

# ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

## México ante el sargazo

**El sargazo: retos y oportunidades**

**El sargazo en los pastos marinos y arrecifes**

**La huella del sargazo en las tortugas marinas**

**El sargazo del mar Caribe mexicano**

**Usos potenciales del sargazo**

**Bacterias que se nutren  
de hidrocarburos**



\$50.00 MN  
ISSN 1405-6550

[www.revistaciencia.amc.edu.mx](http://www.revistaciencia.amc.edu.mx)



# LABORATORIOS EN LA SELVA

CAMPESINOS MEXICANOS,  
PROYECTOS NACIONALES Y  
LA CREACIÓN DE LA PÍLDORA  
ANTICONCEPTIVA

Gabriela  
Soto Laveaga

A LA VENTA EN LIBRERÍAS  
Y LIBRERÍAS VIRTUALES

El barbasco es un tubérculo que crece en el sur de México. En 1940 se descubrió que servía como materia prima ideal para el desarrollo de hormonas sintéticas esteroides las cuales, a su vez, sirven para crear importantes medicinas como la cortisona y las píldoras anticonceptivas. Con este descubrimiento se detonó una carrera por su control y explotación en la cual los principales afectados fueron los campesinos que, por ignorancia y falta del respaldo del gobierno, fueron los más afectados. La autora hace un recuento de este capítulo de la historia de México, desde el descubrimiento de las propiedades del barbasco, pasando por el intento de la nacionalización de este tubérculo en 1970, hasta el final a mediados de los noventa, cuando las industrias extranjeras supieron aprovechar lo que el gobierno mexicano dejó pasar por mucho tiempo.

***Laboratorios en la selva*** ganó el premio Robert K. Merton al mejor libro de ciencia en el 2010 otorgado por la Asociación Sociológica Americana.

## Mensaje de la presidenta de la AMC

Estela Susana Lizano Soberón

3

## Desde el Comité Editorial

Miguel Pérez de la Mora

4

## Presentación. México ante el sargazo

Dalila Aldana Aranda

6

## México ante el sargazo

### El sargazo: retos y oportunidades

Beatriz Paredes Rangel

### El sargazo, un fenómeno complejo

J. Adán Caballero Vázquez

Gilberto Acosta González

Cecilia Hernández Zepeda

### Sargazo en movimiento

Laura Carrillo

Julio Sheinbaum Pardo

### El sargazo en los pastos marinos y arrecifes

Rosa Elisa Rodríguez Martínez

Brigitta Ine van Tussenbroek

### La descomposición del sargazo en la laguna arrecifal y su biota

Héctor A. Hernández Arana

### Impacto del sargazo en el acuífero

Laura M. Hernández Terrones

### La huella del sargazo en las tortugas marinas

Gisela Maldonado Saldaña

### Usos potenciales del sargazo

Rosa M. Leal Bautista

Raúl Tapia Tussell

Liliana Alzate Gaviria

### El sargazo del mar Caribe mexicano

Iris Aurora Nava Jiménez

Hugo Sánchez Hernández

### Cooperación en el Caribe ante el sargazo

Dalila Aldana Aranda

Martha Enríquez Díaz

Vidal Elías

## Novedades científicas

### Bacterias que se nutren de hidrocarburos

Sabina Viramontes Ramos

Martha Cristina Portillo Ruiz

Guadalupe Virginia Nevárez Moorillón

### Biología sintética, economía y biosensores

Celia Monserrat Luna Castro

Ma. de Lourdes Pérez Zavala

José Eleazar Barboza Corona

### Aportaciones veterinarias a la virología

Álvaro Aguilar Setién

Cenia Almazán Marín

Nidia Aréchiga Ceballos

8

14

20

28

34

42

46

52

58

62

73

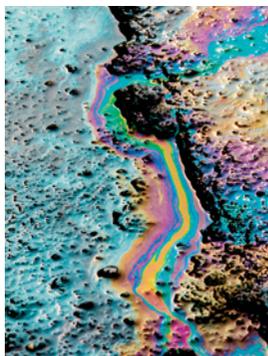
80

89





Portada: Shutterstock.



Separador: Shutterstock.

Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.



GOBIERNO DE  
MÉXICO



CONACYT  
CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

# ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias  
diciembre 2020 volumen 71 número 4

## Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

## Director

Miguel Ángel Pérez de la Mora

## Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero

Raúl Ávila

Beatriz Barba Ahuatzin

Luis Benítez Bribiesca †

Ana Cecilia Noguez G.

Raymundo Cea

Deborah Dultzin

Alfredo Feria Velasco †

Alonso Fernández Guasti

Ronald Ferrera

Gerardo Gamba Ayala

Alfonso N. García Aldrete

Adolfo Guzmán

Juan Pedro Lacleste San Román

Román Piña Chan †

Carlos Prieto de Castro

Sergio Sánchez Esquivel

Alicia Ziccardi

## Representante del Conacyt ante el Comité Editorial

Rubén Jiménez Ricárdez

## Coordinadora editorial

Martha Lorena Soria Licona

## Editora

Rosanela Álvarez

## Revisor de estilo

Paula Buzo

## Social Media

José Eduardo González Reyes

## Diseño y formación

Quinta del Agua Ediciones, S.A. de C.V.

## Ilustradores

Ana Viniegra, pp. 17, 28-29, 42-43, 47, 59, 62-63, 74-75

Enrique Martínez de la Rosa, pp. 9, 12, 21, 25, 36, 37, 40, 55, 57, 82, 86, 87

## Preprensa e impresión

Impresos Comerciales y/o Miguel Fernández

## Academia Mexicana de Ciencias, A.C.

Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N,

Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México

tel.: 5849 4903, fax: 5849 5108

[www.revistaciencia.amc.edu.mx](http://www.revistaciencia.amc.edu.mx)



@CienciaAMC



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS  
CONACYT DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

**ciencia**, volumen 71, número 4, correspondiente a diciembre de 2020, editado y distribuido por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Academia Mexicana de Ciencias. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa de la Academia Mexicana de Ciencias. Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo del título 04-2001-072510183000-102 expedido el 25 de julio de 2001 por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Certificado de Licitud de Título y Contenido 17371 expedido por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1405-6550. Editor responsable: Francisco Salvador Mora Gallegos. Formación: Quinta del Agua Ediciones, S.A. de C.V., tel.: 5575 5846. Impresión: Impresos Comerciales y/o Miguel Fernández, Yucatán 9-B, Col. Héroes de Padierna, Ciudad de México, 10700. Tel.: 5568 5065. Tiraje 4 000 ejemplares. Editor responsable: Correspondencia: Academia Mexicana de Ciencias, A. C., atención: Revista Ciencia, Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México, tel.: 5849 4903, fax: 5849 5108, [ciencia@unam.mx](mailto:ciencia@unam.mx), <http://www.amc.mx>.

# Mensaje de la presidenta de la AMC

Ante el reto de la pandemia por COVID-19 que enfrentamos, la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) ha establecido un puente de comunicación entre los científicos expertos en el tema y la sociedad civil. Para esto, ha difundido mediante seminarios y conferencias virtuales, la revista *Ciencia*, así como infografías y videos, diversos contenidos referidos a la enfermedad ocasionada por el nuevo coronavirus SARS-CoV-2. Entre los temas tratados están las medidas de higiene recomendadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la discusión de las posibles causas de la enfermedad, el desarrollo de diagnósticos, tratamientos y futuras vacunas, así como el trabajo científico y tecnológico que se está realizando en diferentes instituciones de México.

En el concierto mundial, la AMC participa en el grupo de academias de ciencias de los países del G20, denominado Science 20 (S20). Este año, el S20, coordinado por la academia de Arabia Saudita, discutió las transiciones críticas globales –como la actual pandemia– y emitió recomendaciones basadas en la ciencia y dirigidas a las naciones que conforman esta agrupación. Las recomendaciones contemplan los problemas de salud, pero también de la economía circular y de la revolución digital, otros temas de gran importancia actual. Además, este año la AMC también participó en la reunión de academias de ciencias durante el Science and Technology for Society Forum, donde se discutió cómo promover una recuperación sostenible y resiliente ante la COVID-19.

No obstante, la comunidad científica también continúa trabajando en otros temas con un destacado impacto local y global. El presente número de la

revista *Ciencia* está dedicado al fenómeno del sargazo que afecta actualmente a México y otros países. La llegada de sargazo a las costas del Caribe es un fenómeno periódico, cuyo registro data de los años 60 del siglo pasado; sin embargo, a partir de 2015 su arribo masivo a las costas y su descomposición han provocado un deterioro del ambiente que amenaza a los ecosistemas costeros, los arrecifes y las aguas subterráneas. Así, el fenómeno del sargazo perjudica a múltiples especies en peligro de extinción, como la tortuga marina, pero también a la pesca, a la salud humana y al turismo. Por ello, su tratamiento también requiere de la atención de la ciencia y la tecnología. En este ejemplar, se incluyen diversos artículos de gran interés que tratan diferentes aspectos de la problemática del sargazo, además de señalar los usos potenciales de esta alga, cuyo aprovechamiento comercial podría contribuir a solucionar este grave problema.

Como presidenta de la AMC a partir del pasado mes de julio, aprovecho este primer mensaje a los lectores para conmemorar el 80 aniversario de *Ciencia*. Felicito a su director y al Comité Editorial, quienes con su trabajo hacen posible la publicación de esta revista. En el marco de la celebración de este aniversario, a lo largo del año, varios articulistas han impartido interesantes conferencias virtuales que han reforzado la difusión de este proyecto editorial. Esperamos que la revista *Ciencia* continúe por muchos años más su excelente labor de divulgación científica en nuestro país.

SUSANA LIZANO SOBERÓN  
Presidenta

## Desde el Comité Editorial



El sargazo, una palabra que, sin duda, evoca en algunos de ustedes, queridos lectores, las travesías del capitán Nemo a bordo de su famoso Nautilus por el mar en el Atlántico Norte que lleva dicho nombre y que, enclaustrado por los dos grandes brazos de la Corriente del Golfo, da la impresión de constituir un lago interior. Si recuerdan este pasaje, seguramente vendrá a su mente cómo, para evitar que la hélice de su submarino quedase atada y posteriormente bloqueada por el sargazo —macroalgas de color pardo que merced a vejigas llenas de aire flotan en el mar—, el mencionado personaje realizó su travesía convenientemente sumergido a una cantidad de metros por debajo de esa tupida alfombra vegetal.

En el presente número de *Ciencia* nos referiremos a esta misma alga que, arrastrada por las corrientes marinas y el viento, arriba anualmente en cada vez mayor cantidad al mar Caribe, y en particular al Caribe mexicano, donde ensucia las playas, enturbia sus aguas y contamina el acuífero local. Como descubrirán en esta espléndida sección temática acuciosamente preparada para ustedes por Dalila Aldana Aranda, nuestra editora huésped en esta ocasión, junto con su sapiente grupo de colaboradores, el sargazo al que nos referiremos no proviene, sin embargo, del mar que hemos

mencionado. De hecho, las arribazones de sargazo a nuestras playas se originan por los desprendimientos de una profusa y apretada colección de algas que se agrupan en una formación llamada Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, que se extiende casi 9000 km desde el occidente del continente africano hasta el este de Brasil.

Queridos lectores, qué mejor oportunidad que aprovechar la reclusión domiciliaria a la que nos obliga la presente pandemia motivada por el virus SARS-CoV-2 para aprender cuáles son los factores que subyacen a la acumulación de sargazo

en este “cinturón” viviente, junto con algunos de los elementos geográficos que contribuyen a sus arribazones hasta nuestras costas caribeñas. Entérense también, de parte de voces autorizadas, de la magnitud que este problema representa en forma global para México y su turismo, así como sus efectos dele-

téreos tanto para los pastos marinos como para los arrecifes y su biota, sin dejar de apreciar, por supuesto, el impacto del sargazo y su descomposición sobre el acuífero local. No dejen de conocer los problemas que entraña su remoción y, de manera secundaria, sus efectos sobre las tortugas marinas, así como los posibles usos potenciales de tan nefasta alga. Por úl-



timo, no pueden pasar por alto los esfuerzos que no sólo México, sino otras naciones de la cuenca del Caribe y aun del Atlántico Norte hacen, si no para resolver, al menos para mitigar el impacto tan devastador de las arribazones.

Aunque el tema central de la revista es tan atractivo, no desmerecen por ello, queridos lectores, las novedades científicas que también en este mismo número de *Ciencia* traemos para ustedes. Así, sorpréndanse al leer de algo tan insólito e inaudito como la existencia de bacterias capaces de alimentarse del petróleo. Entérense, entonces, cómo algunos de estos microorganismos, merced al empleo de sustancias denominadas surfactantes, secretadas por ellos mismos, son capaces de disminuir la llamada tensión superficial de las suspensiones de hidrocarburos a su alrededor para hacer posible su incorporación y, posteriormente, su oxidación a sustancias tan inocuas como el dióxido de carbono y el agua. Asimismo, conozcan cómo, gracias a tan sorprendente propiedad, es posible utilizar estas bacterias para la remoción de hidrocarburos tanto de los suelos como de las aguas, tras su derrame por barcos petroleros.

Por otra parte, ¿sabían qué es y qué ofrece la llamada biología sintética? Pues encuentren respuesta a esta pregunta en las páginas del presente número de *Ciencia*.

Por último, deléitense con el relato sobre las aportaciones que los estudios realizados en medicina veterinaria hicieron al surgimiento y desarrollo de la virología médica. Asimismo, tomen conciencia de que dentro de nuestro ambiente la salud de otras especies animales repercute en la nuestra, como lo han probado los programas de vacunación animal para prevenir la rabia en los humanos, o bien el reciente surgimiento de enfermedades virales, tales como influenza H1N1 y COVID-19, que nos afectan actualmente y que tuvieron un origen zoonótico.

Hacemos votos por que este número de *Ciencia* resulte de su agrado.

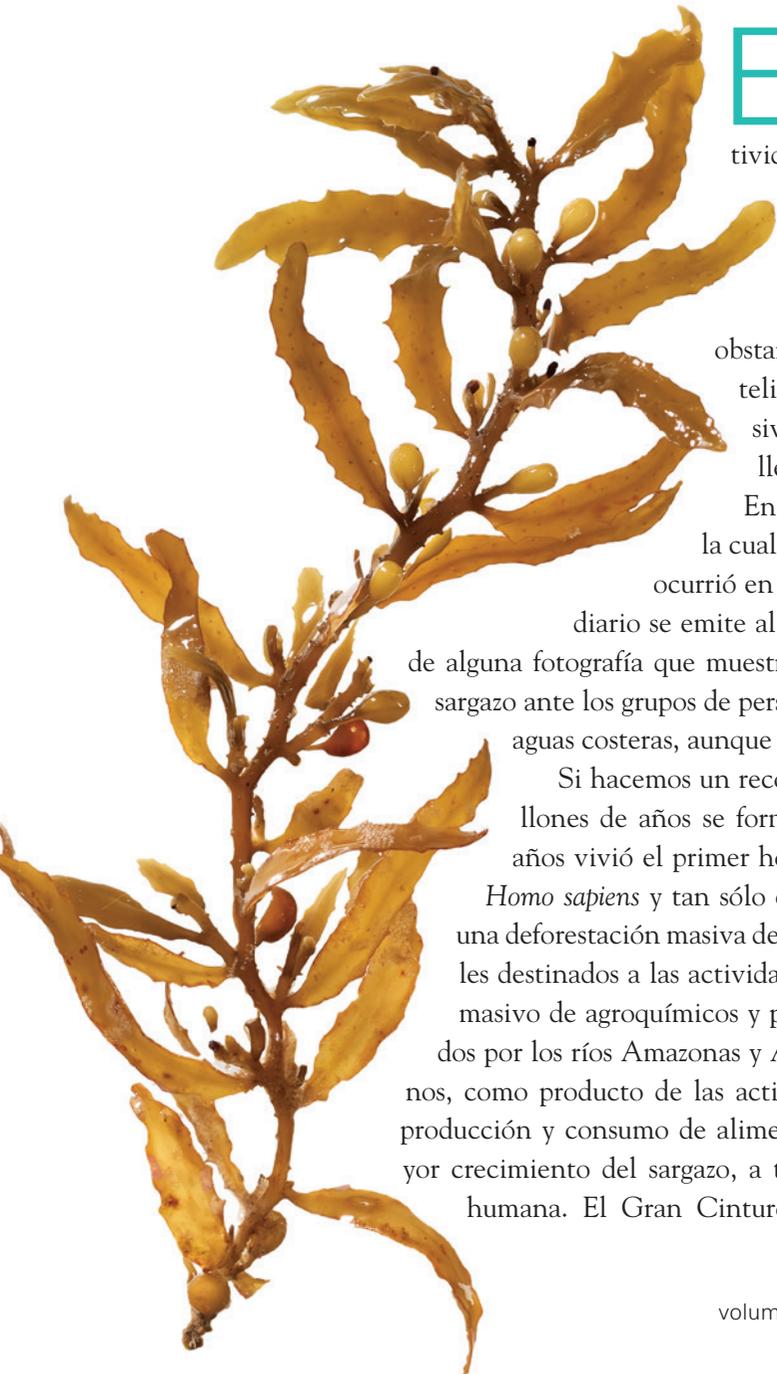
Salud y felicidades.

MIGUEL PÉREZ DE LA MORA  
Director





## PRESENTACIÓN

México ante el **sargazo**

El sargazo es un alga marina muy importante porque constituye un hábitat para diversas especies y participa en los procesos de conectividad oceánica. En una zona del Atlántico conocida como mar de los Sargazos viven dos especies: *Sargassum fluitans* y *S. natans*. Su arribo a las costas del Caribe es un fenómeno periódico, registrado desde la década de 1960. No obstante, en 2011, a partir del análisis de imágenes satelitales, se observó por primera vez la presencia masiva de sargazo al este de las costas de Brasil, el cual llegó hasta Cuba, Barbados y las Antillas Menores. En 2015, se presentó otra arribazón masiva atípica, la cual tuvo impactos en el Caribe mexicano. Lo mismo ocurrió en 2018 y 2019. A partir de eso, en la prensa casi a diario se emite al menos una nota referente al tema, acompañada de alguna fotografía que muestra el tamaño impresionante de las montañas de sargazo ante los grupos de personas que están tratando de “limpiar” las playas y aguas costeras, aunque esta proeza sea una misión interminable.

Si hacemos un recorrido en el tiempo, veremos que hace 4500 millones de años se formó la Tierra, pero apenas hace tres millones de años vivió el primer homínido; hace unos 200000 años que lo hace el *Homo sapiens* y tan sólo en los últimos 30 años la especie humana inició una deforestación masiva de la Amazonia para transformar la selva en pastizales destinados a las actividades ganaderas; esto, aunado a la erosión y el uso masivo de agroquímicos y pesticidas que se descargan al océano transportados por los ríos Amazonas y Araguari. Los cambios en la química de los océanos, como producto de las actividades humanas, por el modelo dominante de producción y consumo de alimentos, bienes y servicios, han provocado un mayor crecimiento del sargazo, a tal magnitud que está fuera de control a escala humana. El Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, que se extiende

desde el oeste de África hasta el este de Brasil, mide casi 9 000 km y tiene una biomasa de 20 millones de toneladas métricas.

En México, el gobierno federal y el de Quintana Roo, así como el sector empresarial, han centrado sus esfuerzos para enfrentar las arribaciones de sargazo mediante incorrectas acciones de “limpieza”, consistentes en recogerlo de la playa para llevarlo a otra parte. De esta manera, el sargazo se ha estado manejando como “basura” y no como una biomasa que tiene un posible potencial de uso para obtener diversos subproductos. La importancia económica del turismo para México es innegable, pues ha generado casi 9% del producto interno bruto y 6% del total de empleos, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía para 2019; sin embargo, el problema del sargazo no se resuelve con “barrerlo” de la playa o levantarlo de las aguas costeras para llevarlo al otro lado de la carretera y botarlo en alguno de los basureros clandestinos en la selva de Quintana Roo. En su proceso de descomposición, estas algas producen ácido sulfhídrico y amonio, lo que en ocasiones deriva en otros contaminantes, como arsénico, metales pesados, plásticos y microplásticos. Éstos se incorporarán a la red trófica y, más temprano que tarde, las personas van a consumirlos a través de las cadenas alimenticias.

El impacto del sargazo es complejo e importante de comprender porque no sólo afecta al turismo, sino a los ecosistemas marinos y terrestres: pastos marinos, arrecifes coralinos, manglares, dunas costeras, selvas, tierras agropecuarias y acuíferos, de los cuales dependemos todas las especies. Por ejemplo, a partir de múltiples investigaciones se ha señalado que, durante el proceso de descomposición, en presencia de oxígeno, las bacterias asociadas al sargazo producen sulfatos, que no son tóxicos; en cambio, en condiciones anaeróbicas, al apilar el sargazo se produce ácido sulfhídrico, que es altamente nocivo. Por ello, hasta para “barrer” adecuadamente el sargazo es necesaria la ciencia; de lo contrario, se está “limpiando” de manera errónea y sólo se producen más daños que beneficios.

Para este número especial de la revista *Ciencia*, invitamos a expertos que están trabajando con esta

alga en lo que se refiere a las investigaciones para su monitoreo desde satélites en el espacio, las explicaciones de su origen, los estudios del impacto del sargazo en los ecosistemas, además de los procesos para su transformación y aprovechamiento. Presentamos un apartado dedicado a la participación de los investigadores para atender la problemática originada por las arribaciones masivas de sargazo a las costas. Asimismo, se señala la importancia de compartir el conocimiento a partir de la cooperación científica nacional e internacional y de divulgar este tema por medio de las academias de ciencias de América y, específicamente, de la región del Caribe. En esta sección se resumen las acciones y conclusiones del panel nacional “El sargazo: retos y oportunidades”, convocado en septiembre de 2019 por la Comisión de Ciencia y Tecnología del Senado de la República; también se menciona la Conferencia Internacional sobre el Sargazo, organizada por la región de Guadalupe, en las Antillas Francesas, en octubre de 2019.

Ante los temas explorados, es claro que México debe contar con un Observatorio Nacional del Sargazo, así como una bitácora para integrar el trabajo de los diversos organismos e instituciones involucrados y las acciones que realizan. Hoy día, cada fuente de información tiene valores diversos respecto a algo tan sencillo como saber cuánto sargazo se recogió y a dónde se llevó. Por ello, se requiere de una legislación adecuada para llevar a cabo la limpieza, movilidad, disposición final y bioseguridad para los usos potenciales del sargazo. México tendrá que invertir en una infraestructura *ad hoc* para el manejo de esta alga y, sobre todo, para apoyar el trabajo científico desde el monitoreo, la evaluación de sus impactos y los usos para obtener subproductos. Por otra parte, los científicos mexicanos tenemos un compromiso con el país y con nuestra sociedad; no obstante, es importante señalar que, así como se destinan recursos para “barrer” el sargazo, deben apoyarse los esfuerzos para conocer, desde la perspectiva científica, el fenómeno del sargazo y poder proponer soluciones para un manejo adecuado, acompañado de un programa de comunicación de la ciencia dirigido tanto a residentes como a turistas.

Beatriz Paredes Rangel

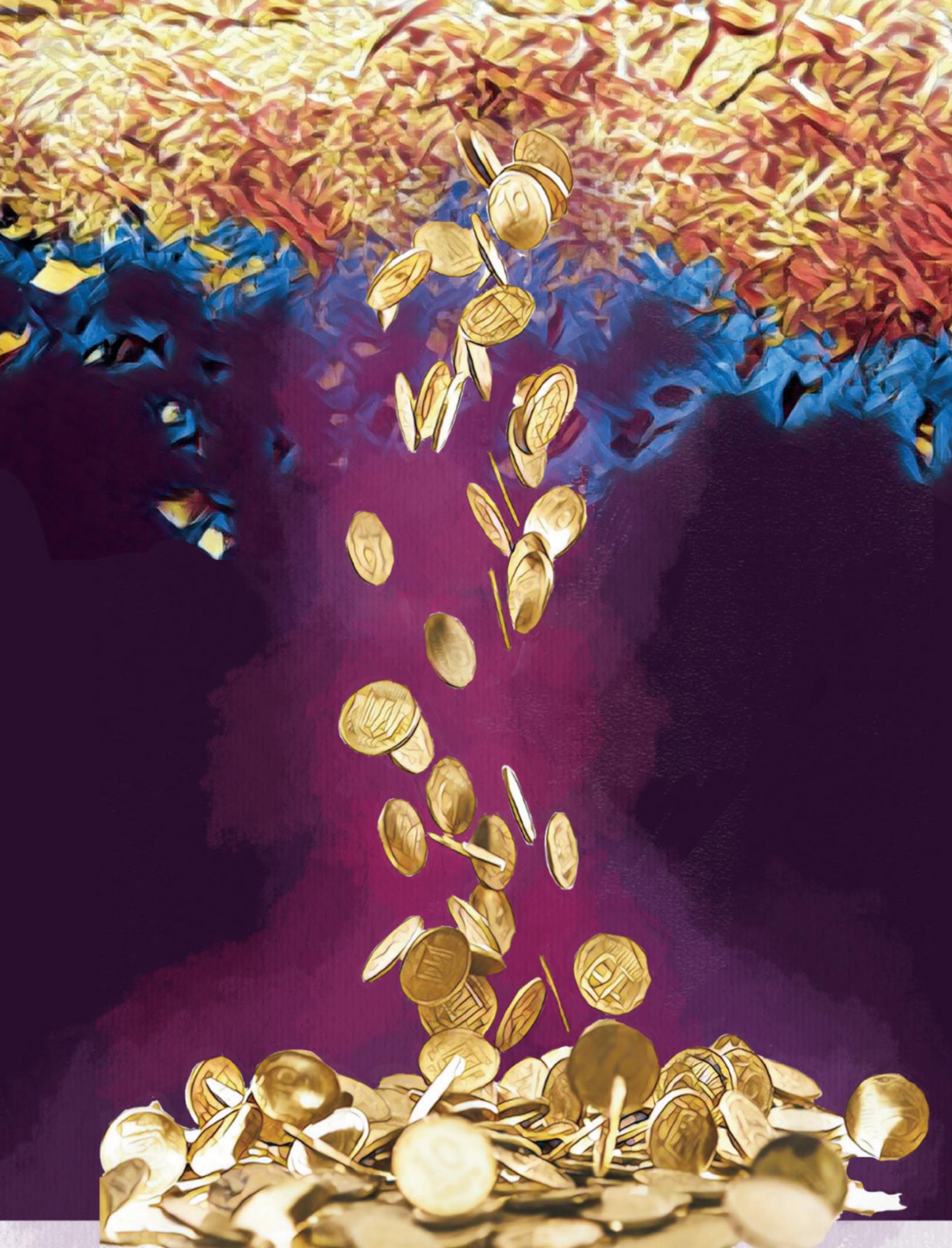


# El sargazo: retos y oportunidades

Algunas recomendaciones para abordar el tema del sargazo son: robustecer la cooperación internacional; garantizar la suficiencia presupuestal para atender el problema de las arribazones; fortalecer a los centros de investigación; elaborar la legislación correspondiente; crear un programa integral de aprovechamiento; así como impulsar la participación del gobierno, el sector privado y la academia.

**M**i relación con Quintana Roo y la península de Yucatán viene de larga data. Estoy convencida de que es uno de los lugares más bellos del mundo, por su biodiversidad, y está entre los más interesantes del orbe, por la fusión de la civilización maya con los diversos tipos de conglomerados sociales que allí se han asentado a lo largo del tiempo, hasta este siglo XXI, en el que Quintana Roo es una de las regiones más cosmopolitas de México, debido a que la expansión de la actividad turística ha convocado a personas de varias nacionalidades, quienes encontraron allí un hogar y la oportunidad para desarrollarse. Miles de mexicanos de distintos lugares también hallaron trabajo allí: veracruzanos, guerrerenses, chiapanecos, yucatecos y, desde luego, quintanarroenses, quienes han podido no sólo sobrevivir, sino vivir con dignidad, gracias a su inserción como trabajadores en la industria turística y en las actividades conexas.

Quizá por mi vinculación y conocimiento de la zona he podido percatarme —antes que otros— de la gravedad del problema del sargazo; por ejemplo, cuando en distintos momentos los senadores por Quintana Roo: Mayuli Latifa Martínez Simón, Freyda Marybel Villegas Canché y José Luis Pech Vázquez abordaron el tema en la tribuna del Senado. Es así que en la Comisión de Ciencia y Tecnología que presido, y de la cual es secretario José Luis Pech Vázquez, ilustre quintanarroense, acordamos designar al tema del sargazo como una de nuestras prioridades de atención, y fue por ello que decidimos convocar al evento “El sargazo: retos y oportunidades”, organizado en colaboración con la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AMEXCID), dependiente de la Secretaría





de Relaciones Exteriores, y con el apoyo de un equipo de expertos. El encuentro se llevó a cabo del 19 al 20 de septiembre de 2019.

Con esta iniciativa, pretendíamos alcanzar a un público no especializado y, desde luego, a los legisladores desconocedores de la problemática. Para ello, desarrollamos cuatro mesas de trabajo:

- **Mesa 1. El sargazo**
  - a) ¿Qué es?
  - b) Su importancia en los servicios ecosistémicos del planeta.
  - c) Hábitat natural y cambio climático.
  - d) ¿De área protegida a plaga?
  - e) Variabilidad hidrográfica en el Caribe mexicano.
  - f) ¿Qué falta por conocer?
- **Mesa 2. El sargazo en el Caribe mexicano**
  - a) Magnitud del problema.
  - b) Tipo de afectaciones a la industria turística, pesquera, salud de la sociedad, valoración económica y social.
  - c) ¿Fenómeno estacionario o permanente?
- **Mesa 3. La problemática. Experiencias en las regiones costeras con el sargazo**
  - a) Países del Atlántico templados, subtropicales y tropicales.
  - b) Las costas de Estados Unidos de América.
  - c) Mar Caribe.
  - d) Formas de control y alternativas de uso.

■ **Mesa 4. El sargazo como recurso vivo de interés económico**

- a) ¿Que potencial ofrece?
- b) ¿Recolección mar adentro?
- c) El sargazo en la zona costera: riesgos y afectaciones.
- d) ¿Es posible diseñar medidas de erradicación?
- e) ¿Hay medidas de control?
- f) Otras alternativas.
- g) Nueva economía azul: recolección, maquinarias, depósitos y utilidades diversas.

Para exponer estos temas, invitamos a un destacado grupo de especialistas: científicos, autoridades nacionales vinculadas con el tema, así como prestadores de servicios turísticos en la región. De los científicos que expusieron, 12 de ellos son mexicanos y uno es extranjero, procedentes de siete centros de investigación nacionales; además de siete científicos extranjeros de siete centros académicos y fundaciones internacionales. En total, los 20 expertos provienen de 14 centros de investigación y fundaciones nacionales e internacionales. Los especialistas extranjeros son originarios de Canadá, Estados Unidos de América, Colombia, India y Brasil.

Asimismo, además de los ponentes y legisladores, acudieron al evento más de 80 profesores, investigadores, estudiantes, autoridades federales, estatales y municipales, organizaciones ambientalistas internacionales y nacionales, así como embajadores

y representantes diplomáticos de Brasil, Jamaica, Nicaragua, Panamá, Belice, Países Bajos, Noruega y Estados Unidos de América.

### Reflexiones, consideraciones y recomendaciones

El conjunto de propuestas que aquí se exponen deriva de los trabajos presentados en el evento “El sargazo: retos y oportunidades”. La memoria del encuentro, con todas las presentaciones de los participantes, se puede consultar en la dirección electrónica: <[https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/64/2/2019-12-10-1/assets/documentos/Sargazo\\_Memoria\\_Electronica.pdf](https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/64/2/2019-12-10-1/assets/documentos/Sargazo_Memoria_Electronica.pdf)>.

En el ámbito internacional, es recomendable:

1. Que la Secretaría de Relaciones Exteriores, en coordinación con otras instituciones competentes, acuerden una definición y determinación técnica que permita, gracias al liderazgo de la Cancillería mexicana, conversar con los países de la región, y desde luego con las naciones que

han mostrado un mayor dominio en el tema: las Antillas francesas, Barbados, otros países caribeños, Estados Unidos de América y Brasil. De esta forma, se puede valorar la pertinencia de convocar a la creación de una convención internacional, como la Convención de Cartagena u otra parecida.

2. De manera más general, se podría aprovechar que en la Asamblea General de la Naciones Unidas se realizará una Asamblea Mundial sobre Océanos. Sin duda, uno de los temas más importantes que se tendrían que poner sobre la mesa es el de las nuevas condiciones de la biodiversidad de los océanos, en particular en el caso del Atlántico Norte, Sur y Posecuatorial.
3. Consolidar una estrategia internacional de cooperación sobre el tema del sargazo, con países interesados y fundaciones internacionales.

En fin, con respecto a la normatividad internacional y los acuerdos entre países hay mucho qué decir, y mucho más por acordar y actuar, no sólo para el intercambio de experiencias, sino en la colabo-





ración conjunta para la investigación, información de sistemas de radar satelital, técnicas y equipo de extracción de sargazo, entre otros.

Por otra parte, en la dimensión nacional hay muchas tareas que realizar:

1. Otorgar un presupuesto suficiente para atender el tema. Aunque sabemos que nos encontramos en una situación de austeridad, es necesario que las instituciones públicas involucradas en la atención de este problema planteen de manera oportuna la necesidad presupuestal. Lo ideal es que

se destine una partida específica del presupuesto federal y, además, que en las instituciones responsables haya áreas, funcionarios y presupuestos destinados a la materia. Asimismo, es necesario encontrar fórmulas innovadoras para conseguir recursos que involucren a los diferentes órdenes de gobierno y al sector privado, en particular a la industria turística. También se debe invertir en la investigación científica, los laboratorios y protocolos que permitan conjuntar los esfuerzos de los diferentes centros de investigación en el país y la región para involucrar a todas las naciones que cuenten con capacidades para apoyar por medio de tecnología, equipo y recursos a los estudios de campo y laboratorios que se requieran.

2. En la dimensión legislativa, una posibilidad consiste en trabajar en la legislación medioambiental y ecológica; mientras que otro camino sería definir una legislación específica sobre el sargazo. Sin embargo, esta última no es recomendable, porque tendríamos que hacer legislaciones específicas por cada fenómeno natural que enfrentemos. Más bien, las acciones en este ámbito tendrían que encuadrarse en una legislación de carácter general, además de que es necesario revisar si mediante el esfuerzo legislativo se podría generar una instancia institucional que precise jerarquías, responsabilidades, niveles de coordinación, etcétera. En el nivel de la norma, la instrucción precisa y el protocolo particular —que tiene que ver con todo el proceso de regular y aplicar las reglas de patentes, comercialización, autorizaciones, etcétera—, la legislación federal fija el marco para que después las autoridades competentes emitan las regulaciones correspondientes.

Existe también otra vía de acción que se ha explorado muy poco en el ámbito legislativo de nuestro país. En la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en los artículos 25 y 26, se legisló la existencia de un Sistema Nacional de Planeación y se estableció que podrán formularse planes sectoriales y regionales. Sería saludable propiciar que el gobierno federal, los gobiernos estatales y los municipales, acompañados por todas las instancias federales a las que les





corresponde el tema, así como los centros académicos locales, puedan formular un plan regional de manejo integral y desarrollo del sargazo, el cual permita tener un plan de acción para el corto, mediano y largo plazo, con el objetivo de acordar con las entidades federativas algunas legislaciones locales –y en los municipios algunos reglamentos–, particularmente en el caso de la recolección, manejo y depósito del sargazo.

3. En la estrategia de aprovechamiento económico, un asunto crucial es encontrar las mejores opciones de aprovechamiento productivo del sargazo. Para ello, resulta indispensable la experimentación científica, verificación de calidad y certezas de mercado, con el fin de conocer los distintos productos que pueden generarse a partir del sargazo. Será necesario tener claro cuál será la cadena productiva y garantizar su viabilidad medioambiental; que no tenga consecuencias nocivas ecológicas. Por lo tanto, es necesario

diseñar una política integral para el aprovechamiento del sargazo, la cual contemple los temas de financiamiento, normatividad, promoción, etcétera.

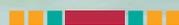
#### **Beatriz Paredes Rangel**

Senadora, presidenta de la Comisión de Ciencia y Tecnología del Senado de la República.

beatriz.paredes@senado.gob.

#### **Referencia específica**

Comisión de Ciencia y Tecnología del Senado de la República (2019), *El sargazo: retos y oportunidades*. Disponible en: <[https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/64/2/2019-12-10-1/assets/documentos/Sargazo\\_Memoria\\_Electronica.pdf](https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/64/2/2019-12-10-1/assets/documentos/Sargazo_Memoria_Electronica.pdf)>, consultado el 25 de agosto de 2020.



# El sargazo, un fenómeno complejo

El sargazo pelágico se presenta en áreas tropicales y subtropicales del Atlántico Norte y constituye un hábitat esencial para más de 120 especies; además, tiene un importante rol ecológico en las zonas costeras. Sin embargo, la afluencia masiva de sargazo provoca daños por su acumulación y descomposición, con lo cual afecta a los ecosistemas costeros, al turismo y a la salud humana.

## Descripción inicial del fenómeno

El sargazo es un conjunto de macroalgas marinas, del género *Sargassum*, que presentan colores pardos, negros y verdes, tienen diversas texturas (rizadas, laminadas, en estirpe) y pueden ocupar extensas superficies en una gran variedad de hábitats. Algunas especies de sargazo tienen vesículas con gas que les permiten mantenerse a flote en el océano y desarrollarse. Las especies más representativas de sargazo que conforman los mantos flotantes son: *Sargassum natans* (Linnaeus) y *S. fluitans* (Børgesen).

El sargazo en el océano funciona como hábitat, refugio y sitio de alimentación o desove para varias especies marinas que utilizan estas macroalgas como medio de alimento, protección y transporte. Se ha observado que la biomasa de los mantos flotantes puede alcanzar hasta 20 millones de toneladas de peso vivo en 8 850 km en el Atlántico. A este fenómeno de acumulación masiva de sargazo se le ha dado el nombre de Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (Wang y cols., 2019).

## Arribazón masiva de sargazo, un problema ecológico

Las manchas de sargazo pasan por diferentes países del Caribe, desde las costas de Brasil hasta México, y pueden convertirse en un





importante ecosistema que permite ampliar la distribución espacial de muchas especies, lo cual genera cambios ecológicos y propicia la introducción de especies invasoras. Las corrientes marinas y los vientos son dos factores que influyen en la llegada de estas macroalgas hacia las costas. En 2010 se reconoció una nueva zona, denominada como nuevo mar de los sargazos, donde las condiciones detonaron el florecimiento (Wang y cols., 2019) en la región del Atlántico Sur, frente a las costas de Brasil y África.

A partir de 2014, se han presentado arribazones masivas de sargazo a las costas del Caribe mexicano. Esto ha ido deteriorando el ambiente, dañando las playas y afectando al sector turístico, que es una de las fuentes de ingresos más importantes del país. En 2015 se estimó una acumulación de sargazo de

2 360 m<sup>3</sup> por kilómetro de playa al mes. En un esfuerzo por controlar esta afluencia masiva, se han implementado algunas medidas tendientes a la recolección en mar antes de que llegue a las costas, o bien mediante la recolección del sargazo acumulado en la playa.

El impacto de este fenómeno ha sido tanto económico como social en la región del Gran Caribe; de manera particular, representa un problema abrumador para el turismo. Frente a la amenaza social, económica y ambiental que las arribazones masivas de sargazo implican, los países afectados han respondido con acciones a corto plazo y mediante enfoques intuitivos, tales como la colecta manual o con uso de maquinaria en la playa. No obstante, esta última medida no es ideal, ya que compacta la arena, modifica los perfiles de playa y puede destruir los nidos



de las tortugas. Otra estrategia recurrente es el uso de barreras en el mar para la contención y colecta del sargazo antes de que llegue a las playas; sin embargo, las barreras tienden a romperse o a desancarse y derivar hacia la playa, lo cual pone en riesgo a los arrecifes. Adicionalmente, la colecta del sargazo sin un protocolo adecuado afecta al acuífero, debido a la infiltración de **lixiviado** (NOM-083-SEMARNAT-2003) al descomponerse las macroalgas en la zona de disposición final.

Por lo anterior, la comunidad científica se enfrenta a un panorama muy complejo, el cual exige diversos esfuerzos para poder comprender el fenómeno y proponer estrategias de manejo del sargazo. En 2017 arribaron al Caribe mexicano 11 523 000 turistas, atraídos por la belleza escénica no sólo de las playas, sino del sistema arrecifal mesoamericano (la segunda barrera de arrecife más grande del planeta). Sin embargo, se encontraron con un escenario de “desastre” natural y económico. Esto representa un enorme reto, pero es también una oportunidad para generar e impulsar un nuevo modelo de turismo en el que la sustentabilidad sea el eje central del desarrollo.

### Afectaciones en la zona costera del Caribe mexicano

El agua del mar Caribe se caracteriza por tener pocos nutrientes y materia orgánica, con lo cual se mantiene el funcionamiento y equilibrio ecosistémico de los arrecifes coralinos. Sin embargo, la enorme cantidad de sargazo que llega a la costa —alrededor de 200 000 toneladas al año (SEMA, 2018)— se acumula y se descompone en la playa, por lo que causa alteraciones en la calidad del ambiente. Los recientes eventos de afluencia atípica e incremento de biomasa de sargazo se han relacionado con altas concentraciones de nutrientes en el agua. Asimismo, la descomposición del sargazo en la playa permite la proliferación de bacterias que, como consecuencia, pueden alterar la química del agua, lo que resulta en la muerte de peces, crustáceos, tortugas y tiburones pequeños por la generación de condiciones **anóxicas** (Rodríguez Martínez y cols., 2020). Todavía no se comprende



#### Lixiviado

Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtración de los materiales que constituyen los residuos, contenidos en forma disuelta o en suspensión.

totalmente cómo la presencia de estas macroalgas modifica las condiciones químicas del agua subterránea y de las zonas costeras. Por ello, es imperante determinar cuál es el impacto del fenómeno de la arribazón masiva de sargazo para la calidad del agua y la biodiversidad.

La descomposición del sargazo en el agua somera genera ácido sulfhídrico, el cual provoca la elevación de la temperatura entre 3 y 4 °C; esto destruye el hábitat de peces, crustáceos y moluscos, además de inducir la pérdida de los arrecifes (Louime y cols., 2017). El efecto de la descomposición del sargazo llevó a la hipótesis de que este fenómeno podría ser el origen de la llegada del patógeno que provocó el **síndrome blanco** del coral en el Caribe. Sin embargo, a pesar de que es una explicación muy interesante, aún no ha sido totalmente comprobada.

### Enfrentar la problemática generada por el sargazo

Es fundamental comprender de forma integral el problema del arribo masivo del sargazo y sus consecuencias en la zona costera, así como también es necesario conocer la estructura de la comunidad de especies asociadas al sargazo y el aporte de las posibles especies invasoras relacionadas con el fenómeno.

#### Síndrome blanco

Nombre genérico para una enfermedad letal que afecta a más de 20 especies de corales escleractinios y que está provocando mortalidades masivas en los arrecifes del Caribe (Sociedad Mexicana de Arrecifes Coralinos).

#### Anóxicas

Cuando un ambiente carece de oxígeno. En el medio acuático, la contaminación por sustancias orgánicas favorece un intenso crecimiento bacteriano que consume el oxígeno disuelto en el agua.



**Karstificación**

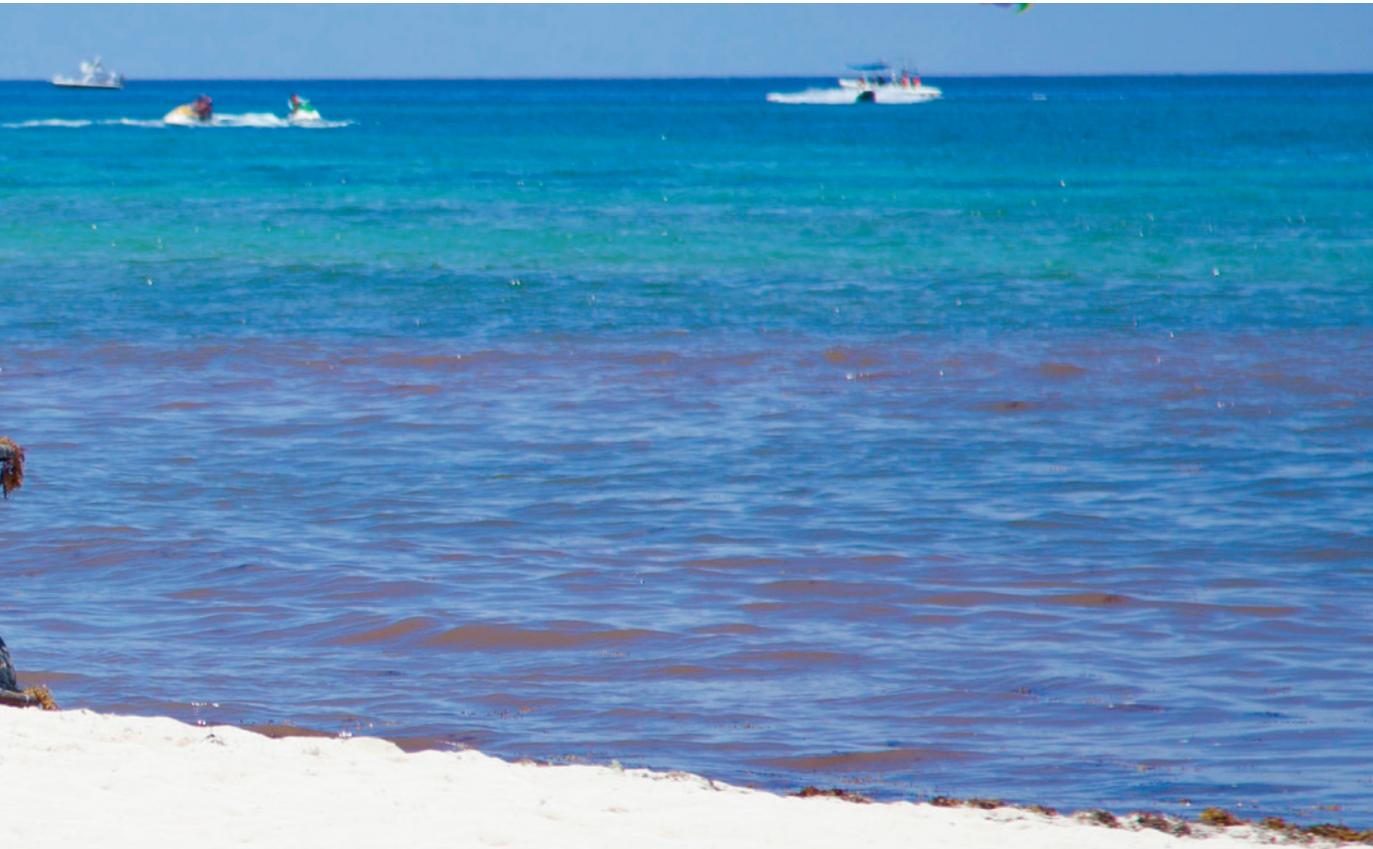
Disolución indirecta del carbonato cálcico de las rocas calizas, debido a la acción de aguas ligeramente ácidas. Esta erosión crea un paisaje con formación de dolinas (cenotes), producto de la disolución, fracturas y condiciones de otros sistemas hidrogeológicos.

Dadas las condiciones de **karstificación** en la península de Yucatán, la generación de lixiviados como resultado de la descomposición del sargazo y su emisión a la intemperie en los sitios donde se deposita sin tener un confinamiento adecuado es el origen de muchas sustancias tóxicas y contaminantes que se infiltran al agua subterránea, lo cual afecta su calidad y puede traer repercusiones importantes para la salud pública y de los ecosistemas.

El fenómeno del sargazo en la región requiere de soluciones integrales a corto, mediano y largo plazo. Sin embargo, debido a la urgencia de resolver el problema, actualmente se han planteado “soluciones” rápidas que tienen que ver más con amortiguar los efectos de índole escénica. Estas medidas corresponden a la colecta del sargazo en la playa y su disposición final en áreas tierra adentro —en su mayoría, tiraderos clandestinos—. Hace falta una visión completa e interés desde varios niveles para conseguir fondos de inversión destinados a la investigación básica y aplicada, con la cual podamos entender los efectos

de las arribazones del sargazo y generar soluciones concretas e innovadoras para utilizar estas macrolagas de manera sustentable. Lo anterior permitirá transitar de un fenómeno complejo a una oportunidad real de desarrollo.

Estamos frente a un futuro ambiental incierto, pero la mejor solución siempre será la prevención. La comunidad científica requiere concentrarse en buscar soluciones a la par de que se sigue acumulando el sargazo. Por lo pronto, el consenso académico se ha enfocado a proponer la colecta mar adentro y no en la costa; no obstante, la capacidad instalada para ello es aún incipiente. Por otra parte, las propuestas tecnologías más avanzadas para el aprovechamiento del sargazo están dirigidas, entre otras, a la obtención de madera plástica, la generación de biocombustible y —de manera destacada— la obtención de materias primas para la industria química y alimentaria; este último enfoque es el que cuenta con un mayor potencial.



Agradecemos a Jorge Carlos Peniche Pérez, de la Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán, por su asistencia técnica para la generación de los datos utilizados en la elaboración de este manuscrito.

### J. Adán Caballero Vázquez

Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán.  
adan.caballero@cicy.mx

### Gilberto Acosta González

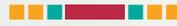
Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán.  
gilberto.acosta@cicy.mx

### Cecilia Hernández Zepeda

Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán.  
cecilia.hernandez@cicy.mx

### Referencias específicas

- Louime, C., J. Fortune y G. Gervais (2017), “*Sargassum* Invasion of Coastal Environments: A Growing Concern”, *American Journal of Environmental Sciences*, 13(1):58-64. Disponible en: <[doi.org/10.3844/ajessp.2017.58.64](https://doi.org/10.3844/ajessp.2017.58.64)>, consultado el 24 de agosto de 2020.
- Rodríguez Martínez, R. E., P. D. Roy, N. Torrescano-Valle, N. Cabanillas-Terán, S. Carrillo-Domínguez, L. Collado-Vides, M. García-Sánchez y B. I. van Tussenbroek (2020), “Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019”, *PeerJ*, 8: e8667. Disponible en: <[doi.org/10.7717/peerj.8667](https://doi.org/10.7717/peerj.8667)>, consultado el 24 de agosto de 2020.
- SEMA (2018), *Modelo de atención integral para el arribo de sargazo*, Secretaría de Ecología y Medio Ambiente. Disponible en: <[www.qroo.gob.mx/sema/modelo-de-atencion-integral-para-el-arribo-de-sargazo](http://www.qroo.gob.mx/sema/modelo-de-atencion-integral-para-el-arribo-de-sargazo)>, consultado el 24 de agosto de 2020.
- Wang, M., Ch. Hu, B. B. Barnes, G. Mitchum, B. Lapointe y J. P. Montoya (2019), “The great Atlantic *Sargassum* belt”, *Science*, 365:83-87. Disponible en: <[doi.org/10.1126/science.aaw7912](https://doi.org/10.1126/science.aaw7912)>, consultado el 24 de agosto de 2020.



# Sargazo en movimiento

Analizaremos las causas de las arribazones de sargazo a escala regional y local. Los florecimientos parecen estar relacionados con procesos de fertilización oceánica. La forma en que esto ocurre depende de variaciones estacionales e interanuales de los vientos, olas y corrientes, además de la presencia de remolinos y otros procesos en la zona costera, donde la fricción tiene un papel relevante.

## Introducción

El año 2011 marca el inicio de las invasiones masivas de sargazo en el mar Caribe y de lo que ahora conocemos como el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico (GCSA). Estos crecimientos anómalos continuaron de forma irregular pero recurrente en 2014, 2015, 2017, 2018 y 2019 (véase la Figura 1a). En 2015 y 2018, fueron particularmente intensos.

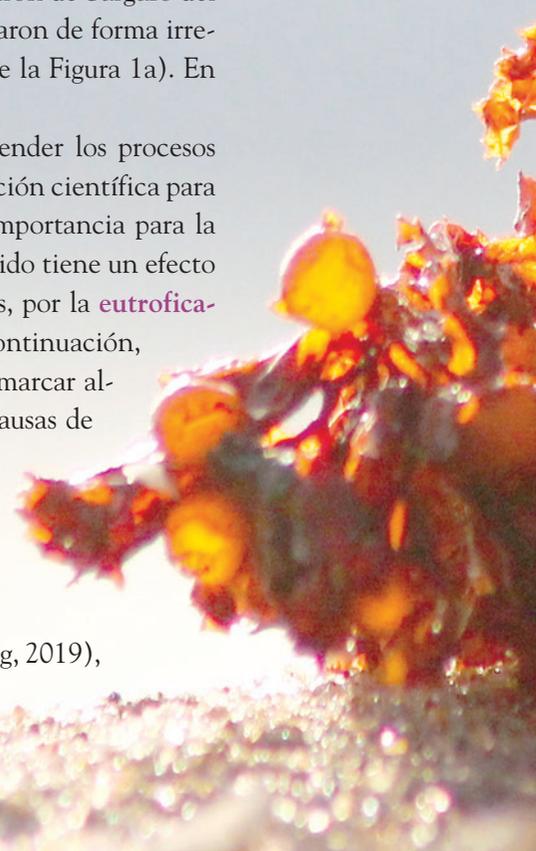
Al respecto, se han formulado muchas hipótesis para entender los procesos involucrados en este fenómeno, pues se requiere de la investigación científica para mitigar su impacto y aprovechar el sargazo. Éste es de vital importancia para la supervivencia de diversas especies, pero su crecimiento desmedido tiene un efecto negativo en los ecosistemas costeros, en especial los arrecifales, por la **eutrofización** y por un manejo inadecuado del sargazo en las playas. A continuación, presentamos un contexto más amplio y su variabilidad para remarcar algunos eventos importantes que podrían relacionarse con las causas de estas arribazones anómalas de sargazo a escala regional y local.

### Eutrofización

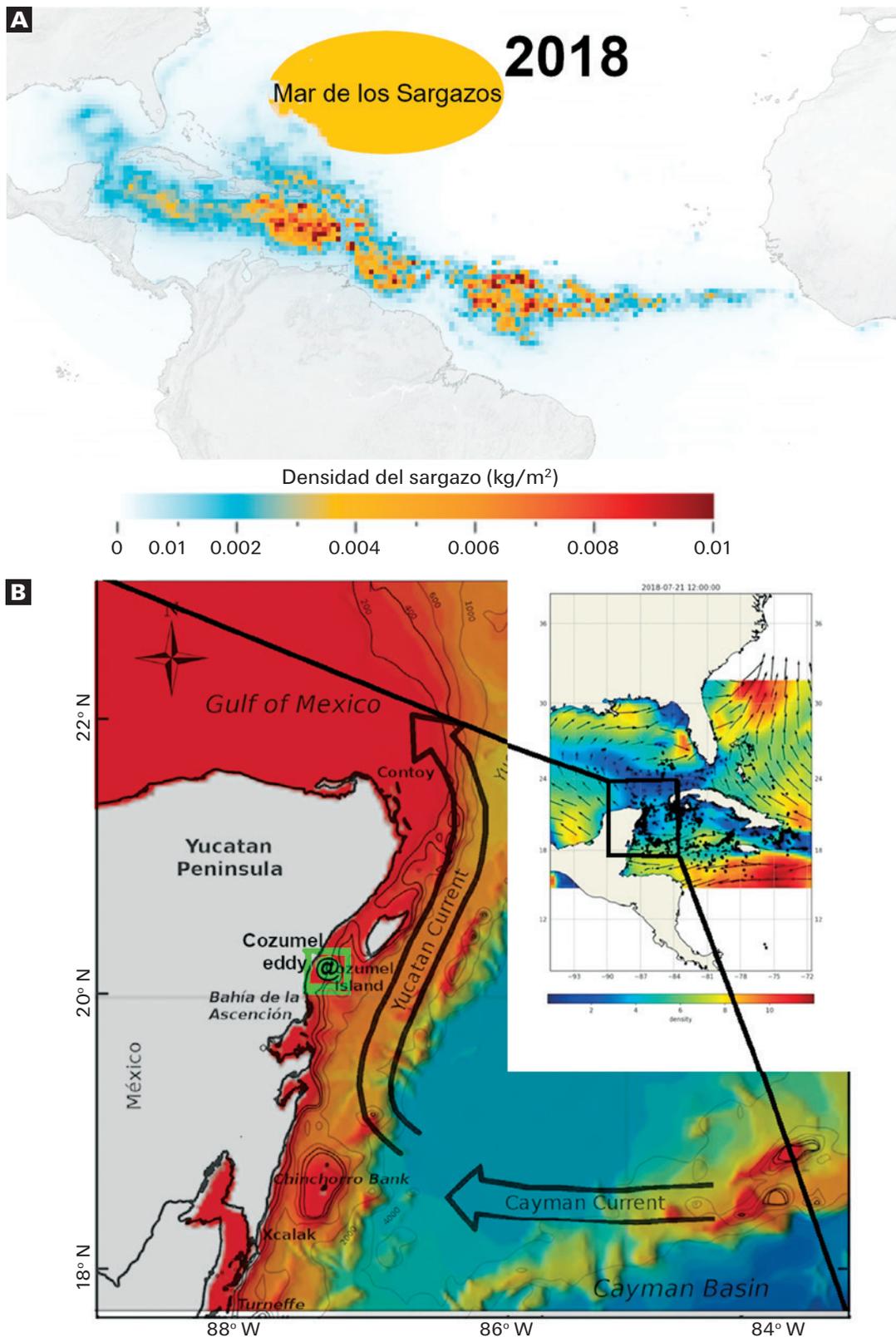
También llamada eutrofización, significa aumento de la concentración de fósforo, nitrógeno y otros nutrientes en un ecosistema acuático, lo que provoca un exceso de fitoplancton o de plantas acuáticas.

## Océano, atmósfera y tierra en el Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico

El GCSA parece tener su origen en el Atlántico Tropical (Wang, 2019), en la región denominada NEER (por las siglas en







**Figura 1.** a) Concentración superficial de sargazo en julio de 2018 (adaptada de Wang y cols., 2019 y del sitio web de la NASA: <<https://earthobservatory.nasa.gov/images/145281/scientists-discover-the-biggest-seaweed-bloom-in-the-world>>). Se indica la localización del mar de los Sargazos. b) Ejemplos de la batimetría en el Caribe mexicano (modificada de Carrillo y cols., 2015) y de una predicción del movimiento del sargazo durante julio de 2018 (1 día, modelo desarrollado por CIGOM: <<http://www.cigom.org>>). Se muestra la corriente Cayman, la corriente de Yucatán y el giro de submesoescala al sur de Cozumel (cuadro verde).

inglés de *North Equatorial Recirculation Region*). El sargazo que se produce en esta zona es transportado por las corrientes, los vientos y el oleaje hacia el Caribe, Golfo de México y parte de la costa este de Estados Unidos de América. La forma en que esto ocurre depende de variaciones estacionales e interanuales de los vientos, olas y corrientes, pero también se debe a la presencia de remolinos, frentes y otros procesos complejos de menor escala. El sargazo flota y no siempre está en la superficie, por lo que entender cómo se mueve es un tema candente de investigación.

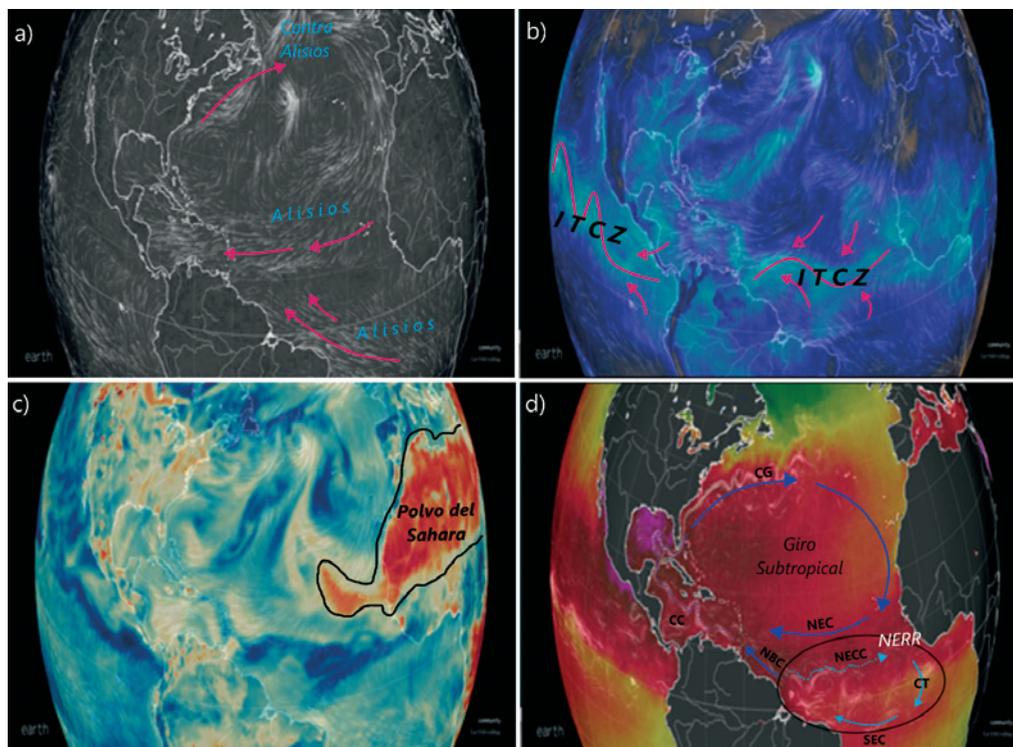
La entrada de sargazo al Caribe ocurre, por lo general, en los primeros meses del año (de enero a marzo); el GCSA alcanza su máxima extensión en julio y agosto. Para explicar este comportamiento es necesario entender las características de la circulación oceánica y atmosférica, en combinación con la fisiología y la biogeoquímica. La Figura 2 muestra

una “fotografía” que ilustra de mejor manera algunas características típicas de la circulación atmosférica y oceánica a gran escala durante un día de agosto de 2018, cerca del pico de extensión del GCSA, que ocurrió en julio de ese año.

Podemos ver que en el Atlántico Tropical, Caribe y Golfo de México dominan los **vientos alisios** o del este (véase la Figura 2a). En la región tropical, los alisios del norte tienen un componente que apunta al suroeste, mientras que los que vienen del hemisferio sur tienen un componente norte. Esto produce un encuentro que da lugar a la llamada Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), representada en la Figura 2b por la banda de color azul cerca de la línea del ecuador, tanto en el Atlántico como en el Pacífico.

La fuerte precipitación en esta zona complica la detección satelital de las plumas de agua dulce de

**Vientos alisios**  
Son aquellos que soplan en las regiones tropicales desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales, y son desviados por el movimiento de la Tierra hacia el oeste.



**Figura 2.** Fotografías del 15 de agosto de 2018 de: a) vientos superficiales, con marcas de color que señalan a los vientos del este (alisios) y del oeste (contralisios); b) vientos y agua precipitable en la atmósfera, con valores máximos en azul claro y en los que se identifica a la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ); c) partículas suspendidas en la atmósfera; con color rojo se muestra la extensión de la pluma generada por los polvos del Sahara; d) corrientes oceánicas y temperaturas superficiales, en las que se marcan varias estructuras mencionadas en el texto: el giro subtropical del Atlántico Norte, la corriente ecuatorial norte (NEC), la corriente norte de Brasil (NBC) y la zona de recirculación norecuatorial (NERR), conformada por la corriente sur ecuatorial (SEC), que fluye al oeste, y la contracorriente ecuatorial norte (NECC). CT (por las siglas en inglés de *cold tongue*) es una lengüeta de agua fría. Las imágenes fueron extraídas del programa *Earth: An animated map of global wind and weather*, disponible en: <<https://earth.nullschool.net>>.



**Fuerza de Coriolis**

Es una fuerza aparente, debida a la rotación terrestre, que desvía el movimiento de masas de agua o de aire a la derecha (izquierda) en el hemisferio norte (sur).

los ríos Amazonas y Congo, las cuales se han sugerido como mecanismos importantes de fertilización (Wang y cols., 2019; Oviatt y cols., 2019); aunque otros estudios (Johns y cols., 2020) no encuentran evidencia de ello y proponen que los florecimientos ocurren en el centro del Atlántico Tropical, bajo la ITCZ, lejos de la influencia de los ríos. Otra fuente de fertilización son los polvos provenientes del Sahara, cuya presencia puede identificarse por su color rojo (véase la Figura 2c). Durante julio a septiembre, estas partículas tienden a viajar en dirección al oeste, incluso hasta el Caribe, mientras que en el invierno viajan hacia al ecuador, llegan al Amazonas y participan en la fertilización de la región. Además, está la fertilización proveniente de los procesos oceánicos de afloramiento ecuatorial y por huracanes (Oviatt y cols., 2019).

En la latitud 30° N se puede apreciar el inicio de los vientos del oeste, o contraalios, que se extienden hasta los 60° N. El mar de los Sargazos se ubica precisamente entre los dos sistemas de viento (véase la Figura 1a). Las variaciones en la posición e in-

tensidad de los vientos se relacionan con diferentes índices de variabilidad climática, como la oscilación del Atlántico Norte (NAO), que mide la diferencia de presión atmosférica entre la alta de las Azores y la baja de Islandia. Este sistema de vientos explica la circulación oceánica y sus variaciones de temperatura, cuya expresión superficial puede verse en la Figura 2d. La forma en que el forzamiento del viento da lugar al patrón de corrientes oceánicas que ahí se marca está determinada por el balance dinámico entre el esfuerzo del viento sobre la superficie del mar, el gradiente de presión y la **fuerza de Coriolis**. Comenzando por latitudes más altas, entre los alios y contraalios se forma el giro subtropical del Atlántico Norte, producto de la convergencia del flujo oceánico por el arrastre del viento hacia dicha región (transporte de Ekman), que resulta a la derecha (izquierda) de la dirección del viento en el hemisferio norte (sur). Esta convergencia da lugar a un transporte vertical de agua cálida hacia profundidades mayores, al hundimiento de las **isotermas** y a una elevación del nivel del mar en el centro del

**Isotermas**

Curvas que representan puntos de igual temperatura en una visualización gráfica de los campos de temperatura.

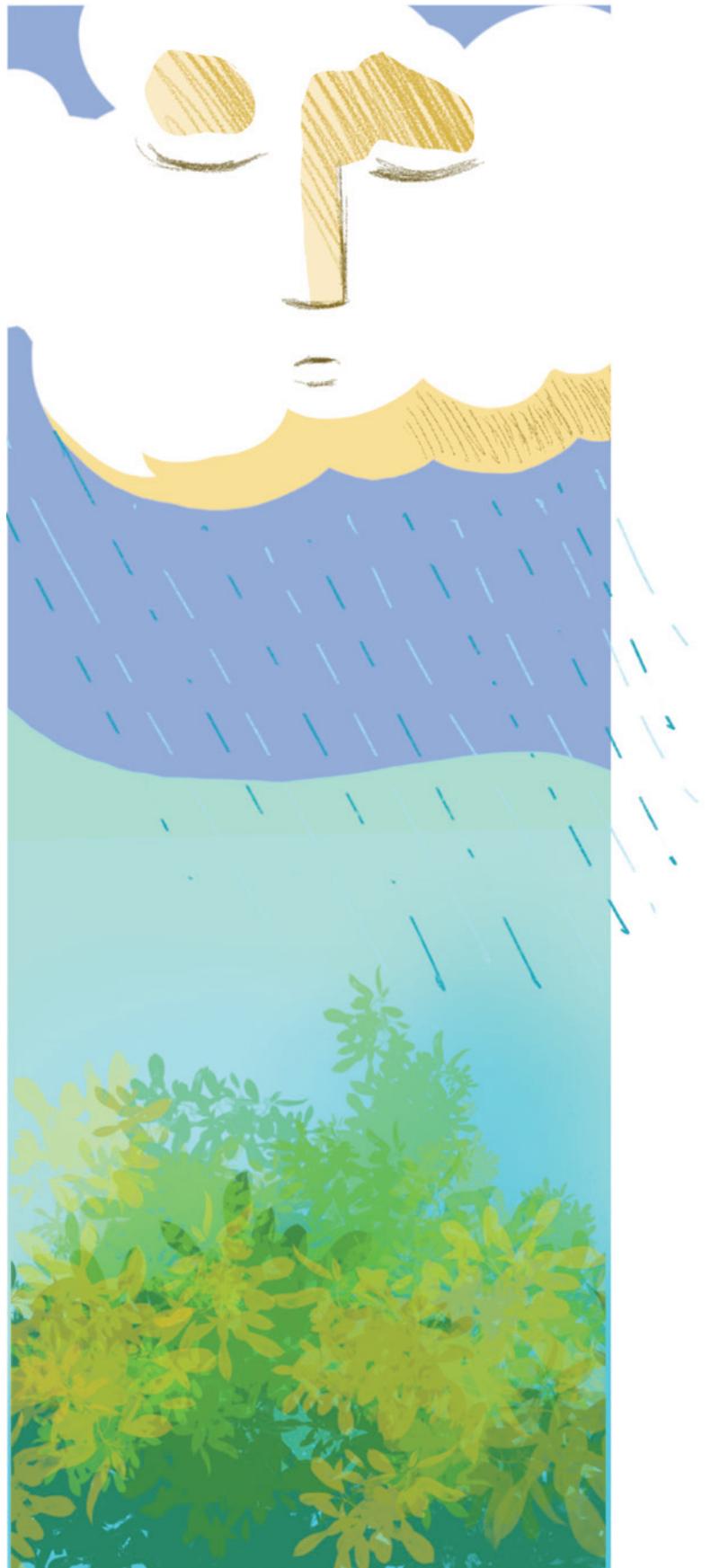


giro. Todo esto se combina para generar las corrientes geostróficas (corrientes oceánicas que resultan del balance entre la fuerza de Coriolis y el gradiente de presión), que conforman el giro subtropical (véase la Figura 2d).

En las regiones tropicales cercanas al ecuador, donde se ubica el sistema de corrientes de la NERR, la dinámica es un poco diferente a la que ocurre en latitudes más altas. Como la fuerza de Coriolis se anula sobre el ecuador, los vientos alisios arrastran el agua en su misma dirección y la apilan cerca de la costa de Brasil. Al mismo tiempo, en cuanto se separa del ecuador, la fuerza de Coriolis deja de ser nula y toma valores de signo contrario dependiendo del hemisferio. Ello provoca que el transporte de Ekman en la superficie sea hacia los polos en ambos hemisferios, lo cual genera una divergencia superficial en el ecuador y el afloramiento de aguas más profundas, frías y ricas en nutrientes hacia la superficie.

La NERR se conforma por varias corrientes (véase la Figura 2d). La corriente norte de Brasil (NBC) se alimenta al este por la rama norte de la corriente sur ecuatorial (SEC). La NBC, a su vez, mediante un proceso conocido como retroflexión, nutre a la contracorriente ecuatorial norte (NECC), que fluye de regreso hacia el este y está conectada estacionalmente con la ITCZ. Al llegar a las cercanías de África, la NECC se reconecta con la SEC por una de sus ramas que fluye al sur; así se cierra el patrón de recirculación.

Se esperaría que, si los ríos son los principales responsables de los afloramientos de sargazo, algunos eventos importantes que ocurrieron en los últimos 20 años –como las sequías (2005, 2010) y en particular las inundaciones (2009, 2012) de la cuenca del Amazonas– deberían tener algún tipo de correlación. Sin embargo, durante esos años no ocurrieron afloramientos fuertes. Una explicación (Wang y cols., 2019) sugiere que el retraso (pues el pico inicial de sargazo fue en 2011) se debe a varias circunstancias; entre ellas, que había una temperatura oceánica más alta que impidió un crecimiento mayor del sargazo. Por otra parte, también se ha notado que los eventos de 2011, 2012, 2015 y 2018 estuvieron precedidos por una intensa actividad de





huracanes (Oviatt y cols., 2019), por lo que se sugieren mecanismos para conectar esta actividad con los crecimientos de sargazo en el Atlántico Occidental, mientras que se propone que los flujos de ríos y el afloramiento de aguas ricas en nutrientes en las costas de África son las causas del crecimiento en el Atlántico Oriental.

### ■ **Movimiento del sargazo**

■ A partir de un análisis de datos atmosféricos y oceanográficos (Johns y cols., 2020), se ha señalado que en 2010 se presentó un alto índice negativo de la NAO, lo que indica que los contraalisos se intensifican y se desplazan un poco al sur, mientras que los alisos se debilitan. El análisis incorpora el efecto directo de arrastre del viento y las corrientes oceánicas para simular el movimiento de partículas en el océano, y sugiere que el cambio en los vientos ocurrido en 2010 produjo que grandes cantidades de algas del mar de los Sargazos llegaran al Atlántico Tropical, donde encontraron condiciones propicias para su crecimiento. Asimismo, se sugiere que los mecanismos que controlan los florecimientos de sargazo en la NERR parecen estar relacionados con procesos de fertilización ligados a la dinámica oceánica.

En el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) se han desarrollado diferentes modelos para simular el movimiento del sargazo, a los cuales se ha incorporado el arrastre por viento y olas, así como el hundimiento de partículas por rompimiento de olas y turbulencia. La Figura 1b muestra un ejemplo de un “pronóstico” (denominado en inglés *hindcast*) que se hace en el pasado tomando el pronóstico de corrientes marinas y vientos de esos días y utilizando posiciones del sargazo a partir de datos satelitales.

#### *De lo oceánico a lo costero*

Mientras se avanza en el entendimiento del transporte del sargazo a gran escala, existe poco conocimiento de las rutas de transporte del sargazo desde el océano a las costas. Al acercarse a la costa se presenta un umbral de cambios en los fenómenos que controlan la circulación, debido en parte al

cambio en la profundidad de la columna de agua. Ahí, la extensión del continente hacia el océano –llamada plataforma continental– ejerce fricción y empieza a gobernar el comportamiento de la circulación y la disipación de la energía, lo cual genera inestabilidades y turbulencia (Simpson y Sharples, 2012). Por otro lado, en la zona costera se tiene el efecto de las mareas, los vientos locales y el oleaje en la configuración de la costa y en la pendiente del fondo marino. Si a eso se añade la existencia de la barrera de los arrecifes de coral, la complejidad para modelar el transporte y comportamiento del sargazo hacia la playa se incrementa. La extensión de la plataforma, su pendiente y la configuración de la línea de costa van cambiando, de tal manera que hay sitios como una plataforma de varias centenas de kilómetros y otros cuya extensión es de sólo un par de kilómetros (véase la Figura 1b).

#### *El Caribe mexicano*

Si bien la llegada de sargazo a las costas del Caribe mexicano ya se había observado, no fue sino hasta 2015 que se presentó de manera masiva. Se sabe que entre los aspectos oceanográficos relevantes destaca la corriente de Yucatán (véase la Figura 1b), una de las más intensas del mundo, que es parte del sistema de circulación del Atlántico, y que conecta el Caribe con el Golfo de México a través del canal de Yucatán. Por otro lado, se han observado contracorrientes costeras y la presencia de remolinos a una escala de decenas de kilómetros, capaces de generar retención y fortalecer estas contracorrientes, como la del sur del canal de Cozumel (Carrillo y cols., 2015).

### ■ **Relevancia de las observaciones**

■ En esta revisión hemos transitado de lo oceánico a lo costero, a partir de las distintas aproximaciones entre las dos escalas, para esclarecer los procesos físicos involucrados en la cantidad de sargazo que llega a la costa, lo cual sigue siendo una incógnita. La resolución de los sistemas actuales de pronósticos para el Caribe no permite predecir el arribo y la dispersión a las costas mexicanas. En otro tipo de contin-



gencias, como los derrames de petróleo, las observaciones *in situ*, junto con herramientas satelitales y la modelación numérica, han probado el desarrollo de escenarios de predicción de corto plazo y en tiempo casi real. Todavía México no cuenta con un sistema de observación para las costas del Caribe que permita definir las mejores acciones de mitigación ante la presencia masiva de sargazo, por lo que se requiere de un sistema interinstitucional de observación de los océanos y las costas en el Caribe mexicano.

#### Laura Carrillo

El Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal.  
lcarrillo@ecosur.mx

#### Julio Sheinbaum Pardo

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.  
julios@cicese.mx

#### Referencias específicas

- Carrillo, L., E. M. Johns, R. H. Smith, J. T. Lamkim y J. L. Largier (2015), "Pathways and Hydrography in the Mesoamerican Barrier Reef System, Part 1: Circulation Continental", *Shelf Research*, 109:164-176.
- Johns, E. M., R. Lumpkin, N. F. Putman, R. H. Smith, F. E. Muller-Karger, D. Rueda, C. Hu, M. Wang, M. T. Brooks, L. J. Gramer y F. E. Werner (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*, 102269.
- Oviatt, C. A., K. Huizenga, C. S. Rogers y W. J. Miller (2019), "What nutrient sources support anomalous growth and the recent *Sargassum* mass stranding on Caribbean beaches? A review", *Marine Pollution Bulletin*, 145:517-525.
- Simpson, J. y J. Sharples (2012), "Introduction to the shelf seas", en J. Simpson y J. Sharples, *Introduction to the Physical and Biological Oceanography of Shelf Seas*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 1-24. Disponible en: <doi.org/10.1017/CBO9781139034098.004>, consultado el 25 de agosto de 2020.
- Wang, M., C. Hu, B. B. Barnes, G. Mitchum, B. Lapointe y J. P. Montoya (2019), "The great Atlantic *Sargassum* belt", *Science*, 365(6448):83-87.



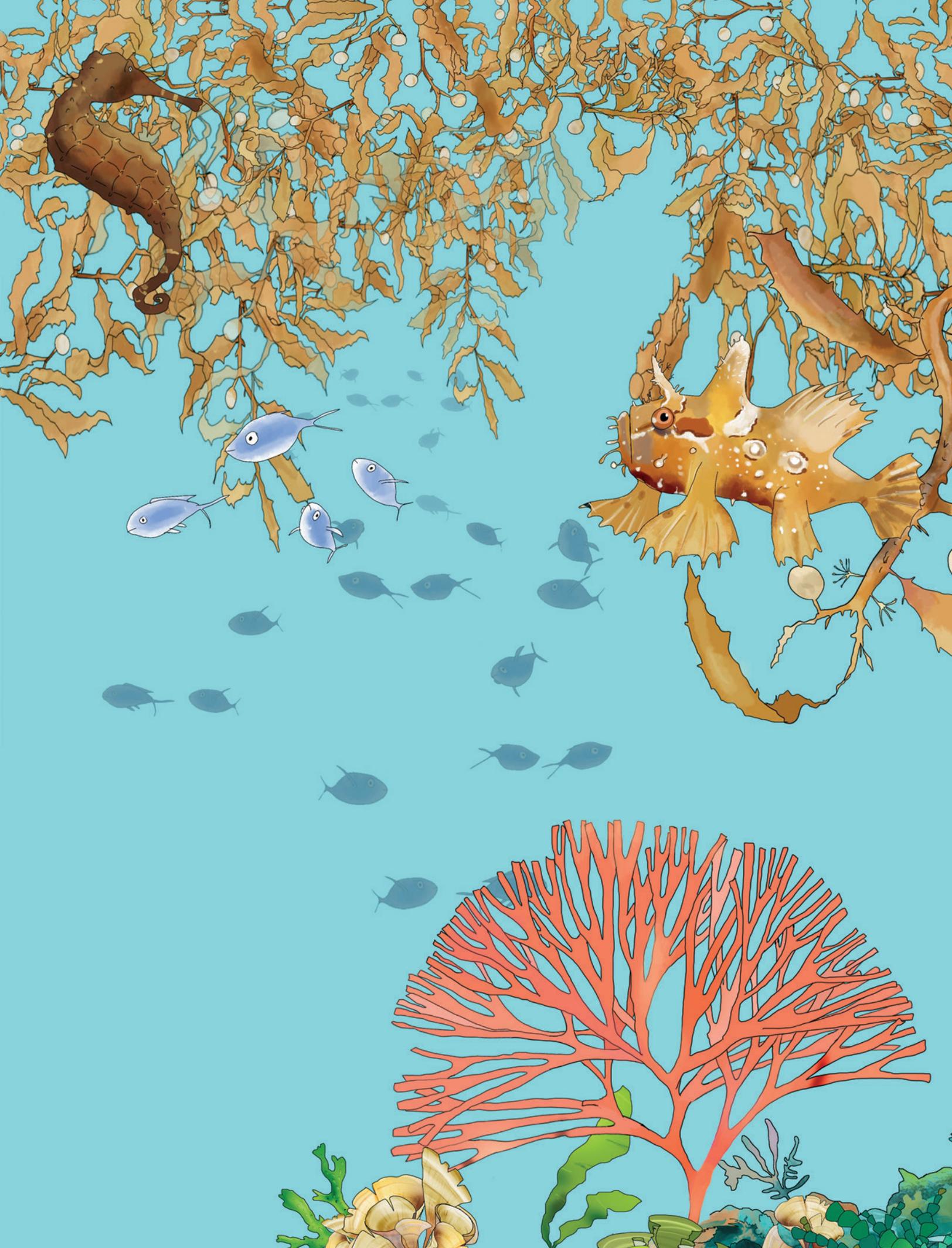
# El sargazo en los pastos marinos y arrecifes

La llegada de enormes masas algales y su descomposición en las playas del Caribe mexicano genera mal aspecto y olor, además de que libera sustancias que deterioran la calidad del agua y afectan a la flora y fauna marina. Los efectos pueden extenderse por cientos de metros hacia el arrecife, con impactos ecológicos, sociales y económicos si no se maneja de manera adecuada este nuevo fenómeno.

## Introducción

En la última década, las costas de los países en el Caribe y el oeste de África han recibido arribos masivos de sargazo pelágico que han provocado el deterioro del ambiente, además de que representan una amenaza para el turismo, la pesca y la salud humana. Sargazo es el nombre común de dos especies marinas de un género de macroalgas pardas (*Sargassum*), del cual se reconocen a la fecha 361 especies. Estas dos especies, *Sargassum natans* y *S. fluitans*, pasan su vida flotando en el mar. Históricamente, su distribución se centró en el mar de los Sargazos, en el Atlántico Norte, aunque de manera ocasional algunas masas de sargazo se desprendían y eran transportadas por las corrientes marinas y el viento hasta las costas de las islas en el noreste del Caribe y la parte este de la península de Yucatán. Sin embargo, a partir de 2011 el volumen de sargazo que llegó a las playas de las islas del Caribe oriental y de la costa oeste de África aumentó notoriamente y, desde mediados de 2014, el arribo masivo de sargazo se comenzó a registrar también en el resto del Caribe, incluidas las playas de México (véase la Figura 1).

En un principio, se pensó que las arribaciones masivas a estas costas provenían del mar de los Sargazos; sin embargo, el análisis de imágenes de satélite recientemente ha demostrado la presencia de un Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, que se extiende desde la costa oeste de África hasta el Golfo de México. En julio de 2018, este Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico alcanzó su máximo tamaño al extenderse por más de 8 850 km; se llegó a estimar que la biomasa total era mayor a



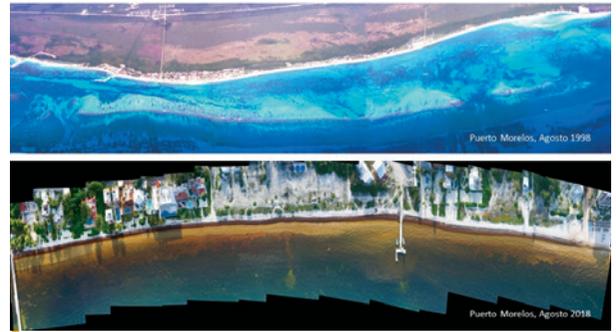


**Figura 1.** Manchas de sargazo pelágico arribando a una playa del Caribe mexicano en 2019. Foto: Lorenzo Álvarez Filip.

20 millones de toneladas. Entre los factores que posiblemente han favorecido el aumento de la biomasa de sargazo en el sur y este del Atlántico durante la última década se incluye el incremento en la concentración de nutrientes de origen antropogénico en el mar, así como los cambios en los regímenes de corrientes, surgencias y vientos, probablemente inducidos por el cambio climático.

En el Caribe mexicano, el primer arribo masivo de sargazo comenzó a finales de 2014 y alcanzó valores muy altos en el verano de 2015. En esa época, en el norte de Quintana Roo se removió un promedio de 2 360 m<sup>3</sup> de sargazo por kilómetro de la playa entre Cancún y Puerto Morelos. En 2016 y 2017, la llegada de sargazo disminuyó, pero luego volvió a incrementarse en 2018, cuando se registraron volúmenes superiores a los de 2015 en el mismo sector de playa (3 200 m<sup>3</sup> km<sup>-1</sup>).

Las masas flotantes de sargazo en el mar abierto sirven como hábitat a numerosas especies animales y vegetales; sin embargo, cuando se acumulan en las playas provocan daños severos a los ecosistemas costeros. Esto se debe a que su descomposición produce una gran cantidad de lixiviados y partículas de materia orgánica que deterioran la calidad de la playa y del agua marina costera, la cual se torna café y turbia (véase la Figura 2). Lo anterior induce una disminución del nivel de oxígeno y aumenta las concentraciones de nutrientes, taninos y otros compuestos



**Figura 2.** Cambio en la coloración del agua en la costa de Puerto Morelos, Quintana Roo, en 1998 (superior) y durante el evento de sargazo de 2018 (inferior). Fotos: Eric Jordán Dahlgren.

orgánicos, así como ácido sulfhídrico en el agua, que puede provocar la muerte de pastos marinos y fauna. A este fenómeno se le dio el nombre de marea marrón de sargazo. Aunque es claramente visible desde la playa hasta decenas de metros mar adentro, sus efectos se pueden extender hasta cientos de metros desde la costa y tener un impacto en ecosistemas más alejados, como los arrecifes coralinos.

### Efecto en los pastizales marinos

Entre los ecosistemas más vulnerables ante el impacto de la marea marrón de sargazo se encuentran las praderas de pastos marinos en las zonas cercanas a la playa. Estas praderas tienen múltiples funciones ecológicas: son uno de los ecosistemas más productivos del planeta, proveen el hábitat para numerosas especies, modulan varios procesos biogeoquímicos, estabilizan la arena e incrementan la claridad al agua al atenuar el oleaje.

Un estudio realizado después de la primera arribazón masiva de sargazo en 2015 evaluó el impacto en las praderas de pastos marinos en cuatro sitios de monitoreo en el Caribe mexicano: Cancún, Puerto Morelos, Xahuayxol e Xcalak. Si bien el grado de impacto del sargazo sobre las praderas de pastos marinos difirió entre los cuatro sitios, dependiendo de las condiciones geomorfológicas e hidrodinámicas, el patrón fue similar. Las masas flotantes de sargazo y los lixiviados y materia orgánica particulada que se produjeron por su descomposición disminuyeron la disponibilidad de luz en la columna de agua, lo

cual provocó una reducción en la fotosíntesis del fitobentos y fitoplancton. Además, la acumulación de materia orgánica causó hipoxia, y en algunos casos anoxia, como resultado de la actividad bacteriana. Estos factores, aunados a la intrusión de ácido sulfhídrico, producido por la descomposición del sargazo en las playas, provocaron la muerte de los pastos marinos en las zonas cercanas a la playa. La especie de pasto marino más afectada fue *Thalassia testudinum*, que es la más robusta y que solía ser la dominante antes de los eventos de sargazo. Después de la marea marrón de sargazo de 2015, los cambios en la vegetación cercana a la línea de playa fueron notorios; la característica más evidente fue el reemplazo de los pastos marinos por macroalgas.

La pérdida de pastos marinos tiene repercusiones severas para los ecosistemas costeros. En las aguas someras, cercanas a la playa, los pastizales marinos son especialmente importantes para la protección costera y el mantenimiento de la claridad del agua, ya que atenúan las olas y esto permite la deposición de partículas finas, lo que reduce la turbidez. A diferencia del sargazo, la mayor parte del tejido de los pastos marinos se encuentra abajo de la arena, lo cual les aporta una gran capacidad de arraigo y les permite resistir a oleajes fuertes, incluso si es generado por las tormentas y los huracanes. Además, estos tejidos subterráneos desempeñan un papel importante en la fijación de los sedimentos. Por lo tanto, las costas afectadas por los arribos masivos de sargazo tienen aguas más turbias y playas menos estables y más vulnerables a los impactos de los fenómenos meteorológicos. Por citar un ejemplo, se tiene el caso de los cambios registrados en la playa de Mirador Nizuc, en Cancún, en la que se perdieron entre 10 y 15 m de longitud de playa después de la marea marrón de sargazo de 2015.

La recuperación de las praderas de pastos marinos cercanas a la costa podría tardar décadas. Por ejemplo, en 2005 una pradera ubicada en Puerto Morelos quedó enterrada por los sedimentos durante el paso del huracán Wilma; después de 10 años (en 2015) aún no se había recuperado. Si la frecuencia de las arribaciones masivas de sargazo es mayor que el tiempo de recuperación de los pastizales marinos,

entonces éstos cambiarán de forma permanente. Por ello, es esencial restaurar las praderas afectadas lo más pronto posible y evitar que el sargazo se acumule y se descomponga en las playas.

#### **Efecto en el sistema arrecifal**

 La marea marrón de sargazo también afecta a otros organismos del sistema arrecifal. En el evento de 2015, se registró la mortalidad de corales en zonas cercanas (<100 m) a la costa. En los arribos masivos de sargazo de 2015, 2018 y 2019, se presentó además la mortalidad de individuos pertenecientes a por lo menos 78 especies de fauna marina en playas ubicadas entre Cancún e Xcalak. Su muerte se asoció a condiciones de hipoxia y a un aumento en la concentración de amonio y sulfuros. Las especies eran principalmente de peces y crustáceos, pero también se encontraron equinodermos, moluscos y poliquetos. Entre las especies afectadas se incluyen algunas de importancia comercial, como langostas, pargos y pulpos.

En mayo de 2018, los corales del Caribe mexicano comenzaron a verse afectados por una enfermedad denominada síndrome blanco, la cual continúa observándose hasta la fecha (julio de 2020). En pocos meses este síndrome afectó a entre 24 y 46 especies de coral del Caribe mexicano y provocó la muerte de entre 25 y 70% de las colonias en 82 sitios de monitoreo. Tan sólo la enfermedad causó una pérdida de corales similar a la ocurrida en total en los últimos 40 años en el Caribe mexicano. Si bien no se ha demostrado que el sargazo tiene una relación directa con el síndrome blanco, ambos eventos coinciden en el tiempo; asimismo, el deterioro en la calidad del agua, resultante de la descomposición del sargazo, posiblemente contribuye a disminuir la resiliencia de los corales, ya que están adaptados a vivir en aguas con pocos nutrientes.

Todavía se desconoce si el sargazo pelágico transporta organismos patógenos; sin embargo, en estudios recientes se ha demostrado que en él viajan grandes cantidades de bacterias, algas, invertebrados y vertebrados. Por lo tanto, el sargazo podría estar funcionando como un vector para la introducción de



nuevas especies de flora y fauna a los ecosistemas costeros. Un estudio realizado sobre la macrofauna móvil asociada al sargazo pelágico que se ha recolectado en la laguna arrecifal de Puerto Morelos indicó que, de 32 especies encontradas, 10 eran nuevos registros. Para determinar si estas especies se establecerán de manera permanente en los sistemas arrecifales, y cuál sería su impacto sobre el equilibrio ecológico, es necesario realizar más estudios científicos.

El sargazo, además, absorbe metales y otros elementos, debido a la presencia de alginatos en su pared celular. Un análisis de muestras de sargazo colectadas en 2018 y 2019 a lo largo del Caribe mexicano indicó que éste contiene macronutrientes en concentraciones suficientes para ser utilizados en la industria alimenticia y como fertilizante; no obstante, algunas muestras presentan elementos que son potencialmente tóxicos en concentraciones altas, como arsénico, cobre, manganeso, molibdeno y zinc. El arsénico se encontró en todas las muestras en concentraciones de entre 24 y 172 ppm; en 86 % de ellas su concentración fue mayor a la permitida en la Unión Europea para el uso de algas en alimentos para animales (40 ppm), y todas las muestras estuvieron por encima del límite permitido para los suelos agrícolas en México (22 ppm).

La descomposición de millones de toneladas de sargazo en el Caribe mexicano, desde 2014, implica un riesgo potencial de contaminación de playas y ecosistemas marinos por las acumulaciones excesivas de materia orgánica, nutrientes y elementos tóxicos (véase la Figura 3). También existe un riesgo de contaminación del acuífero de la península de Yucatán, debido a las malas prácticas de disposición del sargazo, ya que a la fecha no se han adecuado sitios de disposición final que estén habilitados con geomembranas y en donde se dé tratamiento a los lixiviados.

Dado que la península de Yucatán tiene un suelo kárstico, existe el riesgo de que los nutrientes y elementos tóxicos del sargazo que es tirado en las selvas, manglares, playas y terrenos baldíos, se infiltren al acuífero y contaminen la única fuente de agua dulce en la región. Además, como el agua del acuífero fluye hacia el mar por medio de ríos subte-



**Figura 3.** Limpieza manual de sargazo acumulado en una playa del Caribe mexicano. Foto: Rosa Rodríguez Martínez.

ráneos, una parte de los elementos infiltrados eventualmente llegará al ambiente marino.

De acuerdo con la información existente, el arribo masivo de sargazo al Caribe será un fenómeno recurrente en los próximos años, pero su magnitud será variable entre años (y entre estaciones del año). De no tomarse medidas urgentes y apropiadas para su contención, colecta y disposición, sus efectos en los ecosistemas costeros del Caribe mexicano podrían ser irreversibles y resultar en problemas socioeconómicos severos.

### ■ ■ ■ Acciones para disminuir el impacto del sargazo

■ Desde 2018, el gobierno mexicano y el sector hotelero han realizado varias acciones para intentar disminuir el impacto ecológico y económico del arribo masivo de sargazo. Actualmente algunos sectores de playa a lo largo de la costa de Quintana Roo cuentan con barreras de contención o desviación de sargazo, así como con embarcaciones sargaceras (véase la Figura 4) y bandas de transportación para depositarlo en camiones que lo transporten a los sitios de disposición. Con el tiempo, también han aumentado en número las máquinas para colecta de sargazo en las playas y se han mejorado sus diseños, para evitar remover grandes cantidades de arena. El manejo sustentable del sargazo, sin embargo, requiere también del desarrollo de industrias que lo



**Figura 4.** Barrera de contención de sargazo y embarcaciones sargaceras utilizadas en el Caribe mexicano. Foto: Miguel A. Diego.

utilicen en grandes volúmenes, de manera eficiente y con modelos de negocio que consideren la variabilidad interanual y estacional de las arribazones.

En este sentido, en los últimos dos años se han puesto en marcha varios proyectos que pretenden dar valor al sargazo y analizan la factibilidad de usarlo en las industrias alimentaria, farmacéutica, textil, energética y del papel. Otra alternativa es mezclar el sargazo con resinas para producir materiales, como bloques para la edificación, tapas de registros o coladeras, así como muebles para jardín. De lograrse algunas de estas innovaciones, el arribo masivo de sargazo a nuestras costas podría pasar de ser un problema a constituir una oportunidad real para diversificar las economías del Caribe mexicano (que en su mayoría dependen exclusiva o principalmente del turismo), así como de otros países afectados por este nuevo fenómeno regional.

#### Rosa Elisa Rodríguez Martínez

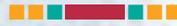
Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.  
rosaer@cmarl.unam.mx

#### Brigitta Ine van Tussenbroek

Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.  
vantuss@cmarl.unam.mx

#### Referencias específicas

- Alvarez-Filip, L., N. Estrada-Saldívar, E. Pérez-Cervantes, A. Molina-Hernández y F. J. González-Barrios (2019), "A rapid spread of the stony coral tissue loss disease outbreak in the Mexican Caribbean", *PeerJ*, 7:e8069.
- García-Sánchez, M., C. Graham, E. Vera, E. Escalante-Mancera, L. Álvarez-Filip y B. I. van Tussenbroek (2020), "Temporal changes in the composition and biomass of beached pelagic *Sargassum* species in the Mexican Caribbean", *Aquatic Botany*, 167:103275.
- Guiry, M. D. y G. M. Guiry (2020), *AlgaeBase*, Galway, National University of Ireland. Disponible en: <[www.algaebase.org](http://www.algaebase.org)>, consultado el 10 de julio de 2020.
- James, K. J., R. Silva Casarin, B. I. van Tussenbroek, M. Escudero-Castillo, I. Mariño-Tapia, H. A. Dijkstra, R. M. van Westen, J. D. Pietrzak, A. S. Candy, C. A. Katsman, C. van der Borg, R. E. M. Riva, C. Slobbe, R. Klees, J. Stapel, T. van der Heide, M. M. van Katwijk, P. M. J. Herman y T. Bouma (2019), "Maintaining tropical beaches with seagrass and algae: A promising alternative to engineering solutions", *BioScience*, 69(2):136-142.
- Jean López, P., V. Hervé, J. Lambourdière, M. René-Trouillefou y D. Devault (2020), "From the sea to the land: dynamic of the *Sargassum* tide holobiont in the Caribbean islands", *Research Square* (en prensa, versión 1). Disponible en: <[doi.org/10.21203/rs.3.rs-33861/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-33861/v1)>, consultado el 25 de agosto de 2020.
- Monroy-Velázquez, L. V., R. E. Rodríguez-Martínez, B. van Tussenbroek, T. Aguiar, V. Solís-Weiss y P. Briones-Fourzán (2019), "Motile macrofauna associated with pelagic *Sargassum* in a Mexican reef lagoon", *Journal of Environmental Management*, 252: 109650.
- Rodríguez-Martínez, R. E., A. E. Medina-Valmaseda, P. Blanchon, L. V. Monroy-Velázquez, A. Almazán-Becerril, B. Delgado-Pech, L. Vásquez-Yeomans, V. Francisco y M. C. García-Rivas (2019), "Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic *Sargassum*", *Marine Pollution Bulletin*, 146:201-205.
- Van Tussenbroek, B. I., H. A. Hernández-Arana, R. E. Rodríguez-Martínez, J. Espinoza-Ávalos, H. M. Canizales-Flores, C. E. González-Godoy, M. G. Barba-Santos, A. Vega-Zepeda y L. Collado-Vides (2017), "Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities", *Marine Pollution Bulletin*, 122:272-281.



# La descomposición del sargazo en la laguna arrecifal y su biota

La llegada de sargazo a las costas del Caribe mexicano ha cambiado la típica transparencia y el color azul turquesa del agua. Asimismo, en pocos años ha promovido la muerte de la flora y la fauna en los ecosistemas arrecifales de aguas poco profundas. En particular, estos efectos negativos son más notorios en el sur de Quintana Roo, donde el sargazo continúa acumulándose y descomponiéndose desde 2014.

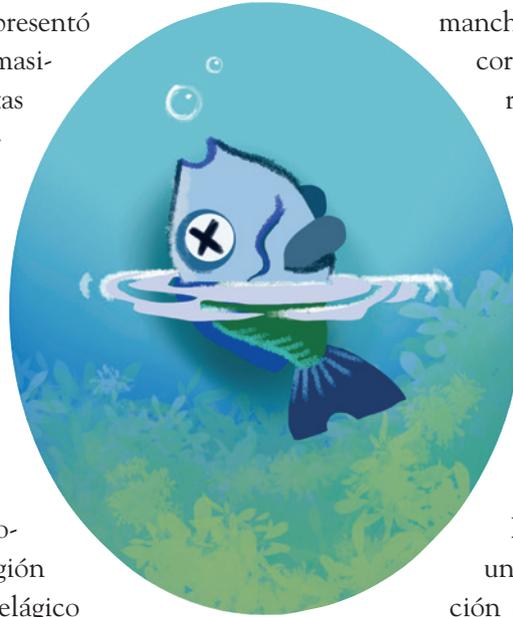
## Descripción del fenómeno emergente del sargazo

Las primeras observaciones satelitales de masas flotantes de sargazo con importantes dimensiones se registraron en el Golfo de México en 2005, con base en el índice máximo de clorofila a partir de estimaciones de imágenes del sensor MERIS (por el nombre en inglés de *medium resolution imaging spectrometer*). Jim Gower y colaboradores (2006) estimaron una biomasa de 25 g/m<sup>2</sup> de sargazo que estaba flotando en la parte occidental del Golfo de México, lo cual representa un orden de magnitud mayor a las estimaciones previas. En un estudio más extenso (Gower y cols., 2013), describieron el ciclo estacional y la distribución espacial de estas macroalgas en el Golfo de México y el Atlántico Noroccidental entre 2002 y 2008. Según identificaron, el Golfo de México Noroccidental es la zona de crecimiento del sargazo entre marzo y junio de cada año; posteriormente, las corrientes lo transportan al Atlántico Noroccidental en julio y agosto. La máxima biomasa estimada fue del orden de 3, 4 y 6 millones de toneladas de sargazo en el Golfo de México en 2003, 2004 y 2005, respectivamente. Por otra parte, la biomasa en el Atlántico Noroccidental fue de 2 a 3.5 millones de toneladas –con una tendencia de aumento– de 2002 a 2007; asimismo, se registró la persistencia de importantes masas de sargazo desde marzo hasta agosto de 2008. Hasta esa fecha el área de concentración del sargazo pelágico se localizaba en el Golfo de México y el Atlántico Noroccidental, en el mar de los Sargazos.





Más adelante, en 2011 se presentó un evento inusual de arribo masivo de sargazo pelágico a las costas del Caribe Oriental, particularmente en las Antillas Menores, así como en las costas de África Occidental. Las masas de sargazo flotante, identificadas como *Sargassum natans*, fueron detectadas por primera vez mar adentro fuera de las costas de Brasil en julio de ese año. El origen de dicho evento se asoció a una nueva y diferente región de acumulación de sargazo pelágico ubicada al norte de la desembocadura del río Amazonas y que se extiende hasta las costas de África Occidental de julio a septiembre. La biomasa total estimada en el periodo de máxima proliferación para esta nueva región fue de 15 millones de toneladas, de acuerdo con el índice máximo de clorofila derivado de imágenes del sensor MERIS.



Un segundo evento de arribo masivo de sargazo ocurrió entre 2014 y 2015, el cual afectó prácticamente a toda la cuenca del Caribe. Con base en observaciones realizadas en el sur del mar de los Sargazos, la corriente de las Antillas, el Caribe Oriental y el Atlántico Tropical Occidental, se descartó al mar de los Sargazos como el origen de esta proliferación, lo cual apoyó a la evidencia de la existencia de una nueva acumulación de sargazo en el Atlántico Tropical.

Un análisis temporal de los años 2000 a 2015 mediante imágenes satelitales del sensor MODIS (por el nombre en inglés de *moderate resolution imaging spectroradiometer*), y con base en el índice alternativo de algas flotantes, describió con precisión la proliferación del sargazo pelágico en el Atlántico Central Tropical. En el periodo de 2000 a 2008, se registró un pequeño número de manchas de sargazo fuera de la desembocadura del Amazonas, con movimiento hacia el norte. A partir de 2009, las manchas de sargazo detectadas empezaron a ser más grandes, hasta alcanzar un máximo de cobertura de 956 km<sup>2</sup>. Estas

manchas fueron transportadas por las corrientes hacia las Antillas Menores en 2011 y hacia todo el Caribe en 2014 y 2015, en los meses de mayo a julio. Actualmente se reconoce la existencia de un cinturón de sargazo pelágico que se extiende desde el Golfo de Guinea en África Occidental, el Atlántico Central Tropical, la costa nororiental de Sudamérica, el mar Caribe, hasta el Golfo de México, en donde se presenta un patrón recurrente de proliferación masiva de sargazo pelágico que

inició en 2011 y se ha mantenido hasta 2019. Los máximos de cobertura y biomasa se han registrado en 2015 y 2018, con más de 10 y hasta 20 millones de toneladas en los meses de junio y julio en los respectivos años (Wang y cols., 2019). Otras estimaciones adicionales a partir de imágenes satelitales del sensor OLCI (por las siglas en inglés de *ocean and land colour instrument*), desde el satélite *Sentinel-3A*, permitieron describir el ciclo anual de 2018 y la consistente expansión del florecimiento de sargazo pelágico.

### Causas y origen del fenómeno

Las causas de este extensivo florecimiento en el Atlántico Norte Tropical aún no han sido determinadas de manera inequívoca. Se ha planteado que una combinación de factores climáticos e hidrológicos, como las **anomalías positivas** en la temperatura del mar superficial en 2010 e inicios de 2011, fue lo que indujo las condiciones favorables para el florecimiento del sargazo pelágico en la región de recirculación norequatorial, y estos florecimientos fueron alimentados posteriormente por las anomalías positivas en la concentración de nutrientes a través de las descargas del río Amazonas (Djakouré y cols., 2017).

Respecto al origen, con base en la literatura reciente, se concluye que los eventos de arribo masivo

#### Anomalías positivas

Indica que la temperatura observada era más caliente que el valor de referencia.

vo del sargazo flotante a las costas del Caribe y del Atlántico Norte Tropical en general, y en particular a las costas de Quintana Roo en México, son resultado de la proliferación de sargazo pelágico en regiones oceánicas frente de las costas de África y de Sudamérica.

### ■ **Problemática de la acumulación de sargazo sobre la costa**

■ Independientemente del origen de este fenómeno emergente de escala oceánica, la llegada masiva de sargazo a las costas de África Occidental y del Caribe está produciendo múltiples efectos negativos de carácter social, económico y ambiental como resultado del proceso de descomposición de estas macroalgas sobre la costa. Las masas flotantes de sargazo dispersadas por la acción de los vientos y las corrientes se quedan varadas en la costa y terminan su ciclo de vida descomponiéndose ahí. Dada la composición química del sargazo, durante este proceso se libera azufre, el cual, por una reacción exotérmica en el agua, produce ácido sulfhídrico que es liberado tanto en el agua como en la atmósfera. Los efectos inmediatos en la zona de descomposición incluyen el aumento de la temperatura, el agotamiento del oxígeno, el descenso del potencial de hidrógeno (pH), la disminución del potencial de reducción en agua y la liberación de nutrientes hacia las lagunas arrecifales, con el consiguiente cambio drástico de color del agua de transparente a marrón, así como el grave impacto a la estructura y función de la biota marina (Van Tussenbroek y cols., 2017).

Las características de este fenómeno emergente hacen que su manejo sea altamente costoso. Estas macroalgas de vida libre tienen una dispersión superficial por el viento y las corrientes, así como una elevada tasa de producción, por lo que arriban a la costa en grandes volúmenes. Lo



anterior ha prevenido que se encuentre una única estrategia de manejo para evitar su acumulación y descomposición. Por ejemplo, la medida de recolección en la costa y disposición *ex situ* implementada en Quintana Roo se ha limitado a las principales zonas turísticas del norte del estado, pero en la mayor parte de la costa, el sargazo que llega se acumula, se descompone y produce profundos efectos negativos sobre los ecosistemas costeros.

El objetivo de esta contribución es recopilar información gráfica y cuantitativa obtenida en el sur de Quintana Roo entre 2015 y 2018 para evidenciar los impactos negativos de la acumulación masiva de sargazo sobre los diferentes ecosistemas costeros y resaltar la necesidad de tener una estrategia de seguimiento de la condición de estos ecosistemas por el efecto del sargazo acumulado.

### ■ **Área de interés**

■ El Caribe mexicano comprende la totalidad del estado de Quintana Roo, con un litoral de aproximadamente 900 km. Dada su posición y orientación, las costas reciben la influencia directa y continua de las corrientes marinas del Caribe y, como consecuencia, en la costa se quedan varadas importantes cantidades del sargazo pelágico transportado, en particular, durante los meses del año en los que predominan los **vientos alisios**. Si bien se reconoce que no todo el litoral se ve afectado por el varamiento y la descomposición del sargazo pelágico, no existe una estimación precisa de la extensión afectada ni de los volúmenes de sargazo varados. Sin embargo, los esfuerzos de recolecta y disposición *ex situ* del sargazo se limitan a las principales áreas turísticas del norte y centro de Quintana Roo y sobre el litoral que cuenta con desarrollos, ciudades y poblados turísticamente relevantes.

Los efectos de la descomposición del sargazo

#### ◀ **Vientos alisios**

Vientos que circulan entre los trópicos, desde los 30 o 35° de latitud hacia el ecuador. Se dirigen desde las altas presiones subtropicales hacia las bajas presiones ecuatoriales.



sobre la costa tienen mayores repercusiones en el sur del Caribe mexicano por ser una de las regiones en donde la recolección y disposición lejos de la costa son mínimas. Desde 2014 el sargazo se ha seguido acumulando en esta parte del litoral (véase la Figura 1); por ello, sus efectos directos y residuales en los ecosistemas costeros deben ser evaluados para conocer los cambios estructurales y funcionales que ha ocasionado, particularmente por los bienes y servicios que los manglares, las dunas costeras y los arrecifes de coral proveen a la sociedad, más allá de su importancia económica para el turismo, entre otras actividades.

■ **Condición de la calidad del agua**

■ El agua de las lagunas arrecifales es el entorno inmediato en el que se producen los primeros impactos negativos derivados de la descomposición del sargazo acumulado en la costa. En un primer estu-

dio realizado de agosto a octubre de 2015 –el primer año de arribazón masiva en el Caribe mexicano–, se documentaron cuatro zonas claramente definidas en las lagunas arrecifales de Mahahual, Xahuayxol e Xcalak:

- La zona A corresponde a la línea de playa donde el sargazo se deposita, acumula y descompone. Esta zona se extiende desde la línea de costa hasta aproximadamente 10 m mar adentro.
- La zona B corresponde a la franja contigua mar adentro, donde el sargazo fresco está en continua acumulación. Su amplitud es muy variable y puede extenderse hasta 100 m en casos extremos, como en Xcalak.
- La zona C corresponde a la franja donde no hay sargazo acumulándose, pero el agua es turbia y de color marrón debido a la presencia de lixiviados y material orgánico particulado proveniente de la zona de acumulación y descomposición. Su



**Figura 1.** Acumulación y descomposición de sargazo sobre la costa en el sur de Quintana Roo, en Mahahual, durante agosto de 2015. *Fotografía:* Héctor A. Hernández Arana.

extensión varía en función de la dinámica hidrológica de la laguna arrecifal, pero se concentra en los puntos de salida hacia el arrecife frontal.

- En la zona D, el agua ya presenta las características típicas de transparencia por las que son reconocidas las lagunas arrecifales del Caribe mexicano.

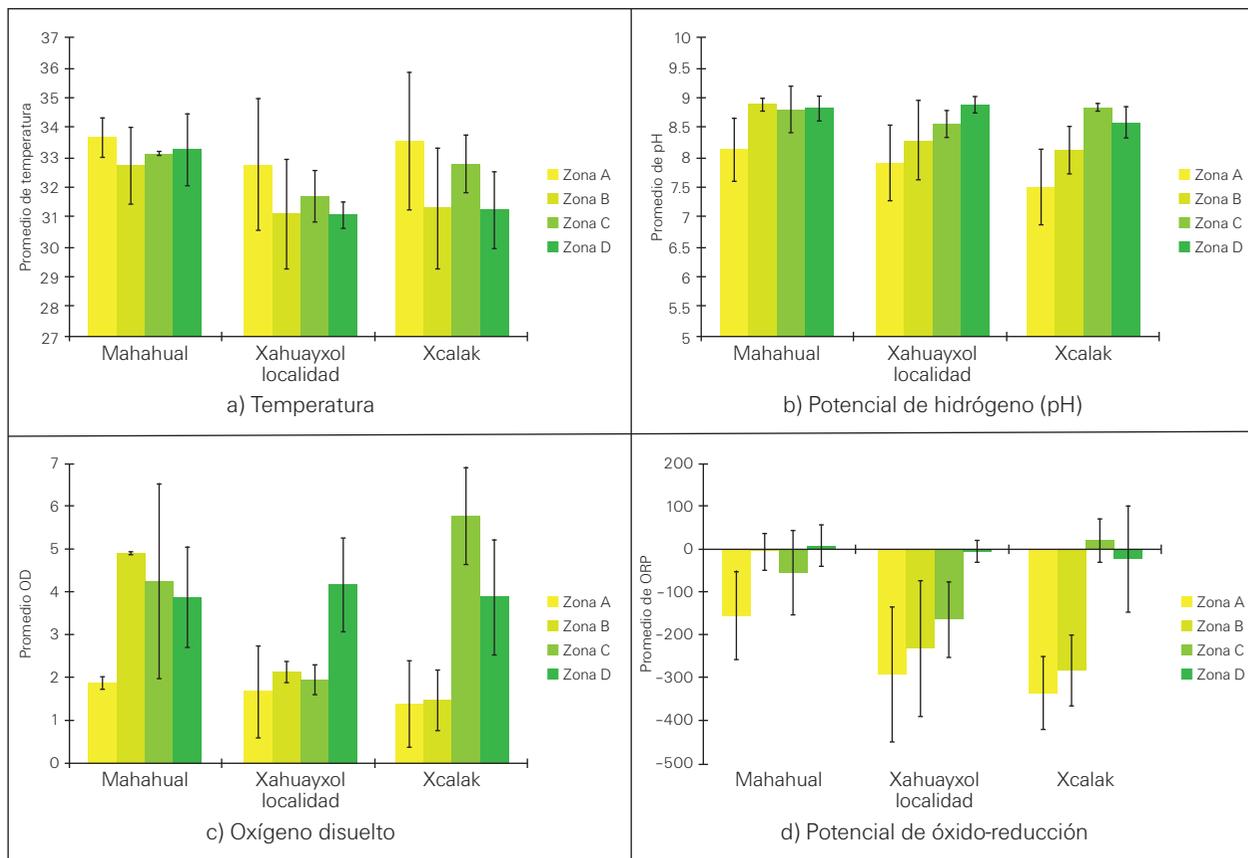
Las características hidrológicas básicas (temperatura, potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto y potencial de óxido-reducción) de estas cuatro zonas en las lagunas arrecifales de Mahahual, Xahuayxol e Xcalak se describen en la Figura 2.

De acuerdo con el estudio, la temperatura del agua fue superior a 29 °C. Los valores promedio de temperatura son mayores en la zona A, con máximos cercanos a 37 °C en la laguna arrecifal de Xcalak. Esta temperatura elevada se debe a la reacción química al formarse ácido sulfhídrico durante el

proceso de descomposición por la liberación del azufre contenido en los tejidos del sargazo y su consecuente reacción en el agua. En tanto, en la zona C –zona de lixiviados– se registró el segundo valor más alto de temperatura promedio.

Por otra parte, la liberación de azufre, con la consecuente formación de ácido sulfhídrico y la acumulación de material orgánico en descomposición, tiene un efecto directo sobre el pH, cuyos valores son menores en la zona A (el mínimo se registró en el poblado de Xcalak). Los valores de pH muestran un claro gradiente de menor a mayor a lo largo de las cuatro zonas en las lagunas arrecifales de Xahuayxol e Xcalak.

Además, la combinación de una temperatura elevada con la acumulación de material orgánico tiene un efecto directo sobre la solubilidad del oxígeno en el agua; esto se ve en la disminución de la concentración de oxígeno en la zona A de Mahahual, las



**Figura 2.** Características hidrológicas básicas de cuatro zonas en las lagunas arrecifales de Mahahual, Xahuayxol e Xcalak: a) temperatura, b) potencial de hidrógeno, c) oxígeno disuelto, y d) potencial de óxido-reducción. Elaboración a partir de datos de Héctor Hernández Arana.



zonas A, B y C de Xahuayxol, y las zonas A y B de Xcalak.

Estos cambios drásticos en la hidrología de las zonas A, B y C alteran los procesos de depuración de las lagunas arrecifales. En condiciones normales de temperatura, pH y oxígeno disuelto, los procesos de depuración de la materia orgánica son principalmente oxidativos, lo cual favorece el registro de valores positivos del potencial de óxido-reducción. Sin embargo, en condiciones de elevada temperatura, pH reducido y disminución del oxígeno disuelto, los valores del potencial de reducción son negativos. Esta condición fue más severa para la laguna arrecifal de Xahuayxol, y en menor medida para Mahahual.

■ **Efectos directos sobre la biota**

■ Los profundos cambios fisicoquímicos en la calidad del agua de las lagunas arrecifales producen

efectos directos e inmediatos en la biota. Un ejemplo es la muerte por ahogamiento de numerosos grupos taxonómicos de fauna y flora, entre ellos: peces, gusanos, cangrejos, erizos y estrellas de mar, almejas, corales y pastos marinos. Asimismo, la recurrencia actual del fenómeno ha provocado cambios estructurales por el aumento de la mortalidad en los arrecifes coralinos de aguas poco profundas en el sur de Quintana Roo. Estos cambios son inducidos, en parte, por la proliferación de algas, cuyo masivo florecimiento recubre toda la superficie del fondo, incluida la biota. El resultado directo es la muerte de organismos arrecifales, como corales duros, corales blandos y esponjas, entre otros.

■ **El Caribe mexicano ante el arribo masivo de sargazo pelágico**

■ De manera adicional, el contexto ambiental actual del Caribe mexicano es resultado de una sobre-

posición de efectos e impactos negativos derivados del acelerado cambio de uso de suelo en las últimas cinco décadas. El deficiente tratamiento de aguas residuales de ciudades y desarrollos costeros, los contaminantes y fertilizantes derivados de las actividades agrícolas y turísticas, los impactos crónicos relacionados con las actividades náutico-recreativas, el escenario regional adverso por un aumento de la temperatura del mar superficial y su relación con la intensificación de los huracanes en los últimos años han producido profundos cambios estructurales y funcionales en los ecosistemas costeros, desde los manglares hasta los arrecifes de coral. A este escenario ambiental se suma el fenómeno oceánico emergente de la proliferación de sargazo pelágico. Sin embargo, las medidas de control realizadas por las autoridades locales y federales para remover la biomasa acumulada en las playas han sido insuficientes en los casi 900 km lineales de costa, ya que hacen falta lineamientos operativos basados en el conocimiento científico. En particular, los efectos de la descomposición del sargazo sobre la costa tienen mayores repercusiones en el sur del Caribe mexicano, donde el sargazo se ha acumulado desde 2014.

### Héctor A. Hernández Arana

Estructura y Función de Ecosistemas Costeros Tropicales,  
El Colegio de la Frontera Sur, unidad Chetumal.  
hhernand@ecosur.mx

### Referencias específicas

- Djakouré, S., M. Araujo, A. Hounsou-Gbo, C. Noriega y B. Bourlés (2017), "On the potential causes of the recent Pelagic Sargassum blooms events in the Tropical North Atlantic Ocean", *Biogeosciences Discuss.* Disponible en: <<https://doi.org/10.5194/bg-2017-346>>, consultado el 7 de septiembre de 2020.
- Gower, J., C. Hu, G. Borstad y S. King (2006), "Ocean color satellites show extensive lines of floating sargassum in the gulf of Mexico", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(12):3619-3625.
- Gower, J., E. Young y S. King (2013), "Satellite images suggest a new Sargassum source region in 2011", *Remote Sensing Letters*, 4(8):764-773.
- Van Tussenbroek, B. I., H. A. Hernández-Arana, R. E. Rodríguez-Martínez, J. Espinoza-Ávalos, H. M. Canizales-Flores, C. E. González-Godoy, M. G. Barba-Santos, A. Vega-Zepeda y L. Collado-Vides (2017), "Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities", *Marine Pollution Bulletin*, 122(1-2): 272-281.
- Wang, M., C. Hu, B. B. Barnes, G. Mitchum, B. Lapointe y J. P. Montoya (2019), "The great Atlantic Sargassum belt", *Science*, 365(6447):83-87.

Laura M. Hernández Terrones



# Impacto del sargazo en el acuífero



El arribo masivo de *Sargassum* ha ocasionado un cambio en el paisaje de la costa del Caribe mexicano. Mediante estudios realizados en el acuífero de la península de Yucatán se ha encontrado evidencia de la entrada de nutrientes a través de las descargas de agua subterránea, lo cual favorece el florecimiento de algas y produce afectaciones a los ecosistemas costeros y arrecifales.



### Arribo del sargazo

La llegada masiva de sargazo ha ido en aumento en la costa del Caribe mexicano en los últimos cinco años, lo que representa, sin duda, un cambio en el paisaje marino costero. En 2014 se reportó el arribo de *Sargassum fluitans* (Børgesen) y *S. natans* (Linnaeus) Gaillon en cantidades inusuales, pero la afluencia fue especialmente alta durante 2015, y excepcional en 2018. Aunque su origen e impactos aún se encuentran en discusión entre la comunidad científica, existe un consenso generalizado de que el sargazo pelágico proviene de una zona ubicada frente a las costas de Brasil y África Occidental (conocida como NERR, por las siglas en inglés de *North Equatorial Recirculation Region*), y no necesariamente del mar de los Sargazos, ubicado en el Atlántico Norte.

La llegada del sargazo a las playas de arena blanca de la costa de Quintana Roo ha significado un problema económico y socioambiental, mismo que se ha traducido en la pérdida de ingresos por el turismo, afectaciones a la pesca y una crisis





sanitaria. La afluencia masiva de estas macroalgas en 2018 y su posterior descomposición provocó el aumento de la turbidez, la disminución del oxígeno disuelto y la aparición de un color marrón en el agua (véase la Figura 1a), lo cual fue reportado como marea marrón de sargazo (Van Tussenbroek y cols., 2017) para diferenciarlo de las masas de sargazo que ocurren en el mar abierto, de color dorado (véase la Figura 1b).

**Efectos en el acuífero**

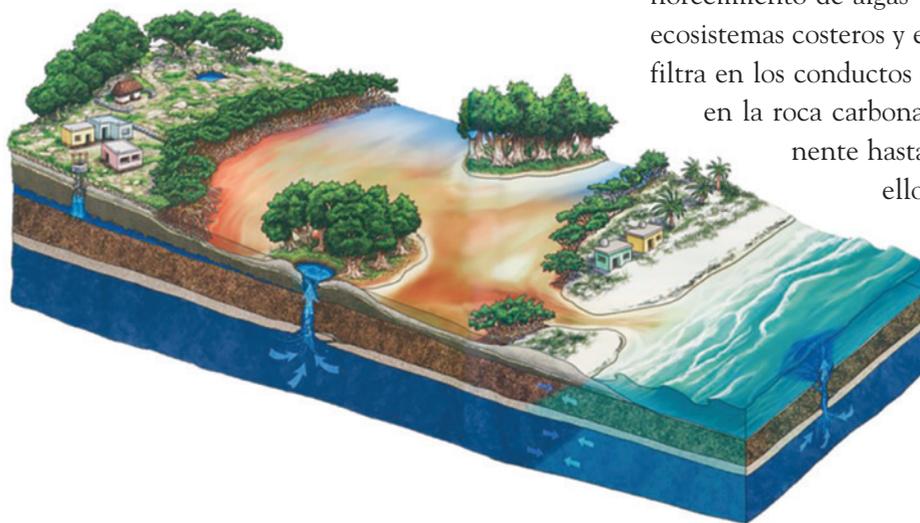
La región sur-sureste de México tiene la mayor riqueza de agua superficial y subterránea. La península de Yucatán, conformada por los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, cuenta con una recarga media anual de 25 316 hm<sup>3</sup>, es decir, más de 32% de la recarga media de todo el país (Conagua, 2019). En esta región, el agua subterránea viaja hacia la costa y aflora mediante manantiales que inundan las depresiones costeras y se mezclan con el agua de mar (véase la Figura 2). Sin embargo, la plataforma kárstica —constituida por carbonatos de calcio y caracterizada por fracturas y conductos de disolución, entre otros— le confiere al acuífero de la península de Yucatán una mayor vulnerabilidad ante la contaminación por infiltración (Null y cols., 2014; Hernández Terrones y cols., 2015).



**Figura 1.** Imágenes de 2019 en la zona de Akumal, Quintana Roo: a) marea marrón de sargazo en la bahía de Akumal; b) masas doradas de sargazo arribando a la costa. Crédito: Marco A. Montes.

Se ha mostrado evidencia de la entrada de nutrientes al mar (Hernández Terrones y cols., 2011) por las descargas de agua subterránea (SGD, por sus siglas en inglés), conocidas localmente como ojos de agua. También se ha observado que el incremento en las concentraciones de nutrientes favorece el florecimiento de algas y produce afectaciones a los ecosistemas costeros y el arrecife. El agua que se infiltra en los conductos de disolución o las fracturas en la roca carbonatada circula desde el continente hasta desembocar en el mar. Por ello, es importante considerar

la zona de playa como fuente de nutrientes en el agua de la costa y resulta fundamental entender la conectividad entre el ambiente costero y las SGD (Null y cols., 2014). La presencia de nutrientes en el agua de la costa, donde



**Figura 2.** Esquema simplificado de un acuífero costero; se muestra la conexión entre el agua subterránea y el agua marina. Crédito: Rodríguez y cols. (2013).

se acumula el sargazo, podría tener impactos adicionales a los que se han descrito. Aunado a ello, se ha reportado la presencia de arsénico y metales pesados en el sargazo (Rodríguez Martínez y cols., 2020), con el riesgo que esto implica para la salud de las personas y los ecosistemas. No obstante, aún no se cuenta con estudios que determinen cuál será el efecto del incremento en las concentraciones de nutrientes en el agua y se desconoce el impacto potencial de las mareas marrones de sargazo en la dinámica del agua de mezcla en el acuífero durante la marea alta.

### **Estrategias de control**

 Aunque los patrones de sargazo son relativamente predecibles, su colecta, transporte, valorización y disposición final aún presentan grandes retos. Los estudiantes de la Universidad del Caribe realizaron estudios en laboratorio durante 2018 con los cuales mostraron que en condiciones controladas el *Sargassum* duplica su volumen en un lapso de entre 15 y 18 días a una temperatura de entre 21 y 22 °C. Se necesitan más investigaciones que lleven a implementar medidas de control y acciones de mitigación que son esenciales para evitar un desastre ecológico y las graves consecuencias socioeconómicas relacionadas.

En algunas áreas, las autoridades federales, estatales y locales, así como la sociedad civil, han estado trabajando en diferentes estrategias para contener la llegada masiva del sargazo y gestionar la contingencia a lo largo de la zona costera de Quintana Roo. No obstante, la contención del sargazo pelágico en el mar debe incluir el desarrollo de métodos para evitar la captura incidental de la macrofauna asociada, como juveniles de peces y tortugas. Asimismo, se requiere generar conocimiento científico sobre el impacto de las mareas marrones y los efectos provocados por una mala disposición del sargazo en sitios que no cuentan con las condiciones necesarias para evitar la contaminación por infiltración en el acuífero.

Todavía quedan muchos cuestionamientos en torno al arribo masivo del sargazo a las costas del Caribe mexicano y su relación con el importante acuífero de esta región. ¿Cuál es el papel de la ciencia,

la política y la sociedad ante la crisis derivada de la llegada del sargazo?, ¿existe algún cambio en las condiciones del agua subterránea?, ¿cuál es el efecto en los ecosistemas?, ¿qué tipo de monitoreo se requiere para evaluar el impacto en el acuífero y en la costa?

### **Laura M. Hernández Terrones**

Universidad del Caribe.

lmhernandez@ucaribe.edu.mx

### **Referencias específicas**

- Conagua (2019), *Estadísticas de agua en México* (2018), Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua.
- Hernández Terrones, L., K. A. Null, D. Ortega-Camacho y A. Paytan (2015), "Water quality assessment in the Mexican Caribbean: Impacts on the coastal ecosystem", *Cont. Shelf Res.*, 102:62-72.
- Hernández Terrones L., M. Rebolledo-Vieyra, M. Merino-Ibarra, M. Soto, A. Le Cossec y E. Monroy-Ríos (2011), "Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems", *Water, Air & Soil Pollution*, 218: 517-528. Disponible en: <doi.org/10.1007/s11270-010-0664-x>, consultado el 31 de agosto de 2020.
- Null, K. A., K. L. Knee, E. Crook, N. R. de Sieyes, M. Rebolledo-Vieyra, L. Hernández Terrones y A. Paytan (2014), "Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula", *Cont. Shelf Res.*, 77:38-50.
- Rodríguez, R. et al. (2013), *Las raíces del agua, el agua como paisaje en la península de Yucatán*, Mérida, SEGEY.
- Rodríguez Martínez, R. E., P. D. Roy, N. Torrescano-Valle, N. Cabanillas-Terán, S. Carrillo-Domínguez, L. Collado-Vides, M. García-Sánchez y B. I. van Tussenbroek (2020), "Element concentrations in pelagic *Sargassum* along the Mexican Caribbean coast in 2018-2019", *Peer J*, 8:e8667. Disponible en: <doi.org/10.7717/peerj.8667>, consultado el 27 de agosto de 2020.
- Van Tussenbroek, B. I., H. A. Hernández-Arana, R. E. Rodríguez-Martínez, J. Espinoza-Ávalos, H. M. Canizales-Flores, C. E. González-Godoy, M. G. Barba-Santos, A. Vega-Zepeda y L. Collado-Vides (2017), "Severe impacts of brown tides caused by *Sargassum* spp. on near-shore Caribbean seagrass communities", *Marine Pollution Bulletin*, 122:272-281. Disponible en: <doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.057>, consultado el 27 de agosto de 2020.

Gisela Maldonado Saldaña

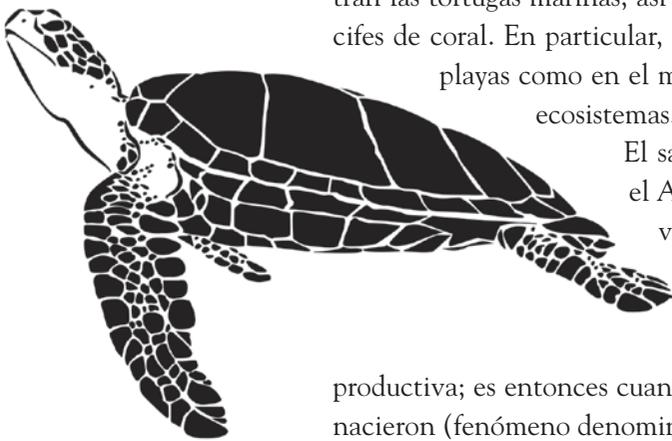
# La **huella** del sargazo en las **tortugas marinas**

La llegada masiva de sargazo al Caribe mexicano tiene un gran impacto en cuatro especies de tortugas marinas que anidan y se alimentan en las costas. Las afectaciones relacionadas con el desove, la eclosión y en las áreas de alimentación también se deben a las prácticas incorrectas de remoción tanto en la playa como en el mar, lo que aumenta el riesgo para estas especies en peligro de extinción.

## Las tortugas marinas y el sargazo

Las llegadas masivas de sargazo al Caribe mexicano se han vuelto cíclicas y continuas desde 2015, con abundancias atípicas por la gran cantidad recalcada. Los efectos en los diferentes ecosistemas, tanto marinos como costeros, son incuantificables hasta la fecha. Entre los organismos más afectados se encuentran las tortugas marinas, así como sus hábitats: playas, pastizales marinos y arrecifes de coral. En particular, las tortugas marinas enfrentan desafíos tanto en las playas como en el mar, debido a que su ciclo de vida está ligado a estos ecosistemas.

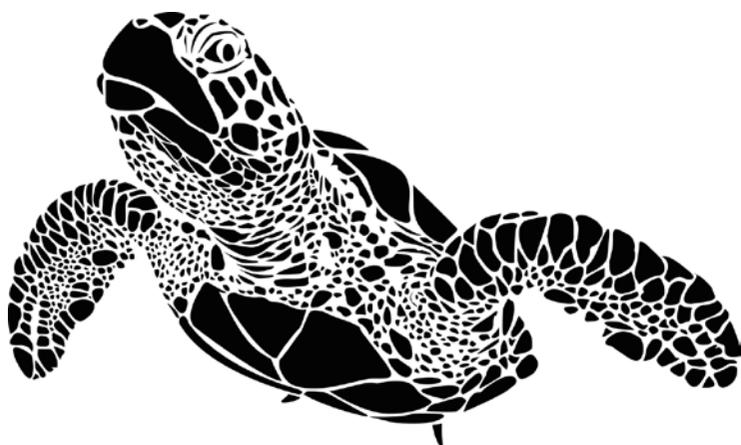
El sargazo en mar abierto, en el mar de los Sargazos en el Atlántico Norte, proporciona refugio y alimento a diversas especies; entre ellas a las tortugas marinas, que pasan gran parte de su vida en esas balsas de algas, lo que les permite protegerse de sus depredadores naturales y poder crecer hasta alcanzar la edad reproductiva; es entonces cuando pueden migrar hacia las mismas playas en donde nacieron (fenómeno denominado filopatría) y así completar su ciclo de vida.



### El sargazo y la anidación de tortugas

En Quintana Roo anidan cuatro de las ocho especies que existen en el mundo: la tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*), la tortuga caguama (*Caretta caretta*), la





tortuga blanca o verde del Atlántico (*Chelonia mydas*) y –muy escasamente– la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*). Sus nidos se ubican en diferentes zonas de la playa: algunos a unos metros de la orilla (tortuga caguama) y otros cerca de la duna costera (tortuga de carey y tortuga blanca). En el sitio elegido, la hembra de tortuga marina cava una cámara de incubación en la cual se llevará acabo el desarrollo embrionario, que dura entre 45 y 60 días, dependiendo de las condiciones climáticas y biofísicas de la playa, en un ambiente que permita la exitosa eclosión de las crías.

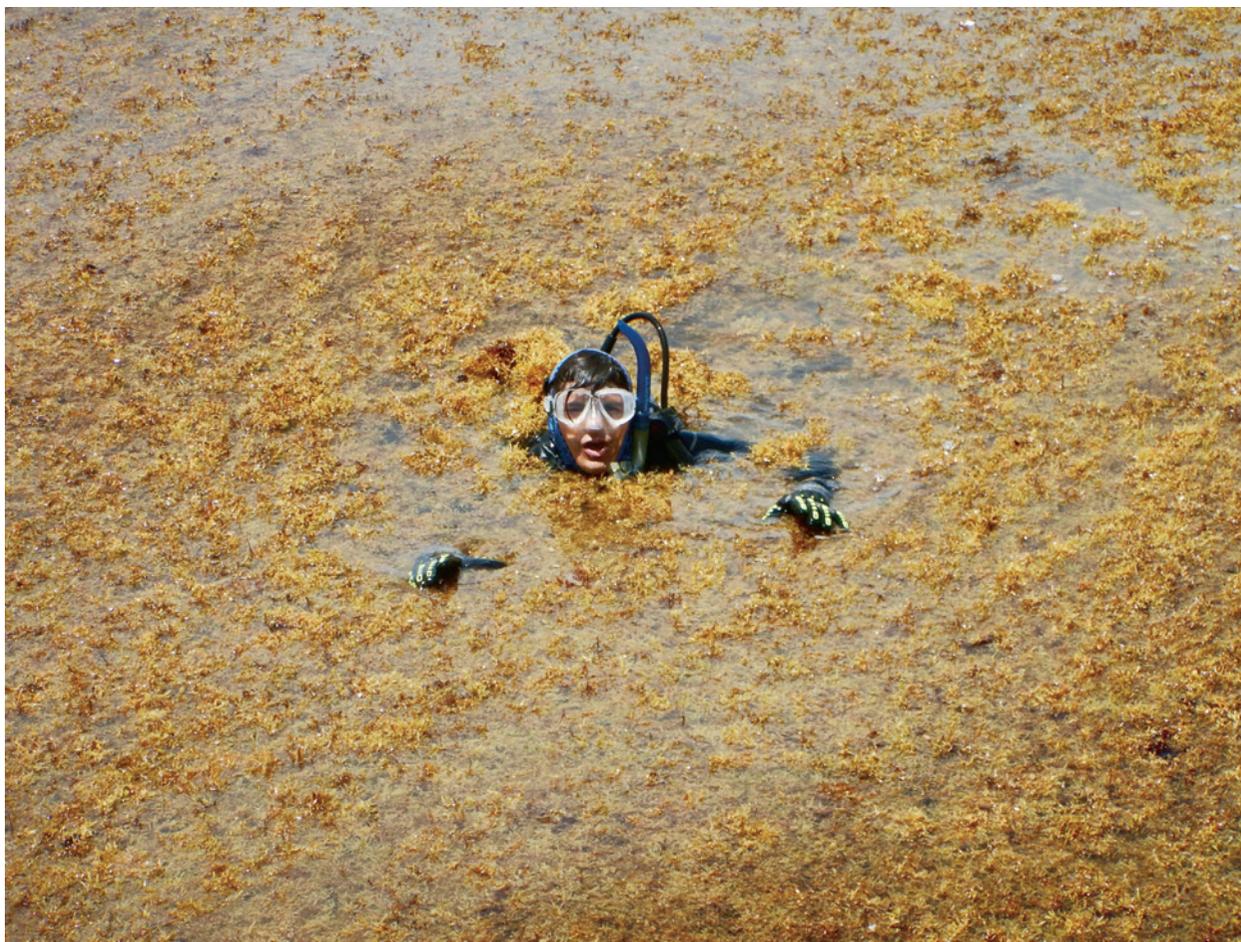
Sin embargo, en mayo empiezan a llegar grandes cantidades de sargazo a las costas mexicanas y se van acumulando en las playas donde dichas especies depositan sus huevos. Al comenzar el proceso de pudrición del sargazo, la temperatura de la arena aumenta; el exceso de calor y la humedad pueden afectar a los embriones e incluso ser letales. Además, la práctica de enterrar el sargazo también genera efectos negativos en los nidos de las tortugas porque modifica las condiciones bióticas de la arena al aumentar su contenido de materia orgánica. Por otro lado, la maquinaria empleada para la remoción del sargazo que circula sobre las playas representa un riesgo por el apisonamiento de nidadas, la compactación de la arena e, incluso, el atropellamiento de las hembras que van a desovar o de las crías emergidas.

Una vez eclosionadas, las crías salen a la superficie y se dirigen al mar abierto, donde podrán encontrar alimento y refugio. No obstante, las masas

de sargazo acumuladas en la playa representan un primer obstáculo (véase la Figura 1); las tortugas invierten su preciada energía en tratar de dirigirse al mar y sólo muy pocas lo consiguen, pues además están expuestas a las altas temperaturas y a los depredadores, entre los que se encuentran las aves marinas y pequeños mamíferos como los mapaches. Al llegar al mar, ahora se enfrentarán a las tremendas masas flotantes de sargazo que continúan complicado su movilidad (véase la Figura 2), aunque ellas seguirán luchando por avanzar hacia aguas limpias. Conforme se desenredan y comienzan a nadar mar adentro, un obstáculo más se interpone: las barreras flotantes artificiales instaladas para la contención del sargazo, cuya función es retenerlo en el agua para disminuir su llegada a la playa. Sin embargo, estas barreras no son inocuas para la flora y la fauna; en el caso de las tortugas marinas, las crías flo-



**Figura 1.** Crías de tortuga marina atoradas en una arribada de sargazo en el sur de Quintana Roo. Fuente: Comité Estatal de Protección, Conservación y Monitoreo de Tortugas Marinas en Quintana Roo.



**Figura 2.** Recale masivo de sargazo en las costas quintanarroenses, también llamado marea dorada.  
Fuente: Juan Carlos Huitrón Baca.

tan gracias a que reabsorbieron el vitelo (yema) del huevo como fuente principal de energía, lo cual les impide hundirse lo suficiente como para superar dichas barreras, por lo que van a quedar atrapadas y morirán por fatiga. Adicionalmente, si las barreras artificiales no están diseñadas de forma adecuada y no tienen un monitoreo constante, también van a dificultar o impedir el nado de las hembras que van hacia las playas a desovar.

En la etapa juvenil, algunas especies **neríticas**, como la tortuga blanca o verde, sufren los efectos del sargazo en la medida en que las praderas de pastos marinos de las cuales se alimentan se ven impactadas por el efecto de sombra que provocan las masas flotantes, así como los cambios físico-químicos por la descomposición de las algas, que causan turbidez, hipoxia, acidificación y exceso

de materia orgánica en el agua. Todo lo anterior es el origen de una alta mortalidad de la cobertura de pastos marinos, además de las posibles consecuencias en la dinámica de las poblaciones de las tortugas blancas. Por su parte, la pérdida de praderas en las playas provoca la erosión de la costa y la disminución de su capacidad para atenuar el roce de las mareas y el oleaje en la laguna arrecifal, lo cual propicia un efecto de erosión continua (Van Tussenbroek y cols., 2017) que termina modificando también el perfil de las playas de anidación.

#### Nerítica

Se encuentran en zonas costeras someras para alimentarse de pastos marinos y algunos invertebrados, especialmente del llamado pasto de tortuga (*Thalassia testudinum*).





En el caso de los arrecifes de coral, el sargazo genera daños directos por el exceso de lixiviados con materia orgánica en descomposición que decantan hacia las barreras arrecifales, lo cual también afecta a la tortuga Carey, que se alimenta fundamentalmente de esponjas que crecen en el arrecife. La disminución del banco de alimento significa un riesgo importante para estas especies, ya de por sí catalogadas en peligro de extinción según la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

**El sargazo y las enfermedades de las tortugas**

A partir de 2003, un grupo multidisciplinario de investigadores realiza el monitoreo de la salud de las poblaciones de tortugas marinas en Quintana Roo, con el objetivo de identificar y documentar la presencia de fibropapilomatosis (FP), una enfermedad caracterizada por la aparición de tumores externos de origen **fibroepitelial** en la piel de las aletas an-



teriores y posteriores, cuello, cabeza y tejidos periculares (véase la Figura 3). También se presentan tumores internos que afectan los pulmones, bazo, hígado, intestinos y corazón. La FP había sido observada de manera muy esporádica por los pescadores desde décadas atrás, pero ningún trabajo epidemiológico sistemático se había desarrollado. Ahora se conoce su prevalencia, distribución geográfica y severidad en las áreas de alimentación de distintas zonas de Quintana Roo. Gracias a ello, sabemos que la tortuga blanca es la más afectada. A partir de 2015, en los monitoreos se ha observado una coincidencia entre el aumento dramático de la prevalencia de FP y la llegada masiva del sargazo (Muñoz Tenería

**Fibroepitelial**

*Fibro-* se refiere a dermis, y *epitelial* a epidermis; por lo tanto, los tumores fibroepiteliales son un crecimiento descontrolado de los tejidos que forman la piel. Por lo general son benignos.



**Figura 3.** Tortuga verde del Atlántico juvenil con presencia de fibropapilomas. Fuente: Gisela Maldonado Saldaña/Grupo Tortuguero del Caribe, A. C.



y cols., 2020), lo cual sugiere que el impacto ambiental provocado por las arribaciones masivas puede tener efectos directos sobre la salud de especies vulnerables como las tortugas marinas.

### **Conclusión**

 Actualmente, un grupo de autoridades de los tres órdenes, académicos de diversos centros de investigación, así como expertos de organizaciones de la sociedad civil, están trabajando en conjunto para encontrar soluciones a este problema y reducir el riesgo que representa la presencia del sargazo para las especies emblemáticas que están en peligro de extinción, como las cuatro especies de tortugas marinas del Caribe mexicano. La finalidad es protegerlas, al igual que a los ecosistemas en donde se desarrolla su ciclo de vida.

### **Gisela Maldonado Saldaña**

Grupo Tortuguero del Caribe, A. C.  
gisela@ecokanantik.com

### **Referencias específicas**

Muñoz Tenería, F., R. L. Herrera-Pavón, A. C. Negrete-Philippe, E. González Ballesteros, G. Maldonado-Saldaña, T. M. Work y V. Labrada-Martagón (2020), "Dynamics of Fibropapillomatosis during fifteen years of monitoring green sea turtles, *Chelonia mydas*, in Akumal Bay, Quintana Roo, Mexico", *Diseases of Aquatic Organism* (manuscrito en revisión).

Van Tussenbroek, B. I. *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.

Rosa M. Leal Bautista, Raúl Tapia Tussell y Liliana Alzate Gaviria

# Usos potenciales del sargazo

Los usos del sargazo son múltiples y van desde la acuicultura, composta y generación de biocombustibles, hasta extracciones especializadas que han mostrado potencial para la obtención de alginatos y antioxidantes; sin embargo, las aplicaciones de esta alga deben analizarse con cautela, debido a su capacidad de acumular metales tóxicos.

## Las arribaciones de sargazo

El sargazo pelágico de macroalgas flotantes es reconocido como un ecosistema fundamental que funciona como área de refugio y alimentación para muchas especies, tales como peces, crustáceos y tortugas. En el mar de los Sargazos se forman inmensas extensiones flotantes, las cuales se constituyen principalmente de dos especies: *Sargassum natans* y *S. fluitans*. Estas macroalgas presentan pequeñas vejigas llenas de gas que les permiten flotar, hasta que se les incrustan tantos organismos que ocasionan su hundimiento después de aproximadamente un año.

El análisis de imágenes satelitales de 2002 a 2008 reveló que las esteras flotantes de sargazo se originan en el noroeste del Golfo de México cada primavera, probablemente alimentadas por los nutrientes del río Misisipi, y son exportadas al mar de los Sargazos durante los meses de verano. Sin embargo, después de 2011, varios informes señalaron nuevas acumulaciones inusuales de sargazo en áreas del Caribe donde nunca se habían visto. Las imágenes de satélite procesadas para visualizar la distribución del sargazo entre 2000 y 2010 muestran una cantidad mínima, con esteras ocasionales que aparecían en la desembocadura del río Amazonas entre agosto y octubre y se movían hacia el norte con la corriente de Brasil. Pero fue a partir de 2011 que varias toneladas de algas alteraron la ecología de las aguas poco profundas, las actividades de navegación y la gran industria turística del Caribe.







En México, el gobierno federal asignó \$3.2 millones de dólares para la limpieza y extracción de sargazo en 2015, aun cuando la cantidad de algas marinas excedió la capacidad de extracción. A lo largo de estos años, el exceso de sargazo en las costas del Caribe ha estado **eutroficando** las aguas, lo cual genera impactos incuantificables a la fecha. Asimismo, los sistemas arrecifales costeros y la biodiversidad asociada a ellos se están viendo afectados; se ha registrado un incremento en la muerte de organismos después de que el sargazo causó eventos en los cuales las concentraciones de oxígeno bajaron de forma dramática (Rodríguez-Martínez y cols., 2019).

Las aguas superficiales ecuatoriales del Caribe y el Atlántico Occidental han sido históricamente **oligotróficas**; no obstante, en los últimos 30 años se han presentado diferentes factores que modifican y promueven el crecimiento de fitoplancton. Se

presume que desde 2011, los desbordamientos del Amazonas suscitaron la floración masiva de sargazo; las mayores inundaciones registradas en dicho río ocurrieron durante 2009, 2011, 2012, 2014 y 2015. Coincidentemente, en julio de 2015 la biomasa media mensual de sargazo flotante que se dirigía hacia el Caribe desde el Atlántico Occidental se estimó en más de 4 millones de toneladas.

**Las especies de sargazo**

En un estudio acerca de la composición taxonómica del sargazo en el Caribe mexicano se han reportado 12 especies de *Chlorophyta*, 14 de *Phaeophyceae* y 14 de *Rhodophyta* en las arribazones de Punta Cancún y Puerto Morelos; el taxón más abundante fue el género *Sargassum*, con 7 especies. Estas algas tienen

**Eutroficar**  
Proceso de alteración de un cuerpo acuático, originado por la acumulación de nutrientes, con afectaciones para las poblaciones acuáticas, así como el balance de oxígeno en el cuerpo de agua.

**Oligotróficas**  
Cuerpo de agua que es pobre en nutrientes, permite el paso de luz y tiene una presencia escasa de organismos acuáticos.



una talla macroscópica (de 10 a más de 40 cm), mientras que las de tallas pequeñas van de algunos micrómetros hasta 6 cm y son, por lo general, **epifitas** de las anteriores. Asimismo, son fuente de agar y de alginatos, tienen propiedades antibióticas y son útiles como biofertilizante (Cid y González, 1991).

Las arribazones en Punta Cancún y Puerto Morelos se presentan todo el año en intensidades cambiantes, pero con dos incrementos de alta diversidad alrededor de los meses de julio-agosto y octubre-noviembre. De las 40 especies encontradas, 25 son de tallas grandes y susceptibles de ser explotadas, mientras que 14 son pequeñas y más difíciles de usar; 22 son estacionales y 15 son perennes. Para la época en que comienza la temporada ciclónica, grandes cantidades de sargazo entran en la zona económica exclusiva mexicana y, al encontrarse cerca del litoral, son dispersadas por las contracorrientes y depositadas

finalmente en las playas a lo largo de todo el litoral de Quintana Roo.

### ■ El sargazo como fuente de energía

■ Existen diversos procesos de generación de energía que aprovechan como materia prima la biomasa, la cual puede consistir en restos de comida, restos de jardinería, huertos y vegetales de mercados. Uno de estos procesos se basa en la fermentación microbiana en ausencia de oxígeno, de la cual se obtiene una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como biogás, además de una suspensión acuosa (tipo lodo) que contiene los microorganismos responsables del proceso de degradación de la biomasa. En 2012, Juliette Langlois y colaboradores concluyeron que las macroalgas marinas podrían servir para la producción

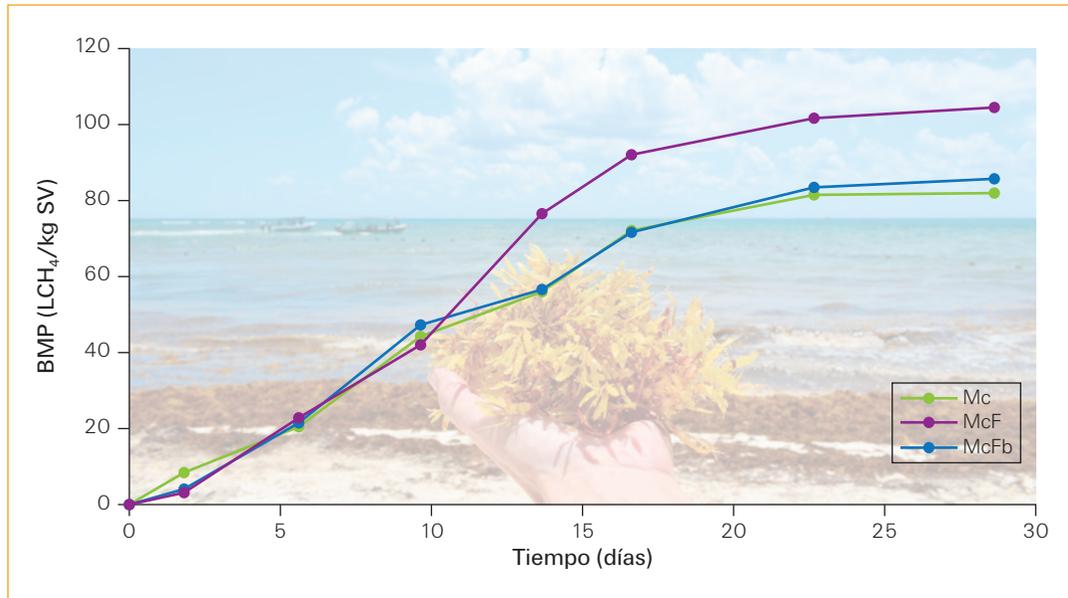
de este biocombustible. En ese sentido, es importante saber qué tanto se puede degradar el sargazo para poder llevarlo a un proceso de generación de energía. Sin embargo, para evaluar el potencial del *Sargassum* como generador de biogás, es necesario estudiar la presencia de múltiples componentes, como sulfatos, cloruro de sodio y metales pesados, así como el contenido nutricional, ya que podrían actuar como inhibidores de la digestión anaerobia (Nkemka y Murto, 2010; Thompson y cols., 2020).

Con el objetivo de aprovechar el sargazo que se ha acumulado en las costas de Yucatán y el Caribe mexicano, los investigadores de la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) desarrollaron una metodología para producir biogás a partir de estas macroalgas, en combinación con un hongo nativo de la región y un inóculo bacteriano (Tapia-Tussell y cols., 2018). Dicho proceso ha obtenido un rendimiento de 104 litros de metano por kilogramo de sólido volátil de sargazo (véase la Figura 1).

### ◀ Epifitas

Plantas que pasan al menos una fase de su vida creciendo sobre otra planta y pueden rápidamente extenderse hacia otras; un ejemplo clásico son los musgos que crecen sobre los árboles.





**Figura 1.** Producción acumulada de gas metano en la digestión anaeróbica del consorcio de macroalga mediante el empleo de dos pretratamientos. Mc: consorcio de macroalga control; McF: consorcio de macroalga más hongo nativo; McFb: consorcio de macroalga más extracto crudo.

### ¿El sargazo es tóxico?

Las posibles aplicaciones de estas macroalgas deben ser analizadas con cautela, debido a la capacidad que tienen de acumular metales tóxicos. El término *biosorción* se refiere a la capacidad de cierto material biológico para unirse por absorción o adsorción a los metales tóxicos. Precisamente, las algas pardas presentan la capacidad de absorber metales como plomo, cobre, cadmio, cromo y zinc. Entre este tipo de algas, el género *Sargassum* destaca por su capacidad de acumulación de metales, ya que su pared celular es rica en polisacáridos (azúcares), que son sitios donde se acumulan los metales.

Para garantizar que la biomasa algal no contenga elementos tóxicos que puedan introducirse en la cadena alimentaria o al ambiente, se debe evaluar la concentración de metales en el sargazo. A partir de las muestras de *S. natans* y *S. fluitans* colectadas en la zona de playa de Puerto Morelos se identificó la presencia de zinc, cadmio, cobre, aluminio, arsénico, níquel, bario y boro; además, en el lixiviado del sargazo se detectó zinc, cobre, aluminio, arsénico, níquel, bario y boro (véase la Figura 2).

El proceso de fermentación de estas macroalgas podría satisfacer actualmente dos necesidades im-



**Figura 2.** Lixiviado generado de sargazo colectado en playas de Puerto Morelos, mayo de 2019.

portantes: a) la mitigación de los efectos eutróficos; y b) la producción de energía renovable. Por ello, la cosecha y la conversión de esta biomasa macroalgal es conveniente para aquellos países que tienen costas extensas o ambientes eutróficos (Migliorie y cols., 2012).

Agradecimientos: Adán Caballero Vázquez, Gilberto Acosta González, Daniela Ortega Camacho y Jorge Domínguez Maldonado.

### Rosa M. Leal Bautista

Unidad de Ciencias del Agua, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.  
rleal@cicy.mx

### Raúl Tapia Tussell

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.  
rtapia@cicy.mx

### Liliana Alzate Gaviria

Unidad de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.  
lag@cicy.mx



### Referencias específicas

- Cid, L. M. y A. C. M. González (1991), "Algas marinas benthicas de la isla Cozumel, Quintana Roo, México", *Acta Botánica Mexicana*, 16:57-87.
- Langlois, J., J.-F. Sassi, G. Jard, J.-P. Steyer, J.-P. Delgenes y A. Hélias (2012), "Life cycle assessment of biomethane from offshore-cultivated seaweed", *Biofuel. Bioprod. Bior.*, 6:387-404.
- Migliore, G., C. Alisi, A. R. Sprocati, E. Massi, R. Ciccoli, M. Lenzi, A. Wang y C. Creminis (2012), "Anaerobic Digestion of Macroalgal Biomass and Sediments Sourced from the Orbetello Lagoon, Italy", *Biomass. Bioenerg.*, 42:69-77.
- Nkemka, V. N. y M. Murto (2010), "Evaluation of biogas production from seaweed in batch tests and in UASB reactors combined with the removal of heavy metals", *Journal of Environmental Management*, 91(7):1573-1579.
- Rodríguez-Martínez, R. E., A. E. Medina-Valmaseda, P. Blanchon, L. V. Monroy-Velázquez, A. Almazán-Becerril, B. Delgado-Pech y M. C. García-Rivas (2019), "Faunal mortality associated with massive beaching and decomposition of pelagic *Sargassum*", *Marine Pollution Bulletin*, 146: 201-205.
- Tapia-Tussell R., J. Ávila-Arias, J. Domínguez Maldonado, D. Valero, E. Olguín-Maciél, D. Pérez-Brito y L. Alzate-Gaviria (2018), "Biological Pretreatment of Mexican Caribbean Macroalgae Consortia Using Bm-2 Strain (*Trametes hirsuta*) and Its Enzymatic Broth to Improve Biomethane Potential", *Energies*, 11(3):494.
- Thompson T., B. R. Young y S. Baroutian (2020), "Efficiency of hydrothermal pretreatment on the anaerobic digestion of pelagic *Sargassum* for biogas and fertilizer recovery", *Fuel*, 279:118527. Disponible en: <doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118527>, consultado el 21 de septiembre de 2020.

Iris Aurora Nava Jiménez y Hugo Sánchez Hernández

# El sargazo del mar Caribe mexicano

En los últimos años, la acumulación de sargazo se ha convertido en un problema para el uso recreativo de las playas por la obstrucción que ocasiona. A continuación, presentamos algunas de las propiedades farmacéuticas y agrícolas del sargazo, así como propuestas para su aprovechamiento.

## Generalidades e hipótesis del origen del *Sargassum*

El género de macroalgas *Sargassum* tiene aproximadamente 450 especies que se encuentran entre las más grandes de las zonas tropicales. En las costas de la península de Yucatán se presentan grandes arribazones de sargazo en las que se han identificado, hasta el momento, dos especies: *S. natans* y *S. fluitans*.

Existen varias hipótesis acerca del incremento en la cantidad de sargazo que ha arribado a las playas del Caribe. La primera es que el *Sargassum* que circula en el mar de los Sargazos se desplazó al sur por el calentamiento global. La segunda indica que el sargazo proviene del frente de la costa de Brasil, en donde las salidas de diferentes ríos van cargadas de nutrientes hacia el mar debido al incremento de la deforestación del Amazonas. Una tercera hipótesis plantea como origen a África, donde la arena del desierto, rica en nutrientes, fertiliza la región y, con ello, se incrementa el crecimiento del sargazo. Las investigaciones en este tema han ido en aumento en los últimos 10 años, con el fin de aportar al conocimiento básico acerca de su origen, propiedades y alternativas de uso.

## El sargazo en el entorno ambiental, social y económico

Desde 2014, en Quintana Roo se han presentado arribazones de estas algas que provocan afectaciones en los sistemas costeros a las especies marinas y para el sector turístico. En el pico de acumulación en 2015, la costa recibió 2 360 m<sup>3</sup> de sargazo por kilómetro de playa; dicha situación se ha mantenido hasta el momento (Rodríguez-Martínez y cols., 2017). Por otro lado, un estudio realizado en distintas playas de la zona mostró que a cada una llegan cantidades diferentes, también





con variaciones en la proporción entre cada especie, donde *S. fluitans* se encuentra en un 96% mientras que *S. natans* representa el resto.

Con respecto a sus propiedades, Silvia Carrillo y colaboradores (2012) encontraron que este género de algas contiene proteínas, minerales (calcio, fósforo, potasio, etcétera), colesterol y lípidos, entre otras sustancias. Es importante mencionar que el análisis químico presenta variaciones en la cantidad de moléculas contenidas en el sargazo (véase la Tabla 1).

### ■ Propuestas para el uso del sargazo en México

#### ■ Alternativas terapéuticas

■ Se han encontrado algunas propiedades farmacológicas de *Sargassum* spp. como anticancerígenas,

antiinflamatorias, antibacterianas y antivirales (Liua y cols., 2012), posiblemente debido a sus metabolitos biológicamente activos, meroterpenoides, florotaninas y fucoidanos. Asimismo, se ha identificado una actividad antibacteriana sobre *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae*, *Escherichia coli*, *Salmonella paratyphi*, *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Aeromonas sobria*, *Vibrio vulnificus* y *V. parahaemolyticus* (Ríos y cols., 2009).

#### Farmacéutica

En algunas especies de algas cafés se han identificado compuestos antioxidantes potenciales, como fucoxantina y feofitina. Un ejemplo de ello se demostró en los extractos de *Sargassum siliquastrum*, con capacidad antioxidante. Por ello, algunos investigadores sugieren que el uso de extractos de algas con fines médicos para inhibir la peroxidación de los lípidos podría ser benéfico para la salud humana.

#### Alimento para rumiantes

También se ha analizado la degradabilidad *in situ* y digestibilidad ruminal de *Sargassum* sp. recolectado en Baja California. Dado que se encontró una digestibilidad de 55%, con una tasa de degradación de 0.05, se confirma el potencial de esta especie de alga como forraje para rumiantes (Gojon y cols., 1998).

**Tabla 1.** Análisis de las propiedades químicas del sargazo (tomada de Carrillo y cols., 2012).

Indicador	Sargassum spp.	Indicador	Sargassum spp.
Humedad (g.100g <sup>-1</sup> )	7.40	Magnesio (g.100g <sup>-1</sup> )	0.90
Cenizas (g.100g <sup>-1</sup> )	38.35	Cobre (ppm)	1.0
Proteína cruda (g.100g <sup>-1</sup> )	6.57	Zinc (ppm)	1600.0
Fibra cruda (g.100g <sup>-1</sup> )	6.55	Hierro (ppm)	3600.0
Extracto etéreo (g.100g <sup>-1</sup> )	1.05	Colesterol (mg.100g <sup>-1</sup> )	4.0
Extracto libre de nitrógeno (g.100g <sup>-1</sup> )	40.08	Lípidos totales (g.100g <sup>-1</sup> )	1.93
Energía bruta (MJ. g <sup>-1</sup> )	10.48	Ácido linoleico (C18:2 LA)	6.99
Calcio (mg.100g <sup>-1</sup> )	3.21	Ácido linoleico (C18:3 ALA)	2.65
Fósforo (mg.100g <sup>-1</sup> )	0.1	Ácido araquidónico (C20:4 AA)	9.83
Sodio (mg.100g <sup>-1</sup> )	20.1	Ácido cicosapentaenoico (C20:5 EPA)	3.53
Potasio (g.100g <sup>-1</sup> )	5.77	Ácido docosahexaenoico (C22:6 DHA)	0.60

### Fertilizante

La aplicación de extractos de algas marinas ha dado como resultado un aumento en el rendimiento de diversas cosechas, la absorción de nutrientes, la mejora de la germinación de las semillas e incidentes debido al ataque de hongos e insectos. Se han realizado investigaciones para analizar el efecto de los fertilizantes líquidos de las algas *Ulva lactuca*, *Caulerpa scalpelliformis*, *Padina tetrastromatica* y *Sargassum linearifolium*, con lo cual se ha demostrado el efecto benéfico por su contenido de proteínas, aminoácidos y carbohidratos. Adicionalmente, existe evidencia de la presencia de reguladores de crecimiento vegetal con efecto en el enraizamiento y aumento de la biomasa (Khan y cols., 2009).

### Bioabsorción de metales pesados

El mecanismo de la presencia de metales pesados en la biomasa seca de *S. fluitans* se investigó a nivel molecular mediante diferentes técnicas. La identificación química de grupos sulfonato y alginato demostró el papel predominante en la absorción de cadmio y plomo (Fourest y cols., 1995).

### Conclusión

El estudio del sargazo es fundamental, ya que lejos de ser una problemática para el turismo en el Caribe mexicano y una afectación negativa para otras especies, podría ser una materia prima para el desarrollo de bioproductos que ayuden a contrarrestar éstas y otras situaciones.

### Iris Aurora Nava Jiménez

Directora del Programa Educativo de Ingeniería en Biotecnología de la Universidad Politécnica de Quintana Roo.  
inava@upqroo.edu.mx

### Hugo Sánchez Hernández

Investigador Académico del Centro de Investigación La Salle, Universidad La Salle Cancún.  
hugo.sanchez@lasallecancun.edu.mx



### Referencias específicas

- Carrillo S., A. Bahena, M. Casas, M. E. Carranco, C. Calvo, E. Ávila y F. Pérez-Gil (2012), "The alga *Sargassum* spp. as alternative to reduce egg cholesterol content", *Cuban Journal of Agricultural Science*, 46(2):181-186.
- Fourest, E. y B. Volesky (1995), "Contribution of Sulfonate Groups and Alginate to Heavy Metal Biosorption by the Dry Biomass of *Sargassum fluitans*", *Environ. Sci. Technol.*, 30(1):277-282.
- Gojon, H., D. Siqueiros y H. Hernández (1998), "Digestibilidad ruminal y degradabilidad *in situ* de *Macrocystis pyrifera* y *Sargassum* spp. en ganado bovino", *Ciencias Marinas*, 24(4):463-481. Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48024406>>, consultado el 18 de septiembre de 2020.
- Khan, W. *et al.* (2009), "Seaweed Extracts as Biostimulants of Plant Growth and Development", *J Plant Growth Regul.*, 28:386-399.
- Liua, L., M. Heinrichab, S. Myersa y S. Dworjanyn (2012), "Towards a better understanding of medicinal uses of the brown seaweed *Sargassum* in traditional Chinese medicine: A phytochemical and pharmacological review", *Journal of Ethnopharmacology*, 142(3):591-619.
- Ríos, N. *et al.* (2009), "Actividad antibacteriana y antifúngica de extractos de algas marinas venezolanas", *Revista Peruana de Biología*, 16(1):97-100.
- Rodríguez-Martínez, R. E., B. van Tussenbroek y E. Jordán-Dahlgren (2017), "Afluencia masiva de sargazo pelágico a la costa del Caribe Mexicano (2014-2015)", en E. García Mendoza *et al.* (eds.), *Florecimientos algales nocivos en México*, Ensenada, CICESE, pp. 352-365.

Dalila Aldana Aranda, Martha Enríquez Díaz y Vidal Elías

# Cooperación en el Caribe ante el sargazo

Las arribaciones de sargazo se han vuelto una constante en el Caribe, con sus respectivas afectaciones ecosistémicas, económicas y sociales. Este fenómeno se ha generado por el calentamiento global y la contaminación antropogénica. Para hacerle frente, se han realizado reuniones nacionales e internacionales en las cuales se presentan las problemáticas y se discute cómo evitar o mitigar los impactos por el sargazo.

## ¿Qué es el sargazo?

El sargazo es un alga marina parda, originaria de zonas tropicales y subtropicales, que constituye un hábitat importante para diversas especies marinas. El sargazo pelágico ofrece un hábitat estructural pseudobentónico para una fauna asociada de varios grupos de invertebrados y una fauna móvil de tortugas, aves, crustáceos y peces (Martin, 2016). Hay dos especies pelágicas en el océano Atlántico: *Sargassum fluitans* y *S. natans*; ambas poseen vesículas llenas de gas que les permiten vivir flotando mientras son arrastradas por las corrientes y el viento. Su reproducción por fragmentación da lugar a una planta nueva de cada fragmento que se desprende (Schell y cols., 2015).



### ■ El fenómeno y su génesis

■ El sargazo pelágico vive y crece en aguas con pocos nutrientes dentro del giro subtropical del Atlántico Norte, en lo que se conoce como mar de los Sargazos (Ryther, 1956). Su arribo a las costas del Caribe es un fenómeno natural periódico, del cual se tiene registro a partir de la década de 1960. La hipótesis era que el sargazo en esta zona se originaba por el desprendimiento de agregaciones del alga en el mar de los Sargazos. Sin embargo, en 2011, a partir de imágenes satelitales se mostró la ocurrencia estacional (entre abril y agosto) de un aumento significativo de sargazo al este de las costas de Brasil (CARICOOS, 2018); esta primera arribazón masiva alcanzó la costa este del Caribe (Cuba, Barbados, Antillas Menores) y el oeste de África (desde Sierra Leona hasta Ghana). En agosto de 2015 se presentó otro arribo masivo atípico, cuantificado en 320 m<sup>3</sup> de sargazo por cada kilómetro de playa por día, el cual se mantuvo hasta diciembre en toda la costa del Caribe mexicano, donde llegó a cubrir 1 200 km<sup>2</sup>. En 2018, la tercera llegada masiva ocurrió a partir de mayo y cubrió un área de 2 800 km<sup>2</sup> a lo largo de la costa de Quintana Roo. Para 2019, algunas fuentes reportaron un millón de toneladas acumuladas en las costas del Caribe mexicano.

Las variaciones ambientales son consideradas como las posibles causas de esta producción masiva de sargazo, principalmente por el aumento de la temperatura, de la materia orgánica y de los nutrientes derivados de las acciones antropogénicas (por ejemplo, el polvo del desierto africano transportado por los vientos, o bien la contaminación del agua). La hipótesis de que se ha formado un Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico que proviene del norte de Brasil está sustentada en la conectividad que se mantiene con las aguas de desembocadura del río Amazonas que llegan al Caribe (Wang y cols., 2019). Dichos autores señalan que la química de





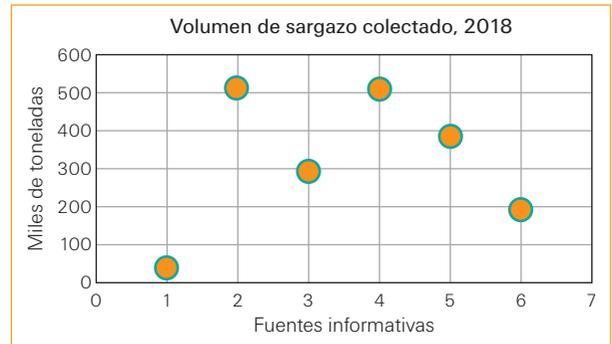
los océanos se ha modificado y, con ello, la floración del alga. Asimismo, han estimado para 2018 una extensión de sargazo intercontinental de 8850 km y una biomasa de 200 millones de toneladas.

**Impacto ecológico, socioambiental y económico**

Atender el problema del sargazo es de alta complejidad debido a los múltiples factores que están involucrados y porque no se conoce con precisión el volumen de la biomasa producida ni cuánto arribará a las costas, ya que los sistemas de teledetección determinan áreas, pero no profundidades, y sus espesores pueden ser de 1 a más de 10 metros.

El sargazo tiene un gran valor ecológico en los manchones en altamar, los cuales proveen sombra y alimento a múltiples especies, varias de ellas de gran valor comercial. Sin embargo, al llegar a la costa genera un sinnúmero de problemas, tanto para el ambiente como para los habitantes ribereños y el conjunto de la infraestructura turística. Además, las emanaciones de ácido sulfhídrico a partir del proceso de descomposición del alga son tóxicas.

Los impactos en los ecosistemas y su biodiversidad por las arribaciones atípicas de sargazo se hacen evidentes en la temporada de anidación de tortugas marinas, la época de captura de langosta, así como



**Figura 1.** Variabilidad de la información sobre la biomasa de sargazo recalado en playas de Quintana Roo, México, en 2018, de acuerdo con seis fuentes informativas consultadas. *Elaboración:* Dalila Aldana.

los periodos y sitios de desove de peces, corales y moluscos, entre ellos el emblema del Caribe: el caracol rosa. También se alteran los ciclos biogeoquímicos al formarse zonas con baja concentración de oxígeno en los manglares, lagunas arrecifales y dunas costeras. Su acumulación aumenta la temperatura del agua e impide el paso de la luz solar, lo cual afecta a las praderas marinas y los corales. Asimismo, los cambios regulares en la diversidad y abundancia de la fauna y flora son impactados por el sargazo y se verán reflejados en la estructura de la comunidad con efectos en las pesquerías y el arrecife mesoamericano del Caribe.

El sargazo también afecta a los ecosistemas terrestres, desde la duna costera y el acuífero hasta la selva, dado que para su deposición final se está enterrando en las playas o se está tirando en la selva, sin ningún acondicionamiento de terrenos con geomembranas para la recolección de los líquidos derivados del proceso de descomposición. En México no existe un registro preciso del volumen de sargazo recalado en las playas ni de la biomasa que se levanta, y mucho menos de su destino final. Por ejemplo, al consultar seis diferentes fuentes —estatales, federales y locales— respecto al volumen de sargazo colectado en 2018, existe una notable variabilidad de la información (véase la Figura 1), que va de 5000 toneladas hasta 500 000 toneladas recogidas. Esto pone en evidencia que México no cuenta con un registro oficial ni una articulación entre todos los sectores involucrados en la atención del fenómeno del sargazo. Desde 2019,

la Secretaría de Marina tiene la encomienda presidencial de atender la limpieza de playas, pero esto se está efectuando solamente en el norte de Quintana Roo. Dicha Secretaría cuenta con un registro de lo que ha levantado, pero no existe comunicación con otras dependencias para obtener un dato global. En tanto, muchas personas poseemos fotos de basureros clandestinos en la selva de Quintana Roo donde se está depositando el sargazo sin seguir las reglas de bioseguridad para no impactar el acuífero, los suelos o la salud humana (véase la Figura 2).

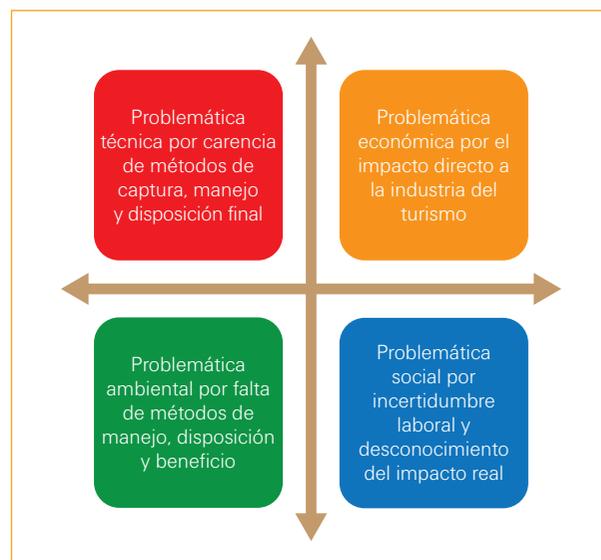
Desde 2011, y con mayor intensidad en 2015 y 2018, el Caribe ha recibido el impacto de las arribaciones masivas de sargazo, las cuales han superado la capacidad de la infraestructura disponible para atender esta contingencia, por lo que también se generan efectos negativos en la industria hotelera y de servicios ofrecidos en la zona. El turismo ha sufrido en mayor medida, ya que se encuentra vinculado socioeconómica y ambientalmente, lo cual representa una relación compleja por efectos diversos, como los servicios ambientales para las actividades económicas o el incremento del turismo y la carga ambiental que se debe soportar.

En este ámbito, algunos de los problemas detectados se relacionan con la acumulación masiva de sargazo en la playa, la producción de grandes cantidades de ácido sulfhídrico –que representa un riesgo para la salud humana y de los ecosistemas–, así como la interferencia en la anidación y eclosión de especies marinas, el impacto en la mortalidad de pastos marinos y corales, además de la erosión de la playa y el daño para el paisaje. La percepción de la población reviste igual importancia, y se puede clasificar en cuatro tipos de conflictos: 1) técnicos; 2) económicos; 3) sociales, y 4) ambientales (véase la Figura 3). Asimismo, los constantes efectos negativos que más preocupan a los pobladores locales en torno al problema del sargazo pueden agruparse en cuatro tipos de impactos: 1) socioambientales; 2) ambientales; 3) sociales, y 4) económicos (véase la Figura 4).

El fenómeno del sargazo, cuyo origen es de orden ambiental, impacta sin excepción a las esferas económica, laboral, política, cultural y social. Ante



**Figura 2.** Tiraderos de sargazo en Quintana Roo. Foto: Rodríguez Martínez R. E.



**Figura 3.** Problemática en torno al sargazo. *Elaboración:* Vidal Elías.

esta situación surge la interrogante referente a si los diversos colectivos afectados deberán acostumbrarse o reconvertir el espacio cotidiano en el que actualmente están inmersos y generar una política pública *ad hoc* en materia de gestión del territorio. Esto



Figura 4. Percepción de los impactos en torno al sargazo. *Elaboración:* Vidal Elías.

puede entenderse conforme lo considera la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO): “el territorio es el resultado de un proceso de construcción social” y, al mismo tiempo, “debe ser considerado como un espacio de gestión pública”.

Sin embargo, incluso entidades como Quintana Roo –que posee más de 50% de todos los cuartos de hotel del área del Gran Caribe– siguen promoviendo los espacios tradicionales (la playa) como generadores de ingresos que buscan la estabilidad económica y laboral, pero sin llevar a cabo una gestión ecosistémica y metodológica del territorio con, al menos, tres objetivos iniciales:

1. Usar de manera adecuada los recursos de toda índole para el desarrollo.
2. Incrementar los índices de calidad de vida y desarrollo humano de la población.
3. Disminuir las condiciones de marginación económica y social.

**Manejo, recolección y uso del sargazo**

La primera estrategia para atender la contingencia provocada por el sargazo en 2015 consistió en

el uso de maquinaria para la limpieza de las playas, lo cual afectó a las zonas de anidación de las tortugas marinas y provocó la erosión de la línea de playa. Posteriormente, un equipo científico propuso la estrategia de recolección de sargazo en el mar, de acuerdo con los lineamientos que emitió la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales para su contención y disposición. En 2018, se anexó una adenda en la cual se enmarca el regreso de la arena después de la limpieza, para evitar la pérdida de arena en la playa. También en ese año se colocaron barreras en el mar, las cuales no han sido del todo eficaces ni para contener el sargazo ni para desviarlo. Es importante señalar que éstas requieren sistemas de anclaje, los cuales afectan la zona de praderas marinas y el arrecife; además, al romperse los sistemas de flotación, contaminan con plásticos el agua.

Por lo anterior, el manejo del sargazo implica crear protocolos para guiar las diversas acciones y contemplar lo siguiente:

1. La forma y el lugar de recolección del sargazo (playa, laguna arrecifal o mar afuera).
2. El tratamiento del sargazo recuperado y su secado para facilitar su manejo.

**Tabla 1.** Algunos productos nacionales elaborados con sargazo.

Producto	Nombre	Sitio web
Libretas, fólderres, portavasos, tarjetas de presentación	Sargánico	<a href="https://sarganico.mx/">https://sarganico.mx/</a>
Ladrillos	Casa Angelita	<a href="https://www.elfinanciero.com.mx/pyme/quintanarroense-construye-una-casa-con-tabiques-de-sargazo">https://www.elfinanciero.com.mx/pyme/quintanarroense-construye-una-casa-con-tabiques-de-sargazo</a>
Zapatos	Ova	<a href="https://www.renovareco.com/">https://www.renovareco.com/</a>
Fertilizantes	Salgax	<a href="https://www.efe.com/efe/usa/variados/jovenes-mexicanos-transforman-plaga-de-sargazo-en-productos-ecoamigables/50000206-3709425">https://www.efe.com/efe/usa/variados/jovenes-mexicanos-transforman-plaga-de-sargazo-en-productos-ecoamigables/50000206-3709425</a>
Biodisel	Bioremar	<a href="https://www.revistagenteqroo.com/produccion-biodiesel-y-derivados-a-traves-de-aprovechamiento-del-sargazo/">https://www.revistagenteqroo.com/produccion-biodiesel-y-derivados-a-traves-de-aprovechamiento-del-sargazo/</a>
Macetas		<a href="https://www.facebook.com/pg/sargazoaglomerado/posts/">https://www.facebook.com/pg/sargazoaglomerado/posts/</a>
Yogur		<a href="https://www.dineroenimagen.com/empresas/esta-empresa-aprovechara-el-sargazo-para-hacer-yogur/110315">https://www.dineroenimagen.com/empresas/esta-empresa-aprovechara-el-sargazo-para-hacer-yogur/110315</a>
Alginato de sodio		<a href="https://alquimar.com.mx/">https://alquimar.com.mx/</a>
Papel; fertilizantes; adhesivos orgánicos		<a href="https://noticaribe.com.mx/2019/05/27/presentan-opciones-para-convertir-el-sargazo-en-productos-como-papel-fertilizante-organico-y-plasticos-biodegradables-que-evitarian-tala-masiva-de-arboles/">https://noticaribe.com.mx/2019/05/27/presentan-opciones-para-convertir-el-sargazo-en-productos-como-papel-fertilizante-organico-y-plasticos-biodegradables-que-evitarian-tala-masiva-de-arboles/</a>

- Los lugares adaptados para su correcta disposición, así como el registro oficial de lo que llega y su procedencia.
- Los costos de los sistemas de recolección y disposición del sargazo.
- La normativa para su manejo y los recursos para su operatividad.

Adicionalmente, distintos equipos mexicanos están trabajando en la obtención de subproductos a partir del sargazo (véase la Tabla 1). Respecto a la generación de bioenergía, un proyecto del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) busca obtener un biocombustible formado de metano, con eficiencia de 70%, a partir de un biodigestor formulado específicamente para el sargazo, en donde la lignina es parte importante en la obtención, así como el azufre. Por otra parte, una investigación del Colegio de Posgraduados y el CICY se enfoca en un sustrato para hongos, para el desarrollo biotecnológico del cultivo de hongos comestibles, con una producción estimada de 114 toneladas de hongos por cada tonelada de sargazo en un periodo de entre 40 y 50 días.

### ■ Instancias desarrolladas para la atención del problema

■ En México, por lo que se refiere a las funciones de atención ante el fenómeno del sargazo, el gobierno de Quintana Roo constituyó el Consejo Técnico Asesor sobre Sargazo como una instancia de asesoría, intercambio y coordinación con la comunidad científica local, experta en diversos temas. El propósito es unificar criterios, homologar acciones y hacer sinergia para la gestión, aplicación y evaluación del Plan de Acción de Manejo Sustentable del Sargazo en el Caribe Mexicano (PLANSARG). Entre sus objetivos particulares está proponer, evaluar y validar los proyectos tecnológicos, programas, medidas y acciones de contención, prevención, mitigación, aprovechamiento y adaptación, además de participar y contribuir a la realización de las líneas de investigación, monitoreo, evaluación y demás acciones contempladas en el plan.<sup>1</sup> A su vez, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) creó un micrositiio colaborativo sobre el sargazo para comprender la

<sup>1</sup> Disponible en: <<https://www.facebook.com/ComiteTecnicoAsesorSargazo>>.

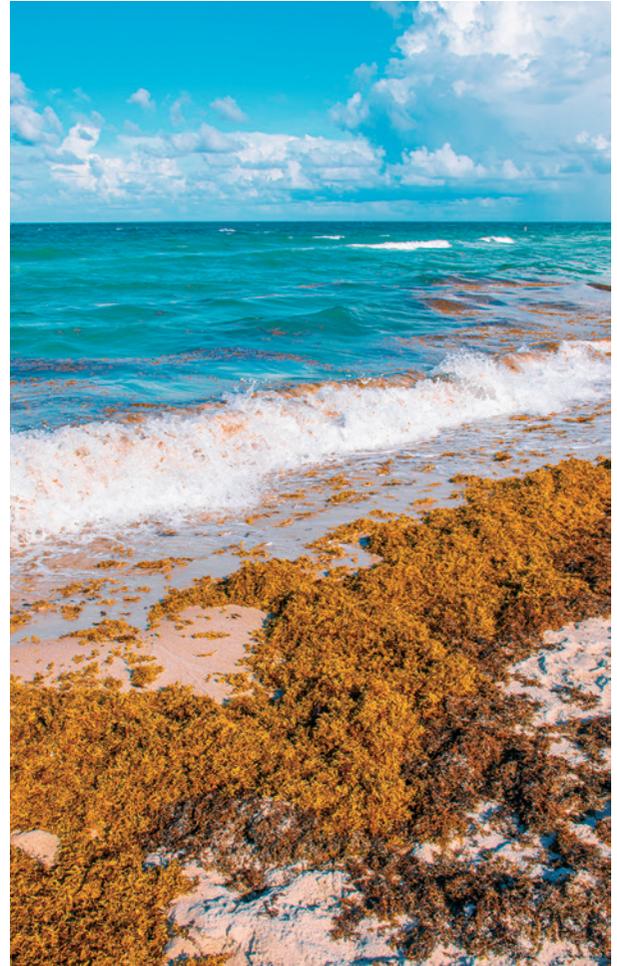


dimensión del impacto de las arribazones al Caribe mexicano. Con ello, el Conacyt articula la agenda interinstitucional y multisectorial en la que participan la Secretaría de Marina, el Instituto de Ecología y Cambio Climático, la Comisión Nacional de la Biodiversidad y el Consejo Asesor Honorario. La plataforma permite consultar la agenda de proyectos y convocatorias para atender el problema.<sup>2</sup>

■ **Cooperación internacional ante el impacto del sargazo**

■ Debido a la complejidad de los impactos por las arribazones de sargazo en todos los países de la cuenca del Caribe, diferentes organismos han convocado a foros internacionales con base científica para integrar el conocimiento existente en torno a este recurso, analizar las prácticas comunes para su manejo y disposición final, así como proponer eventuales subproductos derivados del sargazo. A continuación, mencionamos las principales reuniones nacionales e internacionales, así como su temática principal:

1. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México convocó al “Taller sobre el conocimiento del sargazo en el Caribe mexicano: investigación, manejo y colaboración”, realizado en Cancún, Quintana Roo, del 4 al 6 de septiembre de 2018. Sus temáticas fueron: a) causas y dinámica de la arribazón masiva de sargazo, tomando en cuenta el aumento de la temperatura, la contaminación, las trayectorias oceanográficas y los sistemas de monitoreo y alerta temprana; b) papel e impacto ecológico y socioeconómico del sargazo, y c) innovación tecnológica y aprovechamiento del sargazo. Una de sus conclusiones consideró la importancia de contar con información satelital para tener un estimado de los tiempos y sitios de arrastre de la biomasa de sargazo con potencial de llegar a las costas mexicanas.
2. El 27 de junio de 2019 en Cancún se realizó un encuentro de alto nivel para la atención del pro-



blema del sargazo en el Gran Caribe. Se contó con la participación de representantes de Honduras, Nicaragua, República Dominicana, Jamaica, Trinidad y Tobago, Haití, Cuba, Panamá, Guadalupe, Belice, Guyana, Guatemala y México. Se concluyó que existe la necesidad de reforzar las investigaciones del fenómeno del sargazo, incluirlo en los modelos de alerta y prevención, así como considerar medidas de adaptación al cambio climático. Además, se realizó el lanzamiento de un sitio web.<sup>3</sup>

3. El foro “Sargazo: retos y oportunidades” se realizó entre el 19 y 20 de septiembre de 2019 en la Ciudad de México, convocado por la Comisión de Ciencia y Tecnología del Senado de la Repú-

<sup>2</sup> Disponible en: <<https://www.conacyt.gob.mx/sargazo/>>.

<sup>3</sup> Disponible en: <[www.internacionalsargassumnetwork.com](http://www.internacionalsargassumnetwork.com)>.



blica, la Agencia Mexicana de Cooperación Internacional para el Desarrollo, la Secretaría de Relaciones Exteriores y la Oficina de Información Científica y Tecnológica para el Congreso de la Unión. Se abordaron las temáticas: a) presencia y conocimiento del alga en el Caribe mexicano, su problemática e impactos; b) experiencias en varios países y regiones costeras con el sargazo, y c) varios ejemplos sobre su aprovechamiento como recurso vivo de interés económico. Este foro contó con la participación de científicos nacionales y originarios de diversos países del Caribe, así como de Estados Unidos y Canadá. También participaron representantes del sector gubernamental, la Secretaría de Marina, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, así como empresarios. Las conclusiones de este foro y lo discutido en las sesiones pueden consultar-

se en línea.<sup>4</sup> La senadora Beatriz Paredes Rangel señaló que esta iniciativa permitió abordar la problemática del sargazo desde una perspectiva científica y técnica, más allá de lo político y económico; se congratuló de la existencia de un cuerpo de académicos nacionales que desde diferentes especialidades están trabajando en el tema para comprender y atender este fenómeno natural; asimismo, recalcó la necesidad de contar con recursos para ello. La Secretaría de Relaciones Exteriores concluyó en torno a la necesidad de buscar soluciones a escala regional e impulsar reformas para enfrentar y aprovechar el sargazo en México, como el establecimiento de un impuesto, con el fin de generar recursos que permitan atender la situación actual.

4. La Conferencia Internacional sobre el Sargazo (*Conférence Internationale sur les Sargasses*),<sup>5</sup> realizada en la región de Guadalupe, en las Antillas, del 23 al 26 de octubre de 2019, tuvo una estructura temática muy similar a la del foro convocado por la Comisión de Ciencia y Tecnología del Senado de la República. Es interesante resaltar que ambas reuniones fueron organizadas y convocadas por dos legisladoras, una francesa y una mexicana, ambas participantes en las comisiones de ciencia de sus respectivas asambleas. La región de Guadalupe organizó el Programa de Cooperación Sargazo del Caribe (SARG'COOP), cuyos objetivos fueron: a) conocer el estado científico y técnico de vanguardia y mejorar el intercambio de conocimientos, habilidades y herramientas existentes en el Caribe para atender el fenómeno del sargazo; b) sentar las bases para una cooperación eficiente y pragmática con el fin de proporcionar respuestas funcionales y operativas ante los varamientos de sargazo, y c) reunir a jefes de Estado, autoridades de organizaciones regionales e internacionales, empresas, miembros de la sociedad civil, investigadores y académicos del Caribe. Sus temáticas fueron:

<sup>4</sup> Disponible en: <[https://www.canaldelcongreso.gob.mx/noticias/12445/Senado\\_realiza\\_foro\\_para\\_analizar\\_los\\_retos\\_y\\_oportunidades\\_del\\_sargazo](https://www.canaldelcongreso.gob.mx/noticias/12445/Senado_realiza_foro_para_analizar_los_retos_y_oportunidades_del_sargazo)>.

<sup>5</sup> Disponible en: <[www.sargassum2019.com](http://www.sargassum2019.com)>.



a) estado del arte sobre el conocimiento de las algas *Sargassum* (datos biológicos, ecológicos y oceanográficos) y opiniones cruzadas sobre el impacto del sargazo en la vida cotidiana del Caribe (mediante un debate televisado); b) diferentes estrategias adoptadas por los territorios contra la invasión del sargazo, y c) cómo elevar la voz internacional para señalar el problema del sargazo y contar con una estrategia geopolítica en la lucha contra las algas nocivas y el efecto regional común. Como conclusión de esta reunión se financiaron 12 proyectos internacionales (véase el Recuadro 1) con fondos de la Unión Europea y de la región de Guadalupe, a los que se sumó el Consejo de Ciencia y Tecnología de

Brasil. El Conacyt fue invitado, pero no se integró a esta iniciativa que le hubiera permitido a México participar en una plataforma internacional para el estudio, diagnóstico y transformación del sargazo.

■ ■ ■ **Conclusiones**

■ Durante las reuniones de trabajo nacionales e internacionales se recurre frecuentemente a la hipótesis de que el aumento de la biomasa del sargazo se debe al incremento de la temperatura y a la gran cantidad de materia orgánica proveniente de los nutrientes que llegan al mar por el uso excesivo de fertilizantes y debido a la deforestación, en este caso, de las regiones colindantes a los ríos Amazonas, Orinoco y Congo. Este ambiente provoca que los sargazos –que antes sólo vivían en el mar de los Sargazos– encuentren un nuevo hábitat y formen el ahora llamado Gran Cinturón de Sargazo del Atlántico, el cual atraviesa el océano y se extiende desde las costas del oeste de África hasta el Caribe.

Se ha propuesto ver a estos grandes volúmenes de sargazo como una oportunidad para aprovecharlos, para lo cual se necesita conocer su variación espacio-temporal (volumen), origen, fisiología y composición bioquímica de ambas especies, así como sus respectivas subespecies. A la par, se deben crear las herramientas que permitan desarrollar el marco legal para el manejo del sargazo, a escala local, regional e internacional.

**Recuadro 1.**

**Biocarbono a partir de sargazo**

Entre los proyectos aprobados tras la Conferencia Internacional sobre el Sargazo podemos citar el de biocarbono a partir de sargazo, realizado por la Universidad de las Antillas Francesas. Debido a su composición química, el sargazo resulta ser un buen precursor para la preparación de carbón nanotexturado. Dependiendo de la temperatura del horno, se pueden obtener carbonos enriquecidos con oxígeno y de diferente microporosidad. Este subproducto puede utilizarse en la remediación de suelos, la secuestro de pesticidas o fármacos y la deionización de aguas tratadas.

Las arribazones de sargazo se han convertido en un evento recurrente, por lo que la comunidad internacional –desde investigadores y académicos, hasta empresarios, autoridades, pescadores y la sociedad civil– está sentando las bases para contar con una línea de intercambio y cooperación. Así, el conocimiento científico y tecnológico que se desarrolle estará disponible para todas las regiones afectadas por este fenómeno, en beneficio del ambiente, la salud y la socioeconomía de los países y las personas.

### Agradecimientos

Agradecemos al biólogo Víctor Castillo Escalante, del laboratorio de Conservación, Acuicultura y Biología de Moluscos del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav IPN), unidad Mérida, por su apoyo especializado en la búsqueda de datos de las arribazones de sargazo, de los volúmenes de sargazo recalado y colectado en playa y mar abierto de las costas mexicanas a través de diferentes fuentes de información, así como por la elaboración de bases de datos y su análisis.

### Dalila Aldana Aranda

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional, unidad Mérida.  
daldana@cinvestav.mx

### Martha Enríquez Díaz

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional, unidad Mérida.  
marthaenriquez\_1999@yahoo.com

### Vidal Elías

Consultor independiente.  
vidalelias@prodigy.net.mx

### Referencias específicas

- CARICOOS (2018), “Sargassum outlook – November 2018 update, by USF Optical Oceanography Lab”, *CARICOOS News*. Disponible en: <<https://news.caricoos.org/2018/12/03/sargassum-outlook-november-2018-update-by-usf-optical-oceanography-lab/>>, consultado el 15 de septiembre de 2020.
- Martin, L. M. (2016), *Pelagic Sargassum and its associated mobile fauna in the Caribbean, Gulf of Mexico, and Sargasso Sea* (tesis de maestría), College Station, Texas A&M University.
- Ryther, J. H. (1956), “The Sargasso Sea”, *Scientific American*, 194(1):98-108. Disponible en: <<https://www.jstor.org/stable/10.2307/24943833>>, consultado el 15 de septiembre de 2020.
- Schell, J. M., D. S. Goodwin y A. N. S. Siuda (2015), “Recent *Sargassum* inundation events in the Caribbean: Shipboard observations reveal dominance of a previously rare form”, *Oceanography*, 28(3):8-10. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2015.70>>, consultado el 15 de septiembre de 2020.
- Wang M., C. Hu, B. B. Barnes, G. Mitchum, B. Lapointe y J. P. Montoya (2019), “The great Atlantic Sargassum belt”, *Science*, 365(6448):83-87. Disponible en: <[doi.org/10.1126/science.aaw7912](https://doi.org/10.1126/science.aaw7912)>, consultado el 15 de septiembre de 2020.





Novedades científicas

Sabina Viramontes Ramos, Martha Cristina Portillo Ruiz y Guadalupe Virginia Nevárez Moorillón

# Bacterias que se nutren de hidrocarburos

La contaminación por los hidrocarburos es un gran problema ambiental. Su constitución química hace difícil su remoción, por lo que se han buscado nuevas formas de eliminarlos. Una de las más eficaces reside en la actividad de los microorganismos que convierten los hidrocarburos en dióxido de carbono y agua. Esto, gracias a moléculas de propiedades únicas: los biosurfactantes.

## Contaminación por hidrocarburos y biorremediación

Seguramente han escuchado acerca de los derrames de hidrocarburos en los océanos, o bien de la problemática que generan las refinerías y las gasolineras al descargar combustibles en suelos o en cuerpos acuíferos. Estos compuestos han mostrado ser tóxicos, mutagénicos, carcinogénicos e inhibidores del crecimiento de los organismos; por si fuera poco, su constitución los hace recalcitrantes; es decir, se resisten a cualquier mecanismo de degradación, sea químico o biológico. Lo anterior ha dado como resultado una creciente atención al desarrollo de tecnologías innovadoras para enfrentar estos problemas.

Una forma de reducir los efectos causados por los hidrocarburos reside en la actividad de los microorganismos. Cuando éstos desarrollan su **potencial metabólico** completo, pueden usar dichos compuestos para crecer y reproducirse, al tiempo que producen dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Aunque pueda parecer increíble, esto es posible debido a que los hidrocarburos contienen carbono (C), hidrógeno (H), azufre (S), nitrógeno (N) y oxígeno (O), elementos necesarios para el desarrollo de cualquier organismo vivo. En términos técnicos, este proceso se conoce como restauración biológica o biorremediación.

Como el petróleo y sus derivados están constituidos por numerosos compuestos químicos, ningún microorganismo puede degradar por sí solo todos sus constituyentes, sino que necesita agruparse con otros y formar consorcios microbianos. Éstos tienen mayor poder biodegradativo porque su información genética es más completa. Además, se establece una compleja interacción entre las especies

### Potencial metabólico

Capacidad de una célula para llevar a cabo los procesos bioquímicos que le permiten producir la energía y los materiales básicos necesarios para sus procesos vitales.



microbianas: algunas atacan a un compuesto y otras culminan su degradación, por lo que son más eficientes que los cultivos puros.

Los biólogos han aislado bacterias de suelos contaminados con petróleo y han observado que una especie, identificada como *Pseudomonas aeruginosa*, es capaz de crecer al utilizar petróleo como única fuente de carbono, aunque lo hace cada vez más lentamente. Esto se debe a que los microorganismos primero degradan las fracciones más sencillas del crudo (componentes de cadenas lineales y cortas) y después los compuestos más complejos (aromáticos, ramificados o con más de 20 carbonos).

**Inmiscible**

Incapacidad de ciertas sustancias para combinarse o mezclarse y formar una solución homogénea.

■ ■ ■ **¿Cómo actúan los microorganismos en la biorremediación?**

En cualquier lugar, hay un número limitado de organismos. El estudio de la diversidad microbiana y de la dinámica de sus poblaciones está aumentando, lo cual ha permitido profundizar en el conocimiento de la composición de las comunidades en suelos contaminados, así como de su evolución en cuanto a los procesos de biodegradación. Con estos estudios podemos saber cuáles son los microorganismos capaces de adaptarse y crecer en sitios contaminados con hidrocarburos.

Se han sugerido varias líneas de investigación para el tratamiento biológico de los sitios contaminados por hidrocarburos del petróleo. En una de ellas se utilizan microorganismos, ya sean nativos del sitio o introducidos del exterior, que pueden degradar los hidrocarburos de manera directa, o bien proveer moléculas con propiedades únicas que permiten que otras bacterias lleven a cabo la degradación. Estas moléculas son los surfactantes producidos por organismos vivos (biosurfactantes).

*Surfactante* proviene del inglés *surfactant* (*surface active agent*), que significa agente activo de la superficie. Este término hace referencia al hecho de que dichas moléculas alteran las condiciones de la superficie o interfaz entre dos fluidos **inmiscibles**; en este caso, el agua y los hidrocarburos del petróleo. Por esta razón también se llaman tensoactivos.

Uno de los principales géneros de bacterias degradadoras de hidrocarburos es *Pseudomonas*, caracte-



terizado por una versatilidad metabólica que otorga gran resistencia a los ambientes agresivos. En condiciones específicas, las bacterias *Pseudomonas* producen biosurfactantes del tipo glicolípidos (*glico*- significa que contienen un azúcar, y *lípidos*, una cadena hidrocarbonada). Específicamente, producen ramnolípidos (*ramno*- hace referencia a un azúcar de seis carbonos; su nombre proviene de la planta de la cual se aisló por primera vez: *Rhamnus frangula*), los cuales contienen una o dos unidades de ramnosa ligadas a una o dos cadenas de ácidos grasos de 8 a 12 átomos de carbono. Los ramnolípidos son quizá los biosurfactantes más estudiados, con más de 30 tipos diferentes conocidos hasta ahora.

### ■ ■ ■ ¿Cómo trabajan los biosurfactantes?

■ ■ ■ Por lo general, dos fluidos no se pueden mezclar cuando tienen diferente grado de polaridad. Pensemos en el ejemplo más común: agua y aceite. Una molécula polar es aquella que tiene zonas con cargas eléctricas opuestas y que puede interactuar atractivamente con otras moléculas de su mismo tipo. Siguiendo con nuestro ejemplo, la molécula del agua tiene regiones cargadas positivamente (los átomos de hidrógeno) que sienten atracción por la región negativa de otras moléculas de agua (el átomo de oxígeno). Estas atracciones hacen que las moléculas de agua “se sientan cómodas” cuando están rodeadas por otras moléculas de agua. Por otro lado, las moléculas de aceite, al igual que las de otros hidrocarburos del petróleo, son moléculas no polares: poseen cadenas de carbonos e hidrógenos dispuestas de manera simétrica. Así pues, no es que existan fuerzas de repulsión entre una molécula de agua y una de aceite; simplemente, cada molécula “prefiere” estar entre otras semejantes a ella. ¿Recuerdan el antiguo adagio: “lo semejante disuelve a lo semejante”?

Tal como mencionamos, las moléculas de agua forman interacciones atractivas con sus vecinas. Estas interacciones son enlaces químicos débiles. Llevar una molécula del interior hacia la superficie implica “romper” algunos de estos enlaces débiles, lo que tiene un costo en energía. Pues bien, a la energía necesaria para romper estos enlaces y llevar a la superficie una determinada cantidad de moléculas se le conoce como tensión superficial, definida como la energía requerida para incrementar el área de la superficie de un líquido. Haciendo un análisis dimensional, también se puede expresar como la fuerza tangencial por unidad de longitud que tensa a la superficie. Imaginemos que, entre cuatro personas, sostenemos una sábana por los extremos y la tensamos para evitar que se deforme; mientras más tensión apliquemos, más difícil será deformarla (incluso es posible sostener un peso sobre la sábana y conservar su forma si aplicamos la tensión suficiente). El cociente de la fuerza que aplica cada persona entre la longitud de su lado es la tensión superficial de la sábana. Si la superficie en cuestión es la interfaz entre dos fluidos distintos, entonces se denomina tensión interfacial; su definición es igual, y esta tensión será menor mientras más afines (más miscibles) sean las moléculas de ambos fluidos y viceversa.

A diferencia de las sustancias polares y no polares que describimos anteriormente, los surfactantes son moléculas anfifílicas (*anfi*- significa a ambos lados, y *filico*, afinidad por); es decir, tienen afinidad tanto por las moléculas polares como por las no polares, pues poseen grupos polares (hidrofílicos) y no polares (hidrofóbicos). Esto hace que dichas moléculas “se sientan muy cómodas” en la interfaz de ambos fluidos; sólo orientan su extremo polar hacia las moléculas de agua y la parte no polar hacia las moléculas de aceite. Cuando esto ocurre, la tensión superficial se reduce y a ello se debe el nombre de tensoactivos o surfactantes.





En otras palabras, dado que todas las moléculas de agua “prefieren” estar en el seno del líquido (incluidas aquellas que están en la superficie), podemos pensar en la tensión superficial como una fuerza que tiende a arrastrar a las moléculas de la superficie del líquido hacia su interior. Sin embargo, cuando hay moléculas anfifílicas en la interfaz agua-aceite, las moléculas de agua pueden estar “cómodamente” en la superficie, puesto que se encuentran con el extremo polar del surfactante con el que tienen atracción, y no con las moléculas de aceite, con las que se repelen. Al disminuir la tensión interfacial, se reducen las fuerzas de repulsión entre fases disimilares, lo que permite su mezcla y su interacción.

La tensión superficial se mide en unidades de energía/área o, de manera equivalente, en unidades de fuerza/distancia. Así, la tensión superficial del agua pura es de 72 **dinas/cm**, que equivale a colgar una masa de 750 g a lo largo de 1 m de longitud (algo así como la fuerza que ejerce una toalla húmeda cuando se cuelga en un tendedero).

Cuando un surfactante se adiciona a los sistemas aire-agua o agua-aceite, se observa una reducción en el valor de la tensión superficial. En el caso del agua,

este valor puede disminuir hasta 25 **dinas/cm**; es decir, menos de la mitad (como cuando la toalla ya se secó). En 1998, Adria Bodour y Raina Miller explicaron este fenómeno mediante un experimento llamado técnica de colapso de la gota: cuando se aplica una gota de agua sin surfactantes a una superficie aceitosa, forma una esfera, debido a que las moléculas del agua son repelidas de la superficie hidrofóbica; en contraste, si la gota de agua contiene surfactantes, la tensión interfacial entre la gota y la superficie se reduce, lo que resulta en la extensión de la gota de agua sobre la superficie aceitosa (véase la Figura 1).

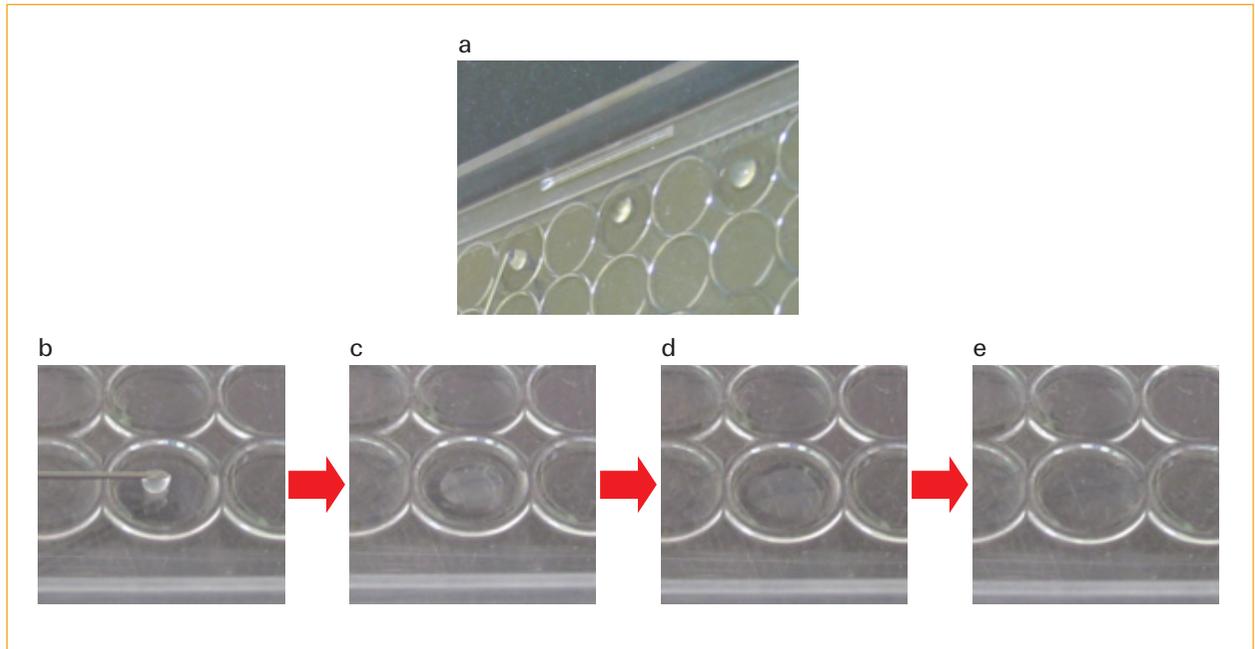
La Figura 2 muestra cómo la tensión superficial varía con la concentración de surfactante. Conforme esta última se incrementa, la tensión superficial disminuye de 72 hasta 25-30 **dinas/cm** y el surfactante empieza a agregarse para formar **micelas**. Esto se conoce como concentración crítica de micelas (CMC) y ocurre cuando la interfaz se satura de moléculas de surfactante. Cuando estas moléculas ya no caben en la superficie, se agrupan de tal manera que las “colas” hidrofóbicas se unen entre sí y quedan expuestas las “cabezas” hidrofílicas. Estos agregados son recibidos favorablemente por las moléculas de

**Micela**

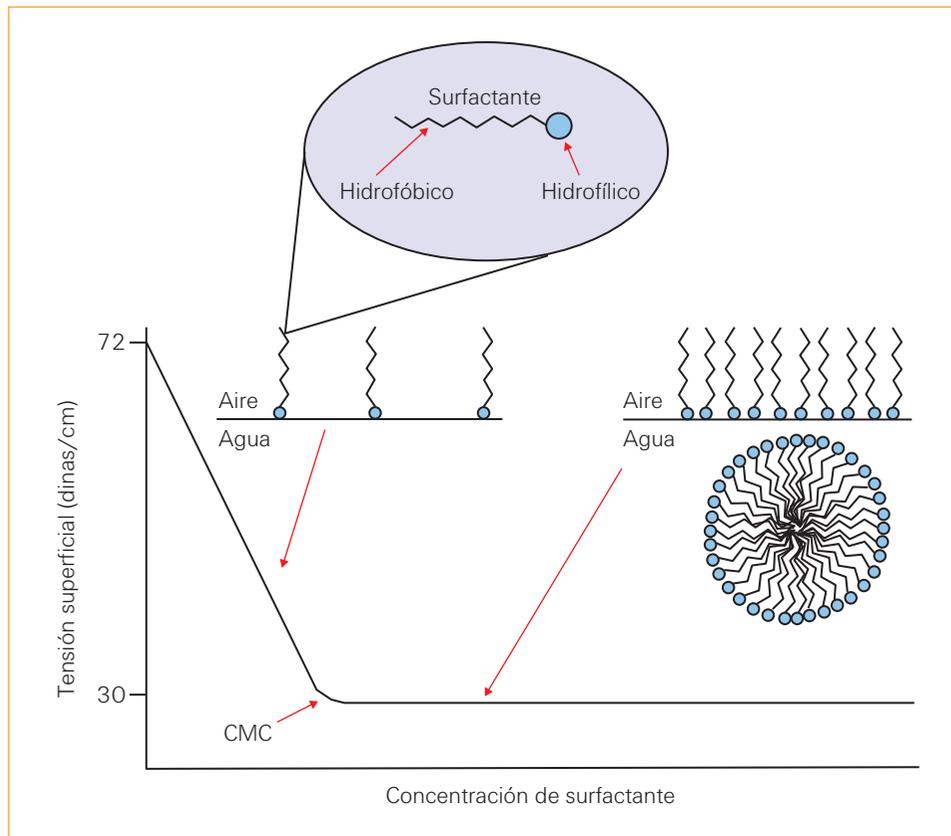
Formación geométrica de moléculas que tienen una cabeza polar (hacia el exterior) y una cola no polar (hacia el interior) adheridas a una partícula que se encuentra en un medio en el cual no es soluble.

**Dina**

Unidad de medida que se define como la fuerza que, aplicada a la masa de un gramo, le comunica una aceleración de un centímetro en un segundo al cuadrado.



**Figura 1.** Resultados para la prueba de colapso de la gota: a) depósito de gotas de cultivo de bacterias no productoras de biosurfactantes en una placa aceitosa; b) depósito de *Pseudomonas aeruginosa* productora de biosurfactantes en la placa aceitosa; c)-d) extensión de la gota en el pozo, y e) colapso total del cultivo en el pozo que contenía aceite (Viramontes y cols., 2010).



**Figura 2.** Gráfica que muestra la relación entre la tensión superficial, la concentración de surfactante y el comportamiento de las moléculas individuales de surfactantes a concentraciones inferiores y superiores a la concentración crítica de micelas (CMC) (Cassidy y cols., 2002).

agua, que les ofrecen su cara más “atractiva”. Entre 50 y 100 monómeros de surfactante forman una micela. Las micelas formadas se acumulan en las interfaces y actúan como agentes humectantes. La capacidad del surfactante de reducir la tensión superficial está basada en este proceso dinámico.

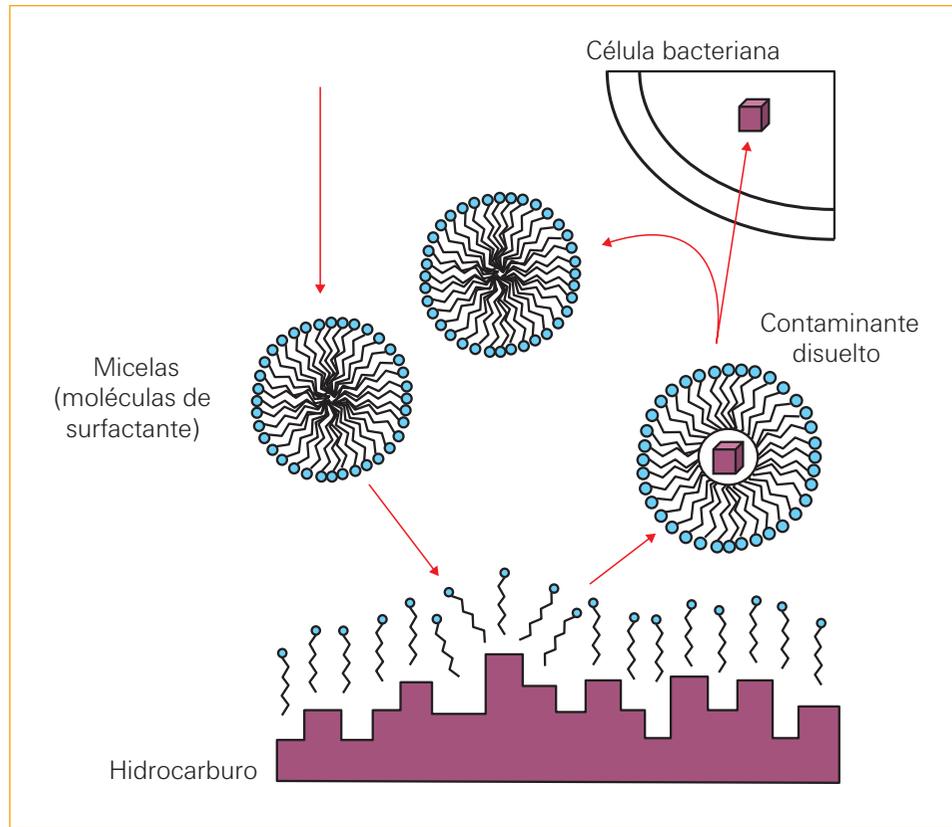
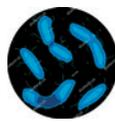
A concentraciones por debajo de la CMC, los surfactantes parten la interfaz aire-agua para maximizar el contacto de la “cabeza” hidrofílica con el agua y minimizar el de la “cola” hidrofóbica. A concentraciones de surfactante por encima de la CMC, todos los sitios de la superficie están ocupados y los surfactantes empiezan a formar micelas, se acumulan compuestos hidrofóbicos dentro de éstas y dan lugar a microemulsiones. Una emulsión se forma cuando una fase líquida se dispersa como gotitas microscópicas en otra fase continua líquida. Cuando las bacterias están creciendo en la interfaz agua-aceite, la emulsificación incrementa el área superficial de las gotitas.

De esta manera, las bacterias pueden tener contacto directo con decenas de gotitas de aceite encapsuladas por el biosurfactante. En función de lo anterior, se ha sugerido que las bacterias son capaces de tomar el contaminante hidrocarbonado del centro micelar por fusión con la membrana celular, que está compuesta por una bicapa lipídica (véase la Figura 3).

#### ■ ¿Todos los biosurfactantes son iguales?

#### ■ ¿Cómo se producen?

■ Es razonable suponer que los diferentes grupos de biosurfactantes tienen distintas funciones en el proceso de crecimiento de los microorganismos que los producen; más aún, el producto depende del microorganismo involucrado, y muchos parecen producir mezclas complejas de biosurfactantes. Como sus estructuras químicas y sus propiedades de superficie son diferentes, es posible que un grupo



**Figura 3.** Posible mecanismo de asimilación de contaminantes hidrofóbicos mediados por surfactantes: la bacteria toma el contaminante de una micela (Schippers y cols., 2000).

de biosurfactantes tenga ventajas en un lugar específico, mientras que otro llegue a ser más apropiado en un lugar distinto, lo que vuelve difícil hacer generalizaciones con respecto a su función natural.

Los biosurfactantes pueden quedarse pegados a la célula (intracelulares), o bien pueden ser secretados (extracelulares). La cantidad y el rendimiento del biosurfactante liberado en relación con la cantidad del que queda unido a la célula dependen del sustrato, de las condiciones ambientales, de la etapa de crecimiento y de los parámetros del proceso, tales como **aereación**, temperatura y pH. En un inicio, se partió de la hipótesis de que la producción de biosurfactantes se debía a la presencia de sustratos hidrofóbicos en el medio de cultivo. Sin embargo, en los últimos trabajos de investigación se ha reportado que las fuentes de carbono solubles en agua también pueden usarse para producirlos, aun cuando sigue suponiéndose que los sustratos insolubles son más efectivos en la liberación de estos compuestos. Por lo

tanto, una de las principales áreas de investigación de los biosurfactantes corresponde al uso de sustratos económicos para su producción. Por ejemplo, se han evaluado como materias primas sustancias como glucosa, sacarosa, melasas, licor de maíz, glicerol, parafina y aceites de soya, girasol y oliva, entre otros. Se encontró que *Pseudomonas aeruginosa* puede aprovechar todos éstos para crecer y producir ramnolípidos.

### ■ **Conclusión**

■ Los rápidos avances biotecnológicos han llevado a generar un interés considerable en el desarrollo de métodos biológicos para la producción de surfactantes a escala industrial. Debido a su aceptación ecológica, baja toxicidad, naturaleza biodegradable, diversidad, efectividad en condiciones extremas, producción en fuentes renovables y a partir de una gran variedad de microorganismos, los biosurfactantes están ganando terreno sobre los surfactantes químicos.

### ■ **Aereación**

Proceso en el que se produce un contacto entre el aire y el agua con el objetivo de oxigenarla o de excluir gases o sustancias volátiles.

La producción de biosurfactantes por parte de microorganismos nativos de los ambientes contaminados con hidrocarburos los provee de ventajas en biorremediación, debido a que ellos pueden utilizar fuentes de carbono insolubles en agua para crecer. La identificación y selección de cepas microbianas con estas capacidades pueden llevar a la caracterización de sus biosurfactantes. Considerando que éstos tienen una gran variedad de estructuras moleculares, también se debe saber que sus propiedades químicas diferentes pueden ser explotadas comercialmente en las industrias alimentaria, petroquímica, cosmética y farmacéutica. Asimismo, en el sector ambiental, resultan ser prometedoras para la biorremediación y el tratamiento de aguas residuales con el fin de remover compuestos tóxicos y peligrosos.

### Sabina Viramontes Ramos

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua.

sviramon@uach.mx

### Martha Cristina Portillo Ruiz

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua.

mportillo@uach.mx

### Guadalupe Virginia Nevárez Moorillón

Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua.

vnevare@uach.mx

### Referencias específicas

- Barrios, Y. (2011), "Biorremediación: una herramienta para el saneamiento de ecosistemas marinos contaminados con petróleo", *Bioteología Aplicada*, 28: 60-68. Disponible en <[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-28522011000200002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-28522011000200002)>, consultado el 14 de febrero de 2020.
- Cassidy, D. et al. (2002), "In situ rhamnolipid production at an abandoned petroleum refinery", *Journal of Soil and Sediment Contamination*, 11(5):769-787.
- De la Rosa, N., E. Sánchez y M. Ortiz (2014), "Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas", *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 4(1):47-67. Disponible en <[https://www.researchgate.net/publication/305848428\\_Biosurfactantes\\_y\\_su\\_papel\\_en\\_la\\_biorremediacion\\_de\\_suelos\\_contaminados\\_con\\_plaguicidas](https://www.researchgate.net/publication/305848428_Biosurfactantes_y_su_papel_en_la_biorremediacion_de_suelos_contaminados_con_plaguicidas)>, consultado el 20 de febrero de 2020.
- León, M., A. Contreras y J. Ramos (2016), "Biosurfactantes en la industria petrolera", *Semilleros*, 2(1): 48-59. Disponible en <<https://core.ac.uk/download/pdf/155272480.pdf>>, consultado el 14 de febrero de 2020.
- López, J. et al. (2006), "Bioremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo", *Nova*, 4(5):82-90. Disponible en <<http://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/nova/article/view/351/1203>>, consultado el 14 de febrero de 2020.
- Pérez, R. et al. (2008), "Aislamiento y selección de una cepa bacteriana degradadora de hidrocarburos a partir de suelos contaminados con petróleo", *Revista CENIC Ciencias Biológicas*, 39(1):44-51. Disponible en <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181214889004>>, consultado el 14 de febrero de 2020.
- Quintana, R. y L. Valerio (2013), "Pseudomonas: bacterias con potencial para degradar petróleo", *EcoCria*, 5(2): 3-5. Disponible en <[https://www.researchgate.net/profile/Rafael\\_Quintana4/publication/305983299\\_Pseudomonas\\_Bacterias\\_con\\_potencial\\_para\\_degradar\\_petroleo/links/57a7e95508aee07544c1fe11/Pseudomonas-Bacterias-con-potencial-para-degradar-petroleo.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Rafael_Quintana4/publication/305983299_Pseudomonas_Bacterias_con_potencial_para_degradar_petroleo/links/57a7e95508aee07544c1fe11/Pseudomonas-Bacterias-con-potencial-para-degradar-petroleo.pdf)>, consultado el 14 de febrero de 2020.
- Raiger, L. y N. López (2009), "Los biosurfactantes y la industria petrolera", *Química Viva*, 3(8):146-161. Disponible en <<https://www.redalyc.org/pdf/863/86320633002.pdf>>, consultado el 20 de febrero de 2020.
- Ron, E. y E. Rosenberg (2001), "Natural roles of biosurfactants", *Environmental Microbiology*, 3(4):229-236.
- Schippers, C., K. Gebner, T. Müller y T. Scheper (2000), "Microbial degradation of phenanthrene by addition of a sophorolipid mixture", *Journal of Biotechnology*, 83:189-198.
- Toribio, J. et al. (2014), "Pseudomonas sp productoras de biosurfactantes", *Tlamati Sabiduría*, 5(2):66-82. Disponible en <<http://tlamati.uagro.mx/t52/t529.pdf>>, consultado el 14 de febrero de 2020.
- Viramontes, S. et al. (2010), "Selection of biosurfactant/bioemulsifier – producing bacteria from hydrocarbon – contaminated soil", *Brazilian Journal of Microbiology*, 41:668-675.

Celia Monserrat Luna Castro, Ma. de Lourdes Pérez Zavala y José Eleazar Barboza Corona



# Biología sintética, economía y biosensores

La biología sintética permite diseñar y construir sistemas biológicos novedosos o rediseñarlos para que sean predecibles y reproducibles con base en principios de la ingeniería y la programación, acopladas a un diseño sistemático. Por ejemplo, se pueden generar biosensores basados en células completas o en sus componentes (sistemas libres de células) y detectar microorganismos de interés en salud pública.

## Introducción

La especie humana es curiosa por naturaleza y aun cuando seguramente las primeras personas se quemaron las manos, descubrieron el fuego; incluso es probable que muchas veces se hayan intoxicado por haber ingerido frutos desconocidos, lo cual les permitió seleccionar aquellos que no causaran daño y, posteriormente, hacerlos parte de la alimentación humana. Esta curiosidad también llevó hace miles de años a la producción de vinos, quesos y diversos productos fermentados, los cuales, en el sentido estricto, son productos de la biotecnología; es decir, se emplearon sistemas vivos o de alguno de sus productos para generar un bien o servicio para la humanidad. Muchos años después se habrían de desarrollar las plantas transgénicas y los organismos recombinantes mediante la ingeniería genética, los cuales han sido importantes para incrementar la producción de alimentos, para la síntesis de insulina, para construir plantas resistentes al ataque de insectos o las sequías, así como para la síntesis de saborizantes o de aromas usados en los alimentos y perfumes, entre otros.

Por otro lado, la secuenciación del genoma humano y de otros organismos definitivamente impulsó el desarrollo de la bioinformática. Este tipo de herramientas permite a los investigadores invertir tiempo para analizar información, diseñar nuevos sistemas y después construirlos a partir de diversos protocolos y equipos de laboratorio. Asimismo, la reducción de los costos de la secuenciación ha permitido conocer la secuencia de diferentes genomas de manera rápida, y los nuevos métodos de síntesis permiten construir genes y circuitos genéticos en tiempos



62 bpm



cortos.<sup>1</sup> Ahora bien, aun cuando la biotecnología permite generar bienes y servicios para mejorar las condiciones o el estilo de vida de los seres humanos mediante las herramientas que se tienen gracias a la ingeniería genética, es complicado generar nuevos sistemas de manera estandarizada y predecir su comportamiento.

■ **La biología sintética es ingeniería biológica con un impacto económico**

■ En años recientes, surgió un movimiento en la ingeniería con el fin de proponer aplicaciones en la biología, para hacerla más predecible y crear nuevos sistemas biológicos. De esta forma, nació la biología sintética (SynBio, del inglés *synthetic biology*) o ingeniería biológica, la cual es un área en la que se diseñan y construyen piezas biológicas, sistemas o rutas biológicas artificiales y sistemas vivos con actividades novedosas, o bien se rediseñan los sistemas biológicos existentes. Los sistemas generados de esta manera son predecibles y reproducibles, ya que usan principios de la ingeniería (estandarización, abstracción, modularización) y la programación (Endy, 2005) acopladas a un diseño sistemático, lo cual distingue a la biología sintética de la ingeniería genética. Dado que la secuencia de los ácidos nucleicos está codificada por unas cuantas letras (A, T, G, C, U) y que el código genético es común para cualquier sistema vivo —ya sean plantas, animales, bacterias o virus—, éste puede programarse y tener un funcionamiento predecible, lo cual permite diseñar nuevos sistemas biológicos en la computadora.

Para estandarizar las secuencias genéticas es importante caracterizarlas primero, asegurarse de su funcionamiento, para que de esta forma estén listas para emplearse como piezas genéticas que puedan reutilizarse en la generación de sistemas genéticos sencillos o complejos. De esta forma nació el concepto de *biobricks* (en español, ladrillos biológicos), los cuales pueden estar formados de piezas sencillas (promotores, sitios de unión a ribosomas, marcos de

lectura, terminadores de la transcripción) o compuestas (promotores/sitios de unión a ribosomas, marcos de lectura/terminadores de la transcripción, etcétera). Los ladrillos biológicos pueden ensamblarse de manera sencilla para construir sistemas más complejos, como cuando se pegan los ladrillos para construir una casa o cuando se unen las piezas de LEGO para formar un castillo, una casa, un avión o un automóvil. Los *biobricks* deben cumplir los lineamientos establecidos en la regla RFC10 de la Fundación iGEM (International Genetically Engineered Machine).<sup>2</sup>

En el mundo, la biología sintética ha sido bien aceptada, lo cual ha abierto un nuevo mercado potencial para las inversiones que están interesadas en el desarrollo de nuevas ideas o conceptos. Un ejemplo es la empresa Ginkgo Bioworks,<sup>3</sup> la cual tuvo una inversión inicial de 52.12 millones de dólares (Hayden, 2015) y actualmente se ha convertido en una de las compañías más importantes del mundo en biología sintética, bajo el lema “*biology by design*” (biología por diseño). Otras empresas importantes que han apostado por la biología sintética son: Transcriptic,<sup>4</sup> Zymergen<sup>5</sup> y Twist Bioscience,<sup>6</sup> con inversiones iniciales de 14.37, 44 y 82.11 millones de dólares, respectivamente (Hayden, 2015). De manera reciente, Synbiobeta<sup>7</sup> reportó que en 2018 las empresas emergentes (*startups*) basadas en la biología sintética tienen fondos de inversión cercanos a 1.9 billones de dólares (Synbiobeta, 2018).

La biología sintética tiene un enorme potencial para la agricultura, biofarmacia, salud, química, materiales, energía, ambiente, alimentos y bebidas, entre otros ámbitos. Por ejemplo, en el área de biofarmacia y salud, la biología sintética puede ayudar a resolver problemas reales relacionados con: 1) el desarrollo de células rojas artificiales que son necesarias para las transfusiones y los trasplantes; 2) el diseño de células inmunes que respondan a la presencia de tumores; 3) la producción de vehículos

<sup>1</sup> Disponible en: <[www.idtdna.com/pages/products/genes-and-gene-fragments/custom-gene-synthesis](http://www.idtdna.com/pages/products/genes-and-gene-fragments/custom-gene-synthesis)>.

<sup>2</sup> Disponible en: <[https://openwetware.org/wiki/The\\_BioBricks\\_Foundation:BBRFC10](https://openwetware.org/wiki/The_BioBricks_Foundation:BBRFC10)>.

<sup>3</sup> Disponible en: <[www.ginkgobioworks.com](http://www.ginkgobioworks.com)>.

<sup>4</sup> Disponible en: <[www.transcriptic.com](http://www.transcriptic.com)>.

<sup>5</sup> Disponible en: <[www.zymergen.com](http://www.zymergen.com)>.

<sup>6</sup> Disponible en: <[www.twistbioscience.com](http://www.twistbioscience.com)>.

<sup>7</sup> Disponible en: <[www.synbiobeta.com](http://www.synbiobeta.com)>.

inteligentes que liberen moléculas con efectos terapéuticos en lugares específicos, y 4) la generación de células hospederas (llamadas chasis) –ya sean virus, bacterias u otras– que puedan ser usadas como **sistemas de expresión** (Fletcher, 2018). Asimismo, la biología sintética es de gran ayuda para la producción de compuestos químicos de uso terapéutico, así como para la obtención de sensores para el diagnóstico médico.

**¿Qué son los biosensores y qué tipos existen?**

En términos generales, los biosensores son dispositivos que permiten detectar y cuantificar una sustancia (analito) que se encuentra en un medio determinado. Los analitos pueden ser de diversa naturaleza, desde la glucosa en sangre, los metales pesados tóxicos que se encuentran en el agua o los microorganismos patógenos, hasta los aromas en la carne descompuesta, entre otros (Daszczuk y cols., 2014; Wen y cols., 2017). Básicamente, un biosensor está formado por un receptor que se acopla a un transductor (óptico, electroquímico, termométrico, etcétera), el cual se encarga de transformar una

señal en algo detectable y cuantificable (véase la Figura 1). Existen diferentes tipos de biosensores, tales como los enzimáticos, electroquímicos, piezoeléctricos, nanomecánicos, magnéticos y ópticos, entre otros, cuyos principios de operación están indicados de manera resumida en la Figura 2. También existen los biosensores basados en receptores de proteínas G (GPCR), en los cuales el biosensor transmembranal se acopla a la proteína G y activa a una serie de genes como respuesta a la presencia del analito. En los inmunobiosensores, los antígenos (patógenos, toxinas) son reconocidos por los anticuerpos. Una vez que se han generado los biosensores, no es necesario tener conocimientos altamente especializados para manejarlos, a diferencia de los métodos que requieren del uso de equipos costosos, como los **cromatógrafos**, los cuales no son portables y deben ser manejados por personal capacitado.

**Biosensores basados en células o en sus componentes**

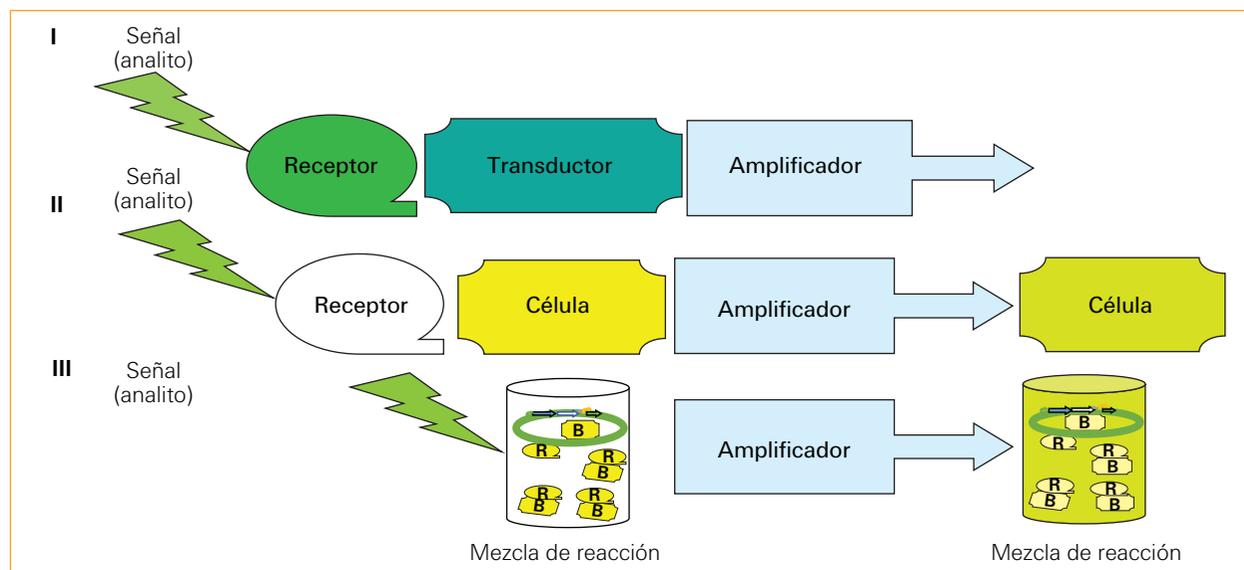
Desde la biología sintética se han desarrollado biosensores basados en células, las cuales pueden

**Sistemas de expresión**

Construcciones genéticas diseñadas para producir una proteína (por ejemplo, enzimas con uso industrial o moléculas terapéuticas), o bien ARN, dentro o fuera de una célula.

**Cromatógrafos**

Equipos usados para separar o identificar moléculas pequeñas (por ejemplo, sensores) de una mezcla de diversos componentes.



**Figura 1.** Esquema gráfico de un biosensor. I) Los receptores reciben las señales que pasan a un transductor, el cual convierte la señal en algo medible y que puede ser amplificado y cuantificado. II) Una célula recibe una señal que es detectada a través de una proteína receptora; la célula responde ocasionando un cambio medible (color, fluorescencia, etcétera). III) En un sistema libre de células, el biosensor (B) está conformado por una serie de piezas o elementos genéticos que forman un módulo que sintetiza las proteínas receptoras (R), las cuales desencadenan la activación de una proteína reportera en presencia del analito. La expresión de las proteínas reporteras es detectada dentro del tubo que contiene la mezcla de reacción con los elementos para la transcripción y traducción.

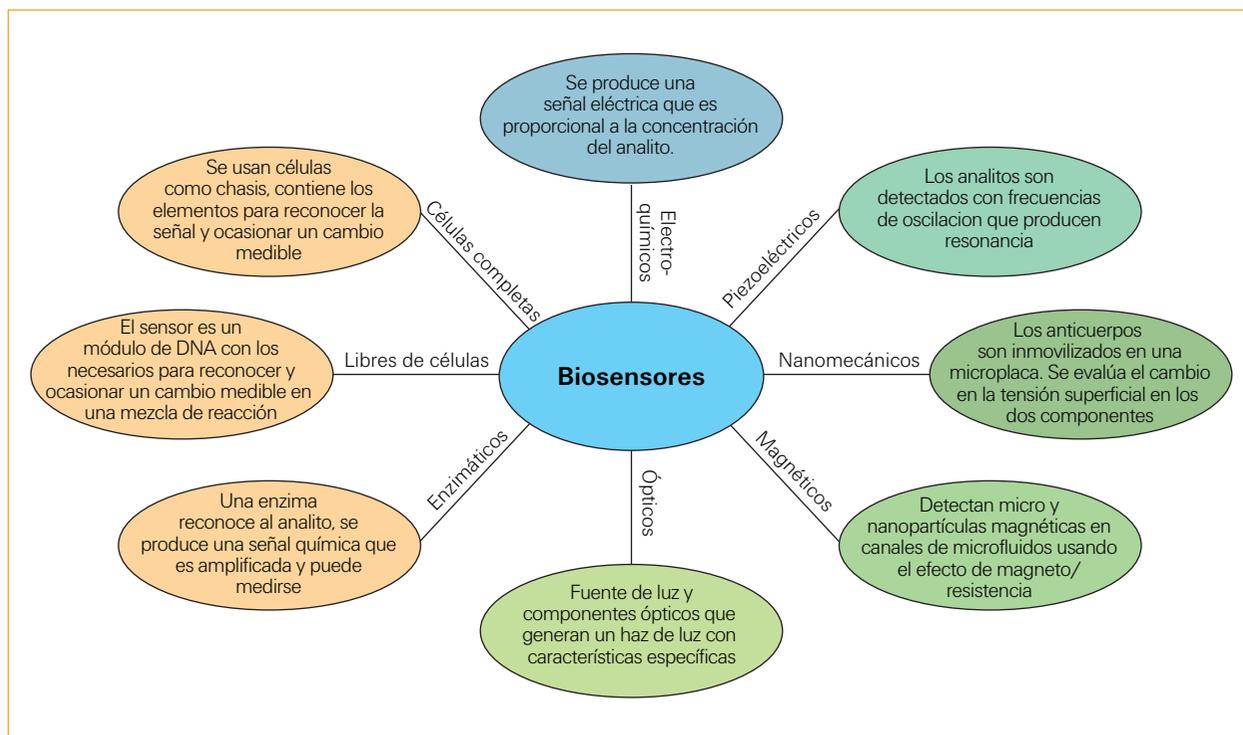


Figura 2. Diferentes tipos de biosensores y sus principios de operación.

ser desde una bacteria hasta una levadura. Este tipo de biosensores vivos contienen toda la información genética necesaria para detectar y amplificar la señal, la cual puede visualizarse y medirse, por algún cambio de color, emisión de fluorescencia u otro parámetro físico dentro de la célula o fuera de ella (véase la Figura 1). En otras palabras, las células vivas actúan como elementos de reconocimiento y amplificación de la señal.

Asimismo, mediante la biología sintética se han generado biosensores que usan sistemas libres de células, en los cuales no se emplean las células, sino que en una mezcla de reacción están la maquinaria celular, la energía y los elementos necesarios para soportar la transcripción (por ejemplo, ARN polimerasa) y la traducción (como aminoácidos), así como el módulo que contiene los genes necesarios para producir el receptor y la proteína reportera que dará un color o emitirá la fluorescencia para indicar la presencia del analito, o bien la modificación del pH o la producción de enzimas hidrolíticas o compuestos antimicrobianos, entre otros cambios (véase la Figura 1) (Wen y cols., 2017).

■ **Desarrollo de biosensores basados en elementos que conforman el *quorum sensing***

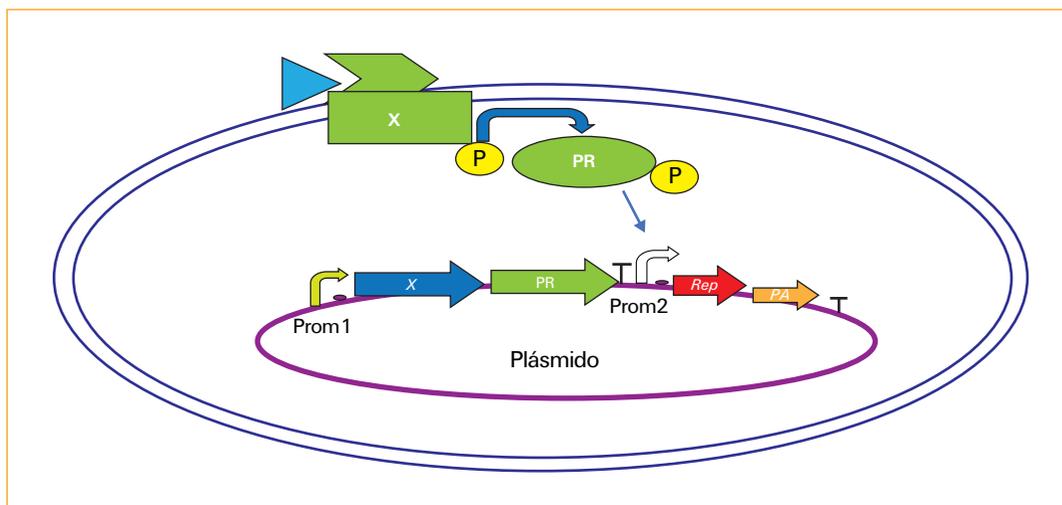
La manera en que se comunican las bacterias es un “lenguaje” sorprendente, y al descifrarlo se puede usar para detectarlas. El mecanismo conocido como *quorum sensing* permite que las células se comuniquen, no por medio de palabras como lo hacemos los seres humanos, sino con compuestos químicos llamados autoinductores, los cuales pueden ser del tipo lactona (en bacterias gram-negativas), o bien por medio de péptidos pequeños (en bacterias gram-positivas). De manera natural, el *quorum sensing* controla la virulencia, bioluminiscencia y formación de biopelículas de muchas bacterias. Este sistema puede ser sencillo o complejo, y en él llegan a participar unos cuantos o muchos genes. Por medio de la biología sintética se han generado módulos conformados por una mínima cantidad de genes que codifican para proteínas con el fin de detectar un microorganismo y dar una respuesta medible. Los módulos genéticos son introducidos en una bacteria (célula hospedera o chasis), la cual funcionará como un biosensor.

Por ejemplo, para detectar *Pseudomona aeruginosa* se han diseñado biosensores que emplean como chasis a *Escherichia coli*. En estos biosensores se introdujeron módulos genéticos que contienen genes que sintetizan para una proteína receptora capaz de reconocer a una lactona (AHL) liberada por *P. aeruginosa*. Esto activa la síntesis de péptidos antimicrobianos para “aniquilar” a la bacteria y produce enzimas que ayudan a destruir las **biopelículas** (Hwang y cols., 2014). Otro ejemplo de biosensor es el desarrollado para detectar a *Vibrio cholerae*. Para ello, se usó *E. coli* como célula hospedera, y se le introdujeron genes que producen las proteínas para detectar a *V. cholerae*, así como un gen reportero que permite indicar su presencia mediante fluorescencia (Holowko y cols., 2016).

En las bacterias gram-positivas, como *Staphylococcus aureus* o *Listeria monocytogenes*, el *quorum sensing* se lleva a cabo mediante el sistema de dos componentes (véase la Figura 3), conformado por una proteína transmembranal (que se inserta en la membrana celular) de tipo histidina cinasa y una proteína que actúa como regulador de respuesta. Si la información genética que sintetizan los componentes de *S. aureus* o *L. monocytogenes*

es introducida a una bacteria diferente que no tiene este sistema, y además se coloca la información para formar una proteína colorida o fluorescente (reportera) que se activa por acción de la proteína reguladora, estamos generando un biosensor cuyo cambio de color indicará la presencia *S. aureus* o *L. monocytogenes*. Por ejemplo, en nuestro grupo de investigación en la Universidad de Guanajuato estamos interesados en desarrollar biosensores basados en células completas para detectar bacterias patógenas de interés en alimentos. Una de esas bacterias es *L. monocytogenes*, la cual resiste bajas temperaturas y se puede encontrar en diversos alimentos, como pollos, mariscos, lácteos, vegetales y embutidos. Este microorganismo puede ocasionar diarrea, vómito, septicemia y, en mujeres embarazadas, abortos espontáneos, por lo que su detección rápida y confiable es muy importante. Por otro lado, varios grupos científicos han comenzado a desarrollar biosensores basados en sistemas libres de células. Por ejemplo, un biosensor de este tipo fue desarrollado por Ke Yan Wen y colaboradores (2017) para detectar *P. aeruginosa* en muestras de esputo tomadas de pulmones de personas que padecían fibrosis quística.

**Biopelículas**  
Estructuras de resistencia que dan protección e impiden que los péptidos antimicrobianos alcancen a las bacterias.



**Figura 3.** Diseño general de un biosensor de células completas mediante un sistema de dos componentes (proteína receptora/proteína reguladora). El módulo genético contiene a un gen (*x*) controlado por un promotor constitutivo (Prom1) que codifica para una proteína receptora (*X*) (histidina cinasa), la cual se activa en presencia de una señal (triángulo azul) y fosforila (*P*) a la proteína reguladora (*PR*). La *PR* fosforilada activa a un promotor (Prom2) que enciende a los genes que sintetizan para una proteína reportera (*Rep*) y un péptido antimicrobiano (*PA*) para aniquilar a la bacteria patógena. La letra *T* después de los genes *PR* y *PA* representa a los terminadores de la transcripción que detienen la síntesis del ARN mensajero.



■ **Desarrollo de biosensores basados en sistemas diferentes al *quorum sensing***

■ El desarrollo de los biosensores no necesariamente se debe basar en el *quorum sensing*. Por ejemplo, se ha generado un biosensor para evaluar la frescura de la carne a partir de utilizar a *Bacillus subtilis* como chasis. Este biosensor se basa en el uso de pequeñas secuencias de ADN conocidas como promotores, las cuales se activan ante la presencia de compuestos volátiles liberados de la carne en descomposición. Esos promotores controlan la expresión de genes que producen proteínas que dan un color o emiten fluorescencia, los cuales se activan cuando el promotor detecta los malos aromas de la carne que se está echando a perder (Daszczuk y cols., 2012).

Recientemente se reportó el desarrollo de un ensayo colorimétrico basado en un biosensor de

*Saccharomyces cerevisiae* que detecta diversos hongos patógenos. El biosensor se fundamenta en la liberación de péptidos, los cuales son detectados por los receptores transmembranales acoplados a la proteína G en la levadura, que a la vez activa a un gen involucrado en la síntesis de licopeno y esto ocasiona que la levadura cambie de color blanco a naranja (Ostrov y cols., 2017).

■ **Perspectivas**

■ La biología sintética ha permitido desarrollar nuevos sistemas biológicos en el laboratorio, donde la mayor parte no se comercializa; sin embargo, es posible que en los próximos años se presente un incremento paulatino de nuevos desarrollos tecnológicos que puedan usarse y venderse. No obstante, aun cuando el uso de biosensores basados en células podría tener ventajas sobre otros tipos de biosensores o kits de detección, no existe una regulación respecto de los organismos desarrollados por biología sintética en el Convenio sobre la Diversidad Biológica de la Organización de las Naciones Unidas, por lo que el uso práctico de este tipo de biosensores podría aún llevar cierto tiempo. A lo anterior se suma el hecho de que deben estandarizarse las condiciones de uso de los biosensores basados en células en algún material biológico, la forma de preservarlos, saber cuáles son sus límites de detección, entre otros, lo cual podría atrasar aún más el uso comercial.

La síntesis de la artemisina en levaduras y su producción a escala industrial para el tratamiento de la malaria ha sido uno de los éxitos más notables de la biología sintética. Sin embargo, aún hay una serie de desafíos, oportunidades y limitaciones en diversas áreas como la medicina, agricultura, ambiente, alimentos y **edición génica**. En este sentido, 1) aún falta caracterizar todas las piezas genéticas que se han desarrollado y hacerlas compatibles y funcionales en un organismo diferente de donde proceden; además, 2) se debe tomar en cuenta que cuando se diseñan

**Edición génica**

Identificar y eliminar una secuencia de ADN del genoma de forma específica y permitir la inserción de otros fragmentos genéticos mediante CRISPR/Cas.



circuitos genéticos cada vez más complejos, su funcionamiento puede ser más impredecible y lleva tiempo encontrar una configuración genética de la cual finalmente se obtenga el producto deseado con un buen rendimiento. Para lograr lo anterior, se requerirá de grupos multidisciplinarios que colaboren en el diseño y la construcción de los sistemas que ayuden a resolver diversos problemas prácticos; sin olvidarse de las implicaciones políticas, éticas y de regulación que se deberán analizar para permitir su uso. Los acuerdos para realizar la transferencia de materiales entre los investigadores deberán tener mucha importancia en dicho desarrollo, ya que permitirán compartir el material biológico de una manera más sencilla, con un mínimo de restricciones, con respeto siempre a los derechos de autor y promoviendo la práctica segura y responsable de la investigación.

Aun cuando la biología sintética tiene pocos años de desarrollo, los gobiernos y la iniciativa privada en Estados Unidos de América, China, Reino Unido y otros países de Europa, han apostado a esta área para el desarrollo de nuevos sistemas biológicos, para la resolución de problemas y la creación de nuevas empresas. En nuestro país existe un número limitado de investigadores que trabajan en temas relacionados con la biología sintética (Barboza-Pérez, 2016); sin embargo, se ha observado que hay un incremento importante en el número de estudiantes jóvenes que muestran interés por estos temas. Por ejemplo, la Red Nacional de Biología Sintética en México<sup>8</sup> es un espacio de difusión creada y manejada por jóvenes mexicanos, la cual en un futuro cercano podría convertirse en una Red Mexicana de Biología Sintética. La participación activa de equipos estudiantiles del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM), de la Universidad Nacional Autónoma

de México (UNAM), del Instituto Politécnico Nacional (IPN) y de universidades estatales, como la Universidad de Guanajuato (UG), la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), entre otras, en la competencia internacional de biología sintética de la fundación iGEM, ha redituado en medallas de oro, plata y bronce. Asimismo, se ve una gran motivación de lo jóvenes en cumbres como AllBiotech<sup>9</sup> y GapSummit,<sup>10</sup> foros en los cuales pueden tener contacto con diversos investigadores, así como con jóvenes de otros países, para desarrollar nuevas ideas que a la larga podrían convertirse en inventos. Por lo

<sup>9</sup> Disponible en: <[www.allbiotech.org](http://www.allbiotech.org)>.

<sup>10</sup> Disponible en: <[www.gaps Summit.com](http://www.gaps Summit.com)>.



<sup>8</sup> Disponible en: <[www.synbiomx.org](http://www.synbiomx.org)>.



anterior, cabe esperar que estos jóvenes talento, en pocos años, puedan contribuir de manera importante al desarrollo de la biología sintética en México y en el resto de América Latina.

Los autores agradecen el apoyo otorgado por la Universidad de Guanajuato, mediante el proyecto 228 de la Convocatoria Institucional 2018.

### Celia Monserrat Luna Castro

Estudiante de Doctorado, Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca.  
monlu\_46@hotmail.com

### Ma. de Lourdes Pérez Zavala

Estudiante de Doctorado, Posgrado en Administración, LGAC en Ciencias Económico-financieras, Universidad Iberoamericana Campus León; Departamento de Agronomía, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca.  
mlperez@ugto.mx

### José Eleazar Barboza Corona

Miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 2, Miembro de la Academia Mexicana de Ciencias. Profesor Titular C, Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca; Departamento de Alimentos, División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca.  
josebar@ugto.mx

### Lecturas recomendadas

- Barboza-Pérez, U. (2016), “¿Quién está haciendo biología sintética en México?”. Disponible en: <<https://medium.com/biological-speculation/quien-esta-haciendo-biologia-sintetica-en-mexico-5f9adf9d997e>>, consultado el 23 de diciembre de 2018.
- Daszczuk A. *et al.* (2014), “*Bacillus subtilis* biosensor engineered to assess meat spoilage”, *ACS Synthetic Biology*, 3(12):999-1002.
- Endy, D. (2005), “Foundation for engineering biology”, *Nature*, 483:449-453.
- Fletcher, D. (2018), “Which biological systems should be engineered?”, *Nature*, 563:177-179.
- Hayden, E. C. (2015), “Tech investor bet on synthetic biology”, *Nature*, 527:19.
- Holowko, M. B. *et al.* (2016), “Biosensing *Vibrio Cholerae* with genetically engineered *Escherichia coli*”, *ACS Synthetic Biology*, 5(11):1275-1283.
- Hwang, I. Y. *et al.* (2014), “Reprogramming microbes to be pathogen-seeking killers”, *ACS Synthetic Biology*, 3(4):228-237.
- Ostrov, N. *et al.* (2017), “A modular yeast biosensor for low-cost point-of-care pathogen detection”, *Science Advance*, 3:e1603221.
- Synbiobeta (2018), *Synthetic Biology Annual Investment Reports*. Disponible en: <<https://synbiobeta.com/wp-content/uploads/2018/11/Synthetic-Biology-Annual-Investment-Report.pdf>>, consultado el 18 de diciembre de 2018.
- Wen, K. Y. *et al.* (2017), “A cell-free biosensor for detecting quorum sensing molecules in *P. aeruginosa*-infected respiratory samples”, *ACS Synthetic Biology*, 6(12):2293-2301.

Álvaro Aguilar Setién, Cenia Almazán Marín y Nidia Aréchiga Ceballos

# Aportaciones veterinarias a la virología

La medicina veterinaria ha tenido un papel preponderante en el desarrollo de la virología. Muchos virus de importancia médica se descubrieron primero en otras especies animales, con lo cual se ha promovido el conocimiento sobre los patógenos que afectan a las personas. Asimismo, las vacunas veterinarias han sentado las bases para aquellas que se utilizan en la medicina humana.

## Nacimiento y desarrollo de la virología médica

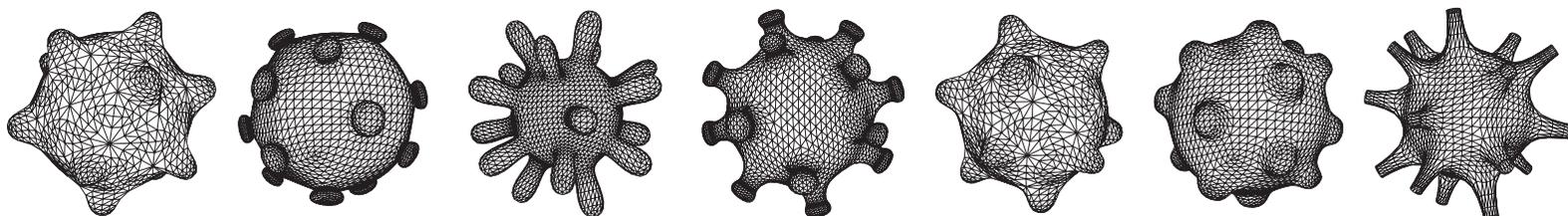
Después del trabajo de Louis Pasteur, una vez aceptado y comprobado el origen microbiano de las enfermedades infecciosas, a finales del siglo XIX, se desarrolló la tecnología de ultrafiltración para eliminar a las bacterias presentes en los fluidos de organismos enfermos mediante ultrafiltros fabricados con porcelana (filtros de Chamberland) y con tierra de **diatomeas** (filtros de Berkefeldt). A partir de estos logros tecnológicos se abrió la puerta para identificar a diversos microorganismos patógenos más pequeños que las bacterias.

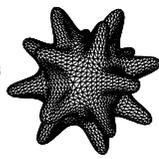
Entre 1888 y 1890, gracias a estos ultrafiltros, los médicos Emile Roux y Alexandre Yersin descubrieron la existencia de las toxinas bacterianas al demostrar que los filtrados de *Corynebacterium diphtheriae* o bacilo de Klebs-Löffler (que provoca difteria) poseían virulencia, aunque ya no contuvieran ninguna bacteria. En la misma época, el médico Emil von Behring logró purificar la toxina.

Con estos antecedentes, el biólogo Dimitri Ivanowsky encontró que las plantas sanas de tabaco enfermaban al inocularles extractos de plantas enfermas con el

### Diatomeas

Algas unicelulares que viven en el mar, en el agua dulce o en la tierra húmeda, y que tienen un caparazón silíceo formado por dos valvas de tamaño desigual.





mosaico del tabaco; los extractos se obtenían al pasar las plantas por los ultrafiltros. Ivanowsky concluyó que el material obtenido podía contener una toxina (como la descrita por Roux, Yersin y von Behring) o una bacteria pequeñísima que era filtrable, pues la patogenicidad de los filtrados permanecía y podía aumentar al hacer pases sucesivos planta-filtrado-planta. Casi al mismo tiempo, en Alemania, el botánico Martinus Beijerinck repitió los experimentos de Ivanowsky con el mosaico del tabaco y concluyó que el fluido obtenido conservaba su poder infeccioso, aunque no se podía detectar ningún microorganismo; lo bautizó como *contagium vivum fluidum* o fluido vivo contagioso. No obstante, Beijerinck no pensaba que hubiera partículas en sus filtrados.

**Huevos embrionados**

Huevos de ave fertilizados, utilizados para la identificación y titulación viral, así como la producción de algunas vacunas.

En 1886, en Alemania, con el estudio de una enfermedad de interés veterinario (fiebre aftosa o glosopeda), los bacteriólogos Friedrich Loeffler y Paul Frosch descubrieron al virus que la provoca y le otorgaron su verdadera naturaleza particulada. Este virus fue el primero de interés médico descubierto en el mundo. A partir de la investigación sobre las enfermedades veterinarias, idearon una vacuna contra la fiebre aftosa: primero mezclaron virus procedentes de filtrados de las lesiones de los animales enfermos y suero sanguíneo obtenido de animales recuperados de la enfermedad, después debían inocular esta mezcla a los animales que querían proteger.

El segundo virus de importancia médica fue el de la mixomatosis de los conejos, un **poxvirus** que produce tumores cutáneos en los conejos domésticos. El médico Giuseppe Sanarelli lo descubrió mediante la tecnología de ultrafiltración. Este virus fue el primer agente que se utilizó de manera científica como un arma biológica para luchar contra la plaga de conejos que se había instalado en Australia en la década de 1950.

La Figura 1 muestra los primeros descubrimientos de los virus de interés médico. La mayor parte de ellos, 19/25 (76%), se logró con el estudio de enfermedades veterinarias y sólo 6/25 (24%), con el estudio de infecciones humanas. A principios del siglo XX, gracias a los antecedentes mencionados, se señalaron las características que distinguen a los virus de otros microorganismos conocidos: filtrabilidad, invisibilidad e imposibilidad de cultivarlos fuera de un organismo vivo.

Sin embargo, el verdadero avance de la virología se logró en el siglo XX, gracias al desarrollo de nuevos métodos para aislar y cultivar los virus. Fue también con un virus de interés veterinario (virus de la viruela de los pavos, *fowlpox*) con el cual se ideó la utilización de los **huevos embrionados** para el aislamiento y la propagación de este tipo de agentes infecciosos. Este método fue un hito en el avance de la virología, ya que permitió el aislamiento y estudio de numerosos virus de interés médico, como mixomatosis de los conejos, virus herpes simplex, influenza A y B, viruela, rabia, encefalitis equina del este, paperas y peste bovina, por mencionar algunos ejemplos.

Otro paso importante para la virología fue el desarrollo de la técnica de cultivo de tejidos animales *in vitro*. El cultivo de células animales se inició a principios del siglo XX como parte de los estudios de zoología publicados en el *Journal of Experimental Zoology*. Ross Granville Harrison empezó a cultivar *in vitro* el tejido nervioso embrionario de las ranas para observar su desarrollo; para ello, utilizaba como nutriente la linfa obtenida de estos animales. En 1913, Edna Steinhardt Harde, Clara Israeli y Robert Lambert cultivaron el virus vaccinia en explantes de córnea de cobayo y de conejo. En 1929, Alexis Carrel, junto con Hugh y Mary Maitland, idearon la producción de virus a partir de fragmentos de riñón embrionario de pollo mantenidos en suspensión en un medio nutritivo con sales y suero de pollo. A partir de ahí se diversificó el número de tejidos de animales y de humanos cultivados *in vitro* y se desarrollaron medios nutritivos cada vez más completos para su mantenimiento. Finalmente, el advenimiento del microscopio electrónico en los años treinta eliminó el carácter de invisibilidad de los virus. Estos hechos permitieron el desarrollo de la virología como la conocemos ahora, lo cual no hubiera sido posible sin la participación de los animales estudiados y de las personas que se ocupan de ellos.

■ ■ ■ **Desarrollo de las vacunas virales**

■ Durante las epidemias de viruela en Inglaterra en el siglo XVIII, era una creencia popular que las personas que tenían contacto directo con bovinos eran

**Poxvirus**

Virus de forma ovalada que posee un genoma de ADN de doble hebra. Ocasionalmente ocasionan enfermedades en los seres humanos y muchos otros tipos de animales, caracterizadas por lesiones, nódulos cutáneos o erupciones cutáneas diseminadas.

## Aportaciones de los albitares a la virología médica y el concepto de una sola medicina.

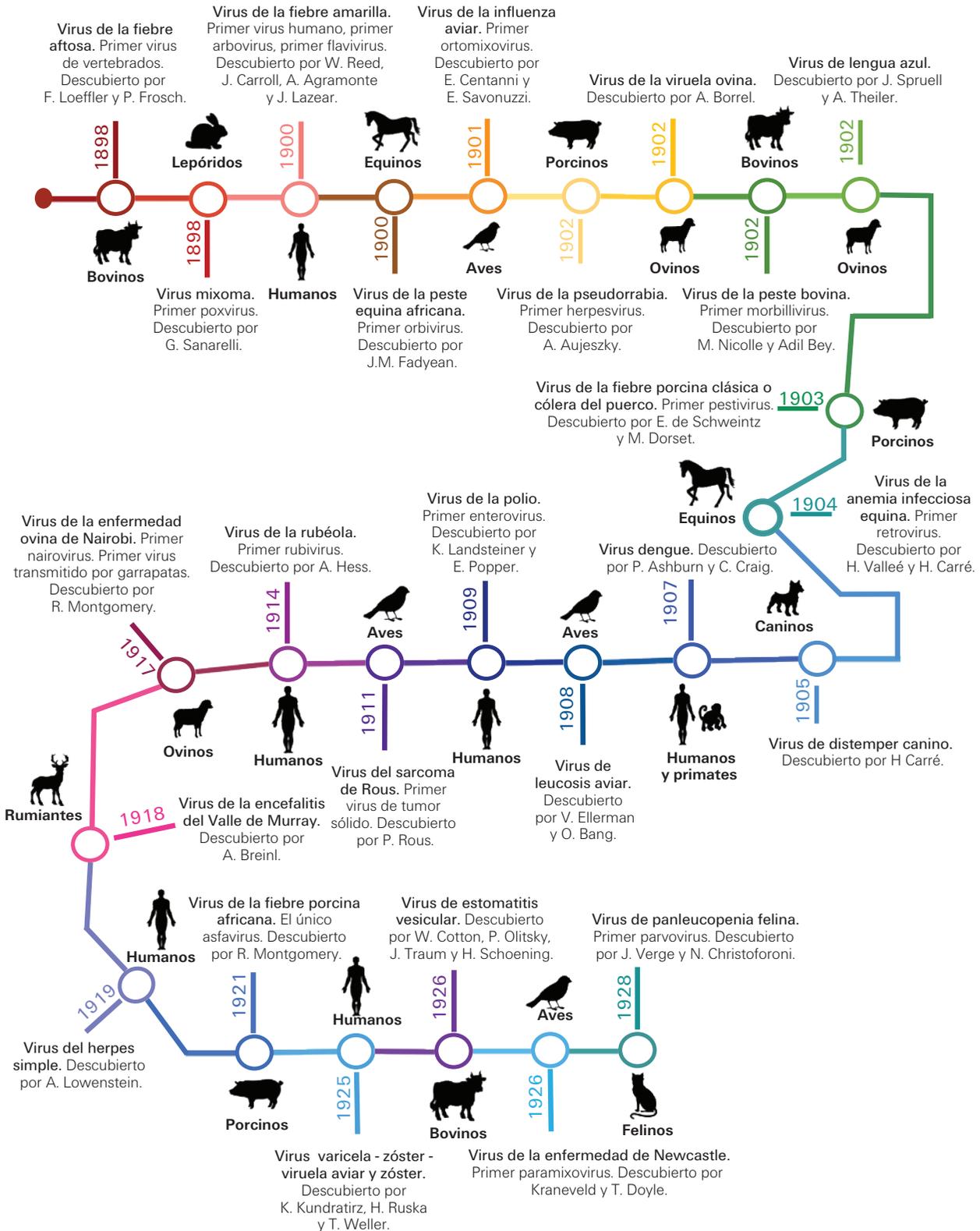
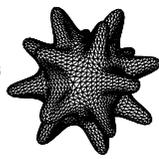


Figura 1. Principales contribuciones a la virología médica. Se muestra cada virus, quién lo descubrió, en qué año y el animal afectado.



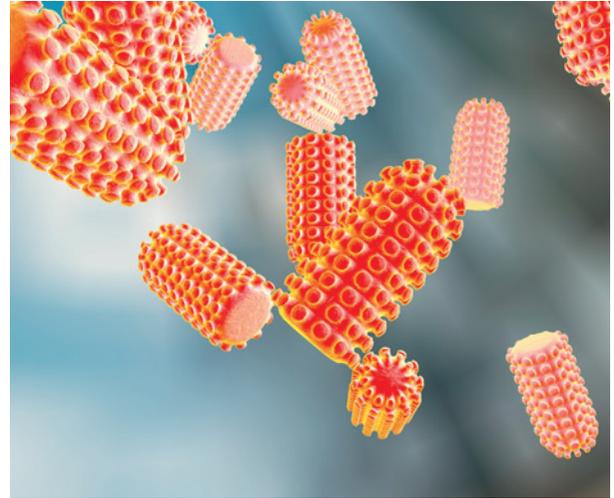
**Albéitar**

Palabra que antecedió a la de *veterinario* y que se usó para designar a las personas que entendían de las enfermedades de los animales, ya sea empírica o profesionalmente.

inmunes a la enfermedad y se consideraba que, sobre todo quienes los ordeñaban, podían ocuparse de los humanos enfermos de viruela sin temor a contagiarse. En 1744, el **albéitar** Benjamin Jesty fue una de las primeras personas que, para proteger a los suyos de la viruela, los inoculó con material obtenido de las lesiones que el virus *pox vacuno* produce en estos animales. Jesty fue muy criticado en su época, al grado de ser abucheado y golpeado cuando recorría lugares públicos, ya que la gente veía “inhumano” introducir enfermedades de los animales en las personas. Años más tarde, en 1802 y 1807, Edward Jenner, ya famoso por descubrir y promover la vacunación, recibiría reconocimientos por hacer lo mismo; el gran mérito de Jenner consistió en retomar los conocimientos populares y otras experiencias registradas, como la de Jesty, para llevar a cabo sus experimentos controlados, por ejemplo, con el virus patógeno de la viruela humana. No obstante, en la época en que Jenner recibió sus reconocimientos, dos personas que conocían las experiencias previas de Jesty (George Pearson, fundador de la original Vaccine Pock Institution de Londres, y el reverendo Andrew Bell, vecino del albéitar) pugnaron por un reconocimiento a Jesty, quien finalmente también lo obtuvo en 1805.

En 1879, Pierre-Victor Galtier, profesor de la Escuela Veterinaria de Lyon, en Francia, utilizó al conejo como modelo para el estudio de la rabia. Este médico veterinario fue el primer investigador en demostrar científicamente la naturaleza infecciosa de esta enfermedad, mediante la transmisión del virus de un perro enfermo a otro sano, y de éste a un conejo; esto lo replicó en otros conejos varias veces para reproducir la enfermedad. Además, Galtier logró inmunizar ovinos contra la rabia al inyectarles virus por vía intravenosa (vía poco infecciosa para el virus). Por estos experimentos, recibió muchos honores y fue nominado para el premio Nobel en 1908, pero desafortunadamente falleció antes de que la decisión del Comité del Nobel tuviera lugar.

Por su parte, Louis Pasteur conocía bien los trabajos de Galtier antes de iniciar sus experimentos de vacunación contra la rabia en 1880, a raíz de que un amigo en común, el veterinario y fisiólogo Jean-Bap-



tiste Auguste Chauveau, los presentara durante una visita de Pasteur a la Escuela Veterinaria de Lyon. El 6 de julio de 1885, Pasteur aplicó la primera vacuna antirrábica a Joseph Meister, lo cual lo salvó de una muerte segura. Rápidamente la noticia se extendió y a Meister le siguieron muchos pacientes, procedentes de varios países, mordidos por animales rabiosos. No hay duda de la influencia de los trabajos de Galtier en los exitosos experimentos de Pasteur para la vacunación contra la rabia, quien con su genio fue capaz de interpretar y aprovechar en toda su valía los trabajos del veterinario. Actualmente Pasteur es conocido como el padre de la vacunación antirrábica, pero hay que reconocer que logró esto, en parte, gracias a los trabajos fundamentales de Galtier.

En México, el médico Eduardo Liceaga estaba bien informado de los trabajos de Pasteur. Durante un viaje a Europa en 1887 lo visitó y obtuvo como donación el cerebro de un conejo inoculado con el virus que serviría para elaborar la vacuna contra la rabia. En 1888, Liceaga llegó con el virus a México, en donde el médico veterinario José de la Luz Gómez (director de la Escuela de Agricultura y Veterinaria) en menos de tres meses logró obtener las primeras vacunas antirrábicas. Fue así como el 23 de abril de 1888, el niño Isidro Delgadillo recibió la primera vacunación antirrábica en el país. Gracias al trabajo coordinado entre Eduardo Liceaga y José de la Luz Gómez, México tiene actualmente el honor de haber sido uno de los primeros países en



el mundo en poner en práctica la vacunación antirrábica posterior a la exposición.

#### Historia de las vacunas antirrábicas

En la historia del desarrollo de las vacunas contra las enfermedades virales, el caso de la rabia es paradigmático por la variedad de vacunas que se han generado contra esta enfermedad. De esta manera, es posible trazar la evolución de las vacunas virales observando la historia de las vacunas antirrábicas, pues muchas han servido de prototipo para el desarrollo de vacunas contra otras enfermedades virales humanas.

La rabia es la zoonosis por antonomasia: una gran variedad de animales domésticos y silvestres pueden servir como reservorios y transmitirla al humano. Así, las prácticas de vacunación antirrábica han cubierto a humanos, animales domésticos y especies silvestres. La vacuna mencionada de Pasteur (basada en los hallazgos de Galtier) se utilizó para el tratamiento de humanos después de la exposición al virus y consistía en suspensiones de médulas de conejos infectados con el virus de la rabia que era inactivado gradualmente por la desecación del tejido nervioso del animal. Con este precedente, se produjeron diversas vacunas antirrábicas a partir del uso de otros animales para replicar el virus, como cabritos y corderos. En este caso, ya no se inactivaba el virus por desecación, sino mediante

sustancias químicas como formol y fenol (vacunas tipo Semple).

Estas vacunas producidas en animales de laboratorio eran eficaces, pero no estaban exentas de peligros, ya que las suspensiones de tejido nervioso contenían otros contaminantes procedentes del tejido, como la **mielina**. Tras la inoculación, algunos individuos producían anticuerpos antimielina, lo cual implica un ataque a la mielina del individuo vacunado y produce afecciones nerviosas paráliticas, como el síndrome de Guillain-Barré. En Chile, el médico veterinario Eduardo Fuenzalida y el médico cirujano Raúl Palacios idearon un método de producción de la vacuna antirrábica en el que empleaban ratones lactantes, que por su inmadurez no están completamente mielinizados; así, se evita la producción de anticuerpos antimielina y las reacciones adversas de índole neurológico en los individuos vacunados. La vacuna tuvo éxito por su facilidad de producción y se utilizó alrededor del mundo durante la mayor parte del siglo XX para el tratamiento posterior a la exposición de las personas mordidas por animales rabiosos o en casos sospechosos. Es difícil encontrar en Latinoamérica, y particularmente en México, alguna persona mayor de 40 años que no conozca a alguien o que ella misma haya sido tratada con la famosa vacuna Fuenzalida-Palacios, cuya aplicación era: 15 dosis consecutivas, subcutáneas en la región ventral, después de una agresión por un perro rabioso o sospechoso.

Al mismo tiempo, con la evolución de la virología, surgió una gran variedad de vacunas antirrábicas de uso veterinario, tanto atenuadas como inactivadas. Los investigadores se dieron cuenta de que era más eficaz detener a la enfermedad en su principal transmisor de aquella época (perros y gatos) que tratar a los seres humanos. Así, surgieron vacunas producidas en huevos embrionados, como las vacunas Flury, de altos y bajos pases en cultivo, para la vacunación de perros y gatos. El virus utilizado para la producción de la vacuna Flury fue aislado de una mujer que murió de rabia tras haber sido infectada por un perro, cuyo nombre era Flury. Siguió las vacunas producidas en cultivos de tejidos, como la SAD y la ERA, hechas con virus de rabia pro-

#### Mielina

Lipoproteína que constituye la vaina de las fibras nerviosas.



arsenal de la medicina veterinaria contra las enfermedades infecciosas desde hace más de una década.

En el caso de la medicina humana, recientemente empezamos a conocer algunas vacunas de tercera generación, como las vacunas recombinantes utilizadas para prevenir el cáncer cérvicouterino: Gardasil® y Gardasil-9®, así como la vacuna basada en partículas similares a un virus para prevenir la hepatitis B: Hecolin®.

### Conclusión: fomentar el concepto de una sola salud

William Osler fue un médico canadiense conocido como el padre de la medicina moderna y la medicina interna. Para ello, la alianza de Osler con la medicina veterinaria fue fundamental. Junto con el veterinario Albert W. Clement, desarrollaron un estudio sobre los parásitos del cerdo en los rastros de Montreal, con el cual concluyeron que la cocción adecuada de la carne del animal era la mejor alternativa para romper la cadena de contagio de parásitos del cerdo a los seres humanos. Igualmente Osler, junto con el médico veterinario Calvin W. Schwabe, profesor emérito de la Universidad Davis, son considerados los fundadores de la epidemiología veterinaria y se les acredita haber acuñado el concepto de una sola salud (*one health*) para abarcar la relación entre la medicina humana y la veterinaria. Este término reconoce que los seres humanos no

existen aislados, sino que forman parte de un todo, un ecosistema viviente, y que las actividades de cada miembro afectan a los demás. Por lo tanto, una sola salud considera a la salud como un todo: los seres humanos, los animales y el ambiente en el que existen. Este concepto se denomina también “un mundo, una salud”, con lo cual se subraya la súbita toma de conciencia colectiva del vínculo existente entre las enfermedades de los animales y la salud pública.

Nadie pone en duda que los programas de vacunación antirrábica de perros, gatos y animales silvestres, que se han puesto en práctica en muchos países, han repercutido en un descenso considerable de los casos en humanos. Actualmente en algunas naciones, sobre todo de las llamadas desarrolladas, sólo se reportan casos de rabia importados. Cabe mencionar que, en este rubro, México fue reconocido por la Organización Mundial de la Salud en 2019 como uno de los primeros países latinoamericanos que han controlado la rabia humana transmitida por perros. Esto se ha logrado gracias a las acciones sostenidas a lo largo de varios sexenios para los programas de vacunación, no de humanos, sino del principal reservorio de esta enfermedad en las zonas urbanas: los perros.

La especie humana no está aislada en lo que respecta a las enfermedades infecciosas, principalmente las que son provocadas por virus. Es claro que el surgimiento y la exacerbación de estas enfermedades depende de la interfase animal-humano-ambiente. Basta mencionar los ejemplos de la pandemia de influenza H1N1, la cual se originó en explotaciones porcinas de nuestro país en 2009, por la recombinación de variantes virales aviarias y de mamíferos; o bien el surgimiento de las neumonías provocadas por coronavirus en Asia (SARS-CoV-1 en 2003 y el actual funesto SARS-CoV-2 que provoca la COVID-19), así como en Medio Oriente (MERS en 2012). Todas estas enfermedades emergentes tienen un probable origen compartido con los coronavirus de quirópteros (murciélagos), según se ha demostrado recientemente.

A partir de 2010, los organismos internacionales que inciden en la salud pública, como la Organización Mundial de la Salud, la Organización Mundial





de Sanidad Animal y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, establecieron una colaboración<sup>1</sup> para fomentar el concepto de una sola salud, con lo cual solicitan a las naciones coordinar las actividades para abordar los riesgos de salud en la interfase animales-humanos-ecosistemas. A pesar de ello, pocas acciones se han desarrollado en este sentido.

En nuestro medio, es necesario considerar si queremos obtener mayor conocimiento y, por ende, mejor control de estas enfermedades, impulsar el concepto de una sola salud y propiciar el trabajo entre biólogos, veterinarios, médicos, ecólogos... La colaboración entre profesionistas que se dedican a la salud humana y a la de los animales es muy fructífera. Como hemos planteado en este escrito, las duplas veterinario-médico (Jesty-Jenner; Galtier-Pasteur; Luz Gómez-Liceaga; Fuenzalida-Palacios; Clement-Osler) han sido muy productivas en la historia de la virología.

<sup>1</sup> Disponible en: <[www.onehealthinitiative.com/index.php](http://www.onehealthinitiative.com/index.php)>.



### Álvaro Aguilar Setián

Unidad de Investigación Médica en Inmunología, Coordinación de Investigación Médica, Instituto Mexicano del Seguro Social.

balantiopterix@gmail.com

### Cenia Almazán Marín

Unidad de Investigación Médica en Inmunología, Coordinación de Investigación Médica, Instituto Mexicano del Seguro Social.

cenia.almazan@gmail.com

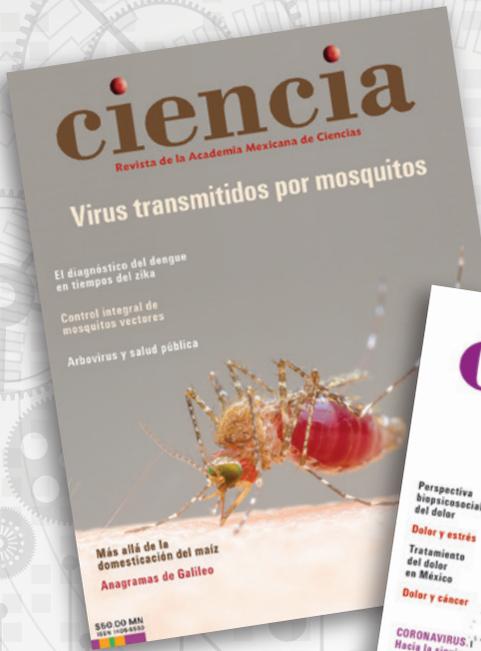
### Nidia Aréchiga Ceballos

Instituto de Diagnóstico y Referencia Epidemiológicos.

nidia.arechiga@salud.gob.mx

#### Lecturas recomendadas

- Aguilar Setián, A. y J. Garza Ramos (1989), "La rabia: una enfermedad antigua y un nuevo paradigma", *Ciencia y Desarrollo*, 15(88):33-39.
- Aguilar Setián, A. y V. Lara Sagahon (1991), "Las vacunas virales del futuro", *Ciencia y Desarrollo*, 22(99):17-23.
- Garza-Ramos, J. (2016), "La situación actual de las zoonosis más frecuentes en México", *Gaceta Médica de México*, 146:430-436.
- Liceaga, E. (1888), "Las inoculaciones preventivas de la rabia", *Gaceta Médica*, 23:249-269.
- Pastoret, P. P., B. Brochier, A. Aguilar-Setián y J. Blancou (1997), "Vaccination against rabies", en P. P. Pastoret, J. Blancou, P. Vannier y C. Verscheuren (eds.), *Veterinary Vaccinology*, Amsterdam, Elsevier, pp. 616-626.
- Rodríguez Villalobos, J. C. (2016), "Animales y humanos, propuesta para una sola salud", *Ciencia*, 67(2): 68-75.



# Consulta nuestros números en línea



[www.revistaciencia.amc.edu.mx](http://www.revistaciencia.amc.edu.mx)



CienciaAMC



GOBIERNO DE  
**MÉXICO**



**CONACYT**  
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología



## CONSEJO DIRECTIVO julio 2020 - julio 2023

### Presidenta

Estela Susana Lizano Soberón

### Vicepresidente

José Antonio Seade Kuri

### Tesorero

Dante Jaime Morán Zenteno

### Secretarios

María del Jesús Rosales Hoz

Pedro Salazar Ugarte

### Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Centro-Occidente: María Patricia Arias Rozas

Sección Centro-Sur: María del Carmen Cisneros Gudiño

Sección Noreste: Oliverio Santiago Rodríguez Fernández

Sección Noroeste: Alfredo Ortega Rubio

Sección Sur-Sureste: Soledad María Teresa Hernández Sotomayor

En nuestro próximo número  
de 2021:

**Educación, ciencia y  
tecnología. Retos de  
la Ciudad de México**

