playas de Quintana Roo. Comentarios como: “las hermosas aguas azul turquesa se volvieron café” y “el panorama es deprimente” fueron repetidos varias veces. También hubo comentarios referentes a otro tipo de afectación escénica. Por ejemplo, en la zona norte nos comentaron que “ahora hay menos pájaros” y que “la playa está contaminada con sargazo podrido, basura y animales muertos”.

**Tabla 9.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales.  
Categoría conexiones intangibles con la naturaleza

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Academia	Desarrollo de herramientas y modelos que permitan evaluar activos intangibles en los ecosistemas locales y su afectación en relación con los arribazones

## CATEGORÍA CULTURA E IDENTIDAD

El componente *identidad* se relacionó con un efecto positivo del sargazo. Algunos participantes expresaron un profundo sentido de agradecimiento ante las personas que ayudan a limpiarlo de sus playas. También expresaron la experiencia que han adquirido para desarrollar soluciones locales, lo que los ha convertido en líderes de sus comunidades. Por lo

tanto, este fenómeno ha incentivado la innovación local y las capacidades de liderazgo especialmente en comunidades del centro y sur.

**Tabla 10.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales.  
Categoría cultura e identidad

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Gobierno	Reconocimiento a los esfuerzos individuales y colectivos para hacer frente a los arribazones Recopilar y documentar las historias y experiencias de comunidades como Mahahual, donde el sector restauranero, por ejemplo, ha desarrollado sus propias estrategias de manejo a partir de un conocimiento profundo de su ecosistema (Rosellón-Druker y Rosellón-Hernández, 2023)

## CATEGORÍA TRANSVERSAL

En términos de equidad y justicia, los participantes de la comunidad maya enfatizaron que existe una exclusión de su comunidad cuando se trata de sargazo porque, durante los arribazones, la atención de las autoridades estatales es desplazada hacia las zonas turísticas. Esta comunidad también expresó que el gobierno estatal podría incentivar y promover un mayor turismo en la zona maya durante épocas de mayor arribazón, pero desafortunadamente esto no ocurre. En el componente de resiliencia, los participantes expresaron que se han “acostumbrado al problema, afrontándolo de manera constante” y que, a diferencia de los turistas, ellos ya lo ven como “algo normal en su vida diaria”.

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 11.** Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales.  
Categoría transversal

SECTOR	ACCIONES PROPUESTAS
Gobierno	Desarrollo y fortalecimiento de programas de turismo ecológico, gastronómico, cultural, etc., enfocados en las comunidades de la zona maya, así como de programas de equidad dirigidos a la comunidad maya Realizar planes de manejo integral del sargazo que consideren el conocimiento local y las perspectivas de las localidades del estado

## CONCLUSIÓN

A través de las páginas de este capítulo, esperamos haber ilustrado la trascendencia de incluir el conocimiento local de las comunidades costeras en el entendimiento de las afectaciones de los arribazones al bienestar humano. Este tipo de estudios pone en evidencia la diferenciación, a nivel local y comunitario, de las afectaciones y riesgos socioambientales asociados a este fenómeno de reciente aparición.

También proveemos de información que pudiera dar pautas a los científicos de las necesidades apremiantes de investigación (p. ej. cuantificar afectaciones en la salud y economía en los pueblos pesqueros del estado), y al gobierno de las medidas más apremiantes de manejo (p. ej. determinar zonas de mayor riesgo socioambiental).

Las acciones futuras para atender y mitigar este fenómeno deben continuar siendo multisectoriales. Si se excluye la voz y conocimiento de las comunidades locales, las acciones llevadas a cabo por otros sectores de la población como el privado, el académico y el gobierno, seguirán adoleciendo de una capacidad real de establecerse y mantenerse en el largo plazo.

## REFERENCIAS

- Breslow, S. J., Sojka, B., Barnea, R., Basurto, X., Carothers, C. et al. (2016). Conceptualizing and Operationalizing Human Wellbeing for Ecosystem

- Assessment and Management. *Environmental Science and Policy*, 66, 250-259.
- Casas-Beltrán, D. A., Gallaher, C. M., Hernández-Yac, E., Febles-Moreno, K., Voglesonger, K. et al. (2020). Seaweed Invasion! Temporal Changes in Beach Conditions Lead to Increasing Cenote Usage and Contamination in the Riviera Maya. *Sustainability*, 12(6), 2474.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) (2020). *Estadísticas de pobreza en Quintana Roo*. <https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/QuintanaRoo/Paginas/principal.aspx>
- Fraga, J. y Robledo, D. (2022). Covid-19 and *Sargassum* Blooms: Impacts and Social Issues in a Mass Tourism Destination (Mexican Caribbean). *Maritime Studies*, 21(2), 159-171.
- Gilchrist, G., Mallory, M. y Merkel, F. (2005). Can Local Ecological Knowledge Contribute to Wildlife Management? Case Studies of Migratory Birds. *Ecology and Society*, 10(1).
- Ingram, R. J., Oleson, K. L. y Gove, J. M. (2018). Revealing Complex Social-Ecological Interactions Through Participatory Modeling to Support Ecosystem-Based Management in Hawai'i. *Marine Policy*, 94, 180-188.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) (2021). *Panorama Sociodemográfico de Quintana Roo*. <https://www.inegi.org.mx/>.
- Olsson, P. y Folke, C. (2001). Local Ecological Knowledge and Institutional Dynamics for Ecosystem Management: A Study of Lake Racken Watershed, Sweden. *Ecosystems*, 4(2), 85-104.
- Palacios-Agundez, I., Casado-Arzuaga, I., Madariaga, I. y Onaindia, M. (2013). The Relevance of Local Participatory Scenario Planning for Ecosystem Management Policies in the Basque Country, northern Spain. *Ecology and Society*, 18(3).
- Rodríguez-Martínez, R. E., Medina-Valmaseda, A. E., Blanchon, P., Monroy-Velázquez, L. V., Almazán-Becerril, A. et al. (2019). Faunal Mortality Associated with Massive Beaching and Decomposition of Pelagic

- Sargassum*. *Marine Pollution Bulletin*, 146, 201-205.
- Rosellón-Druker, J., Calixto-Pérez, E., Escobar-Briones, E., González-Cano, J., Masiá-Nebot, L. y Córdova-Tapia, F. (2022). A Review of a Decade of Local Projects, Studies and Initiatives of Atypical Influxes of Pelagic *Sargassum* on Mexican Caribbean Coasts. *Phycology*, 2(3), 254-279.
- Rosellón-Druker, J., McAdam-Otto, L., Suca, J. J., Seary, R., Gaytán-Caballero, A. et al. (2023). Local Ecological Knowledge and Perception of the Causes, Impacts and Effects of *Sargassum* Massive Influxes: A Binational Approach. *Ecosystems and People*, 19(1), 2253317.
- Rosellón-Druker, J. y Rosellón-Hernández, M. (2023). Arribazones de sargazo: Aristas y perspectivas científicas, económicas, sociales y ambientales. *Revista obsidiana*, 7, 22-23.
- Van Tussenbroek, B. I., Arana, H. A. H., Rodríguez-Martínez, R. E., Espinoza-Avalos, J., Canizales-Flores, H. M. et al. (2017). Severe Impacts of Brown Tides Caused by *Sargassum* spp. on Near-Shore Caribbean Seagrass Communities. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1-2), 272-281.
- Wadsworth, R. M., Criddle, K. y Kruse, G. H. (2014). Incorporating Stakeholder Input into Marine Research Priorities for the Aleutian Islands. *Ocean & Coast Management*, 98, 11-19. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2014.06.003>.
- 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.

# Epílogo

## ¿HACIA DÓNDE VAMOS? CONSTRUYENDO UN MANEJO INTEGRAL SOBRE BASES SÓLIDAS

Judith Rosellón Druker

Josefina Huguette Hernández Gómez

Jessica Nubia Sarmiento Carral

Gabriel Navarro Guerrero

Ha pasado más de una década desde que los arribazones de sargazo cimbraron el estado de Quintana Roo. Al leer las páginas de este libro, y considerando la complejidad y la corta edad de este fenómeno, es sorprendente lo mucho que se ha logrado en términos del conocimiento y caracterización de estas macroalgas. Es evidente que México está a la vanguardia en ciencia, desarrollo tecnológico e innovación para entender y atender este fenómeno.

La pregunta que ahora nos hacemos es: ¿hacia dónde vamos? La respuesta es clara: independientemente de la cantidad anual de sargazo que arribe a nuestras costas, es necesario contar con un manejo eficaz e integral de esta biomasa. Ese manejo es la estructura o edificación que estamos construyendo como país. El contenido de este libro revela que los cimientos de esta edificación ya están puestos y son sólidos. Los pilares que ahora se están empezando a erguir se consolidarán a partir del conocimiento que todavía es necesario generar y del desarrollo de marcos normativos claros y de carácter vinculante. Una vez que esos pilares se encuentren

completos, el establecimiento de un manejo integral conllevará de manera orgánica a la instauración de una industria nacional del sargazo.

En la sección de cimientos gubernamentales de este libro quedó plasmado que el gobierno de México, en sus distintos niveles, ha realizado diversas acciones para hacerle frente a un fenómeno complejo y hasta ahora, impredecible. La Secretaría de Marina (Semar) coordina los esfuerzos en el marco de la estrategia del gobierno federal para la contención y colecta del sargazo en las costas del Caribe mexicano (Semar, 2021). Esta secretaría ha logrado el desarrollo de tecnologías innovadoras como barreras de contención y barcos sargaceros que han sido fundamentales en la primera línea de acción en presencia de los arribazones.

En apoyo a esta estrategia, el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) definió la Agenda científica, tecnológica y de innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo masivo de sargazo en las costas mexicanas (Conahcyt, 2019). Varias de las investigaciones mencionadas en este libro fueron producto de la implementación exitosa de esta agenda. Los resultados de estos proyectos contribuyen a una toma de decisiones basada en evidencia científica y son esenciales para que las acciones que se tomen dentro del sector gubernamental sean efectivas.

Además, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Estado de Quintana Roo (SEMA) han conjuntado esfuerzos para optimizar el manejo del sargazo una vez que llega a las costas y playas de esta entidad. El Sistema de Monitoreo de Sargazo Recolectado (Simsar), desarrollado por la Semarnat, tiene como objetivo sistematizar la información sobre los volúmenes del sargazo acopiado en tierra y mar. Por otra parte, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) ha desarrollado un sistema de monitoreo satelital en altamar, cuyos datos proporcionan información fundamental para dependencias gubernamentales, además de que pueden ser utilizados con fines de investigación para entender la dinámica poblacional del sargazo (González-Cano et al., 2023).

En el caso de la SEMA, la Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del Sargazo (EIMAS) será determinante para las acciones públicas y privadas de los próximos años y un referente de planeación a nivel internacional en la materia (Rodríguez-Martínez et al., 2023).

En la sección de cimientos técnicos quedó asentado que, como país, contamos con grandes avances científicos. En el caso del monitoreo, por ejemplo, existen diversos sistemas operacionales y disponibles de manera pública y gratuita. Sin embargo, todavía es necesario conjuntar estos esfuerzos en un sistema nacional de alerta temprana que nos permita conocer con mayor precisión cuándo y cuánto sargazo llega a nuestras playas.

Esto es necesario para que los tomadores de decisiones (p. ej. hoteles, la Zona Federal Marítimo Terrestre-Zofemat) lleven a cabo tantas acciones preventivas (p. ej. puesta de barreras, colecta en mar) como acciones óptimas de limpieza y mitigación. Además, somos pioneros como país en la utilización de herramientas como la ciencia ciudadana para el monitoreo en playas. Estas herramientas permiten obtener información sobre la cantidad de sargazo, así como de la variación de las especies que encallan en las playas.

Como país también hemos sido punteros en la investigación científica sobre impactos de los arribazones en los ecosistemas marinos y costeros. La mortandad masiva de especies, los cambios en el sistema arrecifal y de pastos marinos, los procesos de eutroficación del agua y la generación de gases tóxicos, entre otros, son ejemplos de lo que se ha podido conocer sobre este fenómeno.

Recientemente comenzamos a dimensionar los impactos de los arribazones en la salud humana, especialmente en aquellas personas que, de tiempo completo, se dedican a la limpieza del sargazo, formando parte de un nuevo trabajo conocido como “sargacero”. Esto debe ser un motivante (en adición al altísimo costo económico de las acciones de limpieza en playa tanto para el gobierno como para el sector privado) para priorizar acciones de contención y colecta en el mar, antes de que la biomasa (o la mayor parte de ella) llegue a las playas causando caos en los ecosistemas.

Los cimientos del desarrollo tecnológico e innovación son sólidos y numerosos. En una escala de maduración tecnológica (o TRL, por sus siglas en inglés) queda determinado que con esta biomasa como materia prima hemos alcanzado el último peldaño. No sólo existen investigaciones a escala de laboratorio (las cuales son prometedoras) sino que ya contamos con empresas que comercializan productos a escala industrial. Para lograr que una mayor cantidad de productos que se obtienen a partir de estas macroalgas sean económicamente rentables y sostenibles, es necesario trabajar en la construcción de marcos normativos que den claridad en procedimientos y jurisdicción en cada una de las etapas de la cadena de valor. Además, los capítulos del libro relacionados con este tema dejan claro que la mejor apuesta para el aprovechamiento del sargazo es un esquema integral de aprovechamiento con residuo cero (en otras palabras, biorrefinerías).

Los cimientos anteriores, aunque absolutamente necesarios, por sí solos no podrían sostener la estructura de un manejo integral, ya que la sociedad es parte fundamental para lograr acciones efectivas y sostenibles en el largo plazo. Involucrar a la sociedad puede tomar diversas formas. Por ejemplo, la ciencia ciudadana es una herramienta clave para fomentar redes de colaboración, generar aprendizajes y producir información de utilidad y calidad para la ciencia. Asimismo, el conocimiento local que poseen los individuos y comunidades sobre el ecosistema que los rodea puede proveer pautas para priorizar acciones y estrategias por parte del sector académico y gubernamental en aquellas zonas que, en presencia de arribazones, tengan un alto riesgo socioambiental.

La conjunción de estos pilares, en aras de resolver un problema complejo con connotaciones ambientales, económicas y sociales, es un ejemplo claro de la implementación del Modelo Mexicano de Innovación Soberana para el Bienestar (MMISB), a través del modelo de la Pentahélice (Secretaría de Gobernación, 28 de noviembre de 2023) el cual incorpora a la sociedad y el ambiente como actores y receptores activos de los esfuerzos de ciencia, tecnología e innovación que se desarrollan en el país.

El impulso a proyectos que, desde su origen, contemplen la integración de capacidades nacionales multiinstitucionales y multisectoriales seguirá siendo esencial en la construcción de la estructura de manejo integral a la cual aspiramos llegar. A continuación, enlistamos algunas de las principales líneas de acción para que esto suceda:

- Promover mecanismos robustos para la generación, concentración y sistematización de datos para la investigación, gestión de conocimiento, manejo y aprovechamiento del sargazo en Quintana Roo.
- Fomentar acciones de mitigación al impacto provocado por las afluencias masivas de sargazo en la zona costera que impactan en la salud de los ecosistemas y de las personas, así como en los sectores social, turístico y económico.
- Realizar vínculos y sinergias entre los tres órdenes de gobierno y los sectores privado, académico y social, para la coordinación de acciones que generen resultados positivos en el manejo y aprovechamiento del sargazo.
- Generar información sobre el proceso, desde el monitoreo y recolección, hasta la transformación y disposición final del sargazo para la toma de decisiones.
- Generar elementos técnicos sobre procesos, prácticas de manejo y consideraciones de posibles efectos en la salud humana y en los ecosistemas, a través del acompañamiento e implementación de la Agenda Conahcyt.
- Promover un sistema de vinculación y seguimiento institucional a la implementación de la estrategia EIMAS del gobierno de Quintana Roo, con indicadores de desempeño que sean medibles en un proceso de mejora continua y adaptativa, transparente en la rendición de cuentas e información pública, destacando las mejores prácticas.
- Promover y gestionar fondos para la realización de proyectos de investigación básica y aplicada que den respuestas puntuales a las necesidades de información del sargazo en Quintana Roo.

- Considerar las condiciones económicas, sociales y ecológicas existentes, como línea base y punto de partida, para poder planear inversiones futuras para la implementación de esta estrategia.
- Implementar estrategias de comunicación efectivas para informar al público sobre la problemática del sargazo y las acciones que se están tomando para abordarla.
- Promover la cooperación y el intercambio de experiencias con otros países y organizaciones internacionales que enfrentan la problemática del sargazo, para mejorar su manejo y aprovechamiento.

Tenemos por delante importantes desafíos, especialmente pensando en los arribazones como un fenómeno global y regional que también requiere una atención coordinada entre los países afectados. En ello, la voluntad política internacional tiene mucho que decir y aportar. La cooperación internacional implica compartir conocimientos, experiencias y recursos para desarrollar soluciones conjuntas y efectivas. A través de foros internacionales y alianzas estratégicas se pretende abordar los desafíos de manera coordinada y promover el desarrollo de esquemas de manejo y aprovechamiento sustentables y eficaces.

Para lograr esto, son necesarias la mejora de las logísticas de la gestión del sargazo en todas sus etapas, la certidumbre y fomento a las inversiones para su transformación y uso, el monitoreo y la generación estandarizada de información. Asimismo, crear una mayor conciencia y conocimiento sobre este problema y fomentar la participación ciudadana permitirá construir la edificación de un manejo integral del sargazo, lo cual es sinónimo de convertir un problema en una oportunidad.

## REFERENCIAS

- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) (2019). *Agenda de ciencia, tecnología e innovación para la atención, adaptación y mitigación del arribo de sargazo pelágico a México*. Gobierno de México.

- González Cano, J. M., Arreguín Sánchez, F. y García Zúñiga, J. E. (2023). En búsqueda de patrones en la dinámica poblacional del sargazo. *La Jornada*. <https://ecologica.jornada.com.mx/2023/03/19/en-busqueda-de-patrones-en-la-dinamica-poblacional-del-sargazo-1390.html>
- Rodríguez-Martínez, R. E., van Tussenbroek, B. I., Navarro-Guerrero, G., Amaro-Mauricio, E. J., Mora-Domínguez, G. y González-Rivera, L. I. (2023). *Estrategia Integral para el Manejo y Aprovechamiento del Sargazo (EIMAS) en Quintana Roo*. Secretaría de Ecología y Medio Ambiente de Quintana Roo/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Rosellón-Druker, J., Calixto-Pérez, E., Escobar-Briones, E., González-Cano, J., Masiá-Nebot, L. y Córdova-Tapia, F. (2022). A Review of a Decade of Local Projects, Studies and Initiatives of Atypical Influxes of Pelagic *Sargassum* on Mexican Caribbean Coasts. *Phycology*, 2(3), 254-279.
- Secretaría de Gobernación (28 de noviembre de 2023). *Aviso por el que se da a conocer el Plan Nacional para la Innovación, mandatado en el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. Diario Oficial de la Federación. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5709686y fecha=28/11/2023#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5709686y fecha=28/11/2023#gsc.tab=0)
- Secretaría de Marina (Semar) (16 de marzo de 2021). *La Secretaría de Marina-Armada de México mantiene acciones para la contención del fenómeno atípico del sargazo en el Estado de Quintana Roo*. <https://www.gob.mx/semar/prensa/la-secretaria-de-marina-armada-de-mexico-mantiene-acciones-para-la-contencion-del-fenomeno-atipico-del-sargazo-en-el-estado-de-quintana-roo>



## Sobre las autoras y los autores

### COORDINADORAS

CALIXTO PÉREZ, EDITH

Es bióloga y doctora en Ciencias Biológicas por la UNAM, y maestra en Políticas Públicas por la Universidad Iberoamericana. En su trayectoria académica ha estudiado el impacto del cambio global en la biodiversidad y las estrategias para su conservación. Ha publicado artículos científicos y capítulos de libros; es integrante del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, y participa de forma activa en actividades de apropiación social del conocimiento. También se ha desempeñado como servidora pública, enfocándose en el diseño e implementación de políticas públicas que permitan la aplicación del conocimiento en soluciones a problemáticas nacionales. Desde 2019 se enfoca en promover el desarrollo tecnológico y la innovación como vía para la resolución de problemáticas nacionales, en ámbitos como la soberanía alimentaria y los sistemas socioecológicos. Actualmente funge como directora de Estrategia Tecnológica en el Conahcyt.

ROSELLÓN DRUKER, JUDITH

Es bióloga por la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), donde obtuvo la Medalla Gabino Barreda. Realizó sus estudios de doctorado en Ciencias del Mar en la Universidad de Massachusetts, enfocándose en la evaluación de áreas marinas protegidas y su relación con recursos pesqueros. Posteriormente realizó un posdoctorado en la Universidad de Alaska, especializándose en la

evaluación integral de ecosistemas marinos y en sistemas socioecológicos. También cursó un diplomado en el Centro de Investigación y Docencia Económicas (CIDE) sobre gestión de gobierno y políticas públicas. Actualmente labora en el Conahcyt bajo el programa Investigadoras e Investigadores por México. Su trabajo se enfoca en investigación y desarrollo de acciones interinstitucionales para el entendimiento y atención integral del fenómeno de arribazones de sargazo.

#### AUTORAS Y AUTORES

ALLENDE ARANDÍA, MARÍA EUGENIA

Laboratorio de ingeniería y procesos costeros. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), unidad Sisal.

ALZATE-GAVIRIA, LILIANA

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

APPENDINI, CHRISTIAN M.

Laboratorio de ingeniería y procesos costeros. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), unidad Sisal.

ARELLANO-VERDEJO, JAVIER

El Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal.

AZCORRA-MAY, KARLA J.

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

CABELLO-GALINDO, ALEJANDRA

Grupo de Biorrefinería. Departamento de Investigación en Alimentos. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila.

CARRILLO, LAURA

El Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal.

CERDEIRA-ESTRADA, SERGIO

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio).

CERVANTES-UC, JOSÉ MANUEL

Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

CÓRDOVA TAPIA, FERNANDO

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

ESCOBAR-MORALES, BEATRIZ

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

ESPAÑA-GAMBOA, ELDA ISAURA

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)

ESTRADA ALLIS, SHEILA

Oceanografía física, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).

FLORES VIDAL, XAVIER

Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California (UABC).

GODÍNEZ-ORTEGA, JOSÉ LUIS

Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

GONZÁLEZ-GLORIA, K.D.

Grupo de Biorrefinería. Departamento de Investigación en Alimentos.  
Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila.

HERNÁNDEZ GÓMEZ, JOSEFINA HUGUETTE

Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Estado de Quintana Roo  
(SEMA).

JIMÉNEZ REYES, ALONSO

Subsecretaría de Regulación Ambiental (SRA), Secretaría de Medio  
Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

LARA HERNÁNDEZ, JULIO A.

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Mérida. Universidad Nacional  
Autónoma de México (UNAM).

LAZCANO-HERNÁNDEZ, HUGO E.

El Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal.

LEAL-BAUTISTA, ROSA MARÍA

Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de  
Yucatán (CICY).

LÓPEZ URBAN, ANAID IBETH

Dirección General de Fomento y Desempeño Urbano Ambiental (DGF-  
DUA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

NAVARRO GUERRERO, GABRIEL

Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Estado de Quintana Roo  
(SEMA).

OLGUIN-MACIEL, EDGAR

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

PERAZA-KU, SILVIA ARGELIA

Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

QUINTANAR-OROZCO, ERÉNDIRA

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, ROSA ELISA

Unidad Académica de Sistemas Arrecifales. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

RODRÍGUEZ-JASSO, ROSA M.

Grupo de Biorrefinería, Departamento de Investigación en Alimentos, Facultad de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Coahuila.

RUIZ MÉNDEZ, GERMÁN

Subsecretaría de Regulación Ambiental (SRA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat).

RUIZ RUIZ, JORGE CARLOS

Escuela de Nutrición. División de Ciencias de la Salud, Universidad Anáhuac Mayab.

RUIZ, HÉCTOR A.

Grupo de Biorrefinería. Departamento de Investigación en Alimentos. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila.

SARMIENTO CARRAL, JESSICA NUBIA

Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Estado de Quintana Roo (SEMA).

SEGURA-GARCÍA, DAVID R.

Grupo de Biorrefinería. Departamento de Investigación en Alimentos. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Coahuila.

SHEINBAUM, JULIO

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

TAPIA-TUSSELL, RAÚL

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

URIBE MARTÍNEZ, ABIGAIL

Laboratorio de ingeniería y procesos costeros. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), unidad Sisal.

URIBE-CALDERÓN, JORGE ALONSO

Unidad de Materiales, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

VAN TUSSENBROEK, BRIGITTA I.

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

# Índice de figuras y tablas

## FIGURAS

### Capítulo 1. La atención del fenómeno desde el gobierno de México: avances y logros

- Figura 1. Visión a corto, mediano y largo plazo para la atención, adaptación y mitigación de los arribazones de sargazo 20
- Figura 2. Ejes rectores y transversales de la EIMAS 31

### Capítulo 2. Historia natural, origen y proliferación del sargazo

- Figura. 1. Registros históricos del sargazo 40-41
- Figura. 2. Morfotipos dominantes de especies holopelágicas de *Sargassum* en el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GASB) 44
- Figura. 3. Variaciones espaciales y temporales en la abundancia relativa de las especies de *Sargassum* holopelágicas y sus morfotipos dominantes 46
- Figura 4. Oscilación del Atlántico norte 50

### **Capítulo 3. Monitoreo remoto, modelación y alerta temprana: estado del arte en México**

Figura 1. Modelo de un sistema de alerta temprana adaptado para arribazones de sargazo, con base en la definición de las Naciones Unidas	64
Figura 2. Patrones de distribución y flujo general del sargazo en tres escalas	66-67
Figura 3. Detección de sargazo de alta resolución con imagen Landsat-OLI 8.	79
Figura 4. Componentes de un sistema de alerta temprana (SAT) de sargazo atendidos en México	93

### **Capítulo 4. ¿Cuánto sargazo hay en la playa?**

Figura 1. Monitoreo de sargazo en una localidad de Mahahual, Quintana Roo, México	113-114
Figura 2. Mapas de sargazo para la localidad de Mahahual	119

### **Capítulo 5. Caracterización de los riesgos socio ambientales y económicos asociados al fenómeno de sargazo**

Figura 1. Toneladas de sargazo pelágico registradas frente al Caribe mexicano	128
Figura 2. Efectos ambientales del sargazo	130-131

### **Capítulo 6. Usos potenciales del sargazo: panorama en México**

Figura 1. Células lignificadas en el sargazo	148
Figura 2. Micrografías del sargazo	158

**Capítulo 7. Biorrefinerías del sargazo pelágico  
en el contexto mexicano**

Figura 1. Procesamiento del pretratamiento del sargazo como materia prima	176
Figura 2. Producción de compuestos de interés industrial y biocombustibles a partir de un concepto de biorrefinería	179
Figura 3. Desarrollo de tecnología para el procesamiento de sargazo	180

**Capítulo 8. Arribazones de sargazo: conocimiento  
local para atender y entender sus efectos  
en el bienestar humano**

Figura 1. Integración del conocimiento local y científico para la toma óptima de decisiones	194
Figura 2. Mapa que muestra las comunidades de estudio en las distintas zonas geográficas del estado de Quintana Roo	196
Figura 3. Categorías y componentes del bienestar humano afectados por los arribazones masivos de sargazo	197

TABLAS

**Capítulo 1. La atención del fenómeno desde el gobierno  
de México: avances y logros**

Tabla 1. Líneas estratégicas, metas y logros de la Agenda Conahcyt para la atención del sargazo	22
---	----

**Capítulo 6. Usos potenciales del sargazo: panorama en México**

Tabla 1. Caracterización proximal del sargazo (datos en base seca)	147
---	-----

**Capítulo 8. Arribazones de sargazo: conocimiento  
local para atender y entender sus  
efectos en el bienestar humano**

Tabla 1. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Ambiente	199
Tabla 2. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Economía	202
Tabla 3. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Salud	204
Tabla 4. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Sustento y actividades	205
Tabla 5. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Conocimiento y tecnología	206
Tabla 6. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Libertad y voz	207
Tabla 7. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Gobernanza y gestión	208
Tabla 8. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Conexiones tangibles con la naturaleza	209
Tabla 9. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Conexiones intangibles con la naturaleza	210

Tabla 10. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Cultura e identidad	210
Tabla 11. Integración del conocimiento local a acciones multisectoriales. Categoría Transversal	211



# Índice general

## Prólogo

- El desafío del sargazo: un faro de esperanza  
en un mar de incertidumbre 7  
*Fernando Córdova Tapia*

## PRIMERA PARTE

### CIMIENTOS GUBERNAMENTALES

1. La atención del fenómeno desde el gobierno  
de México: avances y logros 17  
*Edith Calixto Pérez, Josefina Huguette Hernández Gómez,  
Alonso Jiménez Reyes, Germán Ruiz Méndez, Sergio Cerdeira-Estrada,  
Anaid Ibeth López Urban, Jessica Nubia Sarmiento Carral,  
Gabriel Navarro Guerrero, Judith Rosellón Druker*

## SEGUNDA PARTE

### CIMIENTOS CIENTÍFICOS

2. Historia natural, origen y proliferación del sargazo 37  
*Brigitta I. van Tussenbroek, Julio Sheinbaum, José Luis Godínez-Ortega*
3. Monitoreo remoto, modelación y alerta temprana:  
estado del arte en México 61  
*Abigail Uribe Martínez, Christian M. Appendini, Julio A. Lara Hernández,  
María Eugenia Allende Arandía, Sheila Estrada Allis, Xavier Flores Vidal*

4. ¿Cuánto sargazo hay en la playa?	107
<i>Hugo E. Lazcano-Hernández, Javier Arellano-Verdejo, Laura Carrillo</i>	
5. Caracterización de los riesgos socioambientales y económicos asociados al fenómeno de sargazo	127
<i>Rosa Elisa Rodríguez Martínez</i>	

### TERCERA PARTE

#### CIMIENTOS TECNOLÓGICOS Y DE INNOVACIÓN

6. Usos potenciales del sargazo: panorama en México	145
<i>Raúl Tapia-Tussell, Edgar Olguin-Maciel, Liliana Alzate-Gaviria, Elda Isaura España-Gamboa, Beatriz Escobar-Morales, Eréndira Quintanar-Orozco, Karla J. Azcorra-May, Rosa María Leal-Bautista, Silvia Argelia Peraza-Ku, José Manuel Cervantes-Uc, Jorge Alonso Uribe-Calderón, Jorge Carlos Ruiz Ruiz</i>	
7. Biorrefinerías del sargazo pelágico en el contexto mexicano	165
<i>Alejandra Cabello-Galindo, K.D. González-Gloria, David R. Segura-García, Rosa M. Rodríguez-Jasso, Héctor A. Ruiz</i>	

### CUARTA PARTE

#### CIMIENTOS SOCIALES

8. Arribazones de sargazo: conocimiento local para atender y entender sus efectos en el bienestar humano	193
<i>Judith Rosellón Druker</i>	

Epílogo	
¿Hacia dónde vamos? Construyendo un manejo integral sobre bases sólidas	215
<i>Judith Rosellón Druker, Josefina Huguette Hernández Gómez, Jessica Nubia Sarmiento Carral, Gabriel Navarro Guerrero</i>	
Sobre las autoras y los autores	223
Índice de figuras y tablas	229

Se terminó de editar en diciembre de 2024  
La edición estuvo al cuidado de la Dirección de Difusión  
Científica del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias  
y Tecnologías. Para su formación se utilizaron las familias  
tipográficas GMX y Montserrat.

A una década de los primeros arribazones masivos de sargazo en el Caribe mexicano, se han emprendido diversos esfuerzos desde la academia, la industria, la sociedad civil y el gobierno, para hacer frente a este fenómeno y comprender su origen e impactos, generando los cimientos técnicos, administrativos y sociales para establecer mecanismos de acción a largo plazo. Es por esto que, en colaboración con más de 40 expertos, esta obra recopila el estado actual del conocimiento, incluyendo su historia natural y origen, los riesgos socioambientales que conlleva, así como las estrategias para su monitoreo, manejo y aprovechamiento.

Este libro plasma, la importancia de abordar los arribazones de sargazo a través de estrategias coordinadas que involucren a los diversos sectores de la población, para generar vínculos virtuosos que permitan una gestión eficiente del sargazo. Asimismo, la obra es una valiosa herramienta de difusión del conocimiento sobre un fenómeno intrínsecamente relacionado al cambio global, que nos prepara como sociedad para hacer frente a fenómenos naturales que podrían ser cada vez más recurrentes.



**GOBIERNO DE  
MÉXICO**



**CONAHCYT**  
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES  
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

