

Nadando en la
mancha tornasol del
derrame tóxico.
El cisne, Verónica Gerber



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

3 | OCT | 2022
CIENCIAS Y HUMANIDADES | Nuestros mares y océanos: el golfo de México

3 OCT | 2022
Distribución gratuita

Ciencias Y Humanidades



Directora

María Elena Álvarez-Buylla Rocas

Directora general del Consejo
Nacional de Ciencia y Tecnología

Comité Editorial

Aideé Orozco Hernández

Dirección Adjunta de Desarrollo
Tecnológico, Vinculación e
Innovación

Andrés Eduardo Triana Moreno

Dirección Adjunta de Desarrollo
Científico

José Alejandro Díaz Méndez

Unidad de Articulación Sectorial
y Regional

Raymundo Espinoza Hernández

Unidad de Asuntos Jurídicos

Juan Francisco Mora Anaya

Unidad de Administración
y Finanzas

Alejandro Espinosa Calderón

Secretaría Ejecutiva de la Comisión
Intersecretarial de Bioseguridad
de los Organismos Genéticamente
Modificados

María del Carmen García Meneses

Coordinación de Repositorios,
Investigación y Prospectiva

Horacio Tonatiuh Chavira Cruz

Coordinación de Comunicación

Juan Carlos Herguera

Edward M. Peters

Norma Herrera

Coordinación temática

Santiago Moyao

Portada y contraportada

Armando Fonseca

Ilustraciones de artículos

Ciencias y Humanidades

año 2, número 3, octubre de 2022,
es una publicación editada
por el Consejo Nacional de Ciencia
y Tecnología.

Av. Insurgentes Sur 1582

Col. Crédito Constructor

alcaldía Benito Juárez

Ciudad de México, C.P. 03940

Teléfono: 55 5322 7700

www.conacyt.mx

Ciudad de México, octubre de 2022

Editor responsable

**Consejo Nacional de Ciencia
y Tecnología**

Reservas de Derechos al Uso Exclusivo
04-2021-062922303700-102,
ISSN en trámite, ambos otorgados por
el Instituto Nacional del Derecho de
Autor.

Licitud de Título y Contenido
en trámite, otorgado por la Comisión
Calificadora de Publicaciones
y Revistas Ilustradas de la Secretaría
de Gobernación.

Índice

4 Presentación

María Elena Álvarez-Buylla Rocas

8 Conociendo al CIGOM

Juan Carlos Herguera, Edward M. Peters

16 SOS: Efectos de contaminantes en organismos marinos

Carlos A. Puch Hau, Mercedes A. Quintanilla Mena,
Mayra A. Cañizares Martínez

20 Conservación de las tortugas marinas

María de los Ángeles Liceaga Correa,
Abigail Uribe Martínez, Eduardo Cuevas Flores

27 Petróleo, amenaza latente para los peces

Mónica Améndola Pimenta, Carlos Eduardo González
Penagos, Juan Antonio Pérez Vega, Rossanna
Rodríguez Canul

33 La riqueza de la diversidad bacteriana

Liliana Pardo López, Rosa María Gutiérrez Ríos

38 ¿Es vulnerable la biota marina a la exposición al petróleo?

Daniel Pech

42 Moluscos del Cinturón Plegado Perdido

Alicia González, Daniel Torruco, Alan Torruco

47 Crustáceos de la Plataforma de Yucatán

Daniel Torruco, Alicia González, Alan Torruco

53 Dime dónde lo has visto y te diré dónde podría estar

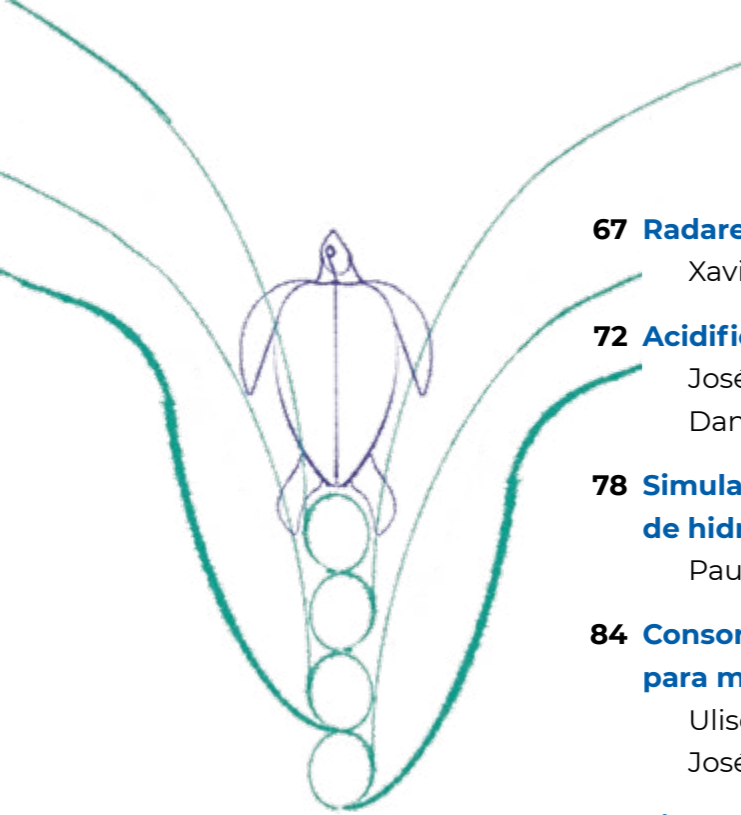
Óscar Sosa Nishizaki, Zurisaday Ramírez Mendoza

57 Bioacumulación de contaminantes en peces

Mercedes A. Quintanilla Mena, Víctor Manuel Vidal
Martínez, Daniel Aguirre Ayala, Arturo Centeno Chalé

62 Afectación a los ecosistemas marinos por derrames de petróleo

Luz Erandi Saldaña Ruiz, Paula Pérez Brunius,
M. Leopoldina Aguirre Macedo, Daniel Pech



67 Radares oceanográficos y corrientes superficiales

Xavier Flores Vidal, Héctor García Nava

72 Acidificación del océano

José Martín Hernández Ayón, Orión Norzagaray López, Daniel Pech

78 Simulaciones del posible destino de derrames de hidrocarburos

Paula Pérez Brunius, Julio Sheinbaum

84 Consorcios bacterianos: una opción para mitigar derrames petroleros

Ulises García Cruz, M. Leopoldina Aguirre Macedo, José Q. García Maldonado

88 Simulación de derrames de petróleo a escala de mesocosmos

M. Leopoldina Aguirre Macedo, Sonia S. Valencia Agami, José Q. García Maldonado, Santiago Cadena, Ulises García Cruz

92 Meteorología del golfo de México

Rosario Romero Centeno, Jorge Zavala Hidalgo

98 Profundizando en la física del golfo de México

Jorge Zavala Hidalgo, Rosario Romero Centeno

103 Atlas ambiental del golfo de México

Sharon Z. Herzka, Rigel Alfonso Zaragoza Álvarez, Edward M. Peters

109 Ciencias sociales críticas y crisis ambiental

Entrevista a Emiliano Terán Mantovani

DATA

115 Investigación CIGOM

CIENCIAS Y ARTE

116 El alma de los peces

Encuentro con Orso Angulo

DERECHO A LA CIENCIA

120 El desarrollo conceptual y normativo del derecho humano a la ciencia

Raymundo Espinoza Hernández, Keyla Gómez Ruiz

SOBERANÍAS

124 Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders

Enric Pallàs-Sanz, Juan Pablo Orozco, Miguel Tenreiro

HISTORIA MÍNIMA

132 Dos peces

Santiago Moyao

PUNTO CRÍTICO

134 Inundación poética: fluidos, derrames y toxicidad

Nuria Angélica Sánchez Matías

140 Manuela Generali: mares íntimos

Kevin Arvizu de la Teja



Consortio de Investigación del Golfo de México

María Elena Álvarez-Buylla Roces
Directora General del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

La dicotomía entre ciencia básica y ciencia aplicada sugiere que hay dos tipos de ciencia: la que se aplica y la que no se aplica. La ciencia es la actividad humana que genera nuevo conocimiento, que avanza más allá de la frontera entre lo que conocemos y lo que no hemos descubierto y, eventualmente, todo el conocimiento se aplica. Por tanto, no es útil hablar de dos tipos de ciencia. Se debe impulsar desde México la ciencia de frontera, la que contribuye a un nuevo conocimiento desde nuestro país y, con ello, estar en una posición ventajosa para poder proponer nuevas tecnologías y aplicaciones del conocimiento, que además sean pertinentes a nuestros retos, nuestra realidad y nuestra cultura. Lo cierto es que todos los retos reales son complejos, sobre todo los que implican dinámicas socioambientales. Por ello, también es necesario propiciar la integración de grupos de investigación que, a la vez que se enfocan a generar nuevo conocimiento, se comprometen a integrarlo y orientarlo hacia la incidencia socioambiental, hacia la comprensión profunda, así como hacia la atención, solución y prevención de los problemas reales en ámbitos concretos. Para ello, es necesario impulsar avances científicos en el contexto de las diversas colaboraciones de investigadores en cada una de sus especialidades e instituciones con compromisos y metas claras, y a partir de éstos llegar a descubrimientos y soluciones necesarios y suficientes actuando de manera eficiente y eficaz. Este enfoque es el que ahora se trata de impulsar desde el nuevo Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), en el Eje Programático de los diez Programas Nacionales Estratégicos (Pronaces) y sus Proyectos Nacionales de Investigación e Incidencia.

En este número de la Revista *Ciencias y Humanidades* nos enfocamos en el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM), proyecto nacional que viene de años atrás, uno de esos casos de éxito que abrevó de la

gran calidad científica y el compromiso socioambiental de los responsables técnicos y coordinadores implicados. Este consorcio es un modelo de articulación en cuanto a las capacidades que existen en México para desarrollar investigación científica y tecnológica con enfoque en temas prioritarios para el país. En este caso, los esfuerzos se centraron en el análisis de las consecuencias de derrames de hidrocarburos en el océano, en particular en el golfo de México. A partir de ahora, desde el Conacyt se pretende tomar el amplio repertorio de información generada en el CIGOM para forjar un observatorio del golfo de México y el Caribe mexicano, en colaboración con otras instancias del gobierno de México y los gobiernos locales.

Sin duda, uno de los temas prioritarios para el país es la conservación de la biodiversidad del golfo de México, que en años anteriores se ha visto amenazada por diferentes impactos derivados del desarrollo industrial, algunos de ellos catastróficos como, por ejemplo, la explosión en la plataforma Deepwater Horizon (DWH) de la compañía British Petroleum, que en 2010 ocasionó uno de los mayores derrames de petróleo en toda la historia de la humanidad. Como respuesta a esta clase de adversidades, en 2015 se creó el CIGOM, que hasta la fecha sigue trabajando con el propósito de comprender mejor los impactos de este desafortunado accidente y, también, para generar instrumentos y modelos prospectivos y de indicadores o alarmas tempranas que sirvan para prevenir y contrarrestar los daños que podrían ocasionar, en un futuro, los accidentes petroleros.

A partir del derrame de petróleo en la plataforma del British Petroleum, se impulsaron estudios de biodiversidad, de corrientes marinas, de modelaje complejo, entre otros, en un esfuerzo integrado y articulado que dio forma y contenido al CIGOM. El golfo de México es un ecosistema fascinante desde el punto de vista biológico, geoló-



gico y también pesquero y de aprovechamiento. Cuidar este gran ecosistema es prioritario para nuestro país, así como para el equilibrio ecológico global.

Entre las aportaciones reunidas en este número de *Ciencias y Humanidades*, los colegas del CIGOM resumen los hallazgos en torno a la fascinante biodiversidad del golfo de México, a las tortugas marinas, los crustáceos en la Plataforma de Yucatán, los moluscos del Cinturón Plegado Perdido y toda su diversidad bacteriana.

Por otro lado, aquí se aporta información sobre la explotación petrolera y los riesgos que esto representa para la vida en el mar, además de los avances hechos en torno a la prevención, los modos de actuar y los posibles desenlaces o intervenciones en caso de que ocurra un gran derrame de hidrocarburos. Desde luego, en este rubro hay todavía mucho por hacer. Desde el Conacyt seguiremos enfocando los esfuerzos y capacidades de articulación científico-técnica a nivel nacional e internacional necesarios para integrar un observatorio del golfo de México y el Caribe mexicano. Al darle continuidad al CIGOM, se pretende propiciar las mejores prácticas en los procesos de explotación del petróleo, refinación de hidrocarburos y otras actividades necesarias para el desarrollo económico del país y así minimizar los riesgos e impactos socioecológicos potenciales.

Es evidente que el modelo extractivista, centrado en el beneficio de unos pocos, ha producido daños irreparables en la naturaleza; lo hemos visto en el reciente derrame petrolero de la empresa Repsol en las costas de Perú. Un ejemplo específico de la continuidad del CIGOM se encuentra en el contexto del Pronaces Energía y Cambio Climático. Con el fin de anticipar cualquier accidente que pudiera ocurrir en las plataformas petroleras mexicanas y, en su caso, poder contrarrestar sus posibles daños, el Conacyt, junto con la Secretaría de Energía (SENER), finan-



ció el proyecto «Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas, geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas con la exploración y la producción de hidrocarburos en aguas profundas del golfo de México».

En este número de *Ciencias y Humanidades* tenemos el honor de contar con una entrevista y algunas muestras del gran arte de Manuela Generali, excelente pintora del mar. También se incluye la reseña al libro de poesía *otro día... (poemas sintéticos)* de Verónica Gerber, que en sus poemas retrata la devastación del medioambiente; asimismo, las imágenes de Orso Angulo, biólogo marino que en los últimos años se ha dedicado a captar en lienzos de algodón las bellas formas de la vida marina. El arte nos brinda un puente afectivo y sensible desde el conocimiento y la ciencia con la sociedad, nos conecta al nivel que necesitamos para contribuir a la revolución de las conciencias, que tanto urge para lograr los esfuerzos colectivos convergentes que, como en este caso, estén a la altura de nuestros retos socioambientales locales, nacionales y globales.

Conociendo al CIGOM

Juan Carlos Herguera
Edward M. Peters

Investigadores del Departamento de Ecología Marina del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

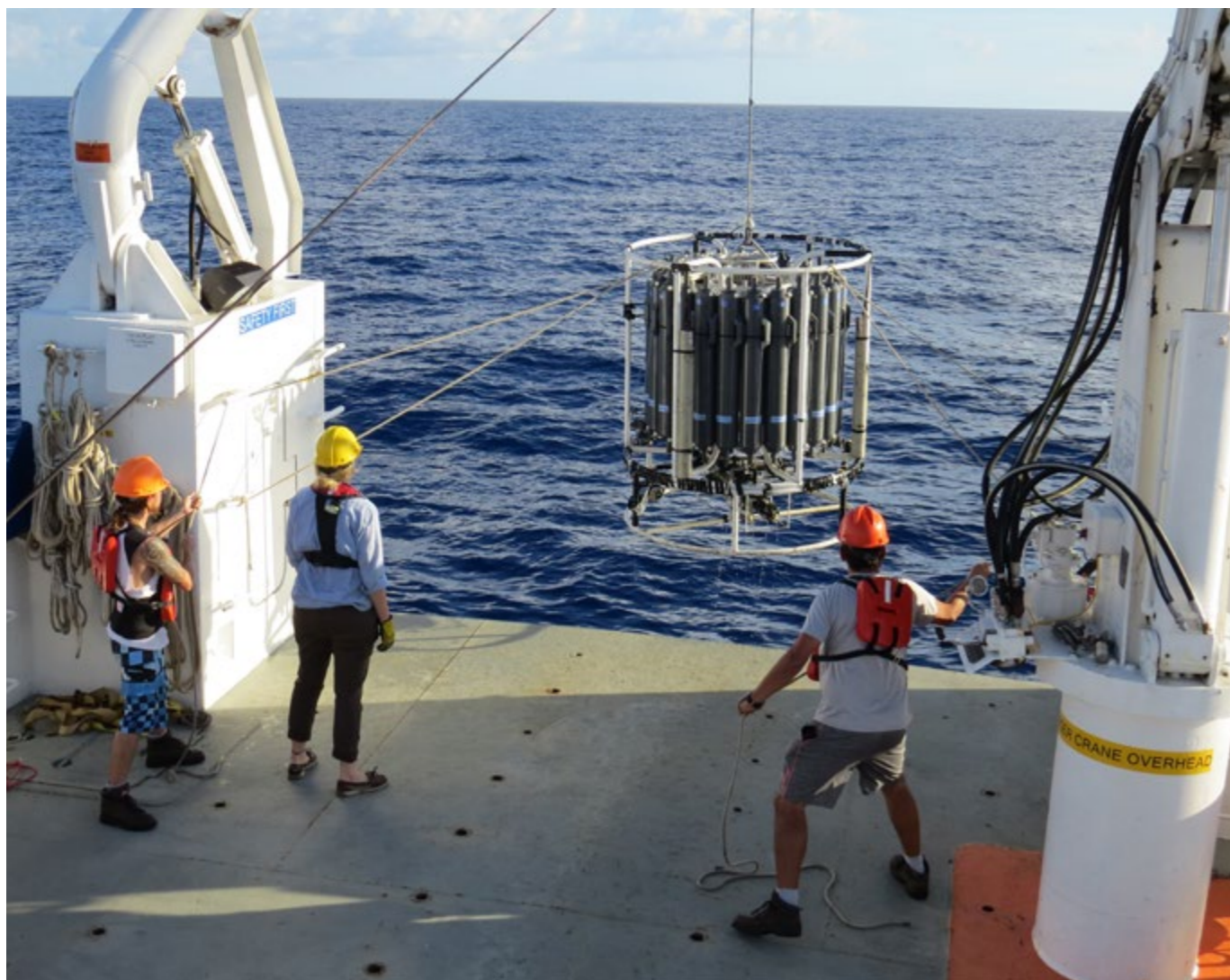
El trágico accidente de la plataforma Deepwater Horizon (DWH) de British Petroleum, ocurrido en 2010, dio lugar a uno de los mayores derrames de petróleo de la historia. A pesar de que el gobierno de México, junto con la comunidad científica y a través del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), tuvo una rápida respuesta para evaluar los impactos en los ecosistemas mexicanos; este accidente reveló las deficiencias tecnológicas, tanto para controlar un derrame en aguas profundas –debido a las grandes lagunas de desconocimiento–, como por la falta de información para poder predecir la propagación y el destino de los grandes volúmenes de hidrocarburos en la profundidad y la superficie del mar. Y aún más importante, por nuestro desconocimiento de su impacto en el gran ecosistema del golfo de México.

Esta falta de conocimiento, tanto en la industria como en la comunidad científica, motivó que académicos, personal de Petróleos Mexicanos (PEMEX) y agencias ambientales del gobierno federal en México generaran las condiciones para que el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), junto con la Secretaría de Energía (SENER), lanzaran una convocatoria de investigación ambiental del golfo de México con el propósito de implementar una red de observatorios oceanográficos, construir una línea base ambiental, desarrollar modelos de circulación oceánica y atmosférica de frontera, generar el conocimiento acerca de la degradación natural de hidrocarburos y, por último, estudiar las consecuencias a causa de derrames de hidrocarburos mediante la construcción de escenarios, considerando la vulnerabilidad de las especies y los ecosistemas.

Ante la necesidad de orientar esfuerzos hacia estos problemas, la convocatoria dio origen al Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM). A través de uno de sus miembros, el Centro de Investigación Científica y Edu-



Maniobras cotidianas durante una de las 22 campañas oceanográficas. Fotografías: Sharon Z. Herzka.



Muestreador roseta al agua.
Fotografía: Sharon Z. Herzka.

cación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, se presentó la propuesta conjunta de «Implementación de redes de observaciones oceanográficas (físicas, geoquímicas y ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del golfo de México».

La ejecución del proyecto ha permitido marcar un hito en la oceanografía en México, ya que se han desarrollado y puesto a prueba, con resultados exitosos, herramientas y

metodologías de observación de las variables esenciales del océano en tiempo real y continuo; se ha llevado a cabo una caracterización extensa y en profundidad de la línea base ambiental de sus aguas y sedimentos, y de contaminantes y estructura de las redes tróficas, a partir de 22 campañas oceanográficas y varios estudios de campo.

Estas observaciones se complementaron con el uso de modelos computacionales de la circulación, con la adición de módulos de biogeoquímica y degradación de hidrocarburos que hicieran posible simular las consecuencias de grandes derrames bajo diferentes condiciones estacionales. Se aplicaron modelos, observaciones y experimentos en grandes depósitos de agua de mar para generar escenarios de derrames con los que se elaboraron mapas de vulnerabilidad de especies de interés, así como de regiones y ecosistemas en la Zona Económica Exclusiva (ZEE) del golfo de México. También se incluyó el estado del arte de la degradación natural de hidrocarburos mediante consorcios bacterianos, junto con observaciones y análisis que aportan una información sin precedentes en cuanto a nuestro conocimiento en torno al estado ambiental del golfo de México.

El conjunto de estos trabajos emanó de diferentes instituciones de investigación y educación en México: del CICESE y de la Universidad Autónoma (UABC), de Baja California, adscritos al Instituto de Investigaciones Oceanológicas; de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través del Instituto de Biotecnología, el Instituto de Geofísica, el Centro de Ciencias de la Atmósfera, el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología; del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), Mérida, y el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

A estas entidades hay que sumar las colaboraciones con otras nueve instituciones internacionales y 16 nacionales. El número de investigadores vinculados al proyecto asciende a 361, con 80 posdoctorados y otros 157 investigadores en instituciones asociadas al Consorcio.

En este número especial dedicado al CIGOM se muestran algunos de los resultados alcanzados por este grupo



La exploración y producción de hidrocarburos en el golfo de México demanda acciones preventivas. Fotografía: istockphoto.com

multiinstitucional y multidisciplinario que explican cómo funciona este gran ecosistema, qué podemos esperar y cómo podemos actuar en caso de un gran derrame de hidrocarburos. Herzka *et al.* presentan una de las obras del proyecto, el *Atlas de Línea Base Ambiental del golfo de México*, que representa el primer estudio geográfico en profundidad y extensión que tiene el país de uno de sus mares, y que supone un acontecimiento importante en las aportaciones más detalladas e interdisciplinarias para su caracterización.

Améndola Pimenta *et al.* abordan las respuestas de diferentes organismos ante la contaminación de hidrocarburos en el medio marino en el corto, mediano y largo plazos. García Cruz *et al.* destacan la importancia de los consorcios bacterianos para degradar hidrocarburos, consorcios que resultan de la gran variedad de metabolismos, fruto de la enorme diversidad bacteriana presente en el golfo y de su ubicuidad desde las playas hasta las llanuras abisales.

Pardo López y Gutiérrez Ríos comparten los resultados de la diversidad bacteriana que vive en la columna de agua y en los sedimentos del golfo de México, identificando una microbiota residente en el golfo que está acompañada de otras, con dispersión global gracias al uso de técnicas de frontera como la secuenciación de «escopeta» del ADN.

García Maldonado *et al.* explican cómo los experimentos, en condiciones controladas de laboratorio, los mesocosmos permiten evaluar el potencial de las bacterias para degradar los hidrocarburos en el mar con un enorme potencial para biorremediar un derrame. El estudio está complementado por Pech *et al.*, quienes con resultados de experimentos controlados del laboratorio muestran la vulnerabilidad de la comunidad marina a la exposición al petróleo y destacan que dicha comunidad cuenta también con mecanismos fisiológicos y ecológicos que permiten su recuperación y disminuyen la afectación, si bien el daño puede resultar irreversible ante grandes derrames de hidrocarburos.

González *et al.* presentan a la fauna residente en el fondo del mar en la Región de Perdido y las complejidades de sus relaciones con el medio. Liceaga Correa *et al.* pro-



Los *gliders* permiten tomar el pulso del ambiente marino del golfo de México. Fotografía: Ángel Ruiz Angulo.

porcionan información científica del uso que las tortugas hacen de los mares y cómo se utiliza conocimiento experto para diseñar acciones de conservación, incluyendo un plan de atención a tortugas marinas y sus hábitats ante contingencias por derrames de petróleo. Esta aportación constituye un parteaguas en la conservación de especies marinas prioritarias en México al identificar y favorecer la creación y fortalecimiento de capacidades humanas, profesionales y de infraestructura en la atención a tortugas.

Hernández Ayón *et al.* hablan de las características del carbono inorgánico disuelto en el golfo y del creciente problema de la acidificación de origen antropogénico en las aguas superficiales. Flores Vidal y García Nava presentan la utilidad de los radares oceanográficos, ya que permiten monitorear de forma continua y simultánea las corrientes superficiales en grandes extensiones del mar costero, hasta 200 km costa afuera, y para el monitoreo de la dispersión a arrastre por corrientes de la contaminación marina y otros cuerpos a la deriva.

Pérez Brunius y Sheinbaum explican cómo generaron escenarios para determinar las regiones que podrían verse más afectadas por derrames de gran escala en seis pozos localizados en aguas profundas del golfo de México occidental. Las simulaciones por computadora requieren de la mejor información y conocimiento disponible en materia de corrientes; por ello, Zavala y Romero describen la importancia de las corrientes y la estratificación de las masas de agua para introducirnos en los controles que ejerce la física de las aguas del golfo junto con aspectos biológicos como son la disponibilidad de nutrientes y la concentración de clorofila.

Por otro lado, Romero y Zavala relatan su trabajo sobre la caracterización climatológica de distintas variables atmosféricas mediante un sistema de modelación numérica regional de alta resolución en el golfo de México y muestran cómo esta información es muy útil para la planeación de diversas actividades, la optimización de recursos y la reducción de riesgos.

Sosa Nishizaki y Ramírez Mendoza utilizaron modelos de nicho ecológico para predecir áreas con condiciones

idóneas para la presencia de las especies de megafauna marina (ballenas, delfines, tiburones, atunes, pez espada y picudos), para conocer la vulnerabilidad de estas especies, en caso de un derrame de hidrocarburos y, de ser el caso, hacer recomendaciones para su manejo.

Torruco, González y Torruco escriben acerca de los crustáceos de la Plataforma de Yucatán, el grupo de organismos más afectado por las actividades antrópicas, incluyendo la extracción de hidrocarburos. La contaminación impacta en los organismos de diversas formas y su medición puede realizarse con diferentes metodologías. Vidal *et al.* se refieren a la bioacumulación de contaminantes en peces y su respuesta fisiológica; encontraron niveles de hidrocarburos y de metales pesados, e identificaron respuestas fisiológicas aparentemente «normales» para una zona petrolera como la del golfo.

Puch *et al.* estudiaron los efectos tóxicos en organismos marinos; sus hallazgos en ecotoxicología permiten comprender mejor cómo los organismos pueden responder a los ambientales. Por último, Saldaña *et al.* evaluaron la vulnerabilidad ecológica del golfo de México con el fin de identificar qué especies y ecosistemas son más susceptibles a la presencia de hidrocarburos en el ambiente, información clave para plantear acciones de prevención, preparación y respuesta ante derrames de petróleo.

A grandes rasgos hemos descrito el contenido de los artículos que integran este número de *Ciencias y Humanidades* dedicado al CIGOM. Invitamos a los lectores a sumergirse en las páginas de esta edición, donde hallarán diversos tesoros oceanográficos descubiertos recientemente en el golfo de México: todos valiosos y útiles para la sociedad y el manejo sustentable de este gran ecosistema.

S...O---S...

Efectos de contaminantes en organismos marinos

Carlos A. Puch Hau

Mercedes A. Quintanilla Mena

Mayra A. Cañizares Martínez

Investigador e investigadoras del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

El golfo de México es un ecosistema marino de vital importancia para nuestro país desde diversos puntos de vista: social, ecológico, económico, agrícola, pesquero, petrolero y turístico, entre otros. No obstante, sus correspondientes actividades producen grandes volúmenes de desechos y contaminantes tóxicos (hidrocarburos del petróleo, detergentes, fármacos, plaguicidas, plásticos, microplásticos, metales, metaloides, etc.) que continuamente se vierten al mar y comprometen la salud de este ecosistema.

Muchos de estos contaminantes pueden estar relacionados con alteraciones reproductivas, efectos cancerígenos, teratogénicos (malformaciones durante el proceso de gestación) y mutagénicos (alteraciones del ADN en las células de forma permanente) en los organismos expuestos, incluyendo los humanos (Figura 1).

¿Qué es y qué ha hecho la ecotoxicología por la salud marina?

La ecotoxicología estudia los efectos de los químicos en los ambientes acuáticos y terrestres. Por tanto, el objetivo de los ecotoxicólogos es alertar acerca de la peligrosidad de ciertas sustancias para el medioambiente, ejerciendo una labor de vigilancia sobre la salud de los ecosistemas con el fin de predecir y prevenir eventos indeseables.



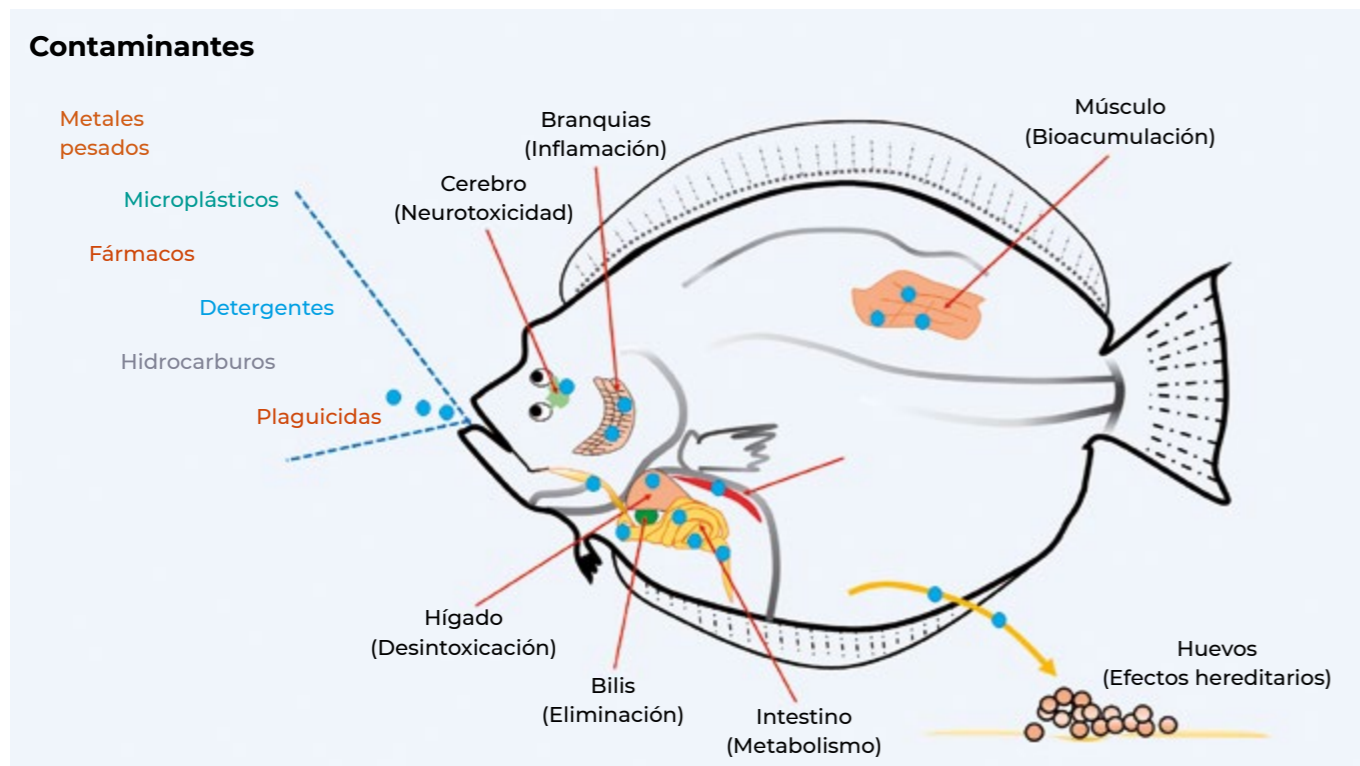
Figura 1

Fuentes de contaminación que afectan al golfo de México.

Gráfico: CIGOM-Conacyt.

Gracias a las contribuciones de la ecotoxicología se ha podido comprender cómo los organismos pueden responder a los contaminantes ambientales. Por ejemplo, cuando un pez tiene contacto con un contaminante, éste ingresa a su organismo a través de la ingestión o la inhalación; luego, se dirige hacia el tracto gastrointestinal, pasa por las branquias y después llega al sistema circulatorio, al hígado y al riñón. Durante su recorrido por medio de los diferentes órganos, los contaminantes pueden ocasionar distintas alteraciones, como trastornos neurotóxicos (en el cerebro), inflamatorios (en las branquias), transgeneracionales (efectos heredados), entre otros.

Después de ser metabolizados por el hígado, los contaminantes pueden ser excretados por la bilis o la orina; sin embargo, algunos tóxicos son difíciles de metabolizar y por ello se van acumulando en el cuerpo mediante un proceso denominado *bioacumulación*. Ahora bien, cuando estas concentraciones bioacumuladas se integran a la cadena alimenticia, ocurre la biomagnificación, es decir, un aumento sucesivo de los niveles de contaminantes conforme sube el nivel trófico. Por ejemplo, el atún, situado en un eslabón superior de la cadena alimenticia, puede contener en sus tejidos niveles de metilmercurio hasta diez veces superiores a los registrados en sus presas.



Fuentes de contaminación que afectan a los peces que habitan en el golfo de México. Gráfico: CIGOM-Conacyt.

Con base en estos hallazgos, los ecotoxicólogos que trabajan en el golfo de México han identificado genes (segmentos de ADN que contienen información genética) que codifican para proteínas o enzimas clave para metabolizar los contaminantes. Estos genes han sido utilizados como biomarcadores de exposición o efecto (Puch-Hau *et al.*, 2018).

De igual manera, se han identificado biomarcadores del sistema reproductivo, como el gen que codifica para la vitelogenina, una proteína comúnmente expresada en hembras, la cual estimula la formación del vitelo (yema) en los huevos. Ante la presencia de ciertos contaminantes –hidrocarburos del petróleo, de-

tergentes, plaguicidas y anticonceptivos, entre otros–, este gen es activado de manera anormal en peces machos, ocasionando un proceso de feminización. Estudios realizados en diferentes especies de peces planos que habitan el sur del golfo de México han revelado que los machos presentan niveles anormales de este biomarcador, lo cual puede tener repercusiones en su reproducción (Quintanilla-Mena *et al.*, 2020).

En un estudio desarrollado en el sur del golfo de México (incluyendo los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán) en 2020 (Quintanilla-Mena *et al.*), se evaluaron las concentraciones de contaminantes (hidrocarburos y metales tóxicos) y su relación con

Jureles amarillos (*Caranx rhonchus*). Fotografía: Claudio Contreras Koob.



diferentes biomarcadores genéticos (a nivel de ADN y ARN) y metabólicos. Los resultados mostraron que la Plataforma de Yucatán presenta un menor impacto, es decir, mejor calidad ambiental en comparación con las zonas con mayor actividad petrolera, como Tabasco, Campeche, Veracruz y Tamaulipas.

Los peces en la Plataforma de Yucatán presentaron mayor capacidad para metabolizar y eliminar de su cuerpo los contaminantes; en cambio, los peces de las zonas más impactadas no respondieron eficientemente, más bien registraron una bioacumulación en sus tejidos. Esto puede causar afectaciones en quienes los consumen, ya sean otros animales del mar o las poblaciones humanas.

Falta mucho por hacer

A pesar de que se han logrado avances importantes en torno a la ecotoxicología del sur del golfo de México, aún falta mucho por hacer. Se necesita desarrollar un programa de monitoreo continuo, además de identificar y regular las principales fuentes de contaminación, estu-

diar los efectos de los contaminantes en el contexto del cambio climático y conocer los riesgos de los contaminantes emergentes –entre otros: fármacos, hormonas, drogas de abuso, productos de higiene personal, nanomateriales y microplásticos–. En este sentido, la ecotoxicología es y seguirá siendo fundamental para la protección del golfo de México y la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras.

Referencias

- Puch-Hau, C., Quintanilla-Mena, M., Rubio-Piña, J., Del Río-García, M. y Zapata-Pérez, O.** (2018). Partial mRNA Sequences of the Biomarkers CYP1A, GST, CAT, GR, SOD, GPx, VTG and p53 in Flatfish *Syacium gunteri* from Gulf of Mexico. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 100(6), 798-802. <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2329-1>
- Quintanilla-Mena, M., Gold-Bouchot, G., Zapata-Pérez, O., Rubio-Piña, J., Quiroz-Moreno, A., Vidal-Martínez, V. M., Aguirre-Macedo, M. L. y Puch-Hau, C.** (2020). Biological responses of shoal flounder (*Syacium gunteri*) to toxic environmental pollutants from the southern Gulf of Mexico. *Environmental pollution*, 258(1). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113669>

Conservación de las tortugas marinas





● **María de los Ángeles Liceaga Correa**
Abigail Uribe Martínez
Eduardo Cuevas Flores

Investigadoras e investigador del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Tortuga carey (*Eretmochelys imbricata*) con transmisor satelital (pp. 20-21). Fotografía: CIGOM.

cimiento de éstos resulta insuficiente pero imprescindible para la conservación efectiva de estas carismáticas especies. Por ello, el objetivo principal del subproyecto Hábitats críticos de tortugas marinas fue generar información científica acerca del uso que estas especies hacen de los mares y conjuntarla con el conocimiento de expertos para así diseñar acciones de conservación, incluyendo un plan de atención a tortugas marinas y sus hábitats ante contingencias por derrames de petróleo.

Rastreo satelital y hotspots de tortugas marinas

Entre 2016 y 2018, rastreamos satelitalmente 85 tortugas de cuatro especies gracias a la colaboración de instituciones académicas, organizaciones civiles y gobiernos estatales y municipales que monitoreaban en ese momento las 47 playas de anidación seleccionadas para este estudio en los estados de Tamaulipas, Veracruz, Campeche, Yucatán y Quintana Roo. Con estos datos se identificaron las áreas marinas donde las tortugas se congregan para alimentarse, descansar o reproducirse, y sus rutas de migración.

Asimismo, gracias al uso de más de mil imágenes satelitales, identificamos zonas de sargazo, un ecosistema flotante común en la costa central de Veracruz y en el norte de Tamau-

Las tortugas marinas son especies migratorias longevas, de maduración sexual tardía y que residen en distintos hábitats durante su ciclo de vida. En aguas mexicanas del Atlántico encontramos cinco especies de tortugas marinas:

- carey (*Eretmochelys imbricata*)
- verde o blanca (*Chelonia mydas*)
- caguama (*Caretta caretta*)
- lora (*Lepidochelys kempii*)
- laúd (*Dermochelys coriacea*)

En México, todas las especies están catalogadas en peligro de extinción; enlistadas en la norma oficial mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, son prioritarias para la conservación y objeto de tratados internacionales para su restauración.

Aunque las tortugas marinas pasan más del 95 % de su vida en hábitats marinos, el cono-

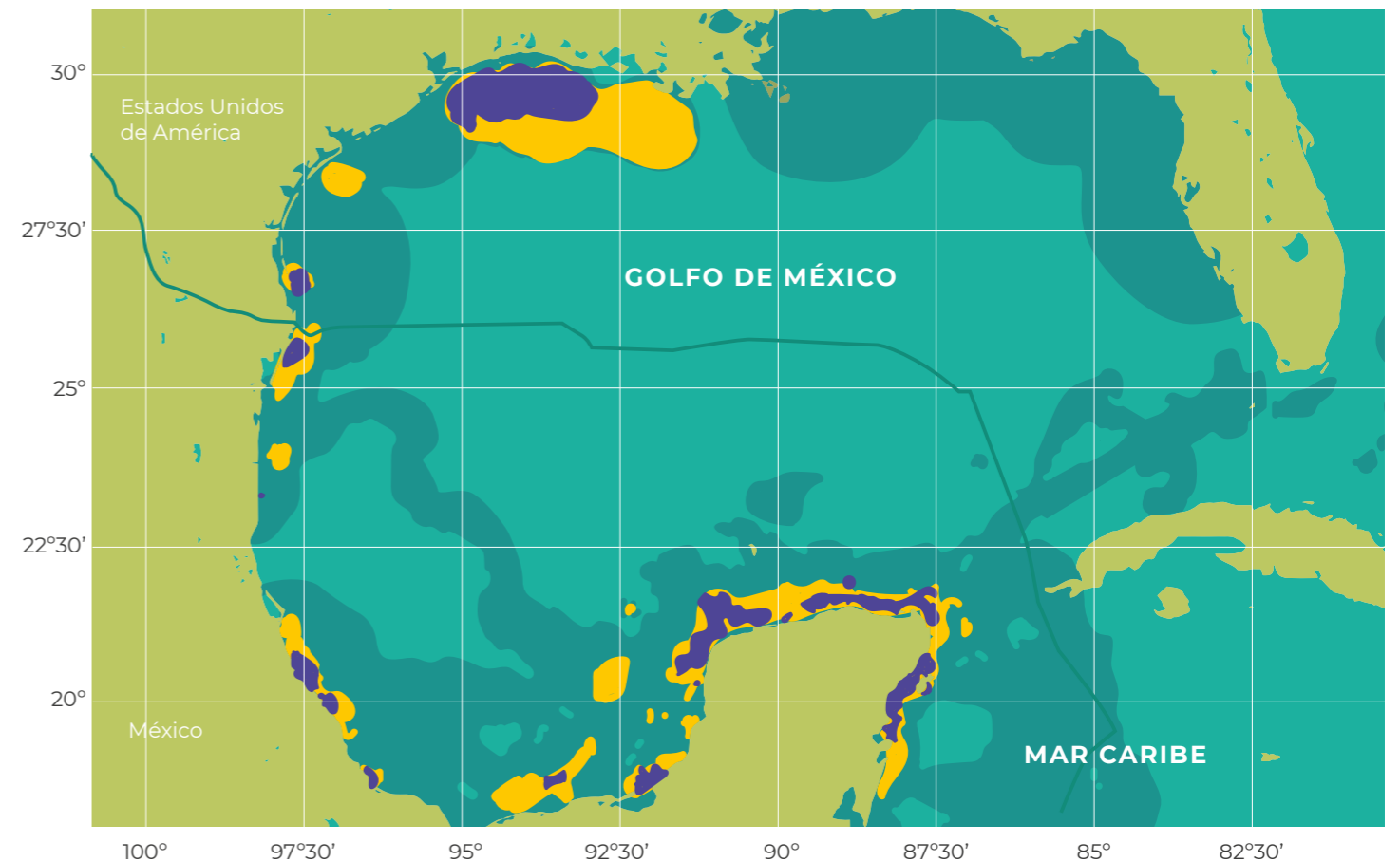


Figura 1

Áreas críticas para la viabilidad de las tortugas marinas (*hotspots*) en el golfo de México y el Caribe mexicano.

Mapa: CIGOM-Conacyt.

Hotspots de tortugas marinas

- Rango de distribución
- Hotspot principal
- Hotspot secundario

pas, potencialmente aprovechadas por las crías como área de desarrollo en su primera etapa.

Si bien las herramientas tecnológicas son imprescindibles para responder a preguntas tales como ¿dónde viven las tortugas?, la suma del conocimiento y el apoyo de los expertos de la región fue estratégico para determinar cuáles son las áreas críticas (las llamadas *hotspots*) para la viabilidad a largo plazo de las poblaciones. Mediante talleres y reuniones, en voz de los exper-

tos, se ponderaron los niveles de importancia de las especies estudiadas y sus hábitats, las amenazas y presiones que sufren, así como los esfuerzos realizados para conservarlas. De este modo, uno de los principales resultados fue la identificación de *hotspots* de tortugas marinas en las costas de la península de Yucatán, Tabasco y Veracruz (Figura 1).

Estas áreas están conectadas por corredores migratorios donde individuos de distintas espe-

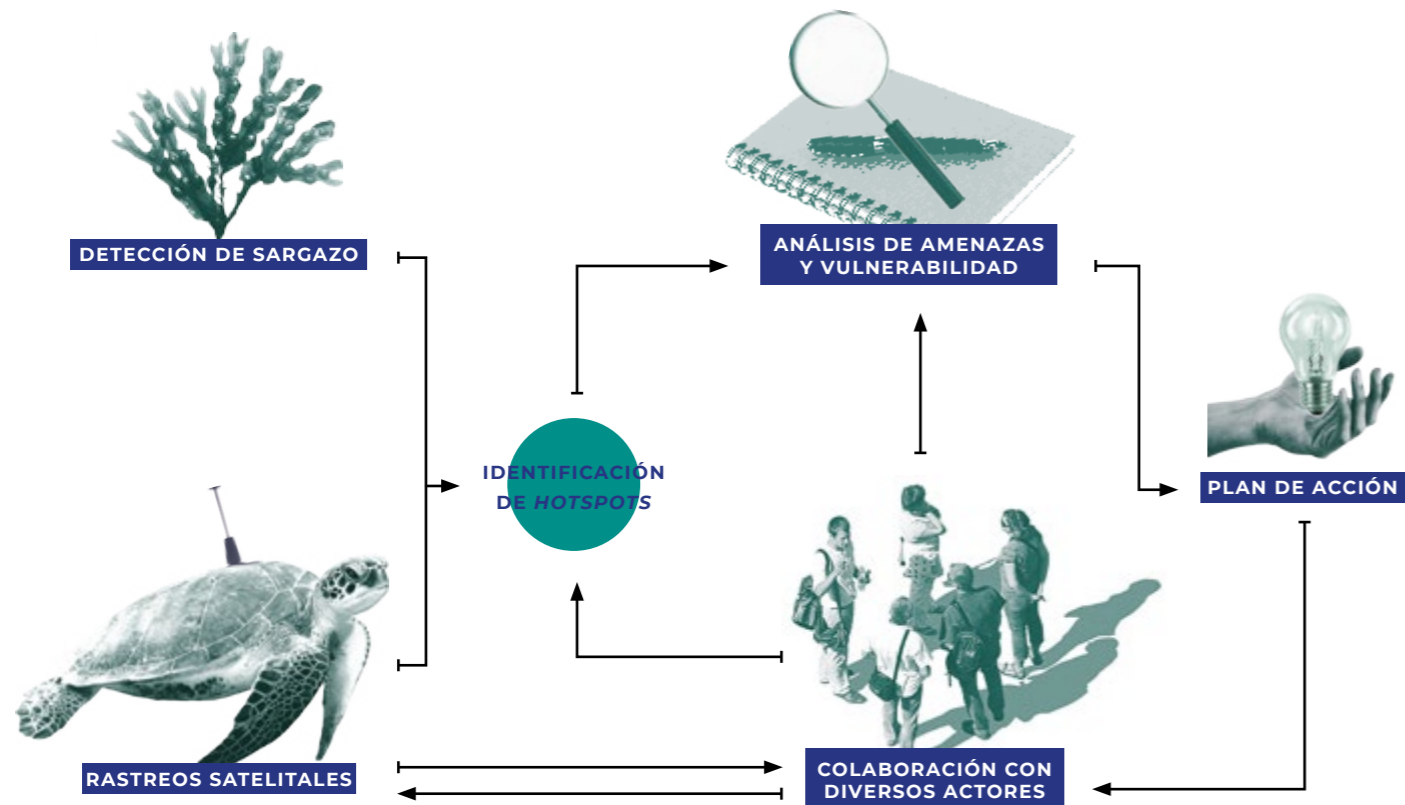


Figura 2
Identificación de hotspots.
Gráfico: CIGOM-Conacyt.



Las tortugas marinas son especies migratorias de maduración sexual tardía, longevas y que utilizan distintos hábitats en su ciclo de vida.
Fotografías: Claudio Contreras Koob.

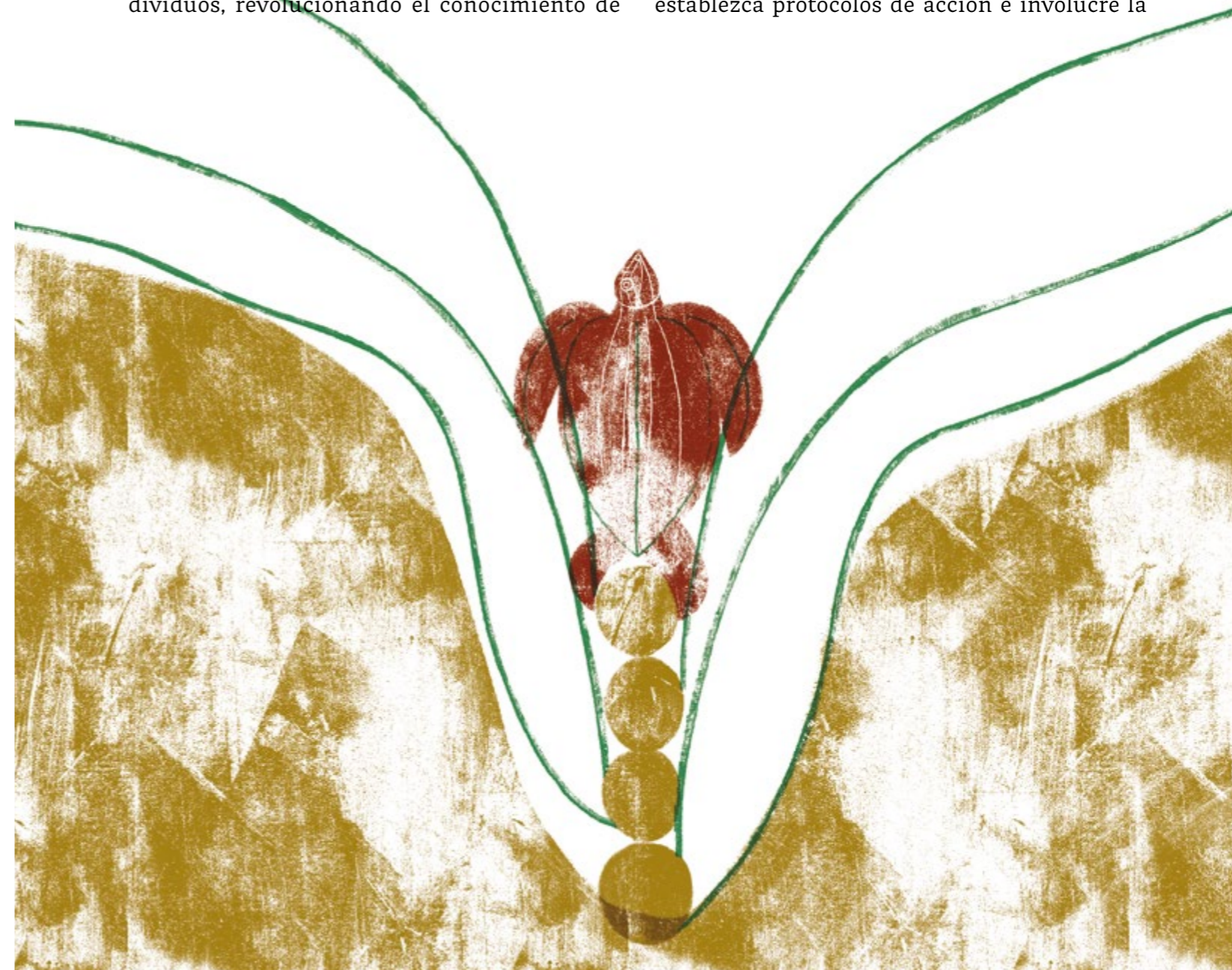
cies se trasladan entre sus playas de anidación y las áreas de alimentación, en donde residirán por más de dos años hasta su siguiente temporada reproductiva. Además, observamos cómo un porcentaje de tortugas abandonó el territorio mexicano para establecerse en Honduras, Nicaragua, Belice, Cuba y Florida.

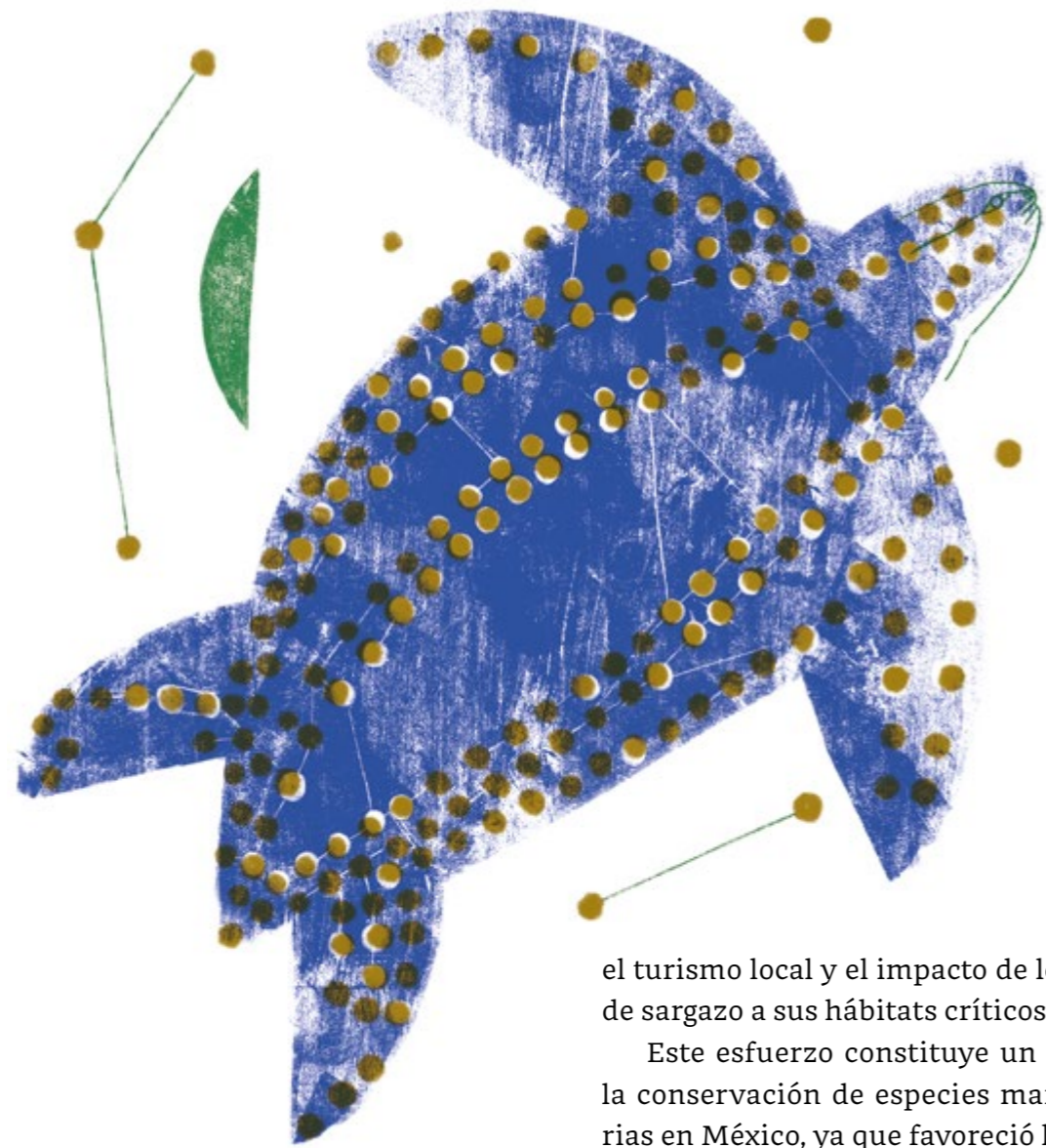
Aportes del Consorcio de Investigación del Golfo de México

Antes de este subproyecto (2015), en el sur del golfo de México, investigadores mexicanos rastrearon cerca de 100 tortugas marinas en el periodo 2000-2015. No obstante, en tan sólo tres años el CIGOM estudió el mismo número de individuos, revolucionando el conocimiento de

estas especies en peligro de extinción a una tasa de un quinto del tiempo que históricamente había tomado (Figura 2).

Al considerar los conocimientos de las personas que desde hace décadas realizan esfuerzos de conservación y monitoreo en las playas, se gestaron herramientas, especialmente explícitas, de apoyo a la conservación; de esta manera, se promovieron la transferencia y la adopción de los productos entre los mismos actores que dieron su apoyo para generarlos. El *Plan de atención a tortugas marinas y sus hábitats ante contingencias por derrames de hidrocarburos en el golfo de México* se gestó como un esfuerzo combinado entre expertos de diferentes especialidades con el propósito de obtener un instrumento que establezca protocolos de acción e involucre la





visión del sistema de mando único de la Secretaría de Marina (SEMAR).

Los productos representan un hito en el conocimiento de estas especies en peligro de extinción. Adoptarlos y aplicarlos como herramientas de política pública con fines de conservación y manejo de sus poblaciones, es un reto latente y debe ser atendido de forma multisectorial. Al mismo tiempo, entre otros beneficios que conlleva su implementación, se generan oportunidades para la continuidad en la conservación y restauración de la biodiversidad marina, incluyendo la armonización de actividades socioeconómicas de alta relevancia para el bienestar de las comunidades, como son la pesca artesanal,

el turismo local y el impacto de los arribazones de sargazo a sus hábitats críticos.

Este esfuerzo constituye un parteaguas en la conservación de especies marinas prioritarias en México, ya que favoreció la creación y el fortalecimiento de capacidades humanas, profesionales y de infraestructura. Ahora toca sostener este impulso y expandirlo en el corto plazo para maximizar el beneficio propiciado por la inversión inicial y facilitar el cauce de dichas capacidades, a fin de atender problemas nacionales y temas estratégicos en el ámbito del conocimiento ambiental.

Agradecimientos

A los responsables de los campamentos tortugueros, instituciones gubernamentales y académicas, organizaciones de la sociedad civil y estudiantes.

Petróleo, amenaza latente para los peces

Mónica Améndola Pimenta
Carlos Eduardo González Penagos
Juan Antonio Pérez Vega
Rossanna Rodríguez Can
Investigadoras e investigadores del Departamento de Recursos del Mar del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Las sustancias tóxicas tales como los contaminantes derivados del petróleo que se desechan en ríos y mares, constituyen una seria amenaza para los ecosistemas y sus organismos. El petróleo, además de contener metales pesados, está compuesto de una mezcla compleja de hidrocarburos que impactan negativamente en el hábitat y sus diversas formas de vida.

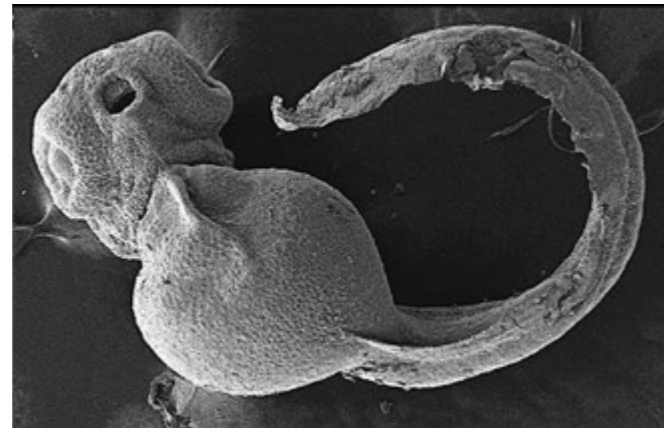
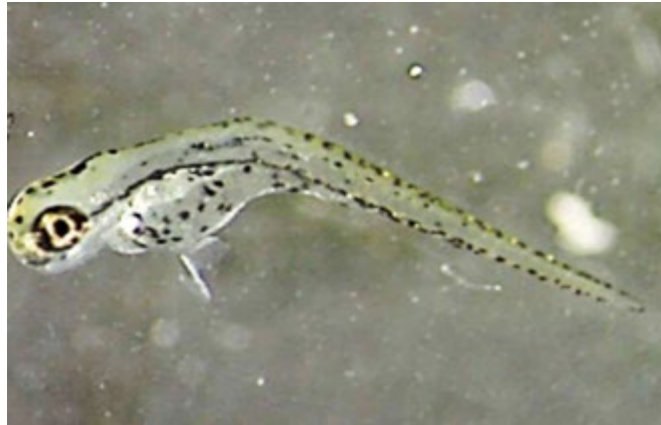
La exposición a los componentes del petróleo afecta el ciclo de vida de los organismos, desde las etapas tempranas hasta su adultez. A nivel mundial, cerca de 45 % del petróleo que ingresa al medio marino proviene de afloramientos o ya-

cimientos naturales, si bien los derrames ocasionados durante su extracción y transporte son los principales responsables de sus efectos en los ecosistemas acuáticos.

Daños directos o por modificaciones

Los daños pueden ser directos, debido a la exposición de compuestos tóxicos que son absorbidos y causan alteraciones sistémicas en los organismos; o bien, derivados de las modificaciones del hábitat, como la reducción de la cantidad de luz disponible, cambio en el pH, disminución del oxígeno

Pez afectado por hidrocarburos



Pez sano



Figura 1

Comparativa de la fisiología entre un pez sano y un pez afectado por los hidrocarburos.

Fotografías: CIGOM.

disuelto y reducción en la disponibilidad de alimentos (Figura 1).

En el golfo de México han ocurrido dos importantes derrames de petróleo: el del pozo Ixtoc-I, en el año 1979, y el del pozo Macondo de la plataforma Deepwater Horizon (DWH), en el año 2010. El segundo alcanzó un volumen que se estimó en 780 000 toneladas de petróleo crudo liberado al medio marino, a lo largo de ochenta y cuatro días, causando daños en toda la región en diferentes niveles biológicos.

Los peces representan la clase de vertebrados más antigua y diversa, y viven en una gran variedad de hábitats: desde el agua dulce hasta el agua salada, desde los fríos mares polares hasta los cálidos arrecifes tropicales, y desde las aguas superficiales someras hasta las profundidades del océano. Asimismo, son fundamentales y muy importantes para el funcionamiento de los ecosiste-

mas, y algunas especies tienen un alto valor económico.

Sin embargo, son organismos particularmente susceptibles al impacto derivado de la exposición a los contaminantes que ingresan al medio acuático, como es el caso del petróleo. Tanto las especies pelágicas, que habitan la columna de agua, como las bentónicas, que viven en los fondos, enfrentan una amenaza constante por el ingreso de hidrocarburos al medio.

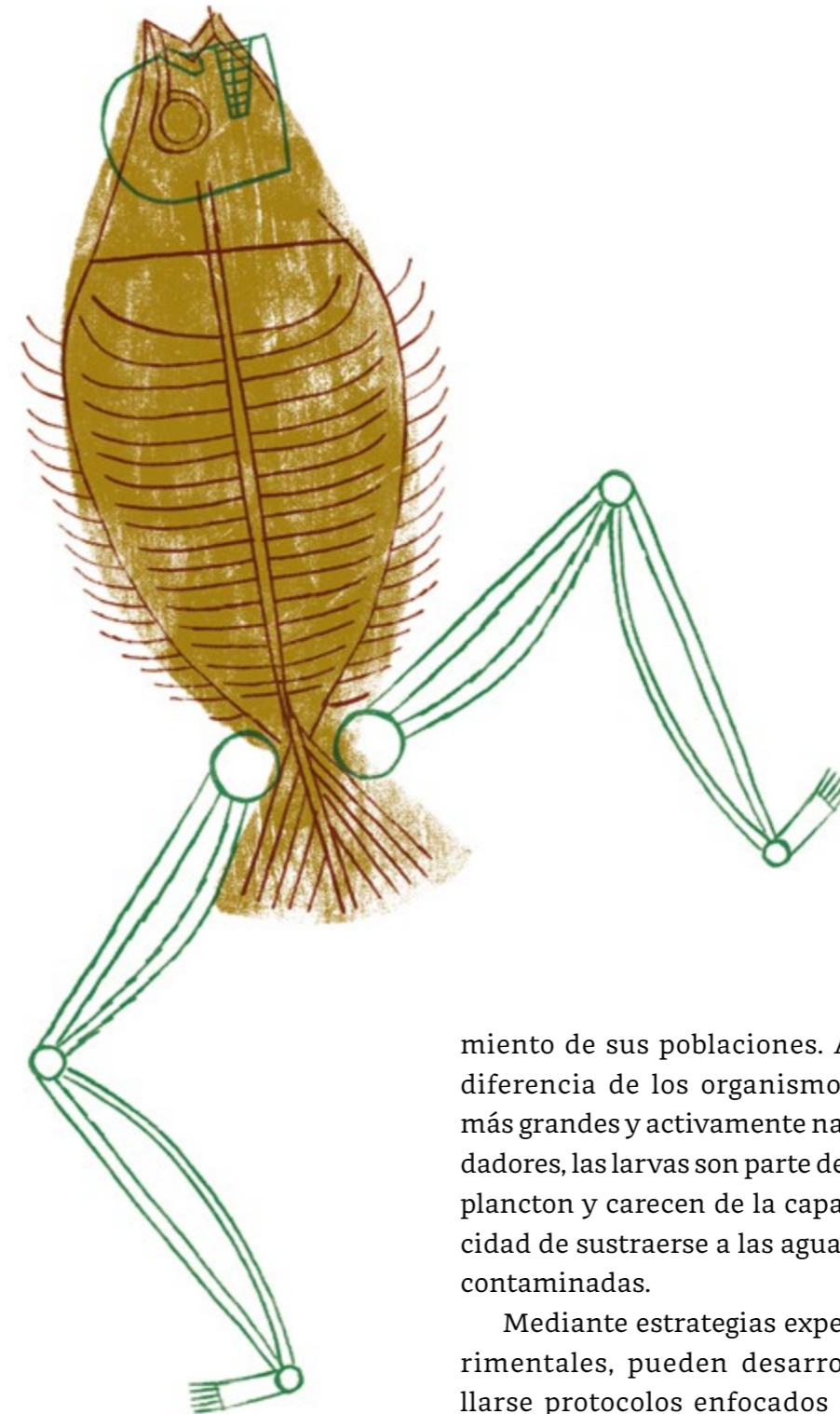
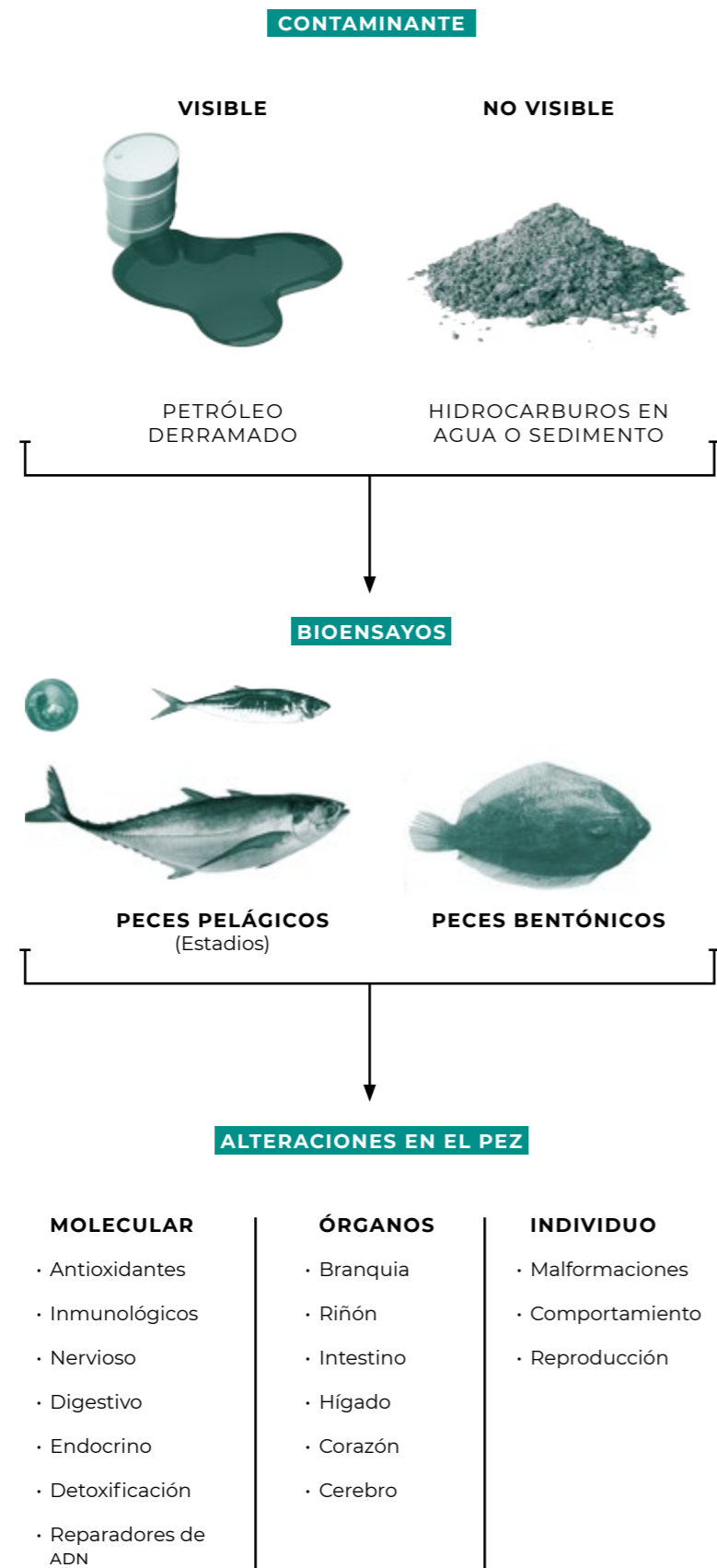
Bioensayos en ambientes controlados

Debido al complejo manejo de un contaminante como el petróleo, y por cuestiones éticas, no es factible ni conveniente simular un derrame de crudo en el ambiente natural; por ello, una opción consiste en la realización de experimentos con base en bioensayos en ambientes controlados, donde los peces actúan como centinelas

en los diversos análisis a múltiples escalas: molecular (en genes, proteínas, metabolitos), celular (respuesta inmunológica, metabolismo endócrino, función reproductiva), individual (órganos, tejidos, alteraciones de crecimiento y desarrollo, movilidad) y poblacional (reclutamiento, reproducción, depredación).

Ciertas especies de peces poseen características especiales que favorecen su uso como modelo de estudio, pues presentan ciclos de vida cortos, pueden producir huevos en grandes cantidades o con propiedades *ad hoc* para fertilizarse externamente y son transparentes, lo que facilita el monitoreo visual del desarrollo embrionario.

Los estadios de vida temprana son más sensibles que los de los adultos y representan un periodo crítico en el ciclo de vida de un organismo; por ello, cualquier agente químico puede impactar dramáticamente en la supervivencia y recluta-



miento de sus poblaciones. A diferencia de los organismos más grandes y activamente nadadores, las larvas son parte del plancton y carecen de la capacidad de sustraerse a las aguas contaminadas.

Mediante estrategias experimentales, pueden desarrollarse protocolos enfocados a

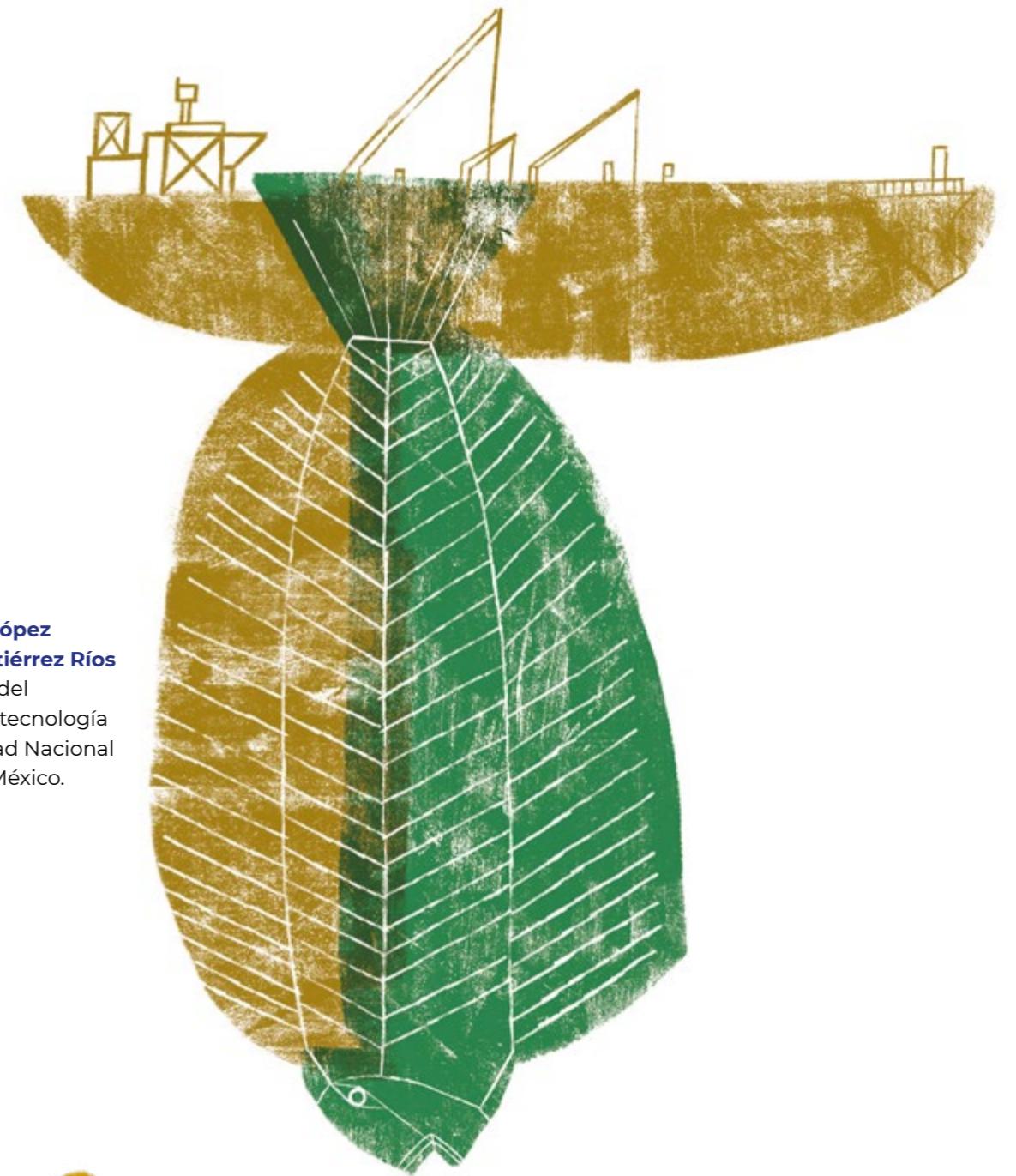
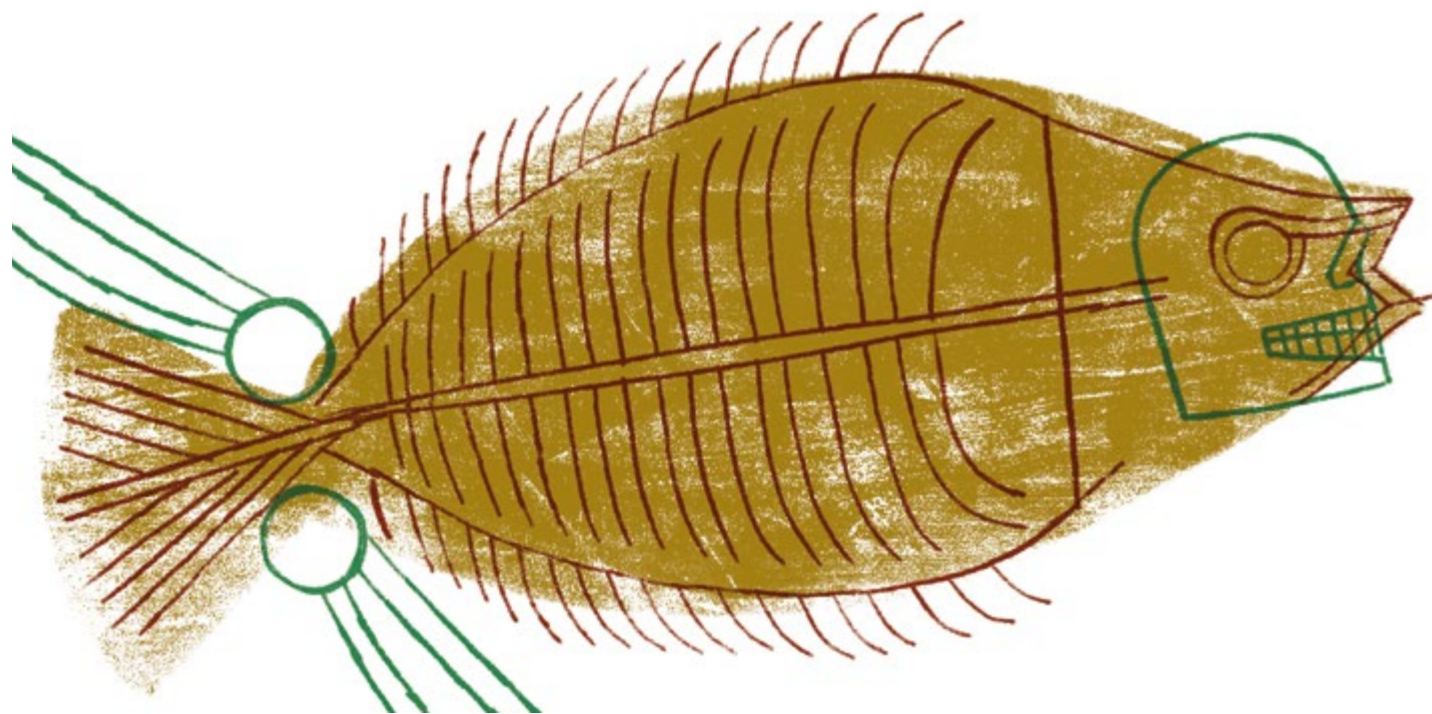
la escala deseada para evaluar una o más variables de interés, ante la respuesta de uno o más estresores, ya que, si bien en el medio natural se pueden establecer relaciones causa/efecto, es mucho más difícil detectar un solo agente causal. Estos estudios en forma de bioensayos son una pieza clave para comprender las implicaciones de un accidente con petróleo y permiten plantear estrategias de monitoreo y detección temprana de las exposiciones (Figura 2).

En los bioensayos realizados por nuestro grupo de trabajo, utilizando peces expuestos a contaminantes de petróleo, se encontraron efectos asociados a esa exposición, tales como: deformidades en embriones; alteraciones en genes relacionados con el sistema inmune, con los mecanismos de reparación de daño al ADN y con procesos vinculados al cáncer; cambios en las células de órganos involucrados en procesos de detoxi-

ficación (hígado, riñones, bazo y branquias); alteraciones en la microbiota intestinal, y aumento en las concentraciones de metabolitos de degradación de hidrocarburos en la bilis, entre otros.

Así, al utilizar como herramienta de trabajo los experimentos en condiciones controladas, buscamos conocer los posibles escenarios que pueden enfrentar las especies acuáticas ante un derrame, ya sea en el momento inmediato,

cuando las concentraciones de los contaminantes son altas en un tiempo de exposición muy corto, o a mediano y largo plazos, cuando las concentraciones son más bajas, pero durante tiempos prolongados de exposición.



Liliana Pardo López
Rosa María Gutiérrez Ríos
Investigadoras del
Instituto de Biotecnología
de la Universidad Nacional
Autónoma de México.



La riqueza de la diversidad bacteriana



Las bacterias marinas han demostrado ser moduladoras de la biogeoquímica del planeta; conocer su composición ha permitido identificar especies clave en estos procesos, así como a las moléculas responsables. Más allá de esto, las bacterias marinas tienen un arsenal genético capaz de producir compuestos químicos y proteínas de interés industrial, además de farmacológico, útiles para la biorremediación de lugares impactados por la actividad humana.

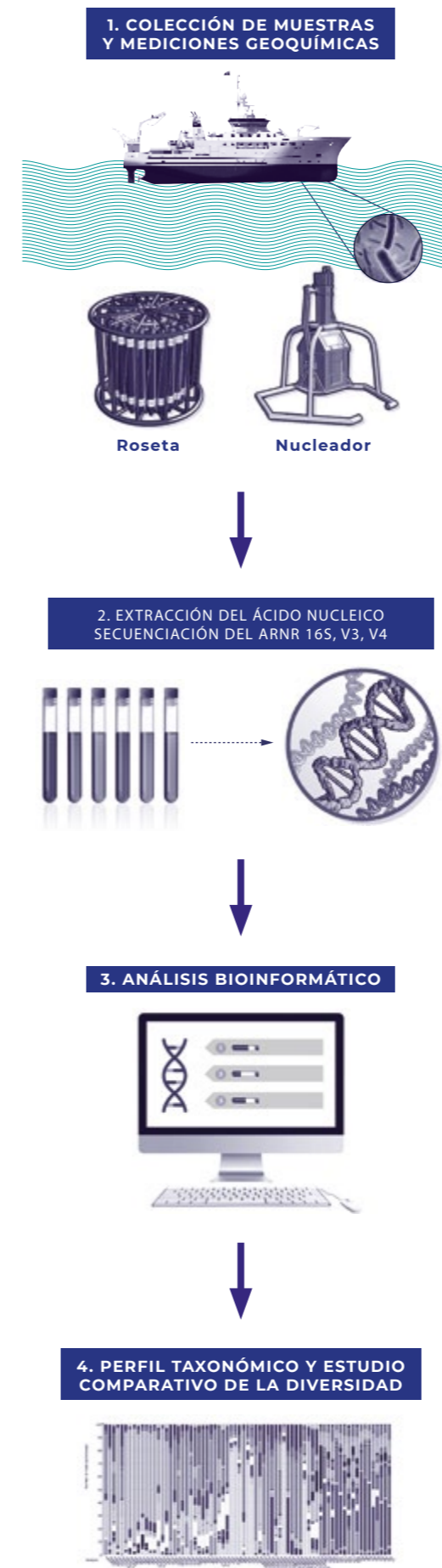
La diversidad bacteriana de los mares del territorio mexicano ha sido poco explorada. Por ello, estudiar estos ecosistemas con el propósito de conocer su composición, distribución y características ayudará a establecer estrategias de regulación y explotación.

Recientemente, el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) realizó la primera línea base de bacterias del golfo, a raíz de lo cual encontró microorganismos de interés socioeconómico y otros con capacidad degradadora de hidrocarburos del petróleo. Los hallazgos obtenidos en 16 campañas oceanográficas (de marzo de 2015 a septiembre de 2018) integran el *Atlas de bacterias*, el cual constituye un esfuerzo de tres instituciones públicas que forman parte del CIGOM: el Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, y el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), Unidad Mérida.

Hallazgos en aguas someras y profundas

Con el fin de conocer la diversidad bacteriana, se exploraron aguas someras y profundas, estos últimos sedimentos de hasta 3 500 metros de profundidad, desde Tamaulipas hasta la península de Yucatán. De las muestras colectadas, se obtuvo el material genético (ADN) de las bacterias que

Figura 1
Colectas y obtención de la diversidad microbiana del golfo de México. Recopilación de datos y de flujo de trabajo para realizar los análisis de la diversidad bacteriana con métodos metagenómicos. Gráfico: CIGOM-Conacyt.



viven en la zona y se clasificaron en función de su cercanía filogenética, es decir, del parecido que tiene una secuencia de ADN con otras ya clasificadas, para así saber el tipo de bacteria observada (Figura 1).

¿Por qué estudiar de esta forma a los microorganismos del golfo de México? Porque muchos de ellos viven en escenarios difíciles o imposibles de cultivar aun con los avances actuales, ya que sus condiciones de vida no pueden reproducirse en un laboratorio. Así, la información obtenida del ADN ambiental, mediante la técnica conocida como metagenómica, da una buena idea de las comunidades microbianas que habitan en distintos ambientes. Una descripción más amplia de este proceso puede consultarse en el *Atlas de bacterias* (<https://atlasigom.cicese.mx/es/dataset/libro-atlas-tomo-10>) (Figura 2).

Bacterias amigables con el ambiente

Lo descubierto en las zonas estudiadas es muy interesante; se descubrieron 450 géneros de bacterias que se repetían en todos los sedimentos colectados y a esto le llamamos el *núcleo* de las bacterias del golfo de México; posteriormente, las comparamos con bacterias presentes en otros mares del planeta y observamos que había bacterias que sólo existen en este golfo. Hallamos también conjuntos de bacterias que han desarrollado estrategias para convertir los hidrocarburos del petróleo (compuestos formados principalmente por átomos de carbono e hidrógeno) en compuestos útiles para su crecimiento y, en muchos casos, degradarlos hasta obtener compuestos amigables con el ambiente.

Lo anterior fue posible gracias al uso de técnicas de frontera como la secuenciación del ADN «de escopeta». De los fragmentos de ADN obtenidos por esta técnica pudimos reconstruir los genomas de muchas de las bacterias

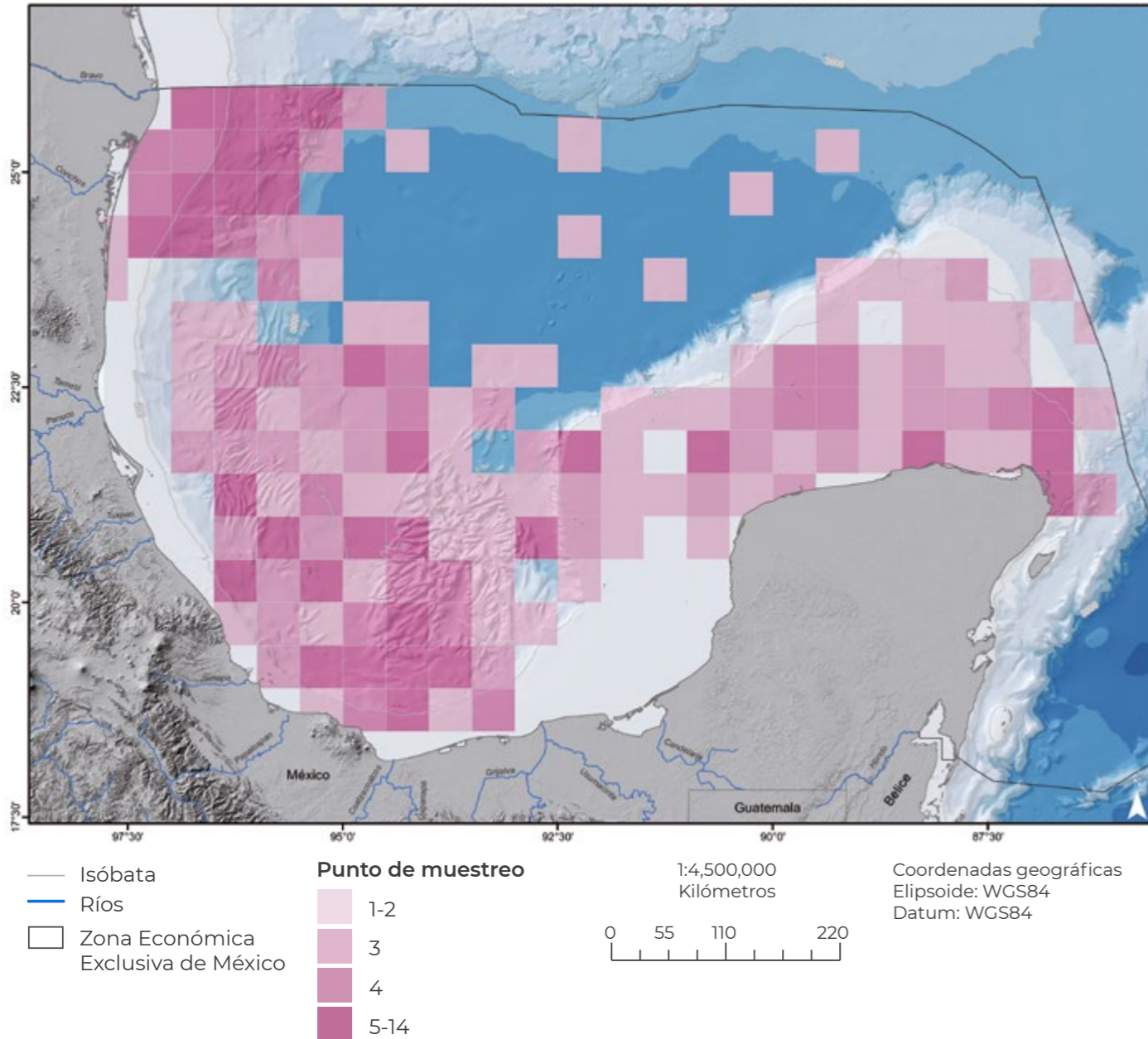


Figura 2
 Sitios muestreados en las campañas CIGOM. Muestras realizadas de marzo de 2015 a septiembre de 2017. Los datos fueron agrupados en una cuadrícula, en celdas de 0,5 grados de latitud x 0,5 grados de longitud. Mapa: CIGOM (Rodríguez-Salazar et al., 2021).

presentes en el agua y los sedimentos. Ahora tenemos una idea más clara de los genes que codifican para las enzimas involucradas en la degradación del petróleo, lo cual nos ayudará en el futuro para el uso biotecnológico de enzimas como dioxigenasas y esterases (patentes en trámite). Las dioxigenasas ayudan a romper anillos aromáticos de compuestos derivados de hidrocarburos y las esterases contribuyen a romper enlaces en compuestos plásticos derivados de hidrocarburos y moléculas de lípidos.



El hallazgo de esta abundancia de bacterias degradadoras de hidrocarburos nos habla de la historia del golfo de México: corrobora que en su Zona Económica Exclusiva (ZEE) existen de manera natural emanaciones de petróleo crudo y producción de gases que han permitido a las bacterias crear estrategias para adaptarse a estos ambientes. La capacidad biorremediadora de las bacterias del golfo de México se ha puesto a prueba en dos derrames: el de la plataforma Ixtoc-I en aguas mexicanas, en 1979, y el mayormente conocido como el pozo de Macondo, Deep Water Horizon (DWH), en 2010; en ambos casos, las bacterias limpiaron parte de los productos del derrame.

Una de las contribuciones importantes del CIGOM ha sido el conocimiento que ahora tenemos de las bacterias del golfo, como su capacidad de degradar el petróleo. En un futuro cercano y con un sólido proyecto de investigación, se podrán proponer programas de contingencia ante derrames que aceleren el proceso de degradación y limpien los mares y arenas costeras de una forma amigable con el ambiente.

Referencias

Rodríguez-Salazar, J., Loza, A., Ornelas-Ocampo, K., Gutiérrez-Ríos, R. M. y Pardo-López, L. (2021). Bacteria From the Southern Gulf of Mexico: Baseline, Diversity, Hydrocarbon-Degrading Potential and Future Applications. *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-23. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.625477>

Van Beilen, J. B., Panke, S., Lucchini, S., Franchini, A. G., Röthlisberger, M. y Witholt, B. (2001). Analysis of *Pseudomonas putida* alkane-degradation gene clusters and flanking insertion sequences: evolution and regulation of the alk genes. *Microbiology*, 147(6), 1621-1630. <https://doi.org/10.1099/00221287-147-6-1621>

¿Es vulnerable la biota marina a la exposición a petróleo?



Daniel Pech
Investigador del Laboratorio
de Biodiversidad Marina y Cambio
Climático en el Colegio de la
Frontera Sur.

Cuando ocurren accidentes con derrames de petróleo al ambiente marino, una de las grandes preguntas es: ¿cuánto daño causa el petróleo a la biota y al ecosistema? La respuesta aceptada y generalizada se resume en: causa pérdidas de especies marinas y un gran daño al ecosistema. Así lo confirman las imágenes de aves y mamíferos marinos cubiertos de petróleo difundidas en medios electrónicos e impresos. Sin embargo, evaluar el daño y la vulnerabilidad de la biota y del ecosistema marino requiere de mayores evidencias basadas en mediciones y observaciones de campo y de laboratorio que permitan comprender el tipo, la magnitud y la intensidad del daño.

En el golfo de México, la estrategia de evaluación del ecosistema marino después de un derrame de petróleo consiste en mediciones de campo para detectar la presencia de contaminantes en la columna de agua, sedimentos y tejidos de peces, así como para estimar la abundancia y la diversidad de la biota que habita la superficie marina (plancton), la columna de agua (peces) y el fondo marino (invertebrados bentónicos).

Hallar respuestas con experimentos controlados

Esta estrategia ha sido de gran valor para estimar las posibles afectaciones sobre la biota y el ecosistema marino; pero, a pesar de toda la información, persisten dos dudas: una, ¿cuáles son los efectos directos del derrame de petróleo?, y dos, ¿es vulnerable la biota marina a este tipo de

derrames? Para hallar respuestas, es necesario realizar experimentos controlados de exposición al petróleo con organismos o comunidades modelo para obtener información directa de la respuesta fisiológica y ecológica que nos sea útil, para interpretar y evaluar con mayor precisión lo observado en las mediciones de campo.

El proyecto Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas, geoquímicas, ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del golfo de México, permitió por primera vez en nuestro país realizar experimentos de exposición al petróleo. Éstos fueron diseñados para evaluar la vulnerabilidad de la biota marina ante la exposición de petróleo crudo ligero extraído del campo Ixtoc-I de la sonda de Campeche.

La primera serie de experimentos en condiciones controladas permitió evaluar la respuesta del pez corvina roja a diferentes concentraciones de petróleo crudo, así como la del pez lenguado expuesto a diferentes concentraciones de la fracción soluble del petróleo en agua, conocida por sus siglas en inglés como WAF (Water Associated Fraction). El petróleo ligero es altamente volátil con tasas de evaporación de entre 60 y 80 % al ser expuesto a la intemperie en las primeras 48 horas. Los componentes que no se evaporan y poseen el mayor potencial de causar daño a la biota, se mezclan con el agua marina y persisten en el medio por varios años.

La segunda serie de experimentos se realizó bajo condiciones semicontroladas de mesocos-



mos, es decir, en un sistema experimental semi-controlado que simula las condiciones naturales del ecosistema y bajo las cuales se evaluó la vulnerabilidad de la comunidad planctónica.

La vulnerabilidad depende de varios factores

Los resultados de estos experimentos han permitido tener evidencias frente al gran cuestionamiento: ¿es vulnerable la biota marina ante la exposición a petróleo? Sí. La biota es vulnerable ante la exposición de petróleo, pero esta vulnerabilidad depende del tiempo de exposición, de la concentración de petróleo y de la respuesta fisiológica de las especies.

Tanto la corvina roja como el lenguado mostraron una afectación baja al inicio del experimento, sin importar la concentración del petróleo. Esto significa que en los primeros días el impacto del petróleo sólo causó daños leves, posiblemente reversibles, a nivel celular y de tejidos sin comprometer la función fisiológica y ecológica de los peces. Al final del experimento, la corvina roja mostró daño celular y de tejidos que afectó la funcionalidad del organismo, lo cual se clasifica como una vulnerabilidad alta. Por el contrario, el lenguado mostró una baja vulnerabilidad, lo que indicó que el pez se adaptó a las condiciones existentes en su entorno.

La vulnerabilidad de la comunidad del plancton fue baja al inicio del experimento con respuestas similares a las de las comunidades que

no se vieron expuestas al petróleo. El daño aumentó a niveles medios a la mitad del experimento, cuando se observó una disminución de la diversidad y la abundancia del fitoplancton. Hacia el final del experimento, la vulnerabilidad del plancton fue baja, pero con un aumento significativo de bacterias que se alimentan de los compuestos de hidrocarburos (hidrocarbonoclastas). Lo anterior muestra la importancia de este grupo de bacterias para la recuperación de la comunidad de plancton expuesta a petróleo.

Sí, pero se defienden

La biota y la comunidad marina son vulnerables ante la exposición a petróleo, pero también cuentan con mecanismos fisiológicos y ecológicos

que permiten su recuperación y disminuyen la afectación. No obstante, ante derrames de larga duración e intensidad, la vulnerabilidad de la biota y de los organismos que se hallan en la misma zona de la mancha del petróleo puede ser muy alta y sin punto de retorno.

Para mayor detalle de los experimentos consultar el siguiente texto:

Aguirre Macedo, P., Pérez Brunius y Saldaña Ruiz, L. E. (2020). Vulnerabilidad ecológica del golfo de México ante derrames de gran escala (caps. 8 y 9). CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4527457>

Moluscos del Cinturón Plegado Perdido



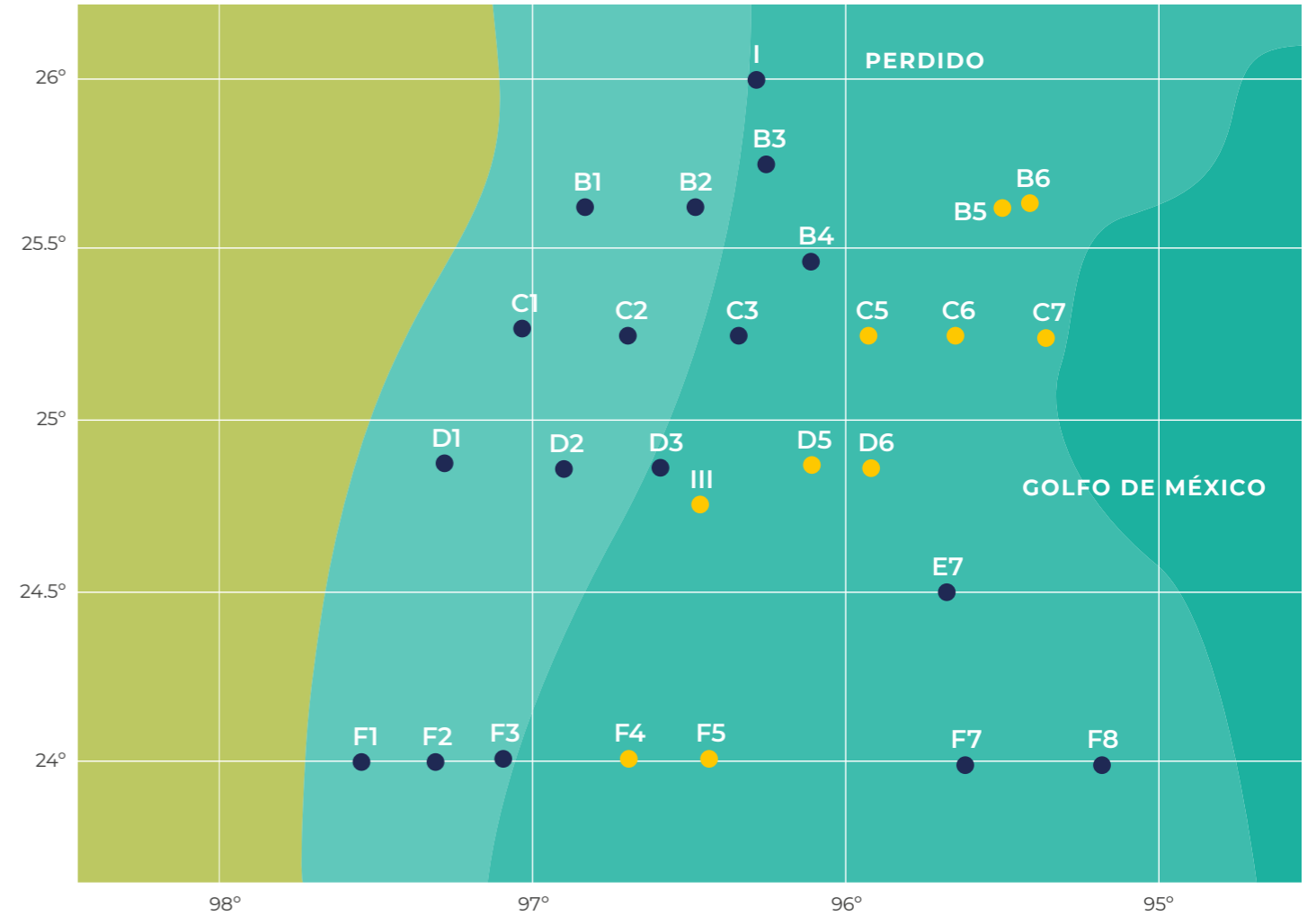
Alicia González
Daniel Torruco
Alan Torruco

Investigadora e investigadores del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.



El estudio de la interacción de las comunidades bentónicas marinas y de sus patrones de distribución, abundancia y composición requiere de la capacidad para definir, de manera comprensible, procesos y características de los principales constituyentes de esas comunidades. Para aproximarnos a estos patrones, en las siguientes líneas se muestra un ejemplo con los moluscos, ya que éstos forman grupos de la mayor incidencia en la megafauna. Los resultados aquí compartidos provienen de cuatro cruceros en puntos selectos del golfo de México.

Desde hace décadas, diversos estudios indican que las comunidades bentónicas han sufrido cambios en la disminución de biomasa, diversidad y composición de especies, con casos de sucesión. La investigación ecológica en el golfo de México ha enfatizado que las tormentas de invierno y esco-



- Con red barrera
- Sin red barrera

Figura 1
Sitios de muestreo.
Mapa: CIGOM-Conacyt.

rrerías de ríos son los procesos físicos más importantes que influyen en la estructura de la comunidad bentónica; sin embargo, en el Cinturón Plegado Perdido, la sucesión es imperceptible, aunque sí hay cambios en la proporción de dominancia de muchas especies. Esto ha implicado realizar una descripción más detallada de los diferentes grupos de la megafauna, para de esta manera tratar de discernir un patrón congruente con los cambios de los descriptores ecológicos, tanto espacial como temporalmente.

¿Cómo sabemos lo que sabemos?

La metodología utilizada en el proceso de descripción fue la siguiente: obtención de las muestras mediante arrastres de fondo con red de trineo, por aproximadamente 30' de duración y cubriendo alrededor de una milla náutica. Los sitios se muestran en la figura 1. Las muestras se separaron, pesaron y congelaron para su identificación, cuantificación y medición individual en el laboratorio. También se elaboraron matrices de densidad para su análisis estadístico.

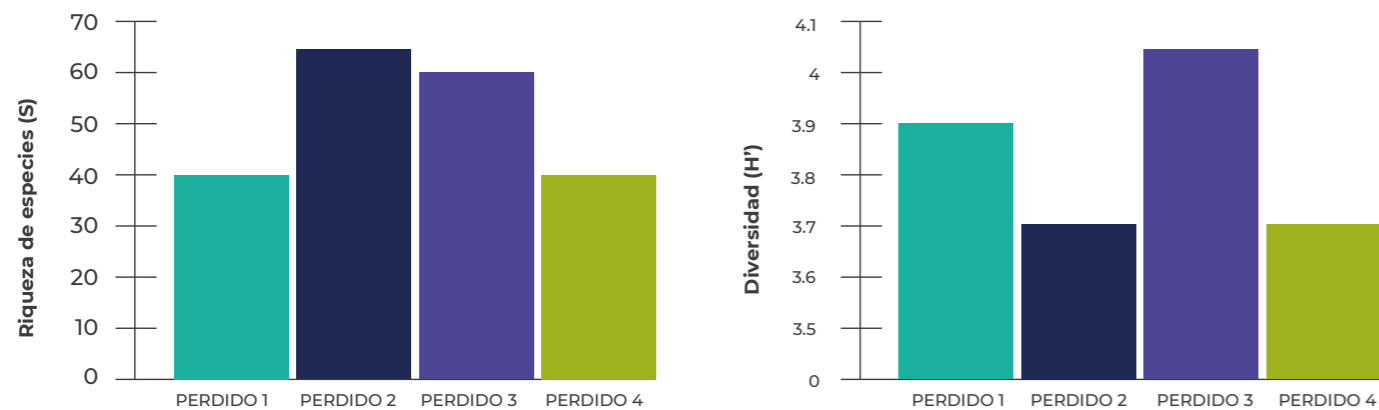


Figura 2
Riqueza y diversidad de especies presente en el crucero.
Gráfico: CIGOM-Conacyt.

co, lo que consistió en la obtención de la riqueza de especies, la diversidad ecológica y la descripción de la distribución espacial de estos parámetros comunitarios, junto con los valores de abundancia y biomasa en relación con los factores del ambiente y de algunos metales e hidrocarburos, mediante un análisis canónico.

En total, se realizaron 94 arrastres cubriendo un área de 844 675 m², durante 43 horas y un intervalo de profundidad desde los 45 hasta los 3600 m, lo cual representa un récord para este tipo de estudios en el golfo de México. En cuanto a la abundancia y la biomasa, en el último crucero registramos los valores más altos.

La riqueza de especies y la diversidad están representadas en la figura

2: el valor más alto de la riqueza corresponde al segundo crucero, donde se presentó una gran cantidad de organismos de mayor tamaño, ya que este crucero alcanzó el mayor valor de biomasa; mientras que el valor de diversidad más alto se obtuvo en el tercer crucero, donde la relación entre el número de especies y su abundancia relativa fue más consistente.

Sin embargo, la dominancia estuvo representada de manera total por doce especies, según puede observarse en la figura 3, donde algunas fueron dominantes en varios cruceros: *Mercenaria campechiensis* fue la más dominante en tres cruceros, su dominancia varió de 16 a 30 %.

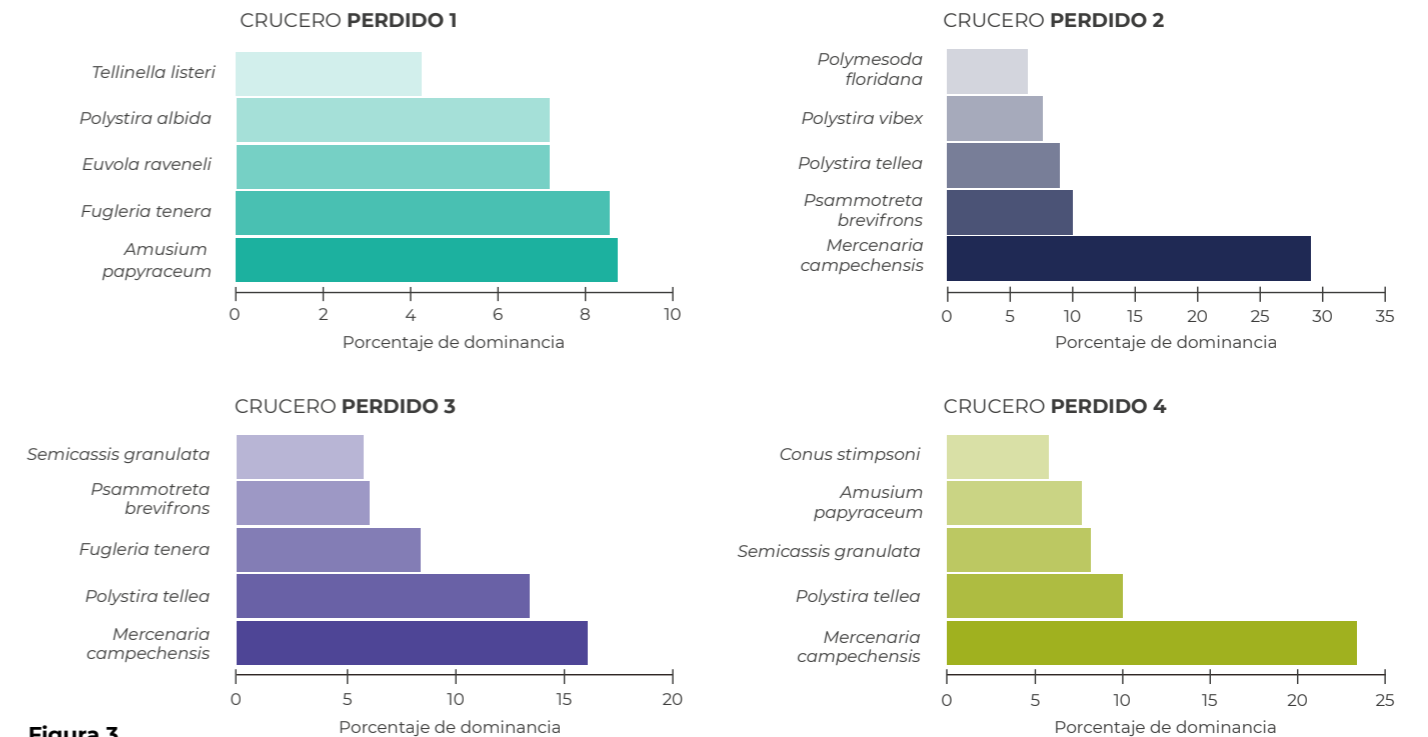


Figura 3
Especies dominantes.
Gráfico: CIGOM-Conacyt.

Diversidad y profundidad

Contrariamente a las hipótesis tempranas de disminución de la diversidad con profundidad, los modelos actuales de diversidad en aguas profundas asumen una curva unimodal con altos valores de diversidad en la vertiente continental (200-2000 m de profundidad) o aumento continental (2000-4000 m) con valores más bajos en hábitats más profundos. En nuestro caso, coincidimos con esos altos valores que aún están influidos por la vertiente continental en esta región.

La distribución espacial de los descriptores comunitarios se presenta muy cercana a las arenas muy finas y medias, así como a la temperatura, materia orgánica y carbono total (Fi-

gura 4). Parece que el ambiente físico también es determinante para las tasas de alimentación y la competencia de los moluscos, pero también es posible que varios factores puedan funcionar concatenados en un momento dado.

Por otro lado, la relación entre las variables climáticas de gran escala y locales puede cambiar con el tiempo. No se presenta relación cercana con la biomasa o abundancia de peces; no obstante, otros grupos de la megafauna que no fueron considerados podrían acercarse a esta distribución espacial de descriptores, al interactuar como presas o depredadores de esta fauna.

Las especies identificadas son consideradas organismos con grandes ca-

Crustáceos de la Plataforma de Yucatán

Alicia González
Daniel Torruco
Alan Torruco
 Investigadora e investigadores
 del Centro de Investigación
 y de Estudios Avanzados del Instituto
 Politécnico Nacional.

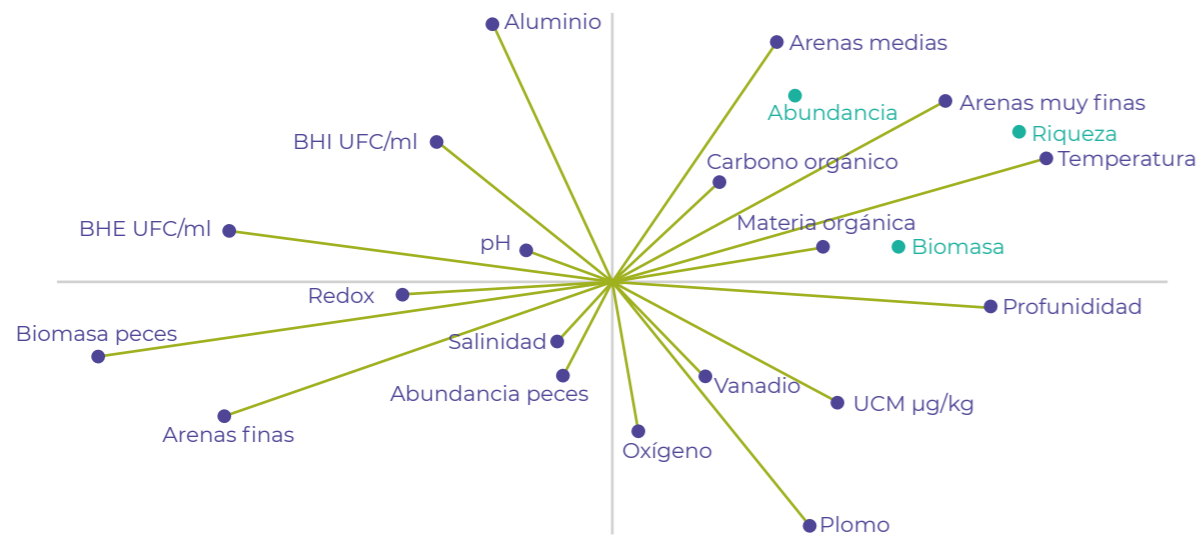


Figura 4
 Distribución espacial
 de descriptores comunitarios.
 Gráfico: CIGOM-Conacyt.

pacidades de adaptación y es posible que su dominancia esté regulada por el espectro trófico y por el favorecimiento de las condiciones del ambiente. Las especies dominantes son principalmente detritívoras y filtradoras, como lo han reportado otros autores. Esto es un intento por explicar los patrones identificados en la naturaleza de parche del hábitat que se presenta en el fondo, pues se mantienen mecanismos causales de tales patrones.

Esta fracción de los invertebrados de la megafauna es extremadamente compleja, ya que los diferentes taxones muestran especialización hacia el hábitat, lo que conlleva la expresión de otras variables, como la presencia de etapas de reposo en ciclos de vida complejos y el tamaño del cuerpo.



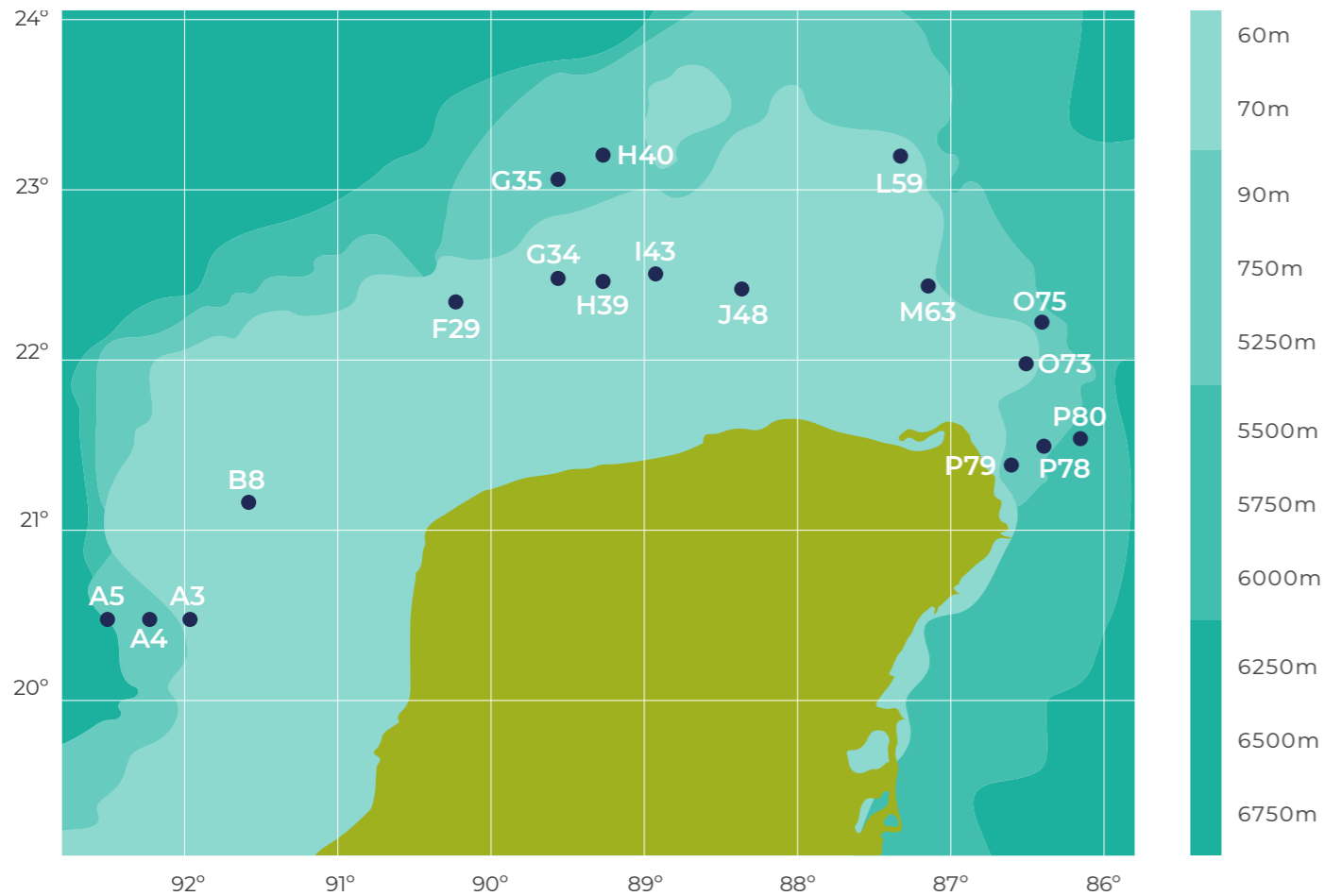


Figura 1
Sitios de muestreo.
Mapa: CIGOM-Conacyt.

En los sistemas marinos hay factores estresantes que cambian progresivamente la estructura de las comunidades bentónicas y que afectan el funcionamiento del ecosistema. Por ejemplo, tenemos el ciclo biogeoquímico, la mezcla de sedimentos, las relaciones interespecíficas, etc. Los índices, basados en rasgos funcionales, son posiblemente una herramienta prometedora en cuanto al cumplimiento de las demandas sociales, políticas y ambientales.

Como grupo, los invertebrados de la megafauna son heterogéneos en diversos aspectos e incluyen las fases de sus ciclos de vida, su motilidad, su tamaño, su permanencia en sus hábitats y su comportamiento. Entre éstos, el grupo de los crustáceos es de los más afectados por las actividades antropogénicas: pesca, minería, vertimiento de desechos, extracción de hidrocarburos (incluido el gas),

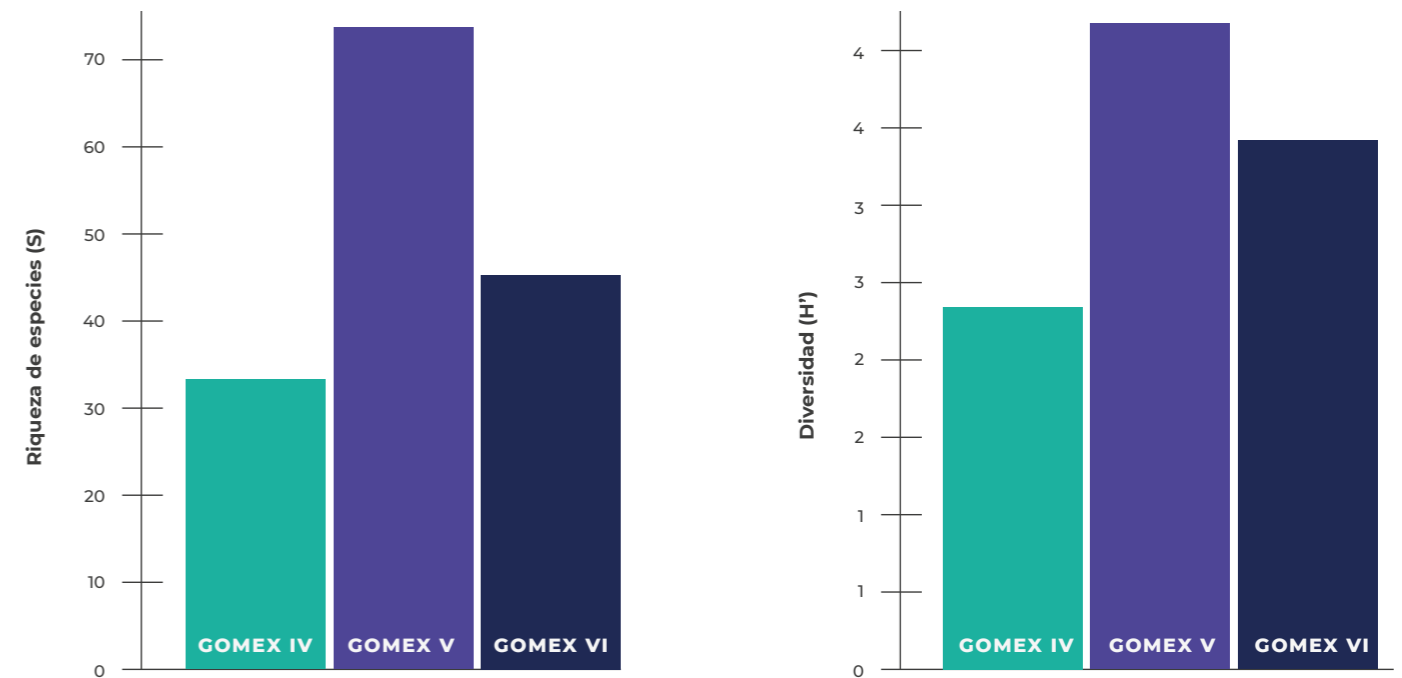


Figura 2
Distribución de riqueza y diversidad en los cruceros estudiados (Gomex IV, V y VI).
Gráfico: CIGOM-Conacyt.

entre otras. Por ello es indispensable tener un registro que sirva como línea base para diferenciar estos efectos, ocasionados por el hombre, de los ocasionados por la naturaleza, sobre todo por la constante expansión de las industrias de extracción de hidrocarburos y la pesca.

El hacer estadístico, en laboratorio y en campo

La metodología de estudios de campo, de laboratorio y estadísticos se resume en lo siguiente: para la obtención de la fauna, se utilizaron redes de puerta comerciales en tres cruceros oceanográficos (Gomex IV, V y VI), cuyos sitios de muestreo se presentan en la figura 1. Los organismos fueron contados, pesados e identificados y con estos datos (estandarizados a org/ha) se elaboraron matrices de especie-densidad (abundancia y biomasa) para cada estación.

Las matrices fueron sometidas a los siguientes procesos: diversidad ecológica (H'), a través del índice de Shannon-Wiener; dominancia, con el índice del valor de importancia para cada especie en la comunidad; y para

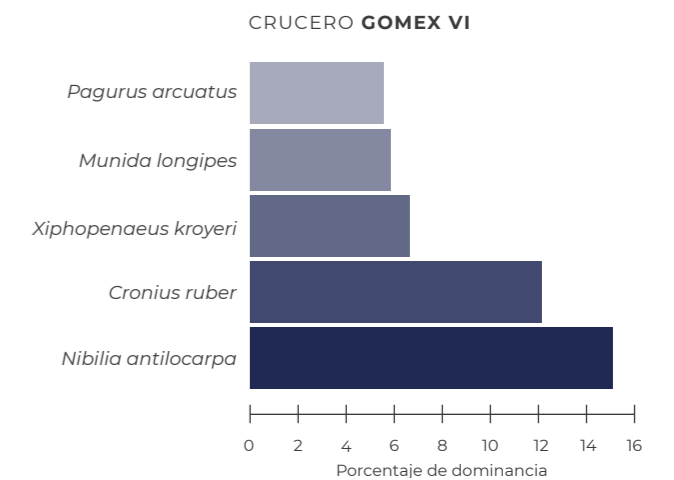
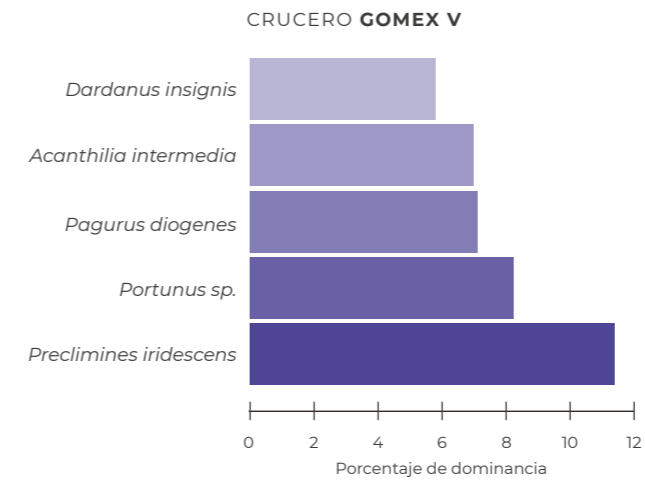
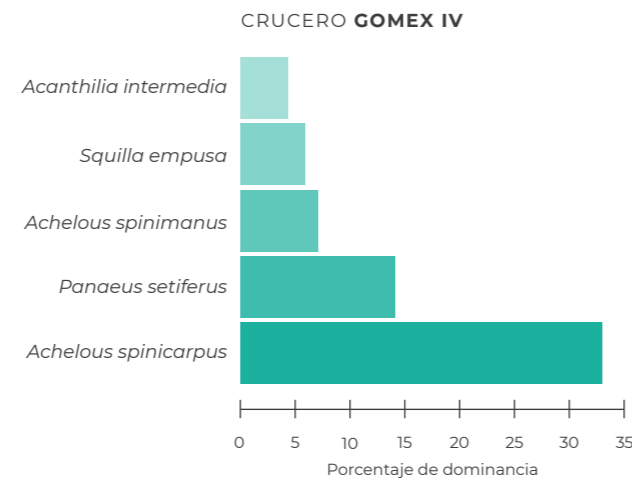


Figura 3
Dominancia de especies en los cruceros.
Gráfico: CIGOM-Conacyt.

definir el grado de relación entre las variables registradas con los descriptores comunitarios de los crustáceos, se realizó un análisis multivariado canónico, a fin de obtener las variables ambientales con mayor influencia en los descriptores comunitarios de este grupo.

El análisis fue conducido bajo la siguiente hipótesis: la riqueza de especies y la densidad de los diferentes grupos no presentan variaciones en las distintas zonas muestreadas. Si no es aceptada, entonces las variaciones pueden estar relacionadas con la abundancia o biomasa de algunos grupos que canalizan los recursos más eficientemente, dando una relación de dependencia inter e intraespecífica, así como otra de diferencias en la complejidad del hábitat.

Los valores más altos de los cuatro descriptores utilizados, es decir, abundancia, biomasa, riqueza de especies y diversidad, se presentaron en el segundo crucero (5198 organismos, 70.7 kg, 74 especies y 4.11 bits·ind⁻¹, respectivamente) y, los más bajos, en el primer crucero (Figura 2).

La dominancia de las cinco especies de mayor valor suma para el primer crucero 38.26 % del total de la comunidad; para el segundo, 61.98 % y, para el tercero, 45.45 %. Ninguna especie dominó durante el trayecto de los tres cruceros, lo cual significa una sustitución de especies muy dinámica (Figura 3).

De evidencia en evidencia

En el esquema de la disposición espacial que se presentó en relación con el análisis canónico, los descriptores de los crustáceos (riqueza, biomasa y abundancia) mostraron una cercanía a la abundancia y biomasa de peces (posibles depredadores), al oxígeno disuelto y al porcentaje de grava (Figura 4). Por un lado, deja en evidencia las fuertes interacciones entre comunidades y, por otro, las condiciones de los hábitats; para este caso, el primero y segundo eje son los más importantes, ya que explican 54.12 % de la varianza, lo cual indica que el sureste del golfo de México se encuentra en buena condición ambiental, con la ausencia de algún signo de deterioro ocasionado por factores como contaminación de hidrocarburos u otros contaminantes.

Para estos cruceros no hay evidencias de procesos estructuradores que puedan originarse en él, pero sí una fuerte dependencia respecto a la abundancia y biomasa de otro grupo (peces) de la megafauna. El componente arrecifal, que es común en una plataforma carbonatada tropical, está presente con algunas especies que se distribuyen, preferentemente, en ambientes carbonatados: *Porcellana sayana*, *Moreiradromia antillensis*, *Cala ppa sulcata*, *Hepatus epheliticus* y *Libinia dubia*, con abundancias y presencias diferentes para cada crucero.

En relación con la diversidad, se alcanzaron valores altos, alrededor de los 3.5 bits-ind-1, correspondientes a plataformas con esta sedimentología y con arrecifes cercanos, como en el caso de Florida. Si pensamos que la diversidad es proporcional al número de relaciones que se establecen entre los elementos de la comunidad, los valores encontrados muestran grandes relaciones interespecíficas que se dan en un ambiente cercano a arrecifes desarrollados; por otra parte, la profundidad fue somera en la mayoría de las estaciones. Lo anterior está en contraposición con lo mencionado por otros autores, quienes señalan que la comunidad béntica de la zona somera es de las menos organizadas, si bien es posible que así suceda en plataformas con otra sedimentología.

Figura 4
Disposición espacial
de los descriptores de crustáceos.
Gráfico: CIGOM-Conacyt.

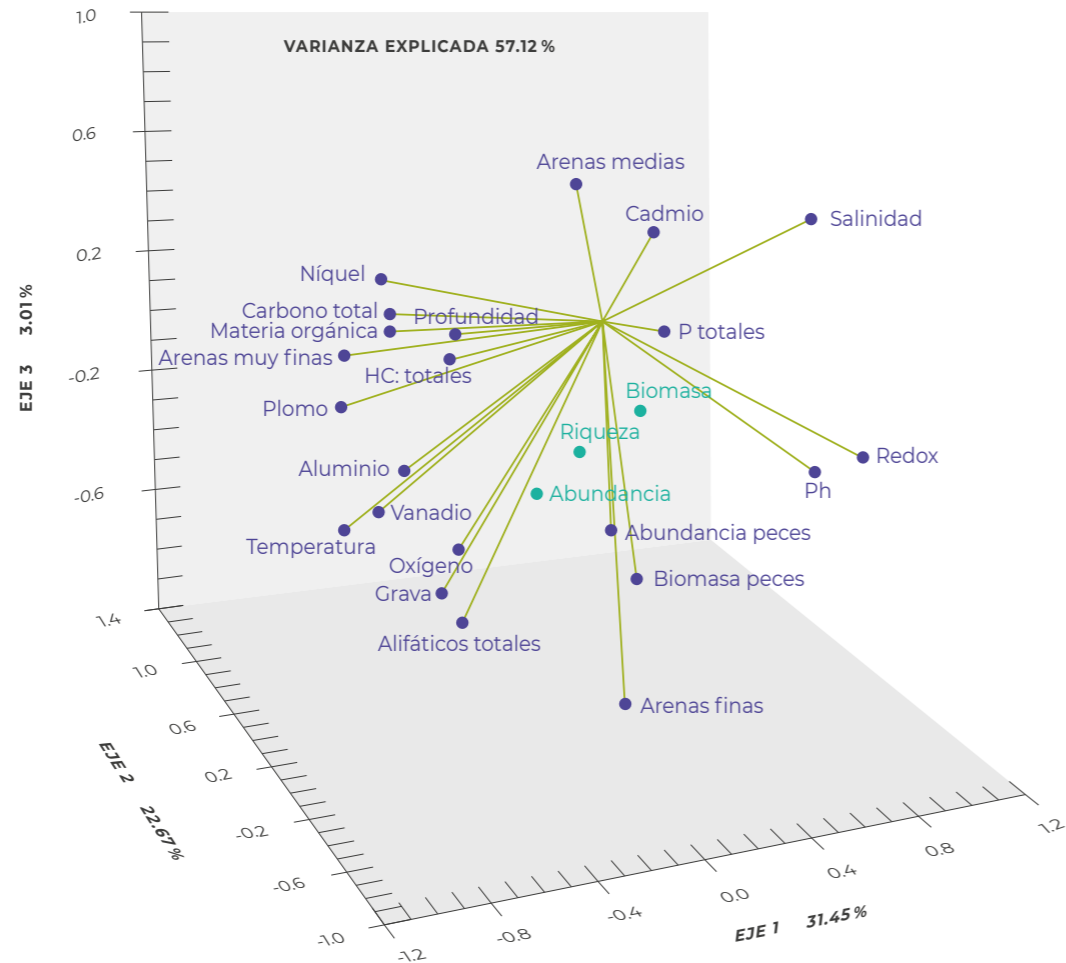


Imagen aérea de la costa
de Sisal, Yucatán.
Fotografía: Esteban Dupinet (p. 53).

Dime dónde lo has visto

Óscar Sosa Nishizaki
Zurisaday Ramírez Mendoza
Investigador e investigadora
del Centro de Investigación
Científica y de Educación Superior
de Ensenada.



y te diré dónde podría estar





Los tiburones son parte de la investigación de la megafauna marina en el golfo de México. Fotografía: Claudio Contreras Koob.

En cualquier novela policiaca, cuando el detective busca a alguno de los personajes, por ejemplo, al asesino, siempre comienza preguntando ¿dónde lo han visto? y, a partir de esa pista, utilizando la lógica en el estilo de Sherlock Holmes, analiza la variedad de lugares que frecuenta el personaje buscado. Después, haciendo algunas deducciones respecto de los sitios donde fue visto, el detective nos lleva hacia el asesino. «Elemental, mi querido Watson», diría Sherlock al disipar las dudas de su fiel acompañante y señalar la guarida más probable del antagonista.

Del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

Durante la conformación del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM), el grupo de trabajo

del Laboratorio de Ecología Pesquera del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) recibió la invitación a sumarse para contribuir en la creación de la línea base ambiental de este mar mexicano. La expectativa era que aportáramos información relacionada con las especies de megafauna marina que habitan el Golfo, incluyendo los cetáceos, es decir, ballenas y delfines; tiburones; peces pelágicos mayores: atunes; pez espada, y picudos.

Así pues, comenzamos con la pregunta elemental de cualquier detective ecológico: «¿dónde se distribuye cada una de las especies a estudiar en esta porción del océano?» Nuestra larga respuesta se encuentra descrita en los tomos VIII y XIX del *Atlas de Línea Base Ambiental del golfo de México* (<https://atlasigom.cicese.mx/>). En las siguientes líneas describiremos cómo logramos responder a la pregunta planteada.

Modelos de nicho ecológico aplicados a cetáceos y peces pelágicos mayores

Los ecólogos marinos aplicamos una gran diversidad de metodologías para investigar dónde se distribuye una especie. Por ejemplo, para la megafauna marina algunos métodos incluyen censos a partir de observaciones hechas desde embarcaciones o aviones, experimentos de marcaje con tecnología microelectrónica asociada a rastreos con satélites y técnicas que



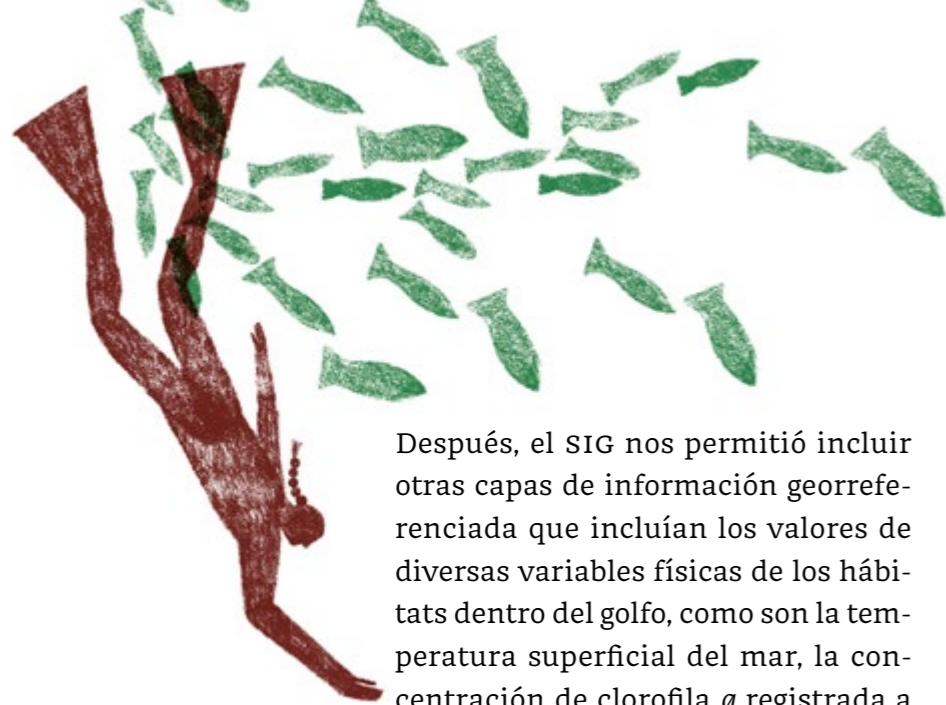
analizan el genoma para entender la estructura poblacional. Pero estas maneras de investigar pueden resultar demasiado costosas, cubrir un área muy pequeña o, sobre todo, requerir

más años de los disponibles para responder.

Por ello, decidimos utilizar una metodología que nos permitiera aprovechar la información ya existente y optamos por los modelos de nicho ecológico. Estos modelos son herramientas estadísticas que sólo requieren de información referente a la presencia de las especies y a una serie de variables ambientales para predecir su distribución potencial. Es decir, caracterizar su sitio dentro de un ecosistema a partir de sus requerimientos ecológicos, los cuales permiten pronosticar áreas con condiciones idóneas para la presencia de las especies, incluso, en sitios no muestreados.

¿Cómo lo hicimos?

Utilizamos un Sistema de Información Geográfica (SIG) que nos permitió construir mapas del golfo de México que incluían datos georreferenciados de los lugares donde se han observado cada una de las especies.



Después, el SIG nos permitió incluir otras capas de información georreferenciada que incluían los valores de diversas variables físicas de los hábitats dentro del golfo, como son la temperatura superficial del mar, la concentración de clorofila *a* registrada a través de satélites, la profundidad o batimetría y otras variables más.

Para deducir los lugares idóneos en cada especie se utilizó el algoritmo de máxima entropía (MaxEnt), que relaciona estadísticamente los valores de las variables ambientales con los sitios donde han sido observadas las especies. La lógica es que cada una ocupa un lugar, un nicho, en el hábitat que está definido por los intervalos de valores de, por ejemplo, las temperaturas que le favorecen. MaxEnt sistematiza todos los valores de intervalos y, después de un proceso estadístico, predice dónde podría estar la especie considerando todas las características ambientales. «Elemental», exclamaría Sherlock Holmes.

Para el caso de las especies de megafauna marina que estudiamos, la distribución general es ampliamente conocida a nivel de océanos; sin embargo, para saber con más detalle su distribución en algunas regiones, por ejemplo, en la parte sur del golfo de México, son pocos los estudios que transmiten esta información. Princi-

palmente, lo que sabemos es dónde han sido vistas o, en el caso de varias especies de peces, dónde las han pescado. Pero esta información es escasa o inaccesible. Con estos mapas, hemos ampliado el conocimiento acerca de cuáles son los sitios con mayor idoneidad ambiental para estas especies, señalando el lugar más probable para encontrar al personaje de nuestra novela ecológica. Y no sólo eso, dentro del CIGOM los mapas nos permitieron asentar una línea base para evaluar los posibles impactos de escenarios de derrame de petróleo originados en seis sitios de exploración profunda. Al considerar las características biológicas de cada especie, logramos estimar su vulnerabilidad ante derrames de petróleo en aguas mexicanas del golfo. Nuestros resultados están reportados en los capítulos 2 y 3 del tomo II de la obra *Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante escenarios de derrame de gran escala en el golfo de México* (<https://escenarios.cigom.org>).

Así pues, hemos cerrado el capítulo de la novela ecológica que nos permite saber dónde podrían estar los cetáceos, tiburones y los peces pelágicos en la parte sur del golfo de México, lo cual contribuye a un mejor entendimiento de la composición de los ecosistemas marinos del país.



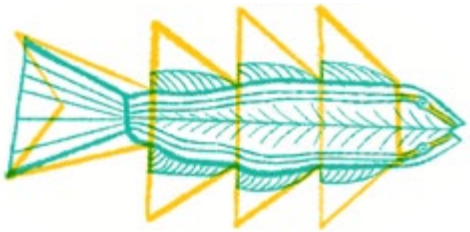
Bioacumulación de contaminantes en peces

Mercedes A. Quintanilla Mena
Víctor Manuel Vidal Martínez
Daniel Aguirre Ayala
Arturo Centeno Chalé

Investigadora e investigadores del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Abril de 2010, circulan por doquier imágenes de la enorme plataforma petrolera de British Petroleum incendiándose y dejando una enorme estela de crudo frente a Luisiana, al norte del golfo de México. Conforme pasan las horas, nos enteramos del derrame del Deep Water Horizon (DWH), y una pregunta acecha a México: ¿llegará a nuestro país?

De haber sido así, el derrame hubiera ocasionado una enorme desgracia para miles de pescadores de la parte mexicana de este golfo. A pesar de que el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) pronto orga-



nizó cruceros para determinar si existía petróleo del DWH en aguas mexicanas, los abogados de la petrolera británica se las ingeniaron para decir que no había evidencia científica sólida para afirmarlo y tan sólo indemnizaron a México con 25.5 millones de dólares. En cambio, Estados Unidos recibió 20 mil millones de dólares. ¿Por qué? Porque ellos tenían información científica y técnica publicada y sólida. Esto no debe pasar en México nunca más.

Meses después del incidente, nació el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM). Apoyado por la Secretaría de Energía (SENER) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), comenzó su ambicioso proyecto orientado a obtener la información científica necesaria para defender a México de cualesquier abogados de las grandes compañías petroleras. En las siguientes líneas, compartimos un fragmento del gran proyecto; asimismo, narramos brevemente los efectos del petróleo y de diversos metales en peces.

¿Qué hicimos?

Durante cinco años llevamos a cabo 21 cruceros oceanográficos, y visitamos 242 estaciones del golfo, algunas de las cuales se muestran en la figura 1. Esto, para determinar los niveles de petróleo y metales pesados en agua, sedimentos y organismos. Estudiamos estos compuestos y los efectos en lenguados, peces del fondo y cuatro especies de peces de la columna de agua mediante biomarcadores, es decir, tratamos de determinar los cambios bioquímicos que indican alteraciones en la fisiología del pez.

Medimos la bioacumulación de hidrocarburos aromáticos policíclicos, o HAPs, y metales (Pb, Ni, V y Cd), así como las respuestas de los peces, incluidos metabolitos de hidrocarburos, expresión de genes de vitelogenina, estrés oxidativo, metilación del ADN, carga parasitaria, histolo-



Figura 1
Mapa de áreas estudiadas en el golfo de México: Perdido, Sonda de Campeche y la Plataforma de Yucatán.
Mapa: CIGOM-Conacyt.

gía, micronúcleos y microcitos en células y, por último, la conectividad biológica entre subpoblaciones de peces del golfo de México.

¿Qué hallamos?

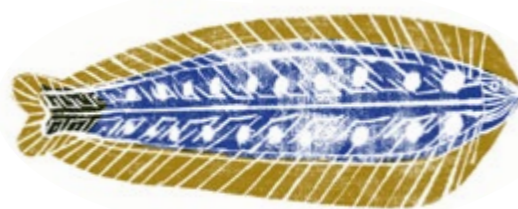
Pudimos observar que los peces tienen hidrocarburos y metales pesados en sus tejidos, aunque los niveles sólo fueron altos en algunas zonas, como en el borde de la plataforma continental de Yucatán. ¿Por qué ahí? Posiblemente porque ocurren emanaciones naturales de petróleo, y los peces se ven expuestos crónicamente o, quizá, porque los barcos derraman hidrocarburos que son acumulados por los peces. Pensábamos que en la Sonda de Campeche los peces tendrían altas concentraciones de hidrocarbu-



ros, pero no fue así. Una probable explicación es que mueren cuando están expuestos crónicamente a petróleo y son sustituidos por otros más jóvenes que apenas van bioacumulando.

Respecto de las respuestas fisiológicas de los peces, detectamos que producen metabolitos de hidrocarburos. Estos hidrocarburos, más un grupo hidroxilo (OH), los hace fluir más fácilmente hacia el exterior a través de la bilis o la orina. En los genes encontramos activación, lo cual demuestra que los peces están procesando los contaminantes. Hubo vitelogenina en machos, lo que indica feminización de los organismos. En cuanto a la metilación del ADN, que en general debe estar entre 7 y 9 %, observamos valores menores a 7 %, probablemente como consecuencia de la exposición al petróleo. También hallamos deformaciones como microcitos y micronúcleos, aunque en baja proporción. Asimismo, observamos grandes cantidades de parásitos en la Plataforma de Yucatán, lo que sugiere un ambiente sano, pues sus ciclos de vida se completan sin problema.

En cambio, en la Sonda de Campeche había pocos parásitos, sin aparentes problemas ambientales. En cuanto a la histología, hubo daños en peces del borde de la Plataforma de Yucatán, lo que puede estar asociado a los HAPs en la misma zona. En la Sonda de Campeche se detectaron pocos daños en peces y, por ello, pensamos que los que se ven expuestos crónicamente al petróleo mueren y, como hemos dicho, son sustituidos por jóvenes con menos daños. En lo que toca a la conexión de peces entre diferentes subpoblaciones, no tienen problemas para reproducirse.



¿Qué concluimos y hacia dónde vamos?

Los peces presentaron niveles de hidrocarburos y metales pesados, y dieron respuestas fisiológicas aparentemente «normales» para una zona petrolera como el golfo de México. En pocos casos, los valores de estos contaminantes excedieron a lo recomendado para consumo humano. Los datos obtenidos hasta ahora sirven como información técnica adecuada para, en caso de derrames petroleros, presentarla ante autoridades y tomadores de decisiones.

A pesar de lo que hemos avanzado, la cantidad de crueros no fue la suficiente como para poder recopilar la variabilidad de los biomarcadores considerados. Por tanto, para mantener a México en la vanguardia de estos estudios y actividades es necesario establecer un programa permanente de monitoreo ambiental, considerando las variables ya estudiadas, y crear una agencia oceanográfica mexicana que compile, analice y distribuya la información generada.

Si te interesa ver todo lo que obtuvimos, visita el sitio web del *Atlas de Línea Base Ambiental del golfo de México* (<https://atlasigom.cicese.mx/>) y los libros de escenarios de derrames y de vulnerabilidad de especies selectas a derrames en este mar mexicano (<https://turing.cicese.mx/>).



Afectación a los ecosistemas marinos por derrames de petróleo

Luz Erandi Saldaña Ruiz

Investigadora del Departamento de Oceanografía Biológica del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Paula Pérez Brunius

Investigadora del Departamento de Oceanografía Física del CICESE.

M. Leopoldina Aguirre Macedo

Investigadora del Departamento de Recursos del Mar del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Daniel Pech

Investigador del Laboratorio de Biodiversidad Marina y Cambio Climático de El Colegio de la Frontera Sur.

Derrames petroleros de gran escala, como el ocurrido en abril de 2010 en el pozo Macondo en el golfo de México, causan severos daños ambientales y económicos a largo plazo. Más grave aún, si consideramos que el golfo alberga una alta diversidad de hábitats y organismos marinos que sustentan actividades de gran valor, como la pesca, la acuicultura y el turismo.

Una de las mayores actividades económicas de la zona es la producción de petróleo que, por sus características, implica riesgos de accidentes como el del pozo Macondo. Ese desastre expuso la falta de herramientas que permitan anticipar los efectos adversos de un derrame de gran escala, orienten estrategias de planeación ante contingencias y prioricen la disposición de recursos para las medidas de mitigación.





Tras las pistas de los más vulnerables

Uno de los objetivos del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) fue identificar los organismos y ecosistemas marinos más propensos a ser afectados por un derrame, con el fin de proporcionar elementos científicos a las autoridades responsables de la elaboración de estrategias de respuesta y mitigación ante estos accidentes.

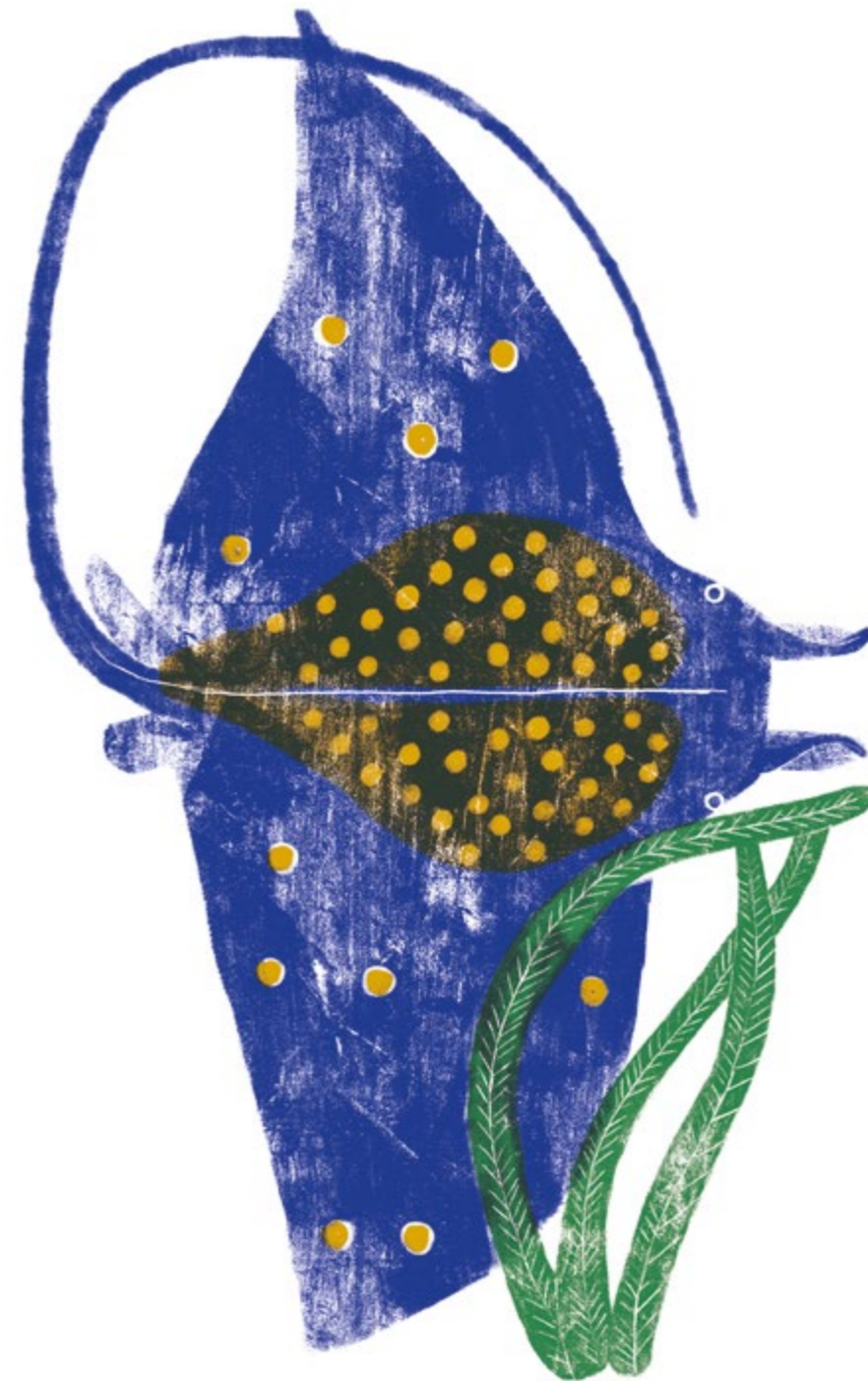
Para ello, se realizó una evaluación de la vulnerabilidad ecológica, evaluación que consiste en cuantificar en qué medida los organismos y sus hábitats son susceptibles a daños ante una amenaza –como la exposición a petróleo–, considerando su ca-

pacidad para hacer frente a los efectos adversos que ésta ocasiona. De esta manera, se identificaron potenciales afectaciones al ambiente por un derrame, antes de su ocurrencia, lo que generó información clave para plantear acciones de prevención, preparación y respuesta ante derrames de hidrocarburos en aguas marinas.

Analizamos especies, familias y ecosistemas

Determinar la vulnerabilidad de un ecosistema tan complejo y vasto no fue tarea fácil. Por ello, los investigadores del CIGOM, bajo diversos enfoques, realizamos evaluaciones a diferentes escalas, según la información disponible. El análisis se hizo a nivel de especies como el atún aleta amarilla; de familias, como el conjunto de especies de tiburones y rayas, y ecosistemas, incluyendo a sus organismos y hábitats clave. El trabajo abarcó desde la respuesta ante la exposición a petróleo por parte de los organismos microscópicos (fitoplancton), que son la base de la cadena alimenticia en el mar, hasta el posible impacto en grandes regiones geográficas donde se agrupan varios hábitats y especies marinas.

Uno de los enfoques consistió en evaluar la vulnerabilidad de tortugas



marinas y comunidades de pastos marinos ante múltiples amenazas que ya los afectan. Por ejemplo, en el caso de las tortugas se analizaron sus hábitats críticos, playas de anidación y rutas de migración, y amenazas, como el tránsito marítimo y la pesca, de manera que se obtuvo un mapa de las regiones donde las tortugas son más vulnerables.

La superposición de dichos mapas con los de las regiones donde es más probable que arribe el petróleo durante un derrame (Pérez Brunius *et al.*, en este número), permitió establecer las especies de tortugas y sus hábitats críticos que podrían verse más afectados. Por ejemplo, derrames en aguas profundas de la región suroeste del golfo tienen un potencial alto de afectar hábitats críticos de la tortuga lora, que se encuentra en peligro de extinción.

¿Y los mamíferos marinos y los peces?

Otro enfoque estimó la vulnerabilidad de mamíferos marinos y peces; para ello, se evaluaron las características que determinan el grado de afectación y capacidad de recuperación de cada especie ante su contacto con el petróleo. Por ejemplo, la necesidad de respirar de los delfines y ballenas los expone al contacto del hidro-

carburo con la piel y a la aspiración de vapores tóxicos, haciéndolos susceptibles a daños. Además, son longevos y producen pocas crías, lo cual limita el potencial de recuperación de sus poblaciones.

Obtuvimos los mapas de su vulnerabilidad ecológica, combinando esa información con el área geográfica en la que potencialmente se encuentran. El traslapeo con las regiones posiblemente expuestas tras un derrame permitió establecer los grupos de especies que más podrían resultar afectados. Por ejemplo, derrames en aguas profundas del noroeste del golfo afectarían principalmente a atunes y a peces picudos como el marlín, mientras que los registrados en el suroeste afectarían más a tiburones y rayas.

Bajo la lupa: hábitats y especies clave

El tercer enfoque fue una estimación de la vulnerabilidad ecológica a nivel del ecosistema, analizando la afectación conjunta de sus componentes en regiones geográficas preestablecidas. Se incluyeron hábitats y especies clave de invertebrados, peces, tortugas marinas, aves y mamíferos marinos. Además, se identificaron las regiones geográficas que son vulnerables al petróleo y, con mayor probabilidad, de verse afectadas por simulaciones de la mancha de un derrame originada en sitios hipotéticos.

El último enfoque determinó los cambios en la vulnerabilidad en orga-

nismos modelo ante diferentes concentraciones de petróleo y tiempo de exposición mediante experimentos controlados en laboratorio. Se estudiaron comunidades microscópicas de fitoplancton y bacterias, así como de dos peces costeros (lenguado y corvina roja), lo que proporcionó indicadores que permiten refinar nuestras futuras evaluaciones de vulnerabilidad.

Los resultados de este enorme esfuerzo de investigación son un valioso primer acercamiento al problema ambiental generado por derrames de petróleo en aguas marinas, útil para el diseño de planes de atención ante contingencias petroleras.

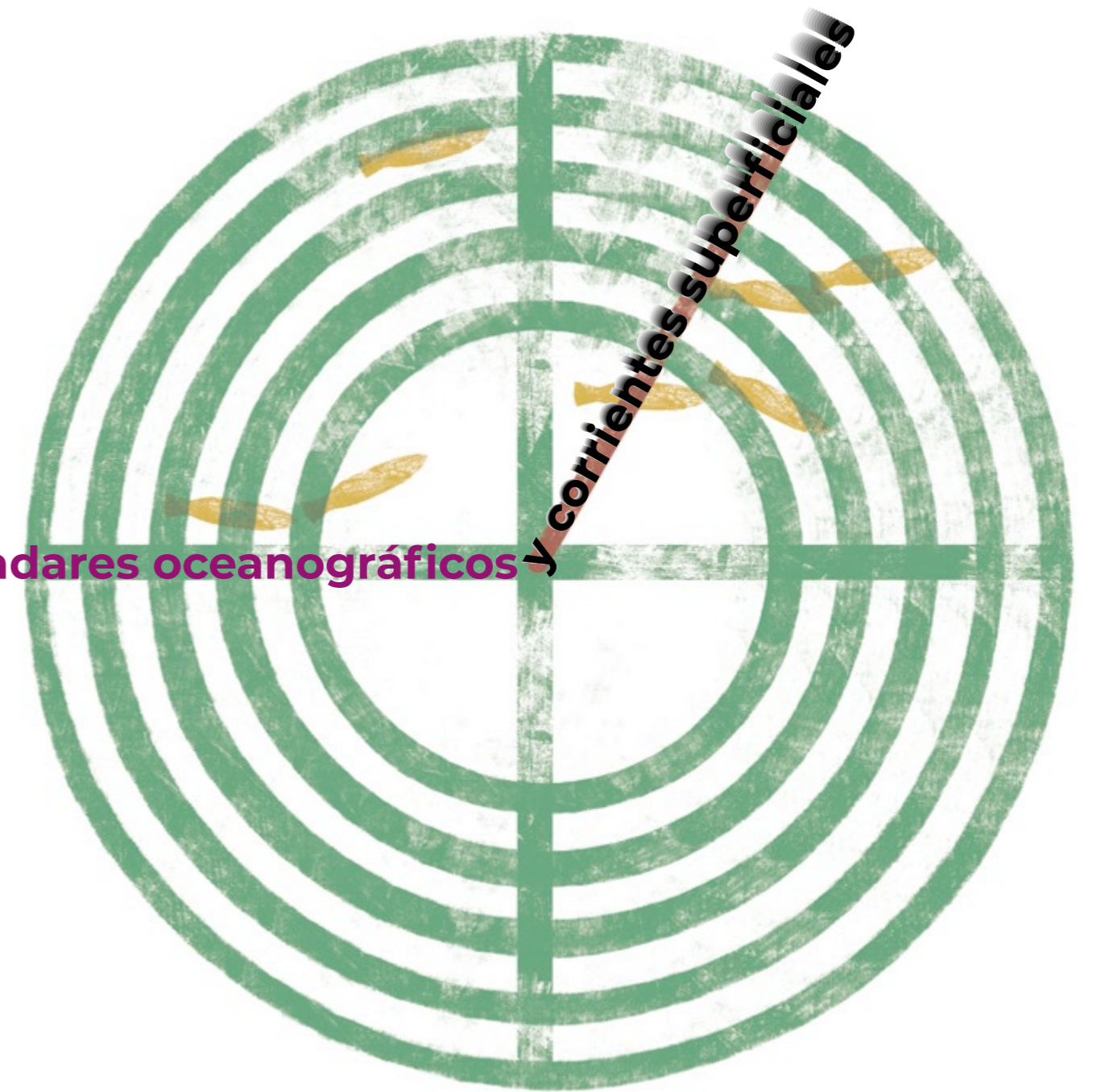
Lecturas adicionales

Aguirre Macedo, M. L., Pérez Brunius, P. y Saldaña Ruiz, L. E. (2020). *Vulnerabilidad ecológica del golfo de México ante derrames de gran escala*. CICESE. <https://escenarios.cigom.org/>

Pérez Brunius, P. y Aguirre Macedo, M. L. (2020). Resumen Ejecutivo en *Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante derrames de petróleo de gran escala en el golfo de México*. CICESE. <https://escenarios.cigom.org/>

Radars oceanográficos

y corrientes superficiales



Xavier Flores Vidal Héctor García Nava

Investigadores del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California.

Probablemente todos, en algún momento, hemos oído hablar de radares, pues se utilizan en múltiples aplicaciones; por ejemplo, en el control del tráfico aéreo o en la expedición de multas automáticas a vehículos que exceden los límites de velocidad, pero ¿qué es un radar oceanográfico?

Para empezar, un radar es un instrumento que transmite y recibe ondas electromagnéticas, que más tarde pueden ser útiles para analizar las características de las ondas reflejadas por objetos. Algunos tipos de radar utilizan el corrimiento en frecuencia de las ondas reflejadas



por objetos en movimiento (efecto *Doppler*) y la retrodispersión (*Backscatter*) de las ondas para determinar características tales como la posición, la velocidad o incluso la composición de los objetos detectados.

En particular, los radares oceanográficos utilizan arreglos de antenas transmisoras y receptoras que se instalan en la playa, para estimar las corrientes superficiales en el océano. Debido a que estos radares emplean ondas electromagnéticas de alta frecuencia (ondas de radio en la banda de 3 a 30 MHz) y a que detectan la retrodispersión de las mismas, también se les conoce como Radares HF (por *High Frequency*) o radio escaterómetros *Doppler*, ya que miden la retrodispersión (*Backscatter*) de ondas de radio.

Vigilando grandes extensiones del océano

La gran utilidad de los radares oceanográficos es que permiten monitorear de forma continua y simultánea las corrientes superficiales en grandes extensiones del océano con una alta resolución espacio-temporal, tarea muy complicada de realizar con otros sistemas de medición, como boyas, cruceros oceanográficos o sensores satelitales. Para monitorear áreas extensas, como el golfo de México, se necesita la operación continua y sincronizada de Radares HF ubicados a lo largo del litoral, lo cual requiere de una gran inversión de tiempo, personal y recursos económicos.

Como parte del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM), mediante las acciones que impulsa el gobierno federal para conocer mejor la fenomenología oceánica, y contar con mayores elementos que permitan el monitoreo y control en tiempo real de potenciales derrames de hidrocarburos en el golfo de México, entre 2017 y 2019 la Universidad Autónoma de Baja California construyó e instaló una red de quince radares oceanográficos, los cuales monitorean el litoral mexicano del golfo, cubriendo las

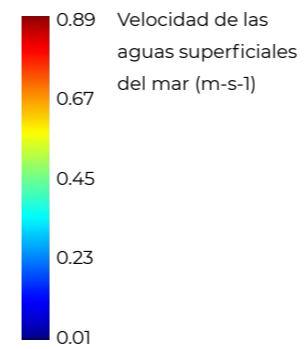
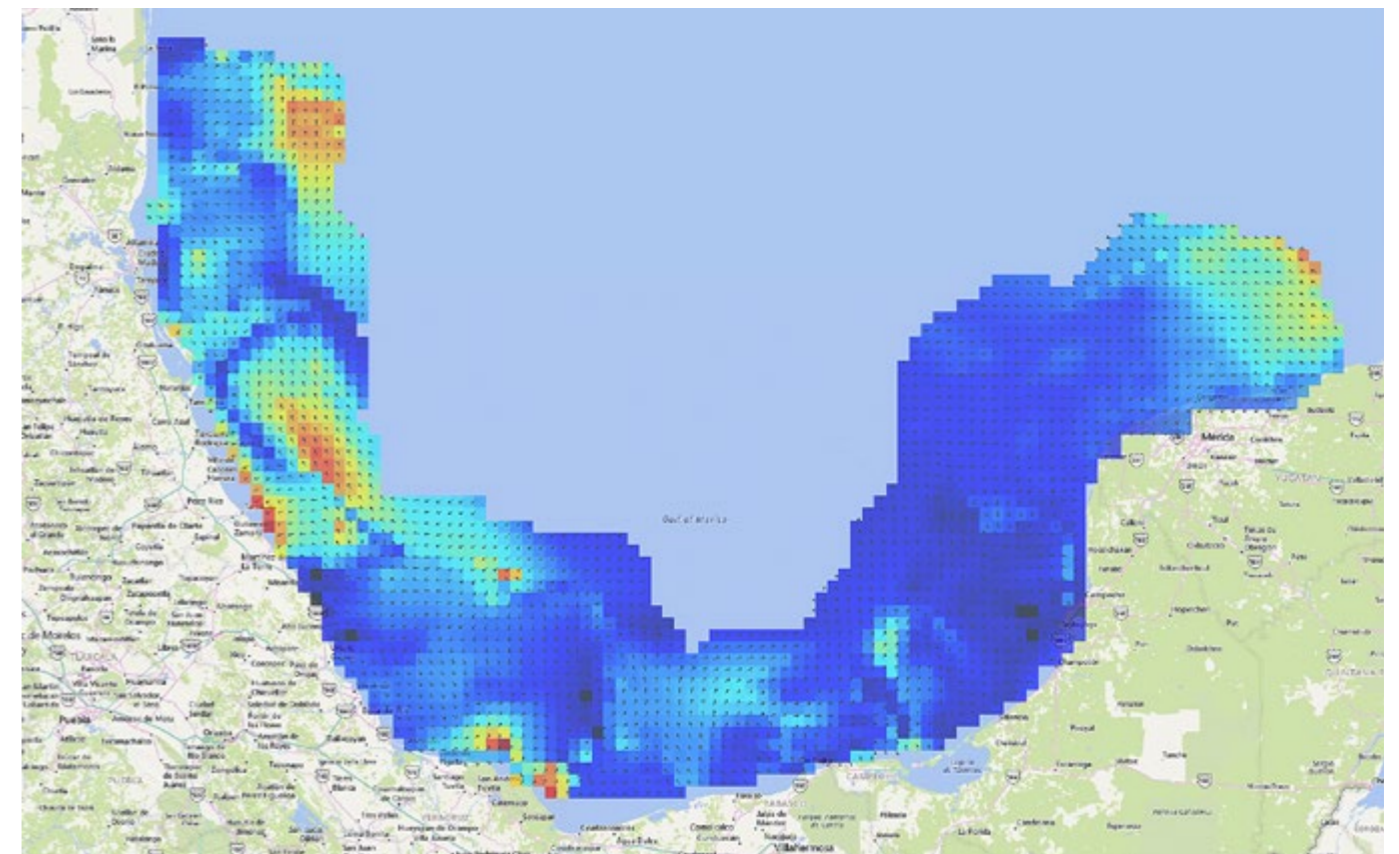


Figura 1
Estimaciones de velocidad de las corrientes superficiales del golfo de México.
Mapa: Observatorio Oceanográfico Regional Costero (UABC).

zonas costeras de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán (Figura 1).

Sensores modernos y tecnología de punta

La Red de Radares del golfo de México está conformada por sensores modernos con tecnología de punta que permiten obtener mapas sinópticos de las corrientes marinas superficiales, desde la costa hasta 200 km mar adentro. Dichos mapas se generan con una resolución espacial de 1.5 km y temporal de 30 minutos, y con una precisión en el cálculo de la corriente de ~2 cm/s. Una vez procesados, los datos son transmitidos en tiempo *quasi* real (diferidos entre una y dos horas) a servidores web en línea, donde se pueden consultar de forma regular.

La información generada por la red de forma casi inmediata acerca de las condiciones actuales de las corrientes superficiales permite tomar decisiones mejor informadas en diferentes situaciones. Es el caso de un probable derrame de hidrocarburos en aguas marítimas. Además, la base de datos que se genera a lo largo del tiempo permite realizar el análisis de escenarios estadísticos de la trayectoria y destino de potenciales derrames de hidrocarburos, con lo cual pueden determinarse zonas con mayor probabilidad de arribo o regiones de recirculación y convergencia que pudieran retener hidrocarburos por más tiempo. Con la información en tiempo real y la generación de escenarios, autoridades y tomadores de decisiones cuentan con mayores elementos para salvaguardar ecosistemas y prevenir tragedias ecológicas, en caso de derrames.

Otras posibles aplicaciones de la información generada por la Red de Radares son, entre otras, el apoyo en maniobras de búsqueda y rescate, el análisis de la dispersión de otros contaminantes, la diseminación de larvas de peces de interés comercial o ecológico, el seguimiento de afloramientos algales nocivos y el apoyo en la contingencia de afloramientos atípicos de sargazo en el Caribe.

Los radares que conforman la red fueron diseñados por la Universidad de Hawaii, en colaboración con la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Actualmente,

el Laboratorio de Radio Oceanografía de la UABC, ensambla, calibra y opera radares oceanográficos con total autonomía. Hoy, esta universidad mexicana opera 25 radares en las siguientes regiones: Pacífico Norte, seis instrumentos; Laguna de Términos, en Campeche, dos instrumentos, en colaboración con el Instituto de Ecología, Pequerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX); Caribe mexicano, dos instrumentos, en colaboración con la Secretaría de Marina (SEMAR), Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR), y El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR); golfo de México, 15 instrumentos, en colaboración con la Comisión Nacional de Áreas Naturales (CONANP), el gobierno de Tamaulipas, SEMAR, Instituto de Ecología (INECOL) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), Universidad Autónoma de Campeche (UAC), UNACAR, Tecnológico (TEC) Lerma y Centro de Investigación y Estudios Avanzados (Cinestav) del Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Esta Red de Radares es única en Latinoamérica, y se proyecta un crecimiento de dos estaciones más para 2022. No obstante, sigue en busca de apoyo para algún día cubrir las costas del Pacífico centro y sur, y las del golfo de California.

Acidificación del océano

José Martín Hernández Ayón

Orión Norzagaray López

Investigadores del Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad Autónoma de Baja California.

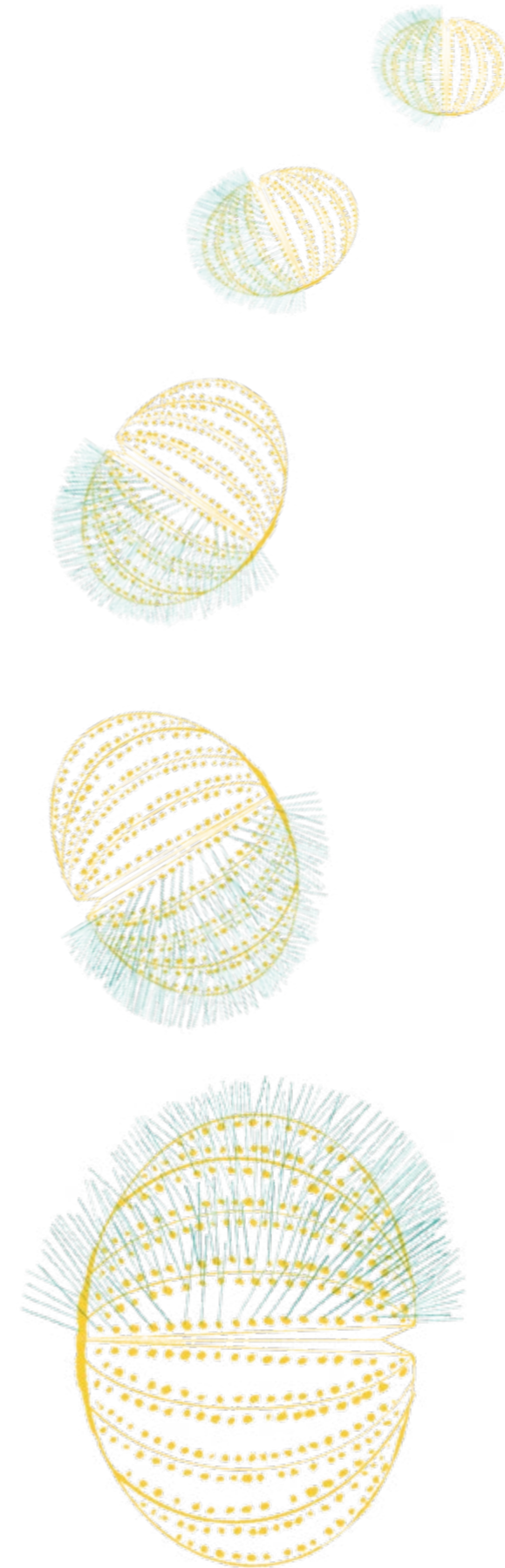
Daniel Pech

Investigador de El Colegio de la Frontera Sur.



A principios de los años 2000 se reportó que el aumento del dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, emitido por la quema de combustibles fósiles, era absorbido por el océano en un 25 %. Una vez absorbido, el CO_2 se hidrata para formar ácido carbónico (H_2CO_3), como se muestra en la figura 1, punto 6, y provoca que el pH del océano disminuya. Cuanto más dióxido de carbono absorban los océanos, más se acidificarán.

Adicionalmente, este ácido carbónico disminuye la concentración de iones de carbonato, ya sea por reacción directa o por la liberación de protones (iones hidrógeno). Los biominerales carbonatados en el mar dependen del nivel de saturación de carbonato en el agua –de acuerdo con ello, el ambiente es propicio o no para que se disuelvan– y usan indicadores como la omega calcita (Ω_{calc}) y omega aragonita (Ω_{arag}), las cuales son una función de la concentración de carbonato, calcio (Ca^{2+}) y la temperatura mediante el producto de solubilidad.



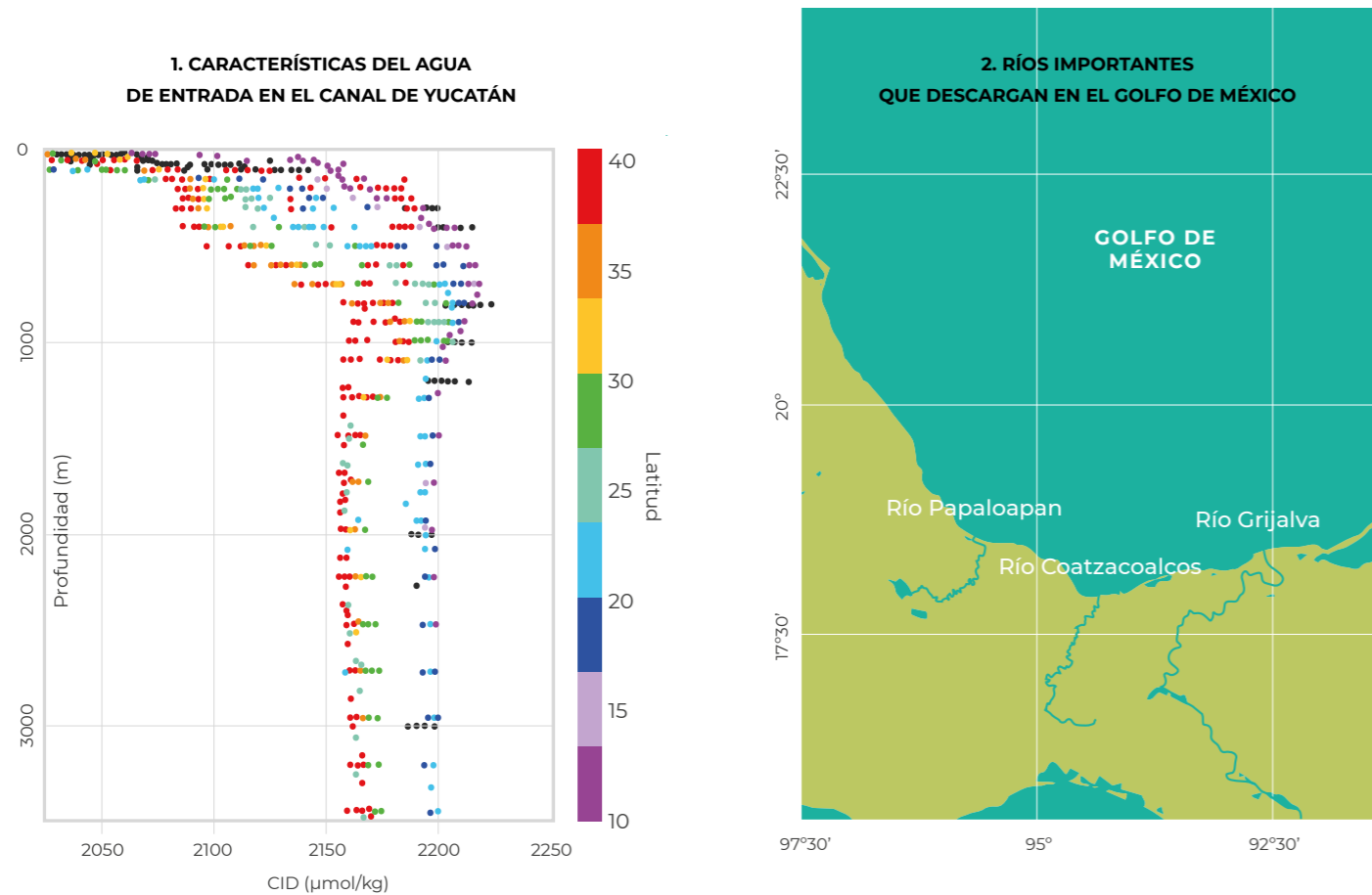
Cuanto más dióxido de carbono absorban los océanos, más se acidifican.

Fotografía: Felipe Ignacio Rocha González.

El vaivén de los organismos calcificadores

Los estados de saturación de aragonita y calcita responden directamente a los cambios de la disponibilidad del ion CO_3^{2-} , de modo que si el océano absorbe más dióxido de carbono, al disminuir el pH disminuye el carbonato y también la Ω_{arag} y Ω_{calc} . Estos valores de saturación son interpretados, por ejemplo, de la siguiente manera: un valor de Ω igual a 1 indica que los minerales de carbonato están saturados; por otro lado, cuando el Ω es mayor que 1 favorece las condiciones para que ocurra el proceso de formación o la preservación de minerales de carbonato. Mientras que, cuando Ω es menor a 1 se favorece la disolución, si la saturación de aragonita y calcita disminuyen, existirán mayores retos fisiológicos para los organismos calcificadores en la formación de sus estructuras.

En este aspecto de la saturación, se utiliza el término corrosivo para referirse a los efectos de las condiciones del estado de baja saturación, que resultan de factores diversos. Por ejemplo, la disminución del pH en zonas costeras



es producto de procesos naturales o debido a problemas de contaminación. El aporte de aguas residuales contribuye no sólo a la disminución de oxígeno, sino también a la del pH y a la disponibilidad de carbonato.

Este escenario no es ideal para organismos calcificadores, como moluscos y equinodermos porque hay efectos en las distintas etapas de su ciclo de vida. Los resultados obtenidos sobre el estado de acidificación del golfo de México, en el marco del proyecto Implementación de redes de observación oceanográficas (físicas, geoquímicas y ecológicas) para la generación de escenarios ante posibles contingencias relacionadas a la exploración y producción de hidrocarburos en aguas profundas del golfo de México, han permitido avanzar en el conocimiento de la acidificación del océano. Analicemos, paso a paso, la figura siguiente y los aprendizajes arrojados hasta el momento (Figura 1).

1) La Plataforma de Yucatán es reconocida por estar constituida por sedimentos kársticos, éstos se caracterizan también por contener volúmenes altos de aguas sub-

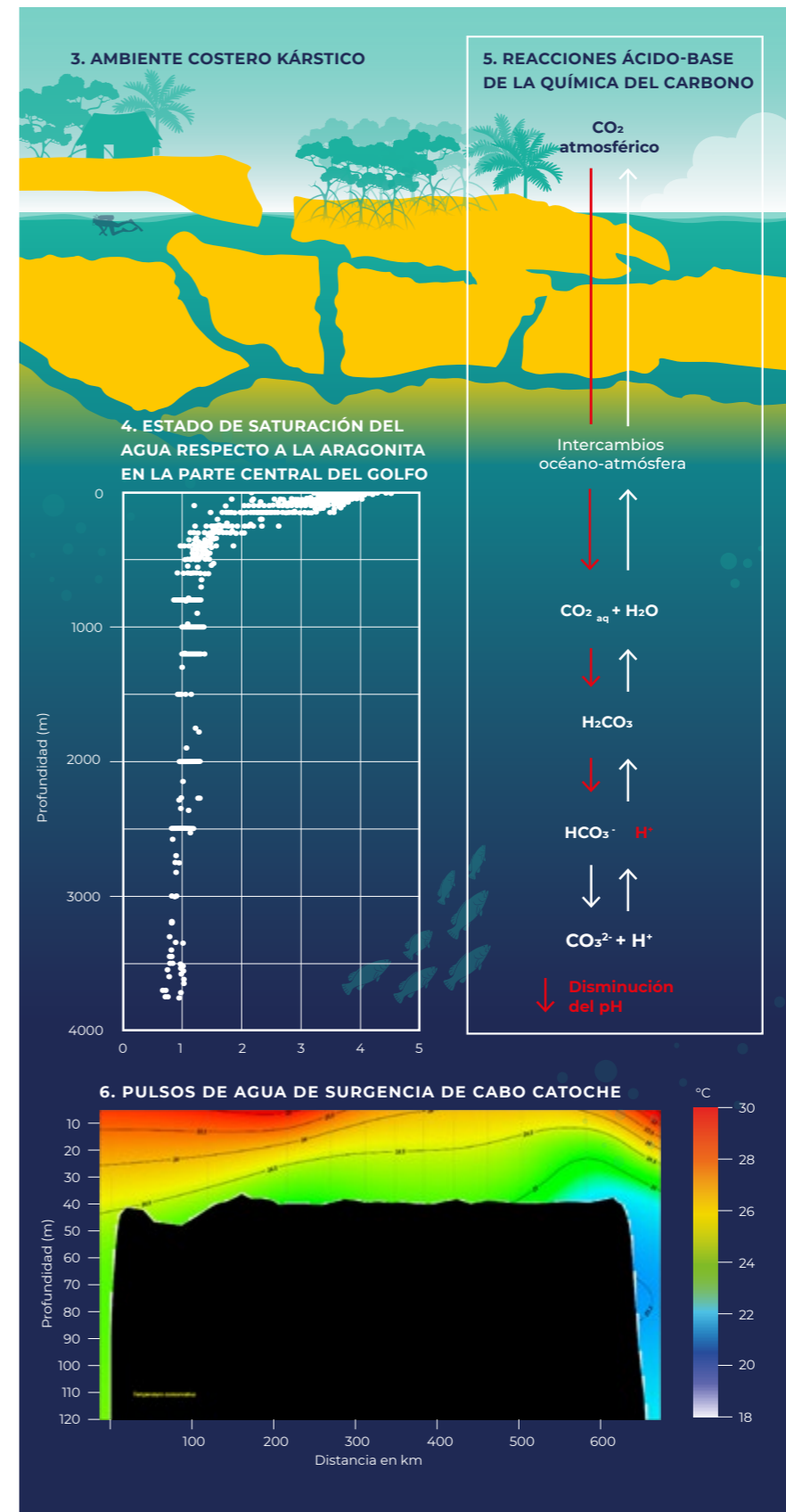
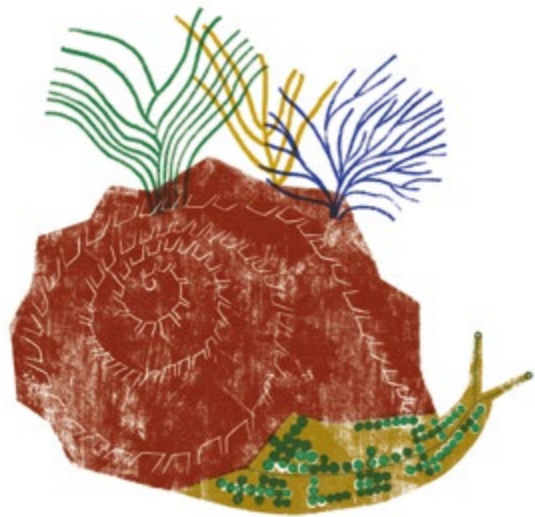


Figura 1
Esquema de la distribución de condiciones y procesos que modifican la química del carbono con acción directa en la acidificación del océano en el golfo de México.

- 1) Esquema de un ambiente costero kárstico.
- 2) Pulsos de agua de surgencia de Cabo Catoche.
- 3) Características del agua de entrada en el canal de Yucatán.
- 4) Datos del estado de saturación del agua respecto al aragonita en la parte central del golfo.
- 5) Ríos importantes que descargan en el golfo de México: Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva.
- 6) Esquema mostrando reacciones ácido-base de la química del carbono.

Gráfico: CIGOM-Conacyt.



terráneas que aportan carbonato a la zona costera (Figura 1, punto 3). Sin embargo, en áreas donde la zona urbana se ha establecido, se presentan problemas en el manejo de las aguas residuales, que llegan a los mantos freáticos e igualmente son transportadas a la zona costera con efectos en los valores de pH.

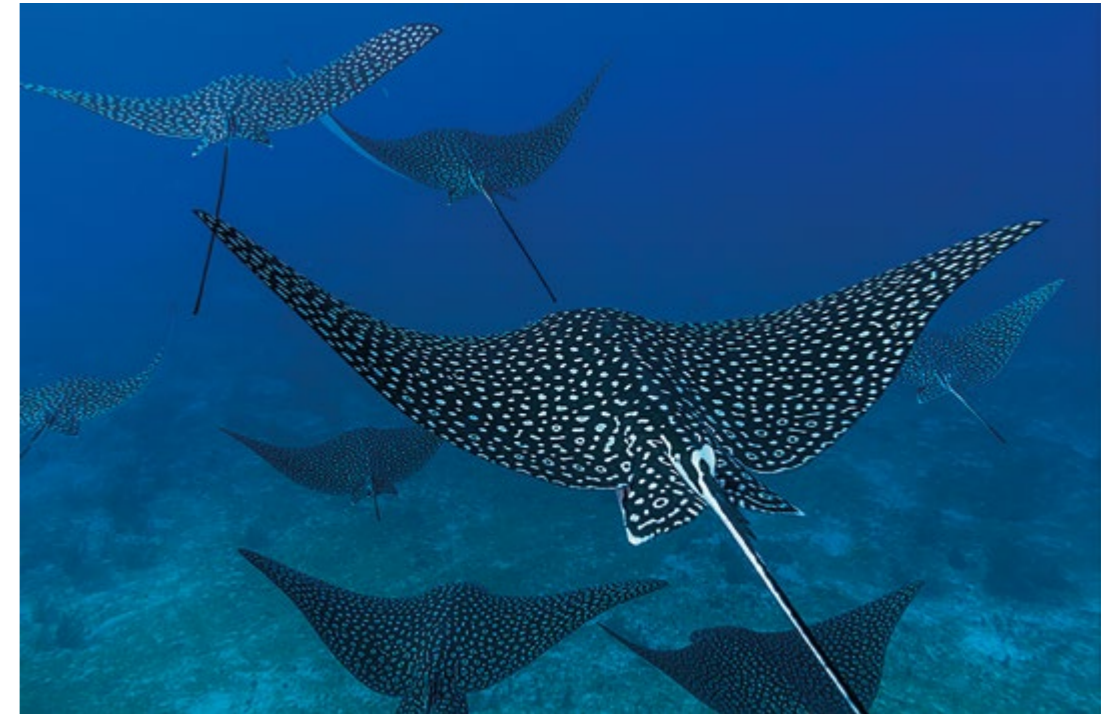
2) Cabo Catoche ha sido reportado por diversos estudios como una zona donde se presentan eventos de surgencias estacionales (Figura 1, punto 6). Las surgencias costeras se presentan por la acción del viento y generan el transporte de aguas subsuperficiales, las cuales se caracterizan por presentar pH bajo y altas concentraciones de CO_2 disuelto.

3) La advección (el transporte) de masas de agua tiene un papel importante en este mar mexicano. La dinámica de las masas de agua subsuperficiales dentro del golfo es moduladora de la biogeoquímica del carbono. Se ha encontrado que las características químicas de las aguas del golfo (en relación al pH, carbono inorgánico disuelto y concentración de carbonatos) son similares a las aguas localizadas y medidas en la región del Caribe (Figura 1, punto 1).

Esto quizá no sea una novedad, pero hay autores que señalan que el agua de este golfo no sólo proviene del Caribe, sino también del Atlántico. Las propiedades biogeoquímicas de ambas fuentes de agua son diferentes: las del Atlántico tienen un pH de mayor a igual que la concentración de carbonatos, mientras que las aguas del Caribe presentan condiciones opuestas. Sin embargo, es importante señalar que las aguas dentro del golfo de México se encuentran saturadas con carbonatos (Figura 1, punto 5).

4) Los ríos tienen un papel importante en los ecosistemas costeros de la zona oeste del golfo de México. Tres de ellos le aportan grandes volúmenes de agua: el Papaloapan, el Coatzacoalcos y el Grijalva. No obstante, a pe-

La acidificación altera el pH del océano.
Fotografía:
Claudio Contreras Koob.

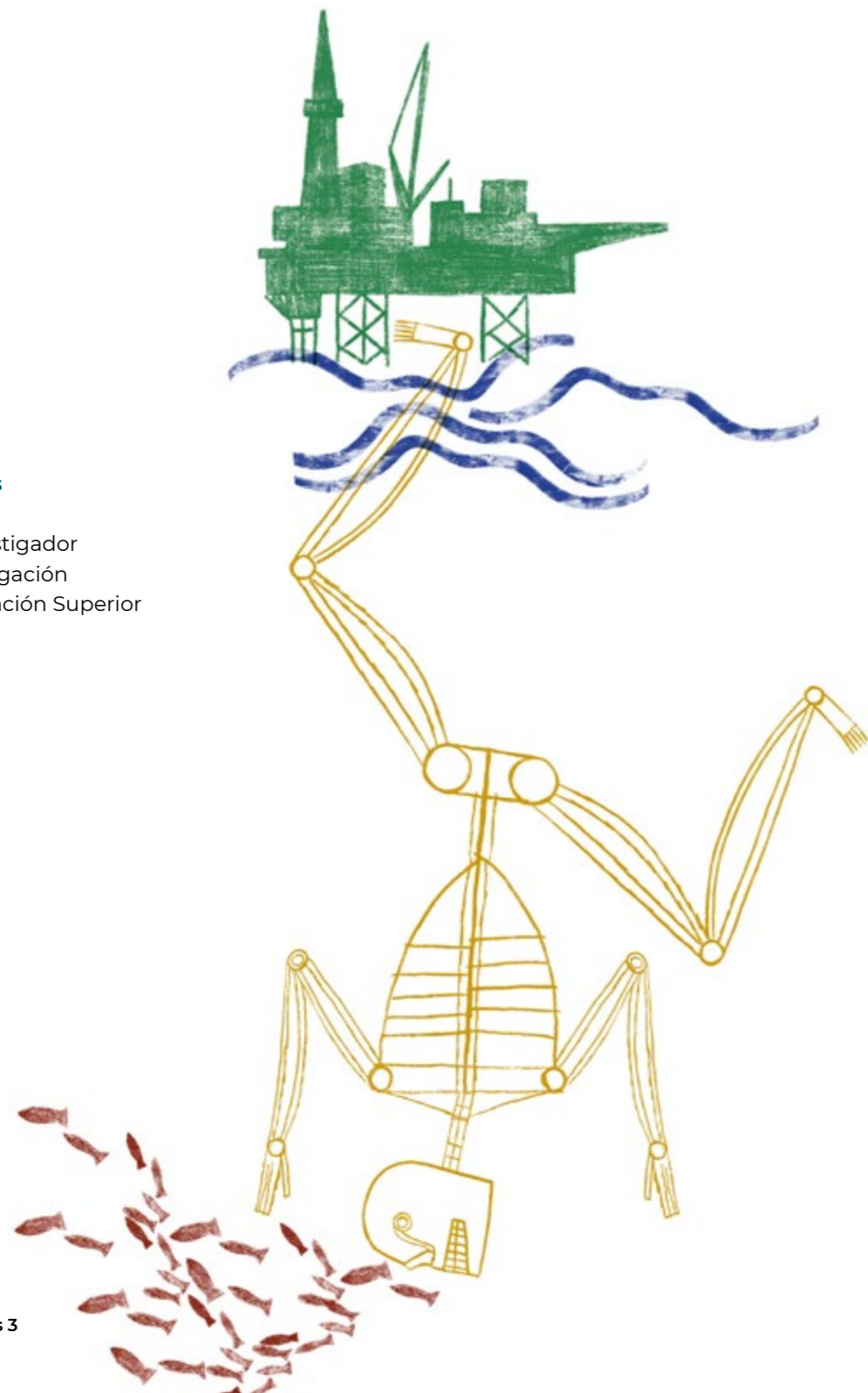


sar de su relevancia, éste es un tema emergente que debe atenderse en futuros estudios con el fin de, por ejemplo, determinar su papel en la química del carbono en la zona costera, ya que suelen ser una fuente importante de nutrientes, pueden transportar carbonatos disueltos y arrastrar materia orgánica de origen antropogénico que podría disminuir el pH después de ser degradada.

El humano influye más que la naturaleza

La absorción oceánica de CO_2 y la dinámica de la química del carbono están determinadas por procesos atmosféricos y oceánicos, pero pueden ser alteradas en los ecosistemas por procesos naturales o por la intervención de la mano del hombre. Si bien es cierto que tenemos una tarea pendiente en cuanto a la función de los ríos en la química del carbono en el golfo de México, nos queda claro cuál es el impacto en zonas como la península de Yucatán, donde el ser humano influye en el pH del océano por encima de las condiciones de la misma naturaleza.

Simulaciones del posible destino



Paula Pérez Brunius

Julio Sheinbaum

Investigadora e investigador del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

de derrames de hidrocarburos

La exploración y explotación de hidrocarburos en México se realiza principalmente en el mar, cerca y fuera de la costa. Puesto que la economía mundial seguirá dependiendo del petróleo en el corto y mediano plazos, estas actividades continuarán por un tiempo relativamente largo con el consiguiente riesgo de derrames a gran escala, como los ocurridos en el golfo de México en los pozos Ixtoc-I en 1979 y Macondo en 2010, con graves consecuencias ambientales y económicas.

Por ello, es imprescindible contar con una estrategia sustentada en bases científicas sólidas que permita trabajar en

planes de contingencia, para responder a probables accidentes o desastres de esa naturaleza. ¿Cómo? Adoptando medidas preventivas y facilitando la distribución óptima de recursos humanos y materiales necesarios para mitigar sus efectos.

Múltiples factores

Cada derrame de petróleo tiene características muy particulares, porque la dispersión y evolución de los hidrocarburos derramados depende de diversos factores. Por un lado, están las características del accidente: localización y propiedades del pozo, tipo de petróleo en pro-

ducción, cantidad de aceite derramado (cada hora) y el tiempo durante el cual permanece abierto el pozo.

Sin embargo, lo que en gran medida determina el destino del petróleo son los vientos y las corrientes predominantes durante el evento, ya que son los responsables de transportarlo lejos del sitio del siniestro y... como podrán imaginarse, son muy variables. Además, la quema intencional del petróleo en superficie, usada como medida de mitigación, libera contaminantes atmosféricos y su llegada a centros de población en tierra firme depende de los vientos presentes al momento.



La economía mundial seguirá dependiendo del petróleo en el corto y mediano plazos. Fotografía: Claudio Contreras Koob.

Difícil predicción

En ese sentido, predecir el destino de un derrame es un problema análogo al de la predicción de huracanes. No podemos predecir con suficiente antelación cuándo y dónde se formará el próximo huracán, ni qué ruta seguirá, ya que dependerá de condiciones ambientales del momento. Pero contamos con cien años de registros, y sus estadísticas nos indican que la península de Yucatán es una de las regiones que probablemente se verá más impactada. También sabemos que es poco probable que estos eventos afecten al altiplano chihuahuense. Una

vez formado el huracán, hay modelos computacionales que nos permiten predecir con cierta precisión la ruta que seguirá y los tiempos que tardará en desplazarse, utilizando información de las condiciones ambientales del momento.

En el caso de derrames de petróleo en el golfo de México, sólo han ocurrido —¡afortunadamente!— dos grandes accidentes, si bien insuficientes para hacer estudios estadísticos. No obstante, contamos con modelos computacionales que nos permiten simular una gran cantidad de eventos en diferentes puntos y bajo condiciones ambientales distintas, con los cua-

Figura 1

Ubicación de los seis pozos en aguas profundas para los que se generaron escenarios de derrame, junto con esquemas de las corrientes marinas promedio. Gráfico: CIGOM-Conacyt (p. 81).

les sí podemos determinar estadísticamente las regiones que pudieran verse impactadas.

Dichos modelos, a su vez, obtienen información de modelos de circulación que reproducen de modo realista las corrientes marinas, el oleaje y los vientos. Los modelos de derrames son cada vez más sofisticados y sirven para calcular la evolución del petróleo liberado, incorporando el efecto de diversos y complejos procesos involucrados en la transformación y degradación de los hidrocarburos en el mar y en la evolución química de los aerosoles, además de la información de corrientes, olas y vientos.



Generando escenarios de derrame

Uno de los objetivos del megaproyecto realizado por el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) fue determinar las regiones que podrían verse más afectadas por derrames de gran escala en seis

pozos localizados en aguas profundas del golfo de México occidental. Para ello, se realizaron numerosas simulaciones de derrames en cada pozo, manteniendo las mismas condiciones del accidente (características del pozo, tipo de petróleo, flujo y duración del derrame y del incendio intencional), pero ini-

ciados en fechas distintas y, por tanto, en condiciones diferentes en cuanto a las corrientes y vientos simulados (Figura 1).

Con los *escenarios de derrame* se obtiene una estadística de los resultados de todas las simulaciones y se determinan las áreas con mayor probabilidad de verse afectadas. Es de-

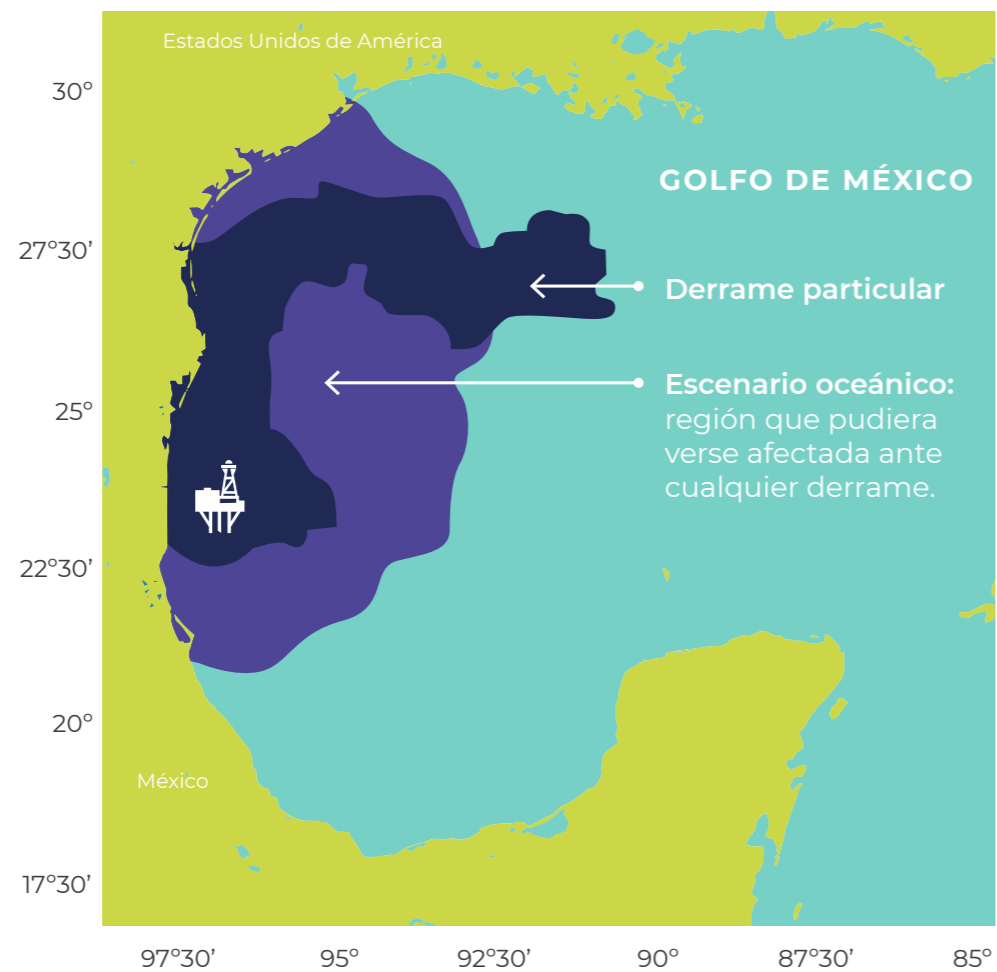


Figura 2
Esquema de un escenario de derrame oceánico (violeta) comparado con un derrame individual que ocurrió bajo condiciones oceánicas y atmosféricas específicas (azul oscuro), para el pozo 3. Gráfico: CIGOM-Conacyt.

cir, se identifican las que sufren en más eventos derrames de petróleo o llegadas de aerosoles liberados en la atmósfera. (Figura 2).

Los escenarios muestran el probable arribo de petróleo a las costas de Tamaulipas y Texas por derrames iniciados en los pozos frente a Tamaulipas. En tanto, las costas, desde Tabasco hasta Texas, podrían recibir petróleo derramado en pozos ubicados al suroeste del golfo, siendo las costas de Veracruz y Tamaulipas las de

mayor probabilidad de daños. Además, es poco probable que llegue petróleo a la península de Yucatán por derrames ocurridos en los seis pozos analizados. Esta información sentó las bases para evaluar qué especies y qué ecosistemas marinos podrían verse afectados (ver en estas páginas Saldaña *et al.*, «Los ecosistemas marinos y su afectación por derrames de petróleo»). Y será de gran utilidad para generar planes de atención por contingencia petrolera, como se hizo en el

caso de tortugas marinas (ver en estas páginas Liceaga *et al.*, «Conservación de las tortugas marinas»).

En el caso de la atmósfera, los aerosoles liberados por incendios en cuatro de los seis pozos pueden afectar la calidad del aire de las poblaciones costeras de Tamaulipas y Veracruz, sobre todo en días de brisa de primavera y verano (Figura 3).

Los escenarios son útiles para tomar medidas preventivas que limiten el impacto de

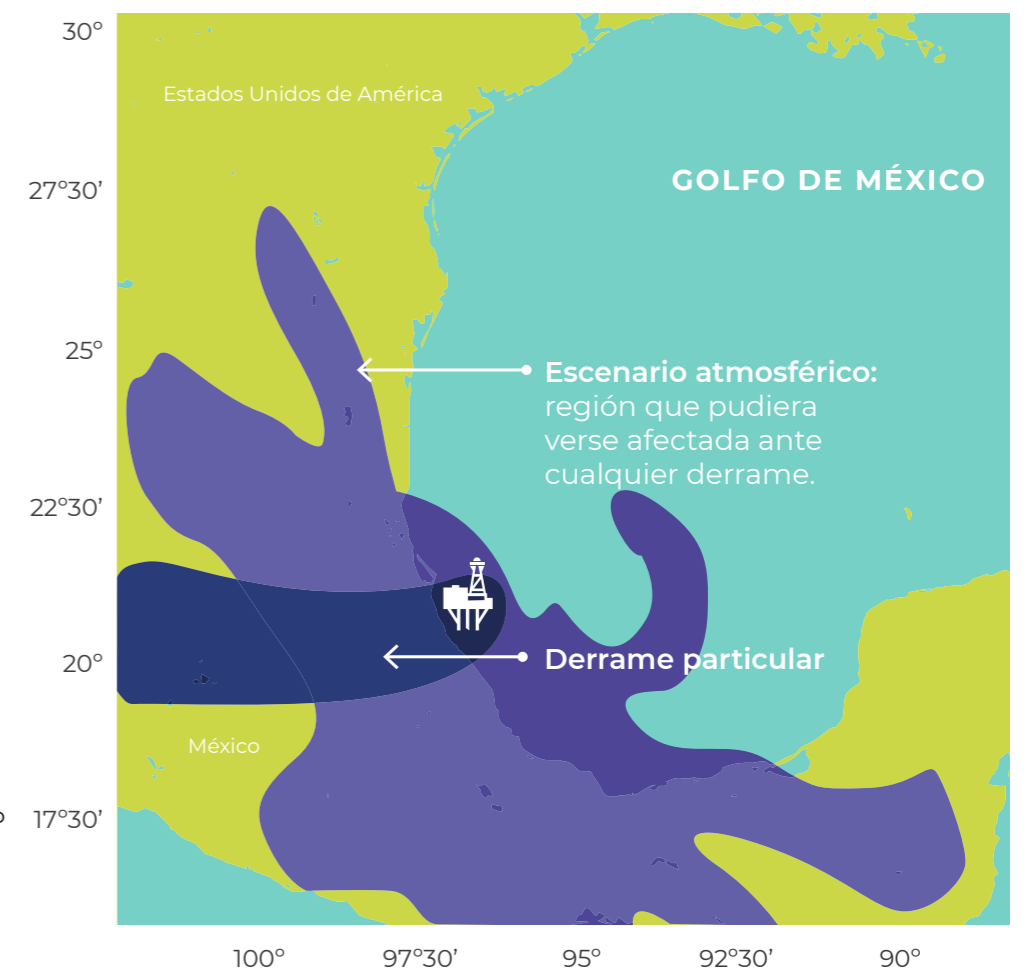


Figura 3
Esquema de un escenario de emisiones de contaminantes atmosféricos (violeta) comparado con un evento particular (azul oscuro), para el pozo 4. Gráfico: CIGOM-Conacyt.

posibles derrames, particularmente dar prioridad a las zonas con mayor probabilidad de daños. Sin embargo, su utilidad es limitada durante un evento real, ya que los equipos que dan atención al siniestro requieren continuamente de predicciones específicas al evento sobre la dirección y rapidez con que se dispersará la mancha.

Para ello, se requiere adecuar los modelos arriba mencionados a fin de que trabajen de forma predictiva, incorporando observaciones que les per-

mitan corregir posibles errores y mejorar la predicción, como se hace para los huracanes. Ac-

tualmente, el CIGOM trabaja en el desarrollo de estas herramientas.

Otras referencias

- Pérez Brunius, P. y Aguirre Macedo M. L.** (2020). Resumen Ejecutivo a *Regiones, especies y ecosistemas vulnerables ante derrames de petróleo de gran escala en el golfo de México*. CICESE. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4527478>
- Pérez Brunius, P., Turrent Thompson, C. y Sheinbaum, J.** (2020). Introducción. En P. Pérez Brunius, C. Turrent Thompson y P. García Carrillo (Eds.), *Escenarios oceánicos y atmosféricos de un derrame de petróleo en aguas profundas del golfo de México* (pp. 9-13). CICESE. <http://doi.org/10.5281/zenodo.4526638> doi.org/10.5281/zenodo.4526638

Consortrios bacterianos: una opción para mitigar derrames petroleros



Ulises García Cruz
M. Leopoldina Aguirre Macedo
José Q. García Maldonado
Investigadora e investigadores
del Centro de Investigación
y de Estudios Avanzados
del Instituto Politécnico Nacional.

Los consorcios bacterianos desempeñan un papel muy importante en la naturaleza, pues son capaces de degradar la mayoría de las sustancias orgánicas presentes en el ambiente. Los consorcios mineralizan la materia orgánica en sustancias más simples y, de esta manera, favorecen su fácil integración a los ciclos biogeoquímicos.

Dada la adaptabilidad metabólica que poseen, los consorcios bacterianos pueden utilizarse en aplicaciones biotecnológicas en el área ambiental para degradar o remover sustancias: desde moléculas sencillas (C_2) hasta mezclas muy complejas como el petróleo, constituido éste por más de 1 000 compuestos y una amplia variedad de metales en bajas concentraciones. Cabe destacar que el petróleo contiene algunos compuestos que, dependiendo de su concentración, son potencialmente tóxicos para los seres vivos.

Efectos adversos

En el golfo de México, los efectos adversos del petróleo se han documentado y evaluado a dife-

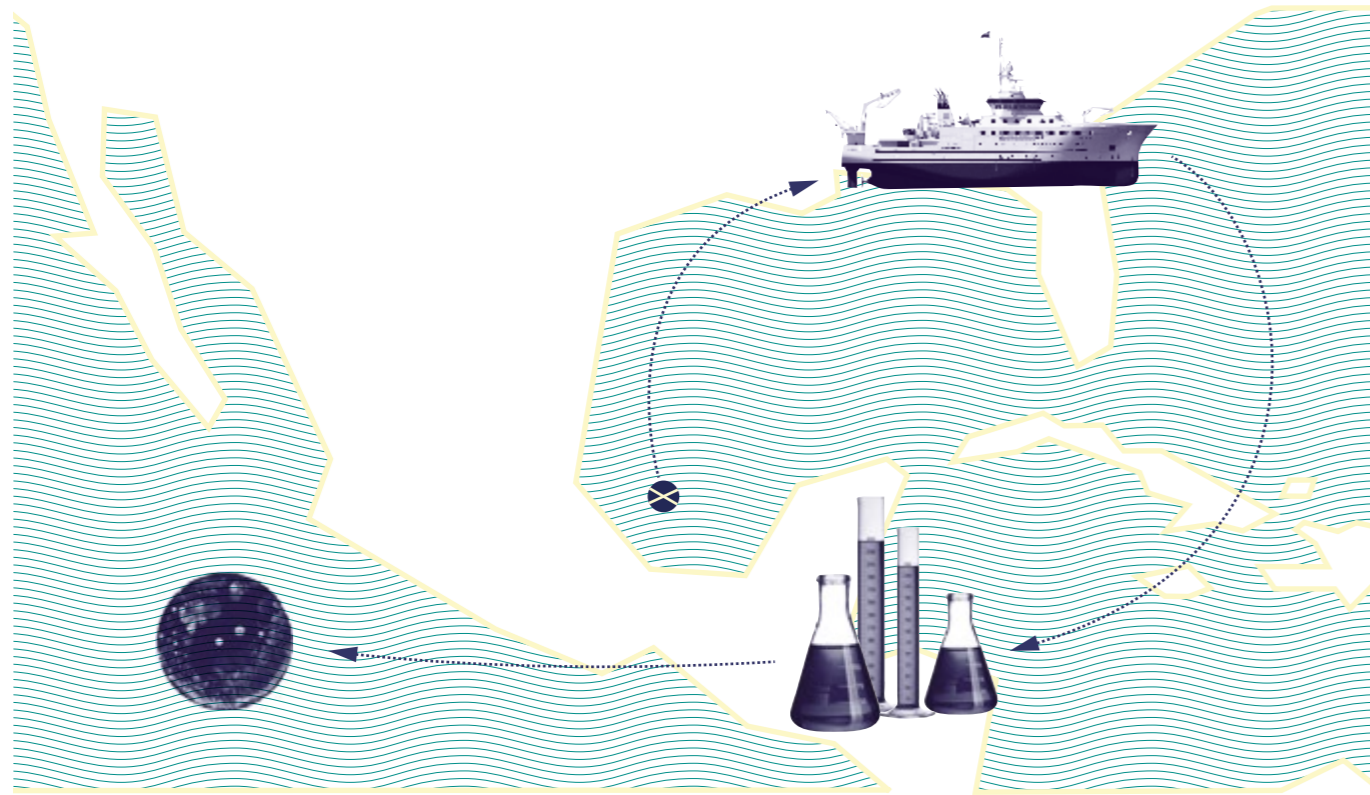
rentes escalas a lo largo del tiempo. Por ejemplo: 1) el derrame del pozo Ixtoc-I, en 1979, frente a las costas de Campeche, donde se derramaron alrededor de 530 mil toneladas de crudo, y 2) el derrame de 2010, de la plataforma Deepwater Horizon (DWH) en aguas de la Luisiana, que vertió cerca de 779 mil toneladas. Ambos derrames afectaron severamente los ecosistemas en las zonas costeras y el fondo marino.

A pesar de que se impusieron medidas de mitigación para contener y disminuir el impacto del petróleo en el ambiente, en las costas donde arribó el petróleo por efecto de las corrientes y mareas, se sufrieron efectos socioeconómicos y en la salud de los pobladores costeros.

La experiencia con el derrame del DWH dejó al descubierto varios puntos importantes que necesitan atenderse durante un derrame de petróleo de estas magnitudes, sobre todo porque, a pesar de los planes de contingencia y de tecnologías de contención disponibles, el petróleo contaminó una gran área en el golfo de México, afectando la flora y la fauna marina de la zona.

Por estos motivos, el gobierno mexicano, a través de la Secretaría de Energía (SENER)

Una instantánea en la zona petrolera
del golfo de México.
Fotografía: istockphoto.com



Colecta y aislamiento de consorcios bacterianos. Gráfico: CIGOM-Conacyt.

y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), favoreció la creación del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) para estudiar y modelar posibles derrames de gran magnitud en aguas nacionales de este mar. Una de las líneas de investigación del CIGOM se enfocó en la degradación natural de hidrocarburos, mediante el aislamiento de consorcios microbianos en diferentes puntos y profundidades de la columna de agua del golfo.

Bacterias que se alimentan de petróleo

El estudio de estos consorcios permitió observar a las bacterias que los forman y trabajar con un

objetivo común: lograr la degradación del petróleo. Esto se da gracias a la gran variedad de metabolismos provenientes de la enorme diversidad bacteriana presente en el golfo, lo cual los hace muy eficientes para consumir diferentes fuentes complejas de carbono, similares a las que componen el petróleo.

En estos consorcios, las bacterias pueden estar presentes en casi todos los ambientes marinos, incluidos los sedimentos de las profundidades, las playas y la columna de agua. En cada hábitat se presentan diferentes condiciones según la profundidad, pues ésta influye en su supervivencia. Por ejemplo, la temperatura, que va desde 28 °C en la superficie hasta 4 °C a más



de 3000 m de profundidad, o el oxígeno, que disminuye a cierta profundidad y vuelve a incrementarse después.

Gracias a las nuevas metodologías y tecnologías, en este proyecto fue posible aislar consorcios de estos ambientes, aptos para degradar petróleo bajo diferentes condiciones ambientales y que podrían ser utilizados en caso de un derrame. Estos consorcios fueron capaces de adaptarse al medio, dependiendo de las propiedades fisicoquímicas y la naturaleza del sustrato.

En experimentos de laboratorio se observó que cinco consorcios de diferente origen pudieron degradar los cinco tipos de petróleo extraídos en México. Esto indica que, dentro del mismo consorcio, las comunidades cambian de acuerdo con la fuente de carbono presente, lo cual evidencia la gran capacidad metabólica que poseen; dependiendo de la fuente de carbono, las bacterias que consumen esos compuestos se ven favorecidas y con el tiempo se multiplican volviéndose las más dominantes dentro del consorcio. Esto da como resultado un cambio total de las comunidades microbianas de un compuesto a otro.

Esta característica tiene aplicaciones en caso de un derrame, ya que el petróleo cambia su composición química debido al intemperismo, es decir, con el paso del tiempo, al inicio del derrame hay ciertos compuestos que van alterándose. Los consorcios bacterianos se van adaptando a estos cambios y, al final, logran degradar la mayoría de los hidrocarburos, lo cual puede ayudar a desarrollar una tecnología de biorremediación de bajo costo e impacto ambiental.

Los consorcios trabajan como una maquinaria bien ajustada. Controlando algunos parámetros biológicos y fisicoquímicos, es posible incrementar su eficiencia de biodegradación y acelerar el consumo. ¿Cómo? Aplicando modelos estadísticos que permiten determinar los parámetros modificables para lograr consorcios más eficientes. Esta versatilidad abre un abanico de oportunidades y aplicaciones medioambientales para el tratamiento de contaminantes.

En conclusión, los consorcios microbianos son una buena opción biotecnológica para la mitigación de derrames petroleros; además, actualmente, presentan ventajas en comparación con otras tecnologías y biotecnologías utilizadas.

Simulación de derrames de petróleo a escala de mesocosmos

M. Leopoldina Aguirre Macedo
Sonia S. Valencia Agami
José Q. García Maldonado
Santiago Cadena
Ulises García Cruz

Investigadoras e investigadores del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

El petróleo, nombre derivado del latín *petroleum*, significa «aceite de roca». Se forma en el subsuelo del planeta Tierra bajo condiciones de alta presión y temperatura. Es un aceite negro y viscoso, una mezcla de compuestos orgánicos complejos denominados hidrocarburos, cuyas características físicas y químicas lo convierten en una excelente fuente de energía y base para la manufactura de muy diferentes materiales.

En México, la industria petrolera representa una de las principales actividades económicas debido a sus beneficios sociales y económicos. Sin embargo, las operaciones necesarias para su extracción y comercialización generan inevitablemente problemas ambientales, sobre todo por derrames

accidentales ocurridos durante su extracción o transportación.

El golfo de México se caracteriza por su gran actividad petrolera. En esta región, tanto en las costas como en el océano profundo, han ocurrido numerosos derrames de petróleo: el de mayores afectaciones ocurrió el 20 de abril de 2010, cuando la llamada plataforma petrolera Deepwater Horizon (DWH), de la British Petroleum, se incendió y explotó durante una operación rutinaria de extracción del líquido debido a emanaciones de metano provenientes de la perforación del suelo. Se estima que el derrame, de al menos 76 millones de litros de crudo, afectó una zona de más de 110 km. Además de la pérdida de vidas humanas, las repercusiones ambientales y económicas fueron catastróficas, por lo que a partir de esa fecha los gobiernos de varios países, la comunidad científica y la sociedad civil impulsaron iniciativas para contender contra estos desastres ambientales.

Creado en 2015 para generar investigación de frontera en aguas mexicanas, el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) cuenta



Puerto Progreso,
Yucatán.
Fotografía:
Esteban Dupinet.

con reconocidos científicos y especialistas en diversas áreas –biología marina, oceanografía, geología, entre otras–, distribuidos en instituciones académicas a lo largo del país. Su objetivo es crear un sistema de monitoreo en este mar mexicano, que ofrezca respuestas rápidas ante posibles afectaciones futuras causadas por la industria petrolera.

Simular a una escala mayor que la del laboratorio

El uso de microorganismos para remediar sitios contaminados con hidrocarburos ha sido evidenciado desde hace muchos años. Sin embargo,

la mayoría de los experimentos para evaluar su efectividad, han sido realizados bajo condiciones de laboratorio que, generalmente, difieren de las ocurridas en el ambiente.

Por tanto, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (Cinvestav) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), Unidad Mérida, realizó experimentos para simular derrames de petróleo en una escala mayor (mesoescala) y en condiciones que se mejasen las del golfo de México. Para ello, se construyeron sistemas experimentales llamados mesocosmos, los cuales consisten en contenedores con capacidad de 2800 litros de agua marina, con una propela electrónica que

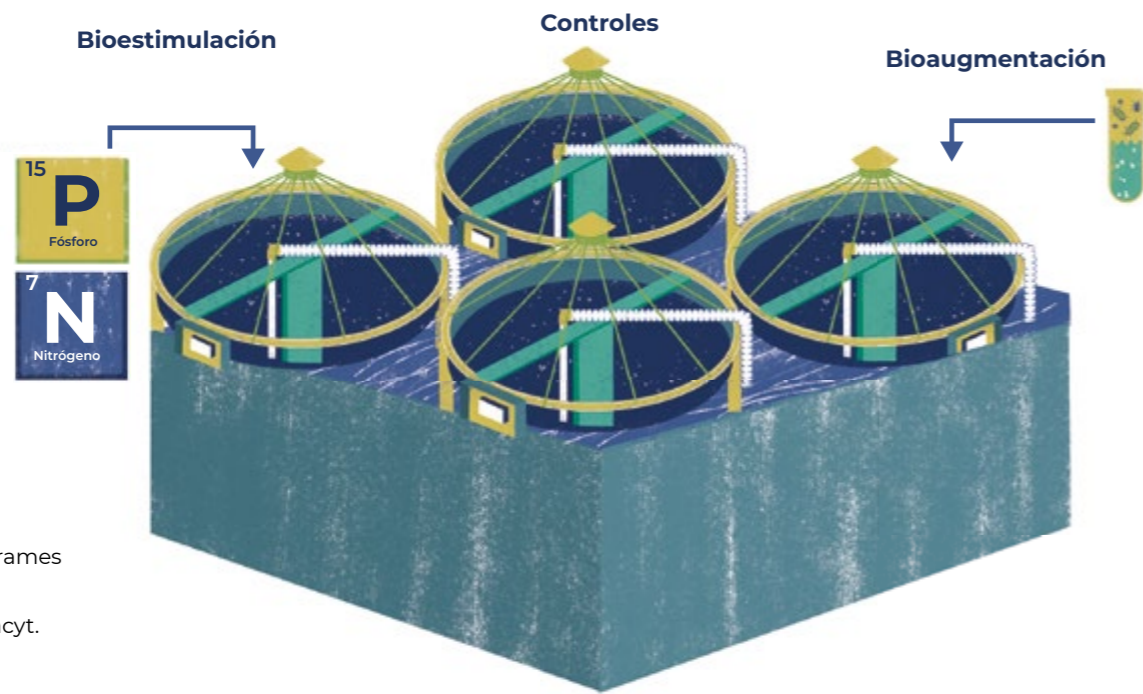


Figura 1
Mesocosmos para la simulación de derrames de petróleo.
Gráfico: CIGOM-Conacyt.

agita el agua para homogeneizar las condiciones de temperatura, oxígeno y salinidad, tal cual como lo realiza la corriente marina de forma natural (Figura 1).

Con estos mesocosmos se contaminó experimentalmente agua de la Plataforma de Yucatán para evaluar la dispersión de petróleo en la columna de agua y su efecto sobre los microorganismos marinos. Además, se realizaron experimentos en otros mesocosmos para evaluar diferentes estrategias de biorremediación: la bioaugmentación, con la incorporación de bacterias degradadoras de hidrocarburos previamente crecidas en el laboratorio, y la bioestimulación, suministrando nutrientes y/o dispersantes químicos del petróleo para promover la degradación del crudo de una manera más rápida y eficiente de lo que ocurre en la naturaleza.

La importancia de obtener cultivos microbianos capaces de degra-

dar hidrocarburos y hacer pruebas en el nivel de mesocosmos con diferentes tipos y concentraciones de petróleo, bajo diferentes condiciones de estimulación, radica en que pueden ser utilizados posteriormente en derrames reales, para bioestimar o bioaugmentar la actividad de las comunidades microbianas nativas del agua marina, y así mejorar la remoción de los hidrocarburos en el ecosistema.

Los derrames de petróleo en el mar son un problema que requiere de mayor participación de centros de investigación y organizaciones sociales. Los sistemas de mesocosmos son herramientas tecnológicas que permitirán generar nuevas investigaciones simulando derrames en gran escala, en condiciones semejantes a las del ambiente, lo que permitirá ofrecer una mejor y más rápida respuesta de biorremediación ante futuros derrames de petróleo en el golfo de México.



Pelícano blanco americano. Chuburná Puerto, Yucatán.
Fotografía: Esteban Dupinet (p. 91, arriba).

Gaviota sombría. Progreso Yucatán.
Fotografía: Esteban Dupinet (p. 91, abajo).

Meteorología del golfo de México

El golfo de México es reconocido mundialmente como un vasto y productivo cuerpo de agua con un enorme valor en términos ecológicos, económicos y sociales. Es también una zona de alta producción y explotación de gas y petróleo y, por tanto, se ve afectado por derrames de hidrocarburos que producen daños que pueden ser irreversibles, principalmente en ecosistemas sensibles como éste. Además, constituye un laboratorio único para estudiar diversos fenómenos y procesos tanto oceánicos como atmosféricos.

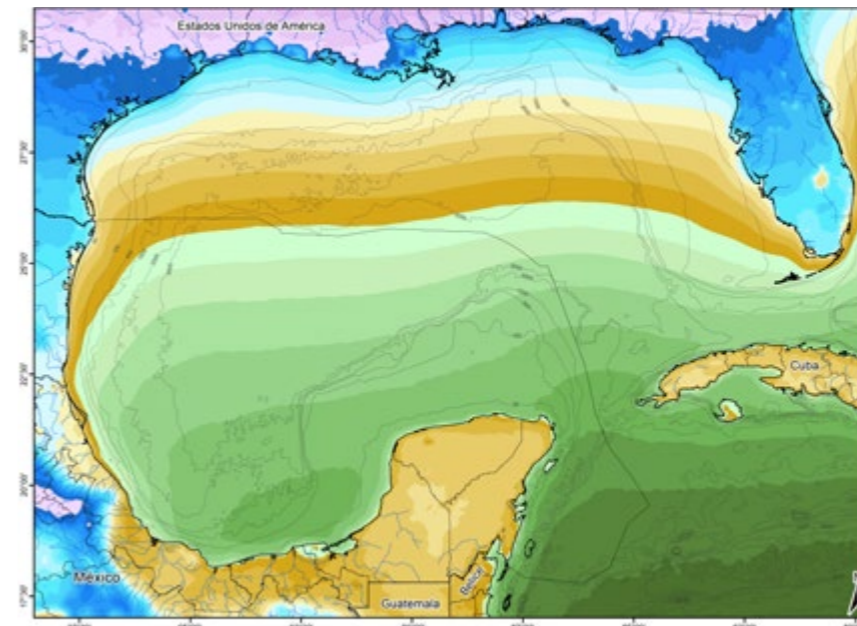
Las condiciones meteorológicas en el golfo de México determinan, en gran medida, sus características oceánicas mediante la fuerza del viento sobre la superficie marina, gracias a procesos de intercambio de calor y vapor de agua entre el océano y la atmósfera, como son la precipitación, los flujos de calor, la evaporación, etc. Estos procesos afectan la temperatura del mar, que se mezcla en las capas superficiales, el oleaje y las corrientes del golfo, particularmente sobre las plataformas continentales.

Asimismo, sus características geográficas, oceanográficas y meteorológicas favorecen el desarrollo de condiciones extremas. Durante el verano, las tormentas tropicales y los huracanes provenientes del Atlántico central y del mar Caribe cruzan por el golfo de México todos los años, lo cual puede provocar gran devastación tanto en zonas costeras como tierra adentro; en cambio, durante el invierno

Rosario Romero Centeno

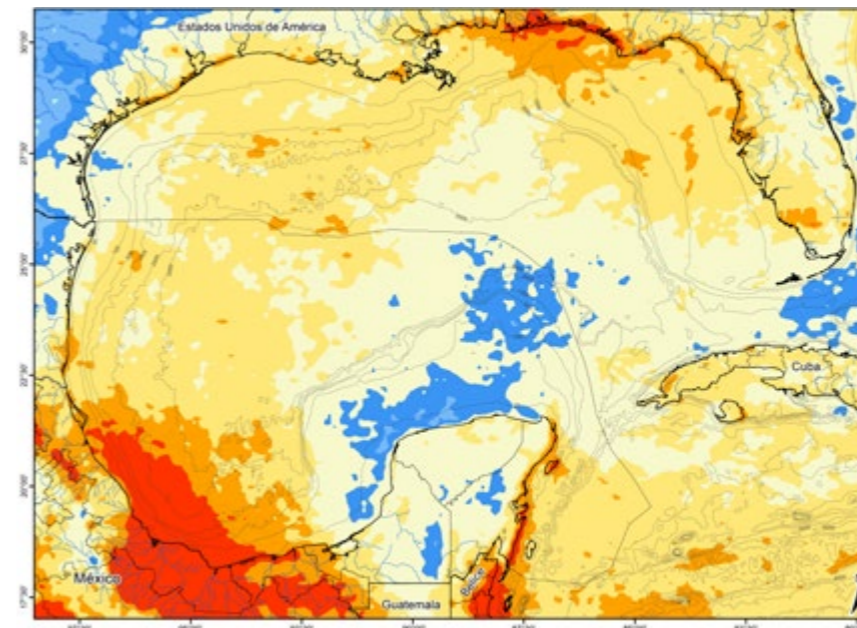
Jorge Zavala Hidalgo

Investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.



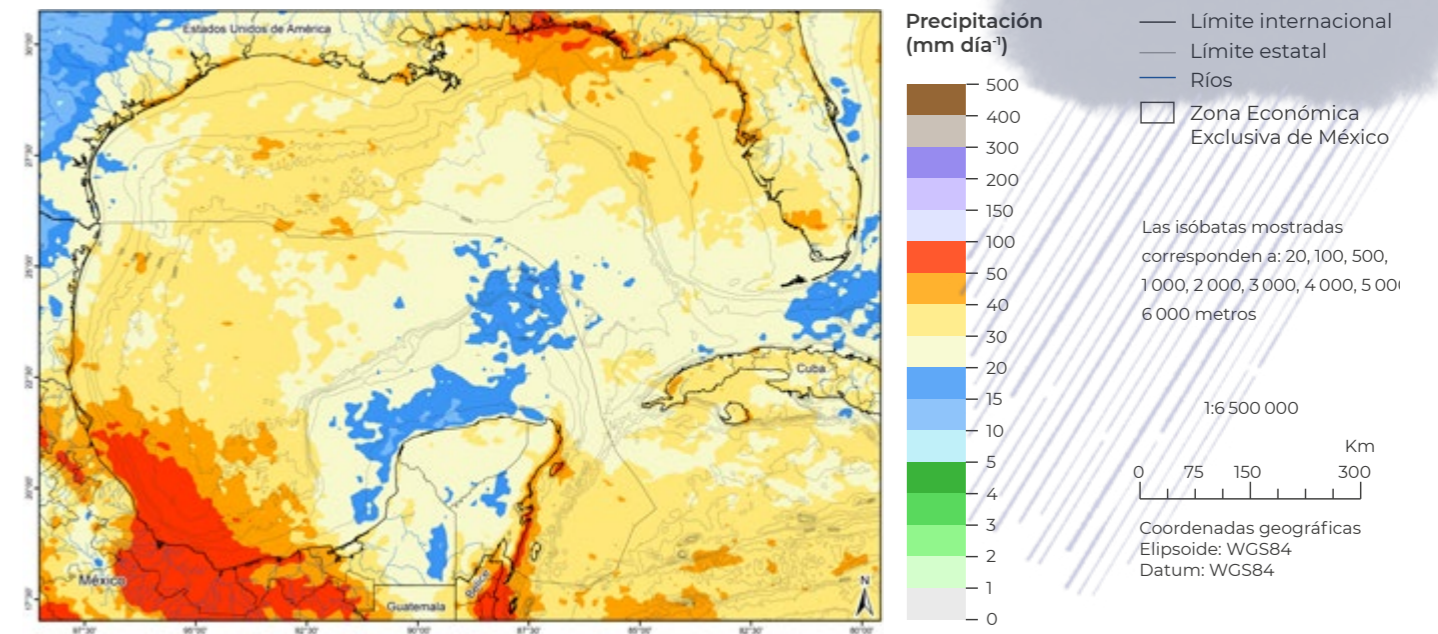
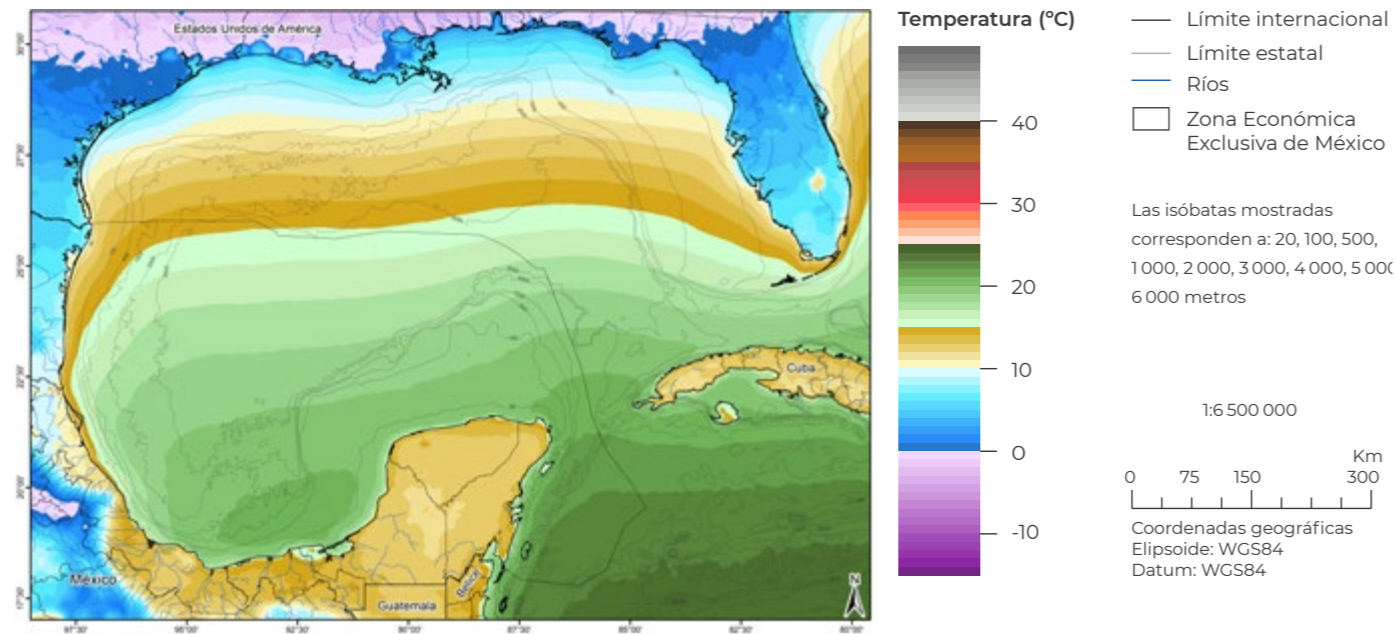
Temperatura mínima promedio para marzo (1979-2017).

Gráfico: CIGOM.



Promedio mensual de precipitación máxima para julio (1979-2017).

Gráfico: CIGOM.



penetran al Golfo masas de aire frío provenientes de latitudes altas y provocan cambios marcados en las condiciones ambientales.

Las bondades de la modelación numérica

Una de las herramientas más utilizadas actualmente para estudiar y entender los fenómenos meteorológicos es la modelación numérica. La información que proporcionan los modelos numéricos es muy útil para varias tareas: la planeación de diversas actividades, la optimización de recursos y la reducción de riesgos, todo ello mediante el estudio de las condiciones típicas y de aquellas que pueden considerarse extremas, como los llamados *nortes* y los ciclones tropicales.

Como parte de las actividades del proyecto del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) se realizó una caracterización climatológica de distintas variables atmosféricas a través de un sistema de modelación numérica regional de alta resolución que se destinó para el pe-

riodo 1979-2017. Mediante la información generada con este sistema, se realizó también un análisis de los eventos de nortes ocurridos en dicho periodo de años; adicionalmente, se utilizó la base de datos de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, por sus siglas en inglés) para generar mapas de las trayectorias y zonas de impacto de los ciclones tropicales que cruzaron el golfo entre 1851 y 2016.

Los nortes

En México y Centroamérica se denominan *nortes* a los vientos intensos cuya dirección predominante es del norte-noreste y están asociados a sistemas de alta presión que se desplazan desde latitudes medias hacia el sureste, alcanzando con frecuencia el golfo de México y, en ocasiones, la península de Yucatán. Los nortes ocurren, principalmente, entre octubre y mayo, y causan un impacto importante en el clima del occidente y sur del golfo al favorecer marcados descensos de temperatura y la ocurrencia



El golfo de México es reconocido mundialmente como un vasto y productivo cuerpo de agua (arriba).

Fotografía: M. Rafael Ramírez León.

El golfo posee un enorme valor ecológico, económico y social (abajo).

Fotografía: Claudio Contreras Koob.

de lluvias intensas. Además, pueden ocasionar problemas y daños considerables en los sectores agropecuario y portuario, así como efectos dañinos para las actividades marítimas, aéreas, pesqueras y de la industria petrolera. En promedio, estos eventos duran entre dos y seis días.

Los ciclones tropicales

Ciclón tropical es el término genérico con el que se identifica a un sistema meteorológico en rotación, caracterizado por un centro de baja presión alrededor del cual giran vientos intensos, bandas nubosas y tormentas eléctricas. Los ciclones tropicales son tormentas de gran escala, con un alto potencial destructivo, se forman sobre las aguas cálidas de los océanos, en las regiones tropicales, y sus circulaciones externas pueden extenderse a más de 1 000 km del centro de la tormenta.

A los ciclones tropicales maduros se les conoce como *huracanes*; sus vientos extremos, lluvias torrenciales y marejadas (o marea de tormenta) hacen del huracán uno de los fenómenos hidrometeorológicos más destructivos del planeta. Los ciclones tropicales menos intensos se denominan *depresiones* (vientos máximos menores a 61 km/h) y *tormentas* (vientos máximos entre 61 y 119 km/h). Cuando se intensifican y se convierten en huracanes, éstos se clasifican de acuerdo con la escala Saffir-Simpson, la cual incluye cinco categorías: desde la categoría 1, con vientos máximos entre 119 y 153 km/h, hasta la categoría 5, con vientos máximos, mayores o iguales, a 250 km/h.

La temporada de ciclones tropicales en el golfo de México ocurre casi siempre entre junio y noviembre, pero muestra una alta variabilidad de un año a otro, en particular en lo que se refiere a la ocurrencia de huracanes de mayor intensidad –categorías 3, 4 y 5–. Tales fluctuaciones son relevantes para las comunidades, porque año tras año aumenta el porcentaje de población afectada en las áreas donde impactan, y representan una parte significativa de los daños, de las lesiones y de la pérdida de vidas humanas causadas por fenómenos naturales.



Puerto Progreso, Yucatán.

Fotografía: Esteban Dupinet.

Los resultados de la caracterización climatológica de las condiciones atmosféricas típicas y extremas que se presentan en el golfo se plasmaron en cientos de mapas que pueden visualizarse en una plataforma web y en el *Atlas de Línea Base Ambiental del golfo de México* (<https://bit.ly/3upCaBx>), y que fueron desarrollados como parte de las actividades del CIGOM.



Rosario Romero Centeno

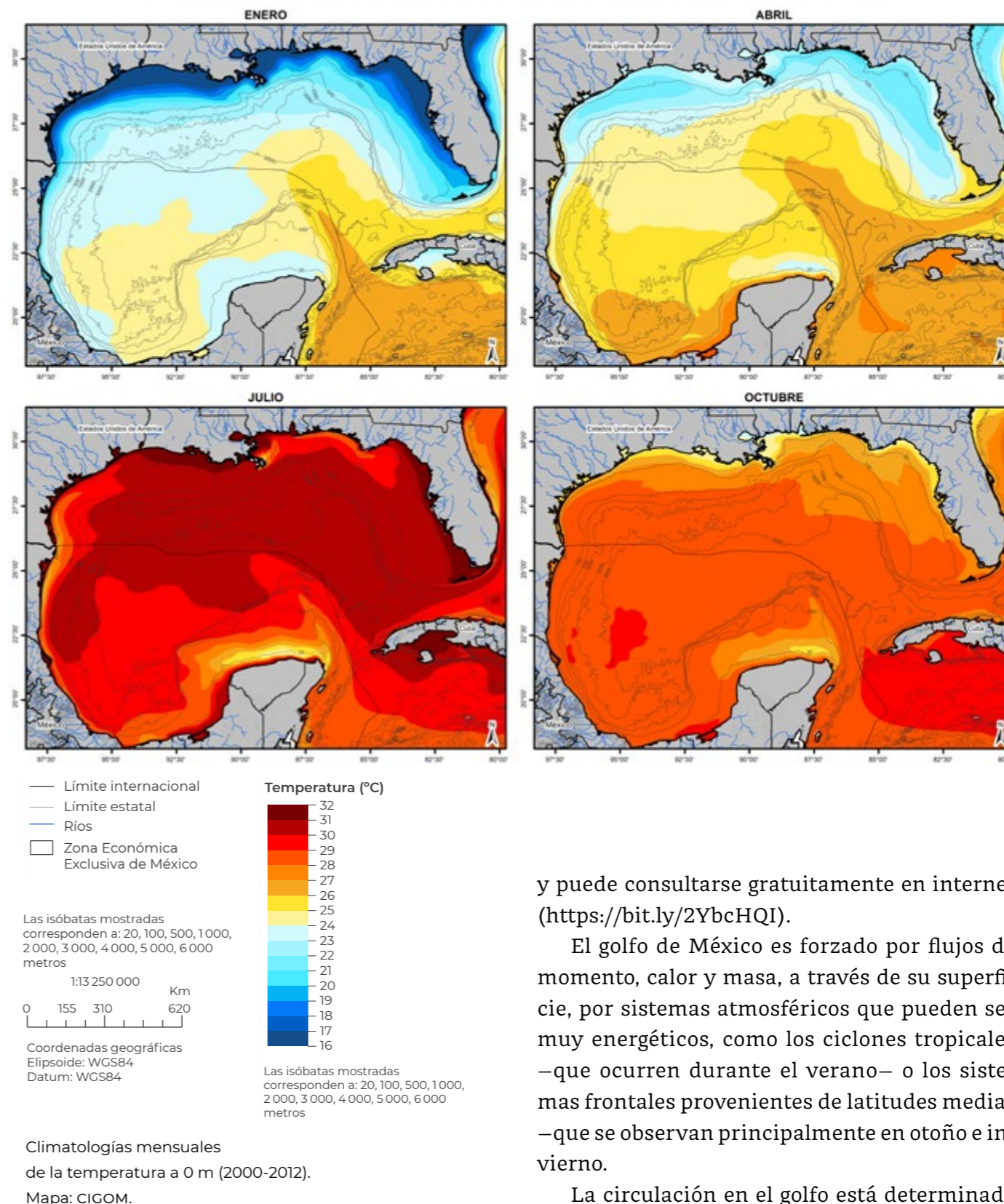
Jorge Zavala Hidalgo

Investigadora e investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Profundizando en la física del golfo de México

El Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) realizó un proyecto por medio del cual, entre otros muchos aspectos, se estudiaron diversos procesos oceanográficos del golfo. Para ello, se utilizaron distintas plataformas de observación, como *gliders*, que son sistemas autónomos que viajan en el océano y van muestreando diversas variables para después transmitir la información por satélite y antenas de radar, que desde la línea costera monitorean las corrientes superficiales hasta aproximadamente 150 km de la costa.

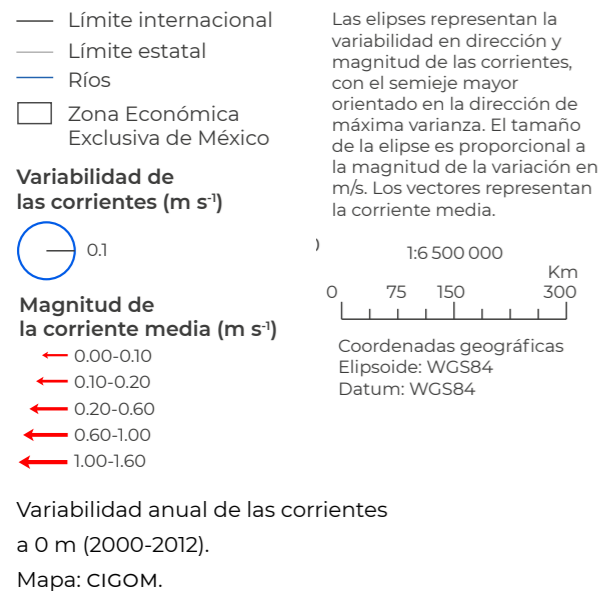
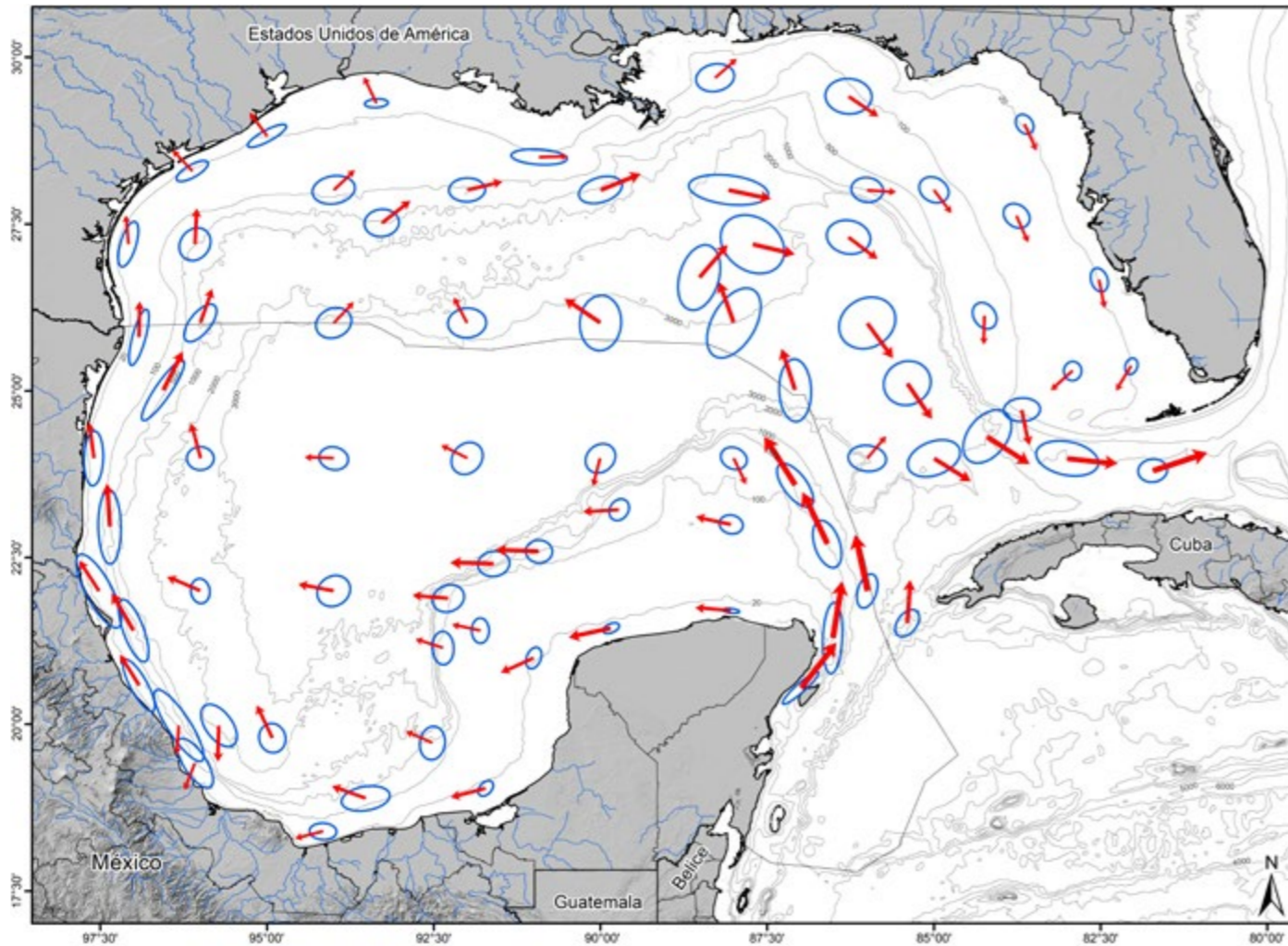
Por otro lado, se desarrollaron simulaciones numéricas para conocer mejor diversos fenómenos relacionados con la circulación, mezcla y dispersión de contaminantes, así como los procesos que afectan la generación de grandes remolinos, etc. También se elaboró el *Atlas de Línea Base Ambiental del golfo de México*, cuyo tomo II incluye información de su física,



y puede consultarse gratuitamente en internet (<https://bit.ly/2YbcHQI>).

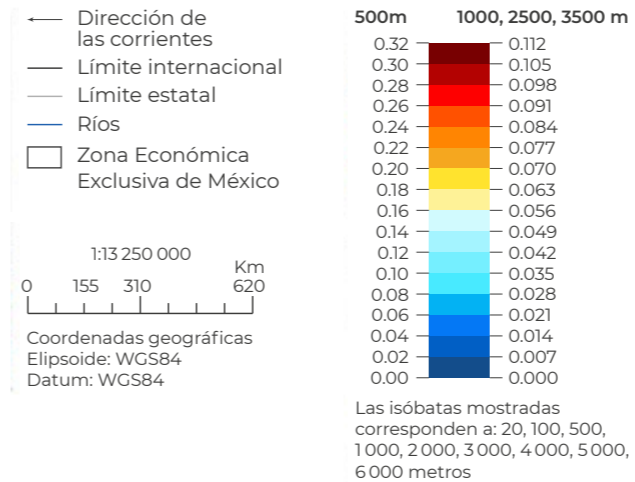
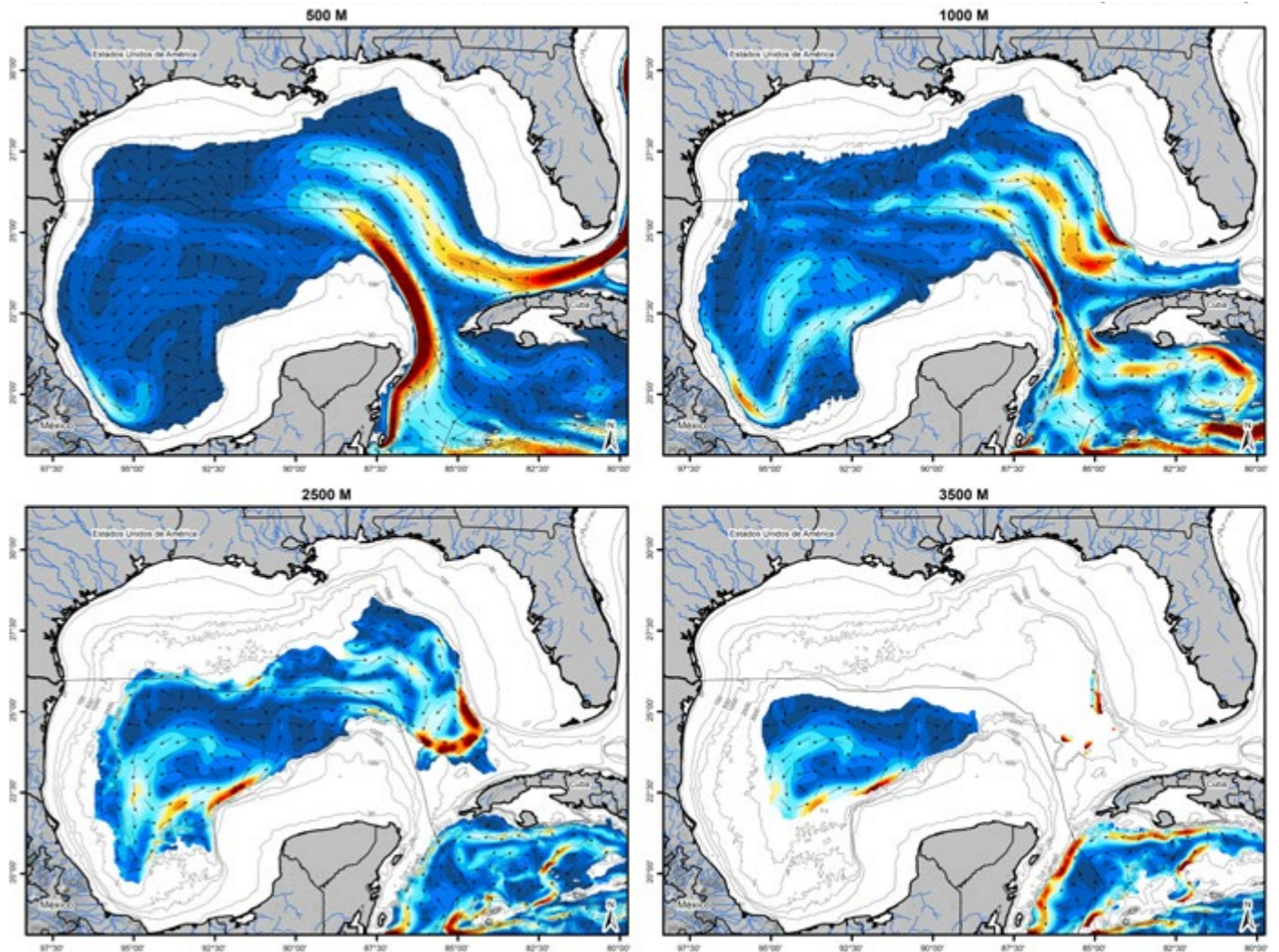
El golfo de México es forzado por flujos de momento, calor y masa, a través de su superficie, por sistemas atmosféricos que pueden ser muy energéticos, como los ciclones tropicales —que ocurren durante el verano— o los sistemas frontales provenientes de latitudes medias —que se observan principalmente en otoño e invierno.

La circulación en el golfo está determinada principalmente por la corriente de Lazo y los remolinos que de ella se desprenden. Esta corriente llega al golfo a través del canal de Yucatán, penetra hacia el noroeste, gira hacia el este,



después hacia el sur y finalmente sale por el estrecho de Florida para formar parte de la corriente del golfo. Con el tiempo, la corriente de Lazo evoluciona hasta que se estrangula y forma un remolino con rotación en sentido horario, proceso que dura varios meses y que se repite en forma no periódica.

Estos remolinos se desplazan de este a oeste por la zona central del golfo hasta llegar al talud continental, entre el norte de Veracruz y el sur de Texas, donde se disipan. Alcanzan diámetros de hasta 300 km, alrededor de 800 m de profundidad y corrientes que superan 1 m/s. Por lo general, los remolinos que giran en sentido horario –anticiclónicos– van acompañados



Climatologías anuales de las corrientes a diferentes profundidades (2000-2012)
Mapa: CIGOM.

en su recorrido por remolinos que giran en sentido antihorario –ciclónicos.

Las corrientes marinas

Los vientos son importantes en la circulación del Golfo, sobre todo en las plataformas continentales. Tienen una variabilidad estacional, la cual se ve reflejada en la circulación a lo largo de las costas de Texas, Tamaulipas, Veracruz y Tabasco. Además, la circulación en las plataformas presenta variaciones en la escala sinóptica, entre dos y diecinueve días.

La circulación profunda en el golfo de México se ha esquematizado mediante dos capas:

Atlas ambiental del golfo de México

una desde la superficie hasta los 800 a 1000 m de profundidad; y la otra desde los 1000 m hasta el fondo. La capa superior se caracteriza por la corriente de Lazo y la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos. La circulación en los primeros 1000 m es similar a la de los primeros 100 m, pero en general las corrientes más profundas son menos intensas que cerca de la superficie.

En la parte oriental del golfo profundo se observan remolinos asociados a la corriente de Lazo, pero de giro contrario, mientras que hacia el centro-oeste del golfo predomina un giro ciclónico sobre la planicie abisal y corrientes a lo largo del talud que siguen una trayectoria antihoraria.

Las masas de agua y la estratificación

Cada parcela de agua en los océanos se caracteriza principalmente por su temperatura y salinidad; éstas proporcionan información de su historia y origen. Las aguas de los mares tropicales son cálidas cerca de la superficie y su temperatura desciende con la profundidad. Por ejemplo, durante el verano, las aguas cerca de la superficie del golfo tienen temperaturas de 29 a 31 °C, pero a 1000 m de profundidad su temperatura oscila entre 4 y 6 °C. Esta estratificación es muy importante para la dinámica del océano, el clima y la vida en los mares.

Las aguas profundas del golfo de México están separadas de las del mar Caribe y del Atlán-

tico norte por dos umbrales: uno en el canal de Yucatán y el otro ubicado entre Cuba y la península de Florida. Esto limita la comunicación y provoca un aislamiento relativo de las aguas profundas del golfo.

La densidad del agua de mar, la cual está determinada por su temperatura y salinidad, afecta la intensidad y dirección de las corrientes. El agua que ingresa al golfo de México por el canal de Yucatán registra modificaciones a medida que viaja hacia el oeste y se mezcla con las aguas residentes y las de zonas costeras que reciben la descarga de los ríos. Ya en el golfo, las masas de agua se van modificando por la radiación solar, el viento, la precipitación, la descarga de ríos, la relación entre la corriente de Lazo y los giros ciclónicos y anticiclónicos, además de la interacción de éstos con el fondo oceánico.

Nutrientes y concentración de clorofila a en el golfo de México

Para los oceanólogos, es sabido que los procesos físicos que llevan las aguas subsuperficiales a la superficie son de gran importancia para el ciclo de vida en el mar, pues llevan los nutrientes a la zona donde llega la luz solar y se lleva a cabo la fotosíntesis. Tales procesos incluyen los movimientos ascendentes de las masas de agua, favorecidos por el efecto de los vientos y la dinámica oceánica.



Sharon Z. Herzka

Investigadora del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

Rigel Alfonso Zaragoza Álvarez

Edward M. Peters

Investigadores del Consorcio de Investigación del Golfo de México.

Las representaciones geográficas prehistóricas reflejan la necesidad de las primeras comunidades de plasmar las características espaciales de su entorno. Nuestros antepasados desarrollaron una innovadora plataforma de comunicación que, con el tiempo, se convirtió en la disciplina de la cartografía. Es así que los primeros mapas de los que se tiene registro, datan de entre 15000 a 25000 años antes de nuestra era e integran la ubicación de ríos, montañas y costas, además de estrellas.

Los primeros navegantes fueron exploradores y comerciantes que enfrentaron duras circunstancias para elaborar mapas de las costas continentales. A través de cuidadosas observa-



Los océanos proveen servicios ecosistémicos que sustentan la pesca, reducen la contaminación y ofrecen esparcimiento a los humanos.
Fotografía: Arturo Fajardo Yamamoto.

ciones, documentaron los puntos de referencia observables desde el mar usando la posición del sol, las constelaciones, el horizonte; además, registraron la posición de estructuras sumergidas que significaban riesgos para la navegación. Los océanos, que cubren alrededor de 70 % de la superficie de la Tierra, eran prácticamente invisibles a los ojos humanos.

Los conocimientos generados por los grandes exploradores, financiados en parte por los imperios colonizadores, dieron paso al estudio moderno de los océanos, integrado hoy en la ciencia de la oceanografía. La primera expedición científica se llevó a cabo a bordo del *HMS* (Navío de Su Majestad) *Challenger*, una embarcación británica que navegó los océanos Atlántico, Índico, Pacífico y Antártico entre 1872 y 1876.

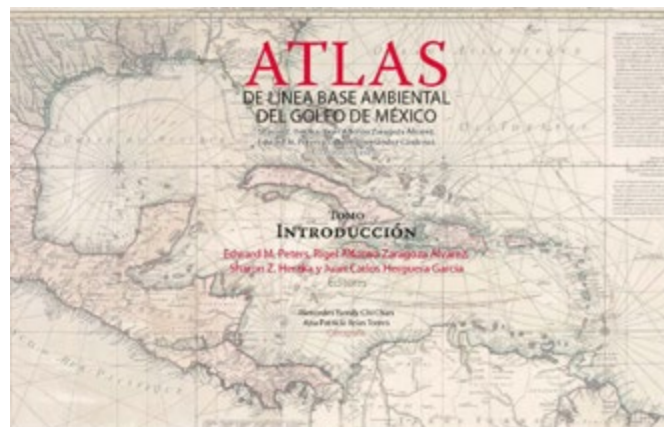
Los estudios del *Challenger* generaron los primeros mapas globales de las corrientes, la temperatura, la química de las aguas y las características del fondo; además, se colectaron miles de especímenes, poniendo en claro que los ecosistemas marinos no eran desiertos, sino altamente diversos incluso en regiones que sobrepasan los 11 km de profundidad. Desde su inicio, la oceanografía involucró esfuerzos de investigación interdisciplinaria. Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los océanos están intrínsecamente relacionadas; por ello, es indispensable la cooperación con el objetivo de lograr un entendimiento integral y sustentar la toma de decisiones, la conservación y el manejo de los ecosistemas.

Uno de los retos para elaborar representaciones espaciales de los océanos es que cons-

tituyen un ambiente tridimensional pues, por su naturaleza líquida y su acoplamiento con la atmósfera, se encuentran en constante movimiento. Además, las características físicas, químicas y ecológicas varían según la profundidad, ya que los océanos están estructurados por estratos, como si fuera un pastel de varias capas de sabores del que sólo vemos la cubierta de glaseado.

Los océanos y ecosistemas marinos desempeñan un papel fundamental en el sustento de la vida a nivel planetario y en la mitigación de los efectos del cambio climático. Proveen servicios ecosistémicos que sustentan la pesca, reducen la contaminación y ofrecen esparcimiento a la humanidad. Hoy, más que nunca, los ecosistemas marinos están degradados y bajo amenazas persistentes asociadas a actividades humanas y sus consecuencias: extracción y vertimiento de hidrocarburos, contaminantes plásticos y microplásticos, nutrientes en exceso, cambio climático (acidificación y aumento en el nivel del mar), sobrepesca y desarrollo costero desmedido.

Desde sus inicios, la cartografía de México destacó por el estudio del amplio y diverso territorio terrestre, si bien excluyendo a los océanos. El Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) realizó el primer *Atlas nacional de México* (1990-1992), el cual incluyó algunos aspectos oceanográficos, pero de alcance limitado por la ausencia de información. A lo largo del tiempo, se han hecho esfuerzos individuales centrados en regiones específicas de la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México, e instituciones como el Instituto Na-



La obra es de acceso libre y consta de once tomos temáticos.
Fotografía: Archivo CIGOM.



cional de Estadística y Geografía (INEGI), realizan estudios destacados sobre los mares y costas del país. Sin embargo, hay una gran carencia de información cartográfica integrada e interdisciplinaria que sirva como referencia de las condiciones ambientales predominantes y pueda proporcionar información robusta, estructurada y reciente para el manejo, conservación y entendimiento de los mares mexicanos.

Una ventana a un patrimonio nacional

El *Atlas de Línea Base Ambiental del golfo de México* es el primer estudio geográfico sobresaliente que el país tiene de uno de sus mares y repre-



Charrán común. Progreso, Yucatán.
Fotografía: Esteban Dupinet.



senta la más detallada e interdisciplinaria caracterización hecha hasta el día de hoy; es una referencia de importancia histórica. Los once tomos temáticos y los 1331 mapas que lo componen reflejan el conocimiento derivado de múltiples aproximaciones, incluyendo muestreos, modelos numéricos y el uso de sensores remotos. Hace mucho hincapié en las aguas mexicanas del golfo central, donde la profundidad alcanza cerca de los 4000 m, así como de la Plataforma de Yucatán, el Plegado Perdido en el noroeste y la bahía de Campeche en el sur.

La obra integra el esfuerzo de investigación de más de 280 personas y diez instituciones mexicanas que colaboraron a lo largo de tres

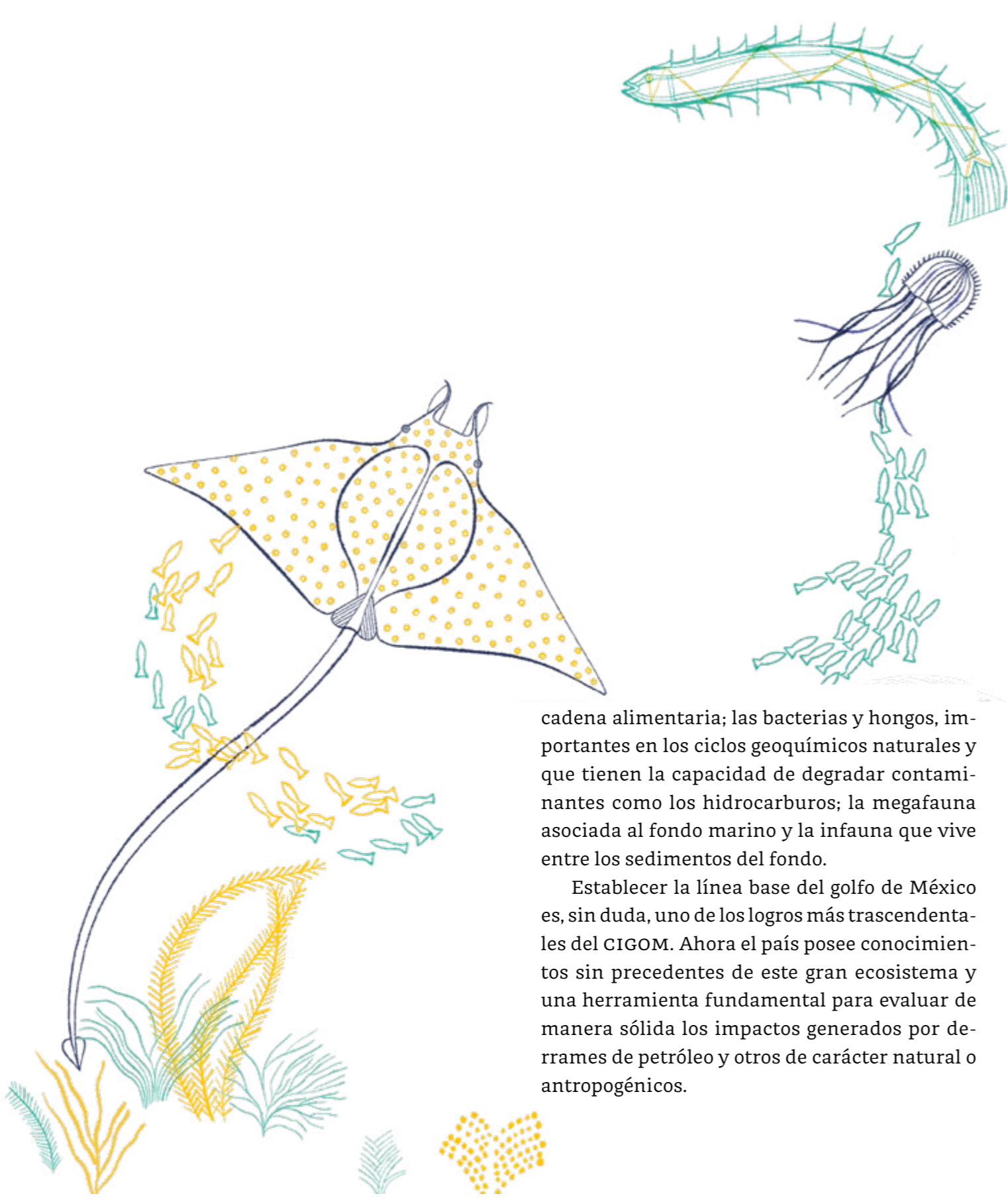


Flamenco americano del Caribe. Progreso, Yucatán.
Fotografía: Esteban Dupinet.

años y medio. Está escrita en un lenguaje no especializado, cada tomo incluye una sección introductoria y otra que describe las aproximaciones científicas y cartográficas empleadas en su elaboración. Además, toda la obra incluye fotografías e ilustraciones de gran riqueza visual.

El *Atlas* presenta mapas de las condiciones meteorológicas, corrientes y oleaje a lo largo del año, así como de las características fisicoquímicas y la distribución de hidrocarburos en las

diferentes profundidades y en el fondo marino. Se incluyen los hábitats de especies de importancia pesquera y bajo conservación: peces pelágicos, tiburones, cetáceos y tortugas marinas, además de los ecosistemas de pastos marinos, hábitats de crianza para numerosas especies. En el *Atlas* se evalúa el estado de salud de organismos bioindicadores y se caracterizan distintas comunidades, incluyendo el fitoplancton y zooplancton que conforman la base de la



cadena alimentaria; las bacterias y hongos, importantes en los ciclos geoquímicos naturales y que tienen la capacidad de degradar contaminantes como los hidrocarburos; la megafauna asociada al fondo marino y la infauna que vive entre los sedimentos del fondo.

Establecer la línea base del golfo de México es, sin duda, uno de los logros más trascendentales del CIGOM. Ahora el país posee conocimientos sin precedentes de este gran ecosistema y una herramienta fundamental para evaluar de manera sólida los impactos generados por derrames de petróleo y otros de carácter natural o antropogénicos.

La obra está disponible en:
atlascigom.cicese.mx

Ciencias sociales y crisis ambiental crítica



Entrevista a Emiliano Terán Mantovani

Sociólogo, investigador, activista y ecologista político posicionado contra las políticas estatales y empresariales del extrativismo, defensor y teórico de la lucha medioambiental en América Latina, profesor de la Universidad Central de Venezuela, obtuvo un máster en Economía Ecológica por la Universidad Autónoma de Barcelona y doctorante por la misma universidad en Ciencia y Tecnología Ambientales. Es también investigador asociado al Centro de Estudios para el Desarrollo y autor del libro *El fantasma de la gran Venezuela*.



Ciencias y Humanidades: ¿Cuál es la situación de América Latina y su relación con las ciencias sociales?

Emiliano Terán Mantovani: Para entender América Latina tenemos que comprenderla desde su origen y su configuración histórica, que ha sido en torno a la colonialidad. Una marca que configuró toda la sociedad, principalmente por el extractivismo, fueron sociedades organizadas por relaciones coloniales de poder, en cuanto al saber, a la extracción masiva de recursos naturales para un mercado mundial.

Aunque pueda parecer un patrón viejo y, a pesar de que hay actualizaciones, estas configuraciones todavía siguen vigentes. Sociedades organizadas en torno al expolio de la naturaleza, por tanto, marcadas por una gran desigualdad e injusticia sobre territorios, bosques, asentamientos campesinos, tierras indígenas, sobre la base de un modelo de desarrollo que hoy en día en los debates académicos están en cuestionamiento.

El propio inicio de la colonización en América Latina supuso el inicio de un conjunto de conflictos ambientales y de resistencias territoriales; se puede pensar en Zacatecas, Potosí, o las primeras formas de colonización en Venezuela, en el Caribe. Éstas suponían el ingreso forzado o violento de la colonización española para la apropiación de territorios, la explotación del cuerpo y trabajo de las personas y el expolio de recursos. Pareciera, nuevamente, un patrón viejo, pero es algo que todavía se mantiene, por ejemplo, en el caso de Venezuela, el gobierno actual está en una especie de asalto a la Amazonia venezolana, sobre la base del expolio de recursos para la extracción, sin ningún tipo de consentimiento de los pueblos indígenas, y devastando unas zonas de reservas acuíferas y de bosques muy



delicada de la cual depende el país. Esta lógica de colonización sobre la base de una idea de desarrollo que está en cuestionamiento, que necesitamos debatir y más a la luz de esta crisis global, es una marca constitutiva que refleja las desigualdades, la insostenibilidad de los modelos sociales.

Creemos que la ciencia social crítica trata de alertar a la sociedad, a la clase política, al conjunto de ciencias existentes para que se puedan usar los conocimientos, que sean funcionales a economías y sociedad y para la vida, sobre todo a causa de que nos encontramos en una situación planetaria muy delicada, en la cual las tramas de la vida que nos sostienen están en peligro y, por tanto, la propia vida de la humanidad y de otras especies. Necesitamos debatir estas cosas con urgencia ante la emergencia ambiental existente en el planeta.

CyH: ¿Cómo se podrían definir las ciencias sociales críticas?

ETM: Las ciencias sociales críticas las podríamos definir a partir de dos grandes rasgos: el primero tiene que ver con que son unas ciencias sociales que han intentado históricamente trascender, escarbar mucho más allá de las convenciones, los patrones epistémicos y de conocimiento dominantes, sobre todo tratándose de conceptualizar una transformación de la sociedad y también de develar las relaciones de poder que constituyen los modelos de conocimiento, de las economías dominantes, las relaciones sociales y las relaciones con la naturaleza.

El segundo rasgo tendría que ver con la manera en la cual las ciencias sociales están comprometidas con las luchas por la justicia social y ambiental, con todo y que buscan objetividad

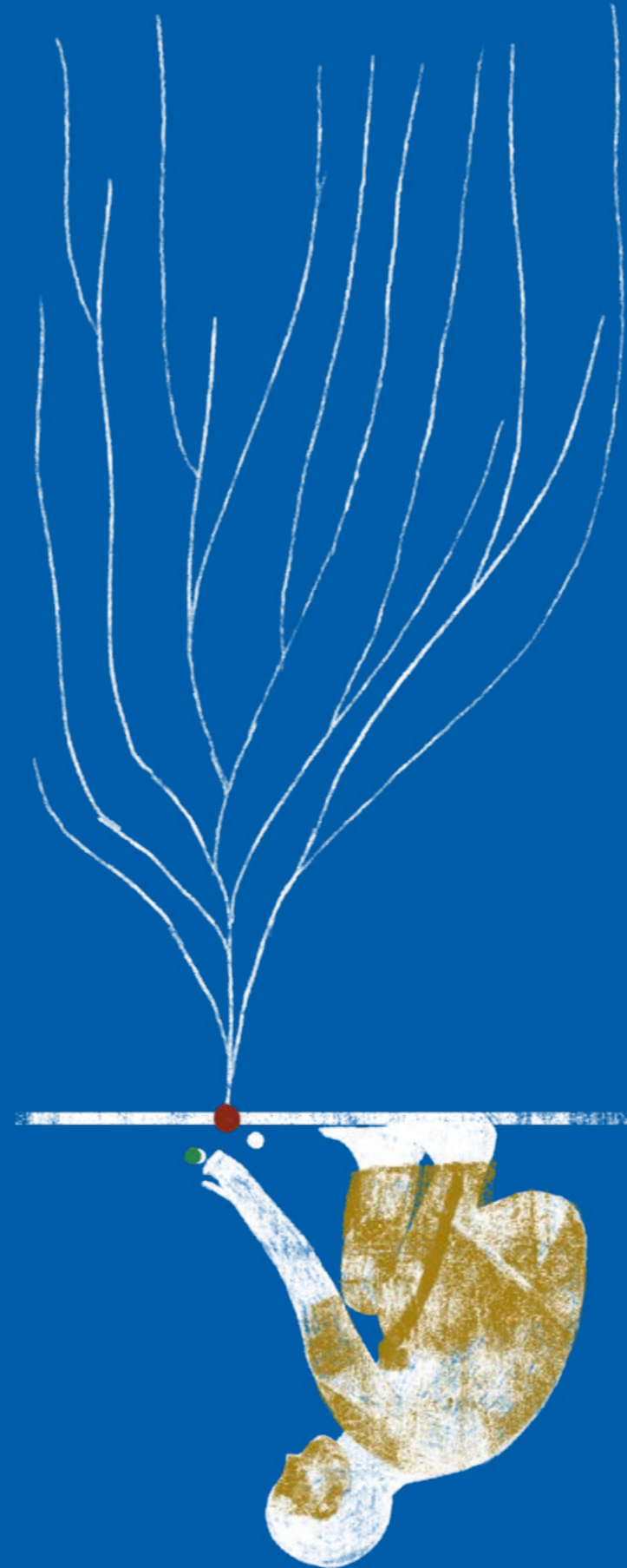


y rigurosidad en sus investigaciones, toman partido y se involucran con las movilizaciones, las luchas políticas y posiciones de pensamiento que buscan trascender y cambiar estas relaciones de injusticia social ambiental, económica y política que hay en la región.

En el caso latinoamericano, hay que conectarlas con la línea histórica del pensamiento crítico latinoamericano, porque persisten todavía las preocupaciones fundamentales como el tratar de buscar la emancipación de las formas de dominación internacional, salir de la dependencia, salir del extractivismo, ampliar la justicia social y, hoy en día, con más fuerza, ampliar la justicia ambiental. Esta línea de pensamiento crítico se mantiene en la actualidad. Me parece crucial y fundamental inclusive contrastarlo con los tipos de gobierno que ha habido en América Latina. Hemos tenido gobiernos quizá de un talante más conservador que mantuvieron o han mantenido por mucho tiempo los viejos patrones de poder y del modelo de sociedad, pero también hemos visto la entrada de gobiernos de izquierda de diverso tipo que llegaron con programas de justicia social y ambiental, que, sin embargo, en la base, en la médula de la propuesta, no transformaron ni modificaron el modelo de expolio de la naturaleza y de injusticia social y ambiental, no modificaron el modelo extractivista y, en algunos casos, lo intensificaron.

CyH: ¿Hay alternativas que contribuyan a la solución de los problemas ambientales y sociales que surjan desde el conocimiento?

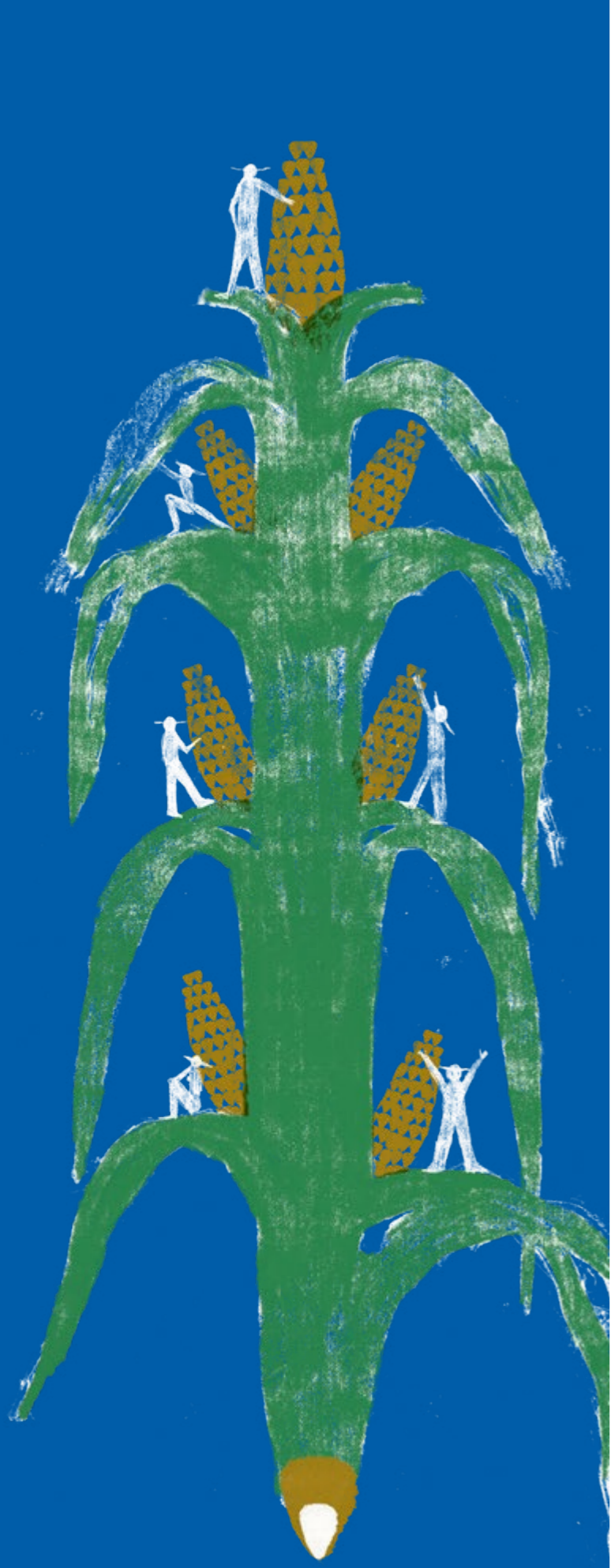
ETM: Nuevamente son las preguntas que pienso desde la ciencia social crítica, sobre todo de la perspectiva de la ecología política. Tratamos de proponer, precisamente, cuáles son las vías



y las alternativas al modelo extractivista dominante. Es decir, preguntarse si el modelo petrolero o el modelo de la megaminería es el único modelo posible o si hay otras alternativas. Y la otra cuestión que me parece central para América Latina, e inclusive para todo el mundo, es que otros modos de vida, otros mundos, concepciones y cosmovisiones existentes que aparecen más claramente en comunidades y pueblos indígenas, comunidades campesinas, saberes ancestrales y están cuestionando de cierta forma este modelo de desarrollo porque, a diferencia de lo que podemos pensar nosotros, en esas sociedades, comunidad y saberes ancestrales, hay también muchas soluciones y alternativas a la crisis que estamos viviendo no sólo en América Latina, sino a nivel global.

Esto lo podemos pensar incluso en la propia pandemia: aparte del saber científico vinculado, evidentemente al factor epidemiológico que enfrentamos. ¿Qué más hay sobre las nociones de salud, sobre las nociones de enfermedad que tienen, además, que ver no sólo con un individuo separado, sino en una relación con el entorno? Nosotros nos enfermamos también porque nuestro entorno está intoxicado, está contaminado. ¿Qué otras nociones de medicina y salud deberíamos incorporar de manera tal que logremos tener un conjunto de conocimientos con los cuales podamos hacer frente?

Hoy en día en el planeta mucho más de la mitad de los alimentos, según algunas estadísticas, lo produce el sector campesino, no la gran agroindustria. El mundo campesino es muy importante en esta transición, no solamente por esa relación cercana con la tierra, sino porque todavía hay saberes ancestrales muy importantes para abordar la crisis. Evidentemente este mundo tiene un rol importante igual que



el mundo indígena. La irrupción de organizaciones indígenas en la política tuvo un efecto muy positivo, porque, en realidad, lo que permitió fue introducir elementos de descolonización en el conocimiento y en la política; dejar de entender la economía en la sociedad como el apropiarse de un modelo de consumo que no se puede sostener y la manera en la cual los pueblos indígenas han portado otras visiones.

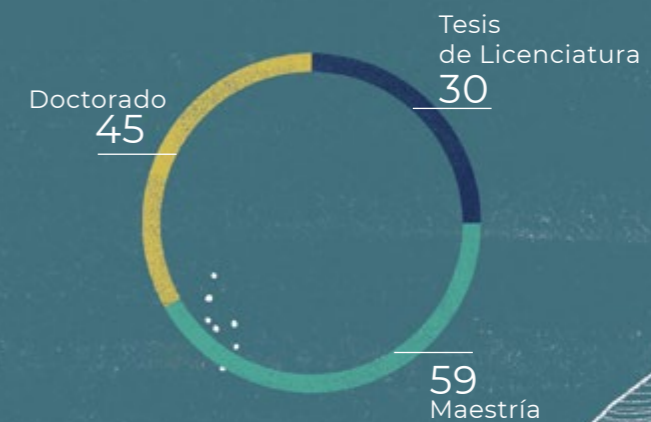
El llamado es, precisamente, al diálogo entre la ciencia y los otros sectores de la sociedad, un diálogo mucho más horizontal. Yo creo que la ciencia social también tiene mucho que aprender de las cosmovisiones de los pueblos indígenas: esa visión más horizontal que elogia más a la diversidad; es una postura que no es la dominante, porque seguimos siendo esa noción de la ciencia en la cual ésta contiene la verdad y desplaza a los otros conocimientos. Plantear una visión de diálogo es desafiante para una sociedad como la actual, donde la ciencia y los políticos son los que dicen todo lo que hay que hacer y cómo se hace. El llamado, evidentemente, es a todos los sectores de la sociedad a nutrirnos de estas diferentes perspectivas.

DATA

Investigación CIGOM

Con apoyo del Conacyt y otras instituciones en el Cigom ha aumentado el número de investigadoras e investigadores que colaboran en distintos proyectos. En 2022 participan más de 500 investigadores, mientras que en 2015 eran 300.

Se ha fortalecido la formación de estudiantes de distintas áreas del conocimiento, dentro del Cigom se han elaborado:



Además, se han realizado más de:

- 256 Participaciones en Congresos
- 77 Postdoctorados
- 34 Estancias de intercambio científico
- 22 Talleres con la sociedad

Y se han publicado más de:

- 200 Artículos científicos
- 139 Notas en redes sociales
- 115 Notas en prensa nacional
- 12 Capítulos de libro

El alma de los peces



Encuentro con Orso Angulo

El primer registro que se tiene de un *Gyotaku* es de alrededor de 1850. La leyenda cuenta que un día un samurai pescó una carpa tan hermosa que pensó que era el regalo ideal para el emperador. Sin embargo, para llegar a él debía enfrentar un viaje de varios días, la carpa no llegaría en buen estado. Entonces, se le ocurrió que podía cubrirla de tinta y colocarle un papel encima. De esta forma lograría preservar su belleza. Junto al grabado escribió un poema. El emperador quedó fascinado

con la imagen. Más adelante, otros pescadores retomaron la idea y comenzaron a grabar las siluetas de su pesca. Cada imagen iba acompañada de un haikú de agradecimiento.

Aunque al principio los *Gyotakus* se usaban como prueba de la frescura de la pesca, actualmente su valor es puramente artístico y la técnica se ha trasladado de Japón al mundo occidental. Los que practican el arte del *Gyotaku* no matan para imprimir, más bien esperan a que la naturaleza les regale

un elemento que puedan usar en sus creaciones. A veces, por ejemplo, recrean organismos preservados en colecciones científicas, tal es el caso de Orso Angulo, quien ha plasmado más de setenta especies diferentes en sus lienzos:

Orso Angulo: Después de ensayo y error, poco a poco encontré lo que buscaba, esa sutil pero difícil transmisión de la esencia de un ser al lienzo. Al principio practicaba el *Gyotaku* por satisfacción propia. Como buen biólogo y coleccionista, me llamaban la atención los organismos del mar. Después descubrí que las personas se interesaban en ellos, en su capacidad de retratar la esencia del pez. Presenté mi obra por primera vez en 2016, en la exhibición *Gyotaku: el alma de los peces*.

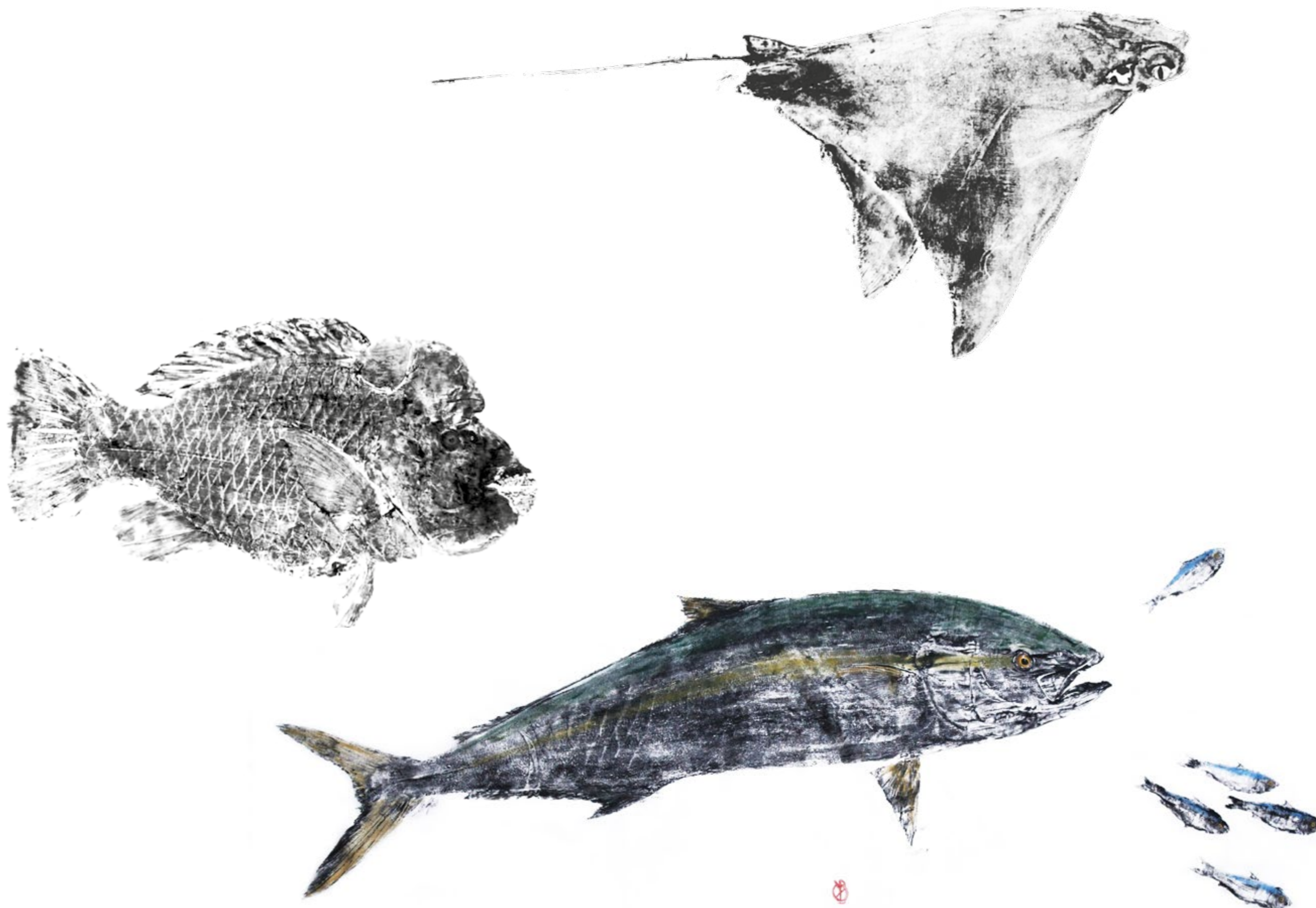
El biólogo Orso Angulo Campillo estudió Biología Marina y desde el inicio de su trayectoria comenzó a estudiar los moluscos nudibranchios. Ha descrito y publicado cuatro especies de estos moluscos: *Cuthona lizae*, *Marionia kinoi*, *Pneumoderma cicimarencis* y *Pneumodermaopsis tacoi*, si bien desde hace algunos años se ha dedicado de lleno



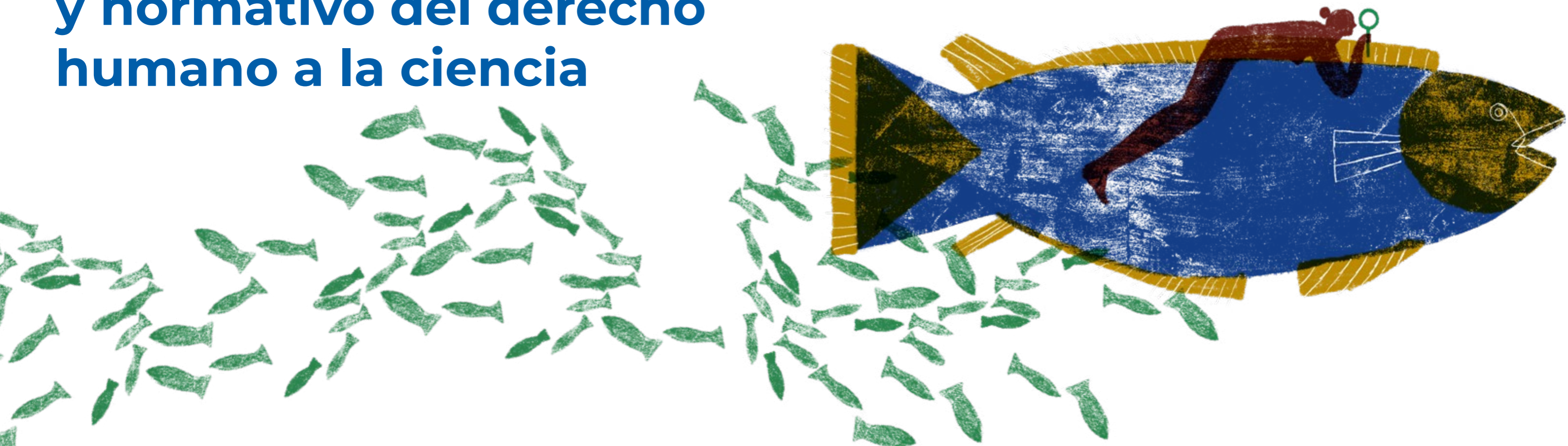


al arte de la tinta y el lienzo. A diferencia de las impresiones japonesas, que buscaban rendirles un homenaje a los peces, las creaciones de Angulo se centran en animales poco estéticos, sin valor comercial o en la anónima fauna de acompañamiento.

Orso Angulo: He descubierto que la ciencia y el arte se parecen bastante: requieren de disciplina, de un continuo proceso de aprendizaje, y ambas emplean la abstracción para comunicarse; la ciencia abstrae un objeto biológico para estudiarlo, entenderlo y darlo a conocer, mientras que el arte lo hace a la inversa: hace real una abstracción, la materializa para enseñarla.



El desarrollo conceptual y normativo del derecho humano a la ciencia



Raymundo Espinoza Hernández
Titular de la Unidad de Asuntos Jurídicos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Keyla Gómez Ruiz
Egresada de la Facultad de Derecho de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la eficacia de las normas que contemplan el derecho humano a la ciencia es su escaso desarrollo doctrinal por parte de personas expertas y órganos internacionales vinculados a los ordenamientos que lo reconocen, así como por la ausencia de litigios ante tribunales nacionales e internacionales motivados por la violación a dicho derecho.

El derecho a la ciencia se encuentra contemplado en el artículo 27 de la Declaración

Universal de los Derechos Humanos y en el 15 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, que establecen el derecho de toda persona a: *i)* participar en el progreso científico; *ii)* gozar de los beneficios que resulten del mismo, y *iii)* disfrutar de la protección de los intereses morales y materiales que le correspondan por razón de las producciones científicas de que sea autora (Asamblea General de la ONU, 1948, art. 27 y 1976, art. 15). También

ha sido reconocido por instrumentos regionales de derechos humanos, como la Declaración Americana de los Derechos y Deberes del Hombre, en su artículo 13, y el Protocolo Adicional a la Convención Americana sobre Derechos Humanos en Materia de Derechos Económicos, Sociales y Culturales —también conocido como «Protocolo de San Salvador»—, dentro de su artículo 14 (IX Conferencia Internacional Americana, 1948; Convención Americana sobre Derechos Humanos, 1988).

De acuerdo con los instrumentos internacionales mencionados, así como con los artículos 47 y 51 de la Carta de la Organización de los Estados Americanos, y el 26 de la Convención Americana sobre Derechos Humanos, el derecho a la ciencia se traduce en las obligaciones de los estados de: *i)* asegurar el ejercicio de este derecho; *ii)* garantizar la conservación, el desarrollo y la difusión de la ciencia; *iii)* respetar la libertad para la investigación científica y la actividad creadora; *iv)* dar

importancia primordial, dentro de sus planes de desarrollo, al estímulo de la ciencia y la tecnología orientadas hacia el mejoramiento integral de la persona humana y como fundamento de la democracia, la justicia social y el progreso; *v)* fomentar la ciencia y la tecnología mediante actividades de enseñanza, investigación y desarrollo tecnológico y programas de difusión y divulgación; *vi)* estimular las actividades en el campo de la tecnología con el propósito de adecuarla



a las necesidades de su desarrollo integral, y *vii*) adoptar providencias, tanto a nivel interno como mediante la cooperación internacional para lograr progresivamente la plena efectividad de los derechos que se derivan de las normas sobre educación, ciencia y cultura, en la medida de los recursos disponibles, por vía legislativa u otros medios apropiados (OEA, 1951, arts. 47 y 51; Convención Americana sobre Derechos Humanos, 1969, art. 26).

En 2012, la relatora especial de la ONU señaló que el contenido normativo del derecho a la ciencia comprende: *i*) el acceso de toda persona a los beneficios de la ciencia, sin discriminación; *ii*) las oportunidades de contribuir a la actividad científica para todas y todos y la libertad de investigación científica; *iii*) la participación

de las personas y comunidades en la adopción de decisiones, y *iv*) un entorno favorable para la conservación, el desarrollo y la difusión de la ciencia y la tecnología (Consejo de Derechos Humanos-ONU, 2015, párr. 25).

Por otro lado, al realizar un análisis comparativo entre países como Argentina, Bolivia, Brasil, Ecuador, Alemania, España, Francia y Estados Unidos de Norteamérica, es posible corroborar que la tendencia en la política normativa global apunta al reconocimiento de este derecho en las constituciones y legislaciones internas, así como a la asunción de obligaciones análogas a las previstas en los instrumentos internacionales por parte de los estados. No obstante, pese a su relevancia y cada vez mayor notoriedad, el desarrollo normativo interno del derecho humano a la

ciencia es todavía limitado. Si bien se hace referencia a ciertas aristas del derecho humano a la ciencia, no lo contemplan con denominación precisa ni agotan la totalidad de sus determinaciones normativas posibles.

Lo anterior hace patente, además, la necesidad de desarrollar una «teoría del derecho a la ciencia», reconocida por el derecho internacional en materia de derechos humanos y por los ordenamientos internos de múltiples estados, con el objetivo de determinar su contenido, su alcance y las mejores garantías para su cumplimiento (UNESCO, 2020a).

La importancia del desarrollo conceptual y normativo del derecho a la ciencia radica en su naturaleza como «derecho habilitador» de otros derechos o «derecho instrumental», destinado

a crear las condiciones necesarias para el ejercicio de otros derechos y libertades fundamentales, como los relacionados con la salud, el medioambiente, el desarrollo, la educación y la alimentación, pero también con el trabajo, la información, la participación política y el acceso a la justicia, entre otros (UNESCO, 2020a, p. 6).

Referencias

A. Instrumentos internacionales

IX Conferencia Internacional Americana (1948). Declaración Americana de los Derechos y Deberes del Hombre.

<http://www.oas.org/es/cidh/mandato/Basicos/declaracion.asp>

Convención Americana sobre Derechos Humanos (7 al 22 de noviembre de 1969).

Convención Americana sobre Derechos Humanos «Pacto de San José»
<https://www.oas.org/dil/esp/Convenci%C3%B3n%20Americana%20sobre%20Derechos%20Humanos%20Pacto%20de%20San%20Jos%C3%A9%20de%20Costa%20Rica%20Rep%C3%BAblica%20Dominicana.pdf>

Convención Americana sobre Derechos Humanos (17 de noviembre de 1988).

Protocolo Adicional a la Convención Americana sobre Derechos Humanos en Materia de Derechos Económicos, Sociales y Culturales «Protocolo de San Salvador».
<https://www.oas.org/juridico/spanish/tratados/a-52.html>

B. Documentos internacionales

Asamblea General de la ONU (10 de diciembre de 1948).

Declaración Universal de Derechos Humanos.
<https://www.un.org/es/about-us/universal-declaration-of-human-rights>

UNESCO (2020a). Derecho a la ciencia. Una mirada desde los derechos humanos. UNESCO, Oficina Regional de Ciencias de la UNESCO para América Latina y el Caribe, UNESCO Montevideo.

Consejo de Derechos Humanos-ONU (4 de agosto de 2015). Informe de la relatora especial sobre los derechos culturales, Farida Shaheed. Derechos culturales. 70° período de sesiones, A/70/279.

<https://www.ohchr.org/es/documents/thematic-reports/a76178-cultural-mixing-and-cultural-rights-report-special-rapporteur>

Grupo de Monitoreo Oceanográfico

con Gliders

Enric Pallàs-Sanz

Investigador en el Departamento de Oceanografía Física del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

Juan Pablo Orozco

Investigador en el Centro de Investigación y Desarrollo Industrial.

Miguel Tenreiro

Investigador en el Departamento de Oceanografía Física del CICESE.

Marco Ulloa

Profesor en el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Altamira.

Gabriela Athié

Investigadora en el Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Universidad Veracruzana.

Ángel Ruiz Angulo

Oceanógrafo del Servicio Meteorológico de Islandia.

Adrián Villicaña

Piloto en el Departamento de Oceanografía Física del CICESE.

Eliot Aranda

Desarrollador de Software en el Departamento de Oceanografía Física del CICESE.

Simó Cusí

Piloto del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders.

Johanna Saavedra

Procesadora de datos oceanográficos del CICESE.

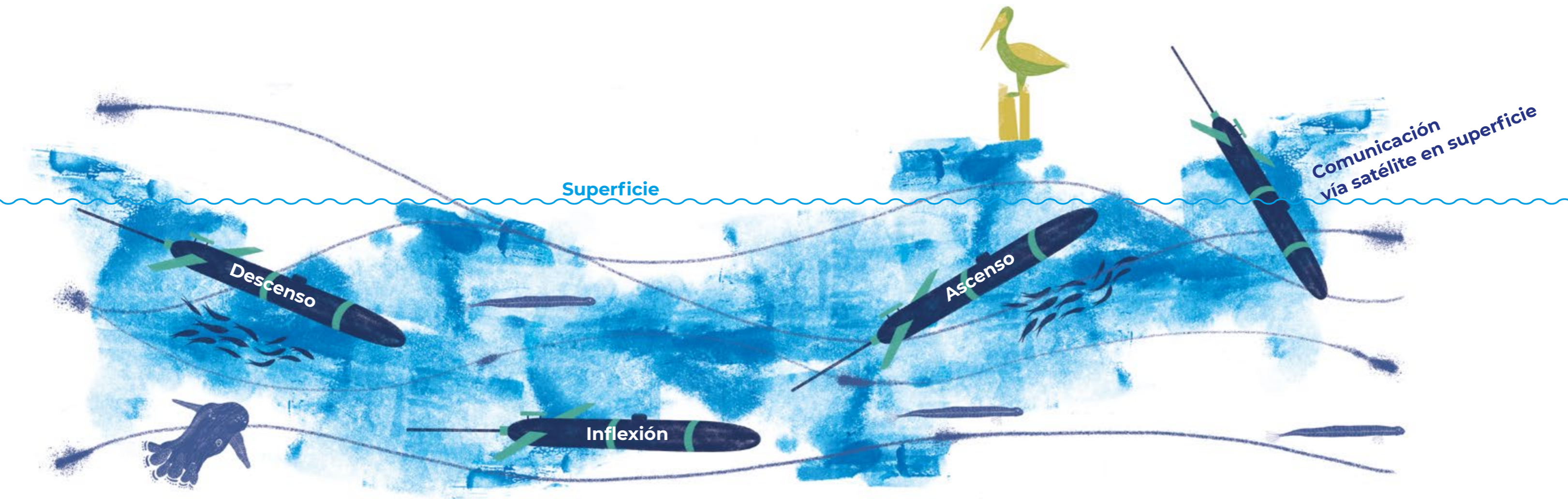
El Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG) fue creado en 2016 en el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, Centro Público de Investigación (CPI) del Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (Conacyt), en el marco del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGOM) con el fin de utilizar tecnología marina de frontera para generar nuevas capacidades en el monitoreo de las aguas Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México y, principalmente, en el golfo de México. El GMOG dispone actualmente de una flota de ocho planeadores submarinos tipo *seaglider* concebidos en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad de Washington y comercializados por Huntington Ingalls Industries.

Según un artículo de revisión publicado en 2019 en la revista *Frontiers in Marine Sciences* (<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00422>), México es actualmente el país con más *seagliders* en Latinoamérica y el 6° a nivel mundial, todos ellos propiedad del CICESE. Además, actualmente se desarrolla de un vehículo submarino tipo *glider*, Kay Juul 2, por parte del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), CPI del Conacyt.

Los *seagliders* son vehículos submarinos, autónomos, y dirigidos remotamente mediante comunicación satelital. Se mueven verticalmente a través de la columna de agua hinchando y deshinchando una vejiga, y horizontalmente gracias a sus alas laterales y forma hidrodinámica. Se pueden sumergir hasta los 1000 m de profundidad y tienen una

autonomía entre dos y tres meses. Los *seagliders* del GMOG son plataformas de observación que se equipan con sensores de medida que proporcionan información física y biogeoquímica del océano en tiempo real. Aunque los *seagliders* pueden tener distintos tipos de operación, el modo principal se basa en el movimiento en el plano vertical, generando el patrón característico de «diente de sierra» (*Sawtooth pattern*) en cada ciclo de operación y muestreo, como se indica en la figura 1.

La capacidad de muestreo del océano de forma remota, adaptativa y en tiempo real con los *seagliders* del GMOG, es única en México. Tiene aplicaciones de gran interés para la sociedad mexicana y para la industria del petróleo y gas que opera en el golfo de México. Por ejemplo,



permite medir las corrientes alrededor de un derrame de petróleo, de una plataforma de exploración/explotación o de una mancha de sargazo y proporcionar información clave para las predicciones sobre su destino final; permite localizar en tiempo real regiones con alta concentración de clorofila y así identificar regiones con alto valor pesquero; monitorear en tiempo real el contenido de calor del océano superior que modula

la intensificación de huracanes en la temporada de junio a octubre en el golfo de México.

La estructura del GMOG se basa en el buen funcionamiento de diferentes grupos de trabajo especializados y de la infraestructura necesaria para la adquisición de información, su control de calidad, su visualización y distribución en tiempo real a través de plataformas de visualización nacionales como la del GMOG

(<https://gliders.cicese.mx/datos>) y del Sistema Integral de Manejo de Datos (SMID) del CIGOM (<https://viz.daWtaserver.cigom.org/>). WEI esquema de funcionamiento del GMOG se esquematiza en la figura 2.

El *Equipo Científico* del GMOG diseña y propone los objetivos de cada misión para que el *Equipo de Pilotos* confeccione el *Reporte de Pre-misión* y programe el *glider* para realizar la

trayectoria propuesta por el *Equipo Científico*.

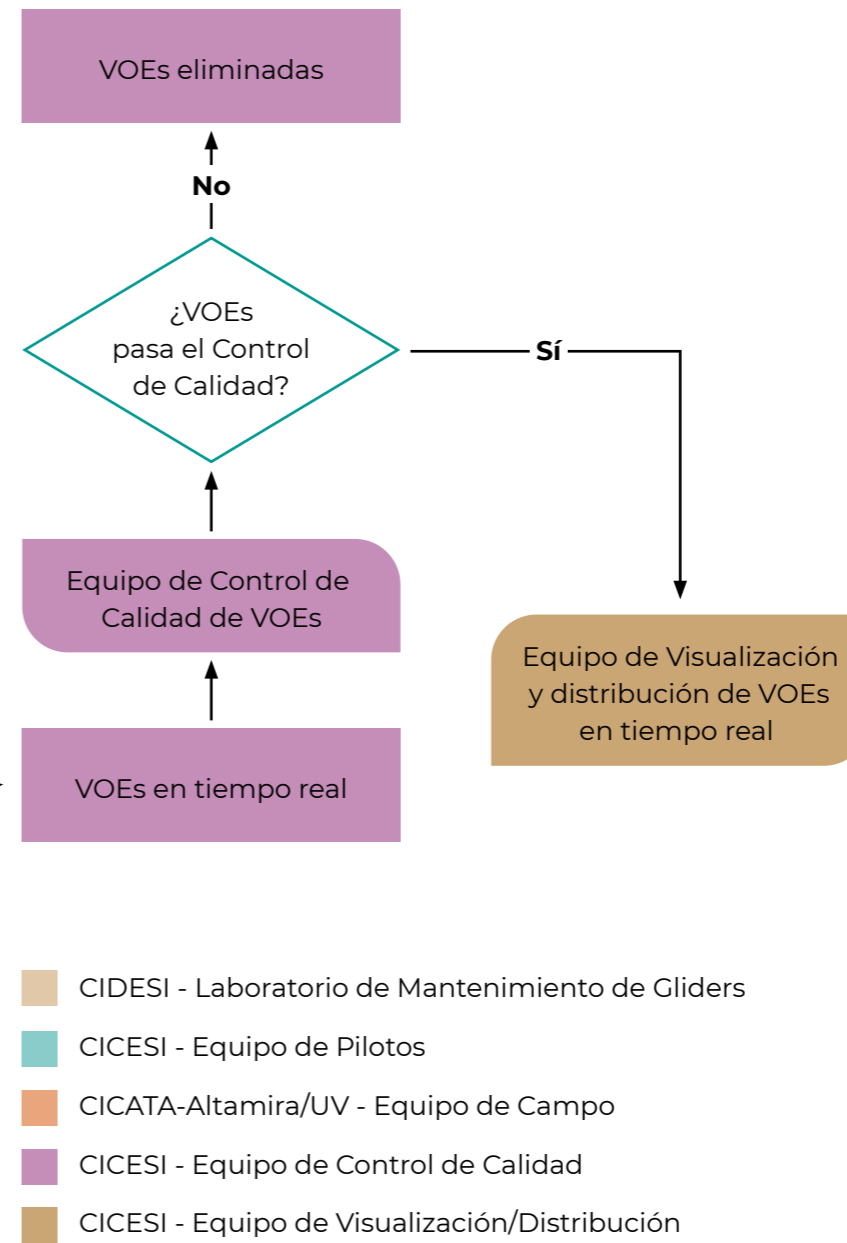
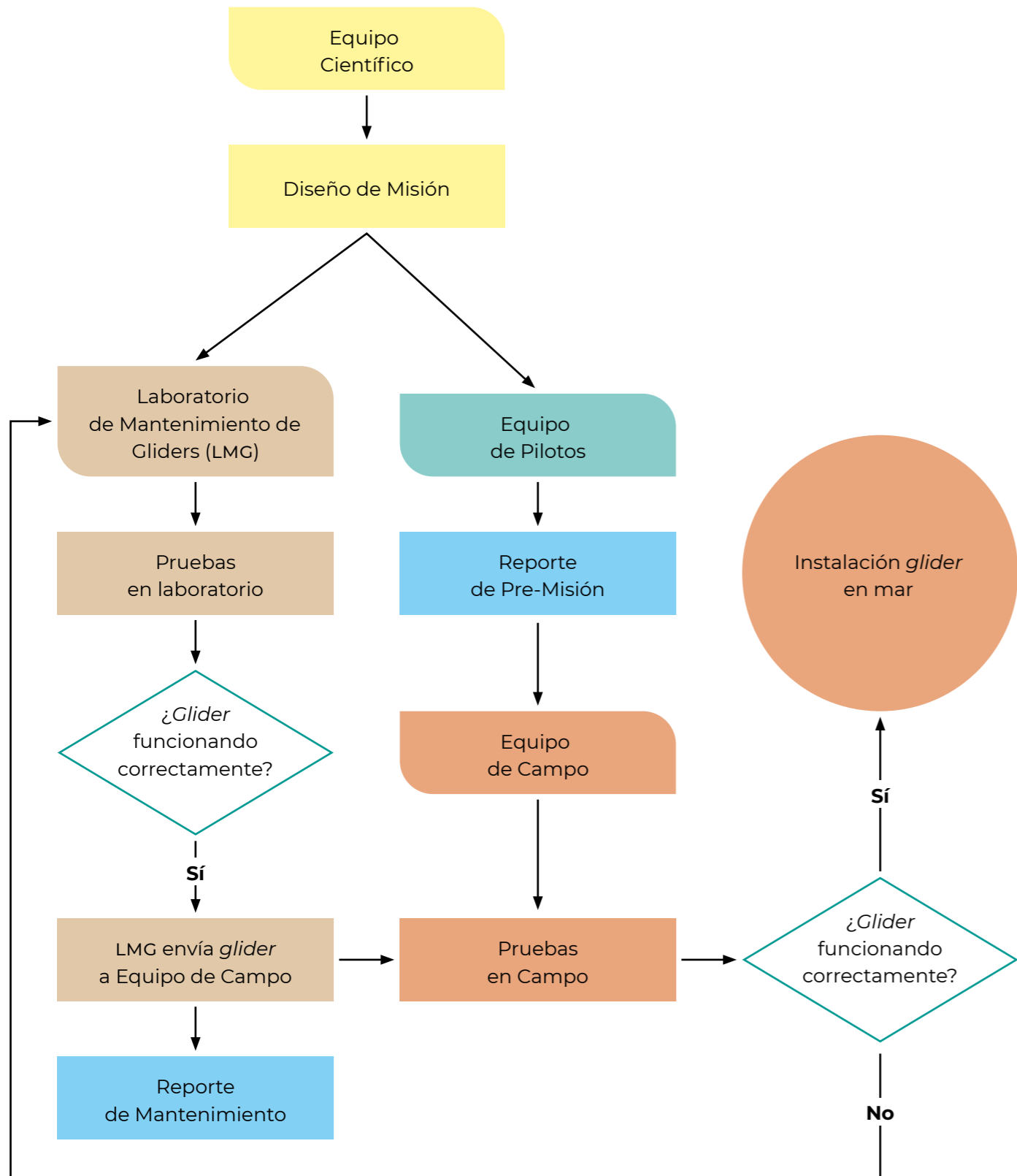
El *Laboratorio de Mantenimiento de Gliders* (LMG) que se ubica en Querétaro, en el CIDESI, es el primer laboratorio en México con capacidades para darle servicio a planeadores submarinos tipo *seaglider*, y entre sus labores se encuentran la revisión general de los vehículos al fin de cada misión del *glider*, el recambio de las baterías, calibración de la

brújula y sensores de medida, el balanceado en alberca de agua salada y la realización de las pruebas finales antes de ser enviado a las instituciones de apoyo en campo para dar inicio a una nueva misión.

El *Equipo de Campo* se encuentra ubicado estratégicamente en el oeste del golfo de México y llevan a cabo las tareas logísticas *in situ* y de instalación/recuperación de *gliders* en el golfo de México con el

Figura 1

Ciclo de operación típico de «diente de sierra» para un planeador submarino autónomo (*glider*). Se muestran los cuatro estados principales de operación para completar un ciclo típico (Descenso-Inflexión-Ascenso) y posteriormente comunicarse vía satélite en superficie. Gráfico: CIGOM-Conacyt.



- CIDESI - Laboratorio de Mantenimiento de Gliders
- CICESI - Equipo de Pilotos
- CICATA-Altamira/UV - Equipo de Campo
- CICESI - Equipo de Control de Calidad
- CICESI - Equipo de Visualización/Distribución

Figura 2
 Diagrama de flujo entre los diferentes equipos de trabajo del Grupo de Monitoreo Oceanográfico con Gliders (GMOG). Los *seagliders* son mantenidos en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), pilotados desde el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), e instalados en el golfo de México con el apoyo del Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), unidad Altamira y la Universidad Veracruzana (UV). El acrónimo VOEs se refiere a Variables Oceánicas Esenciales. Gráfico: CIGOM-Conacyt.

apoyo de personal técnico y científico del CICESE. Actualmente, el GMOG incluye dos instituciones de apoyo en el campo y colaboración científica: (i) Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada (CICATA), Altamira, Tampico y (ii) la Universidad Veracruzana (UV), Veracruz (Figura 2).

Kay Juul 2 (Pez Dardo). El planeador submarino mexicano

Como parte del proceso de desarrollo de tecnología en México para el monitoreo con *gliders*, en el CICESI se ha desarrollado un vehículo submarino tipo *glider* que se espera, en un futuro cercano, tenga las mismas capacidades de los vehículos industriales como son los *seagliders* del GMOG. Se espera que este nuevo *glider* mexicano pueda ser usado en el monitoreo de los mares y océanos, con lo cual se pretende contar con autosuficiencia tecnológica para ser utilizada por el GMOG.

El desarrollo del vehículo submarino tipo *glider* denominado Kay Juul 2 (del maya «Pez Dardo»), considerado el primer *glider* submarino mexicano semi-industrial, es el resultado de seis años de investigación y desarrollo por parte del grupo de trabajo del Centro Público de Investigación del

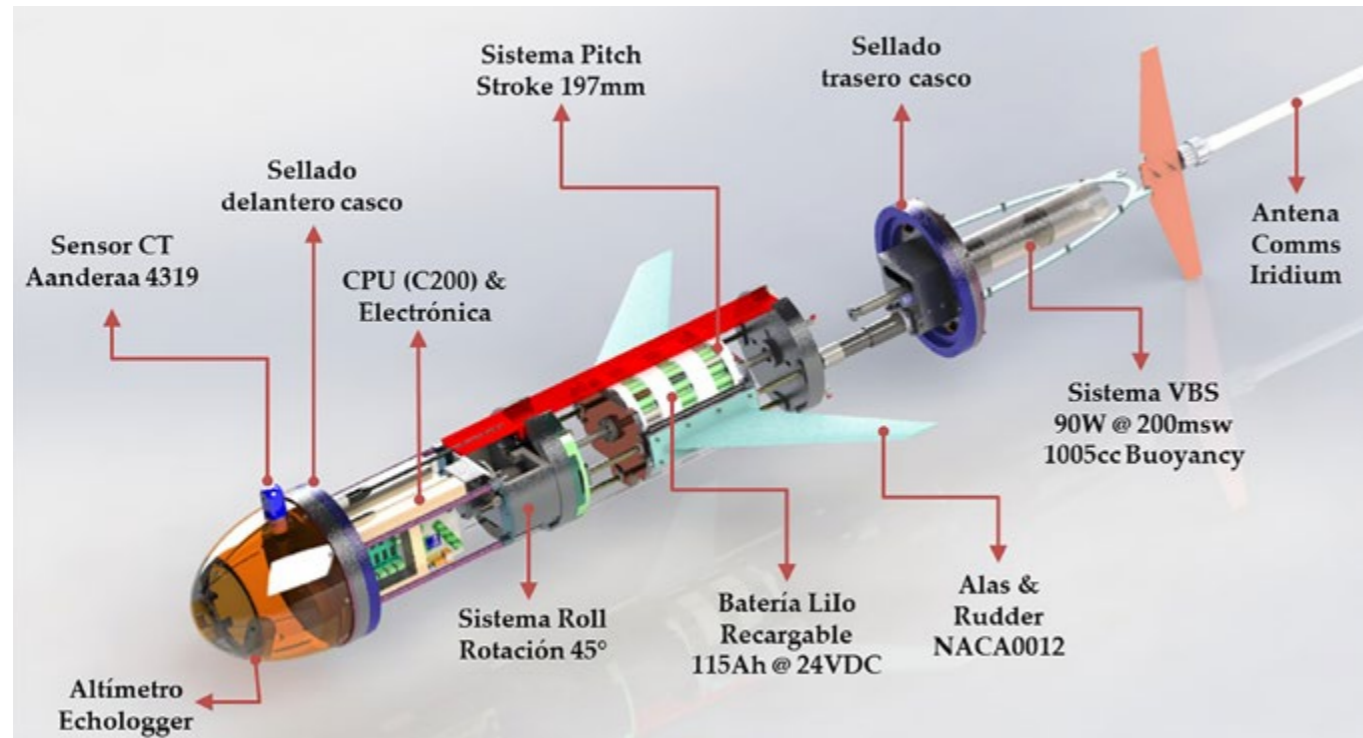


Figura 3
Diseño y componentes principales del vehículo submarino *glider* mexicano Kay Juul 2.
Gráfico: CIGOM.



Figura 4
Glider Kay Juul 2.
Pruebas en mar. Ensenada, Baja California, agosto de 2021.
Fotografía: CIGOM-Conacyt.

CIDESI, como una visión del Consorcio CIGOM (www.cigom.org) para la generación de ciencia y tecnología de interés nacional, mostrando resultados importantes de asimilación del conocimiento, sentando las bases para, en un futuro, madurar la tecnología y contar con soberanía tecnológica en México.

Una de las principales aportaciones científicas del trabajo de Investigación y Desarrollo Tecnológico del *glider* mexicano, ha sido la generación de una metodología para generar, mediante datos estimados

de la hidrodinámica del vehículo, el desempeño del vehículo, permitiendo con ello el dimensionamiento de su principal sistema de operación, el sistema de propulsión por flotabilidad variable VBS (*Variable Buoyancy System*). El artículo científico de referencia ha sido publicado en 2020 en la Revista *Journal of Marine Science and Engineering* (<https://doi.org/10.3390/jmse8110919>).

En la figura 3 se muestra el diagrama del diseño y composición del vehículo submarino *glider* Kay Juul 2 con sus sistemas y

componentes principales, los cuales fueron desarrollados, integrados y probados exitosamente en pruebas de laboratorio, validando los parámetros de diseño e ingeniería por medio de pruebas integrales de funcionamiento para asegurar la estabilidad del vehículo antes de ser puesto en operación en ambiente relevante.

El vehículo fue desarrollado por especialistas que trabajan en el mantenimiento de los vehículos *seaglider* del GMOG, con lo cual la asimilación del conocimiento de los vehículos comerciales ha sido

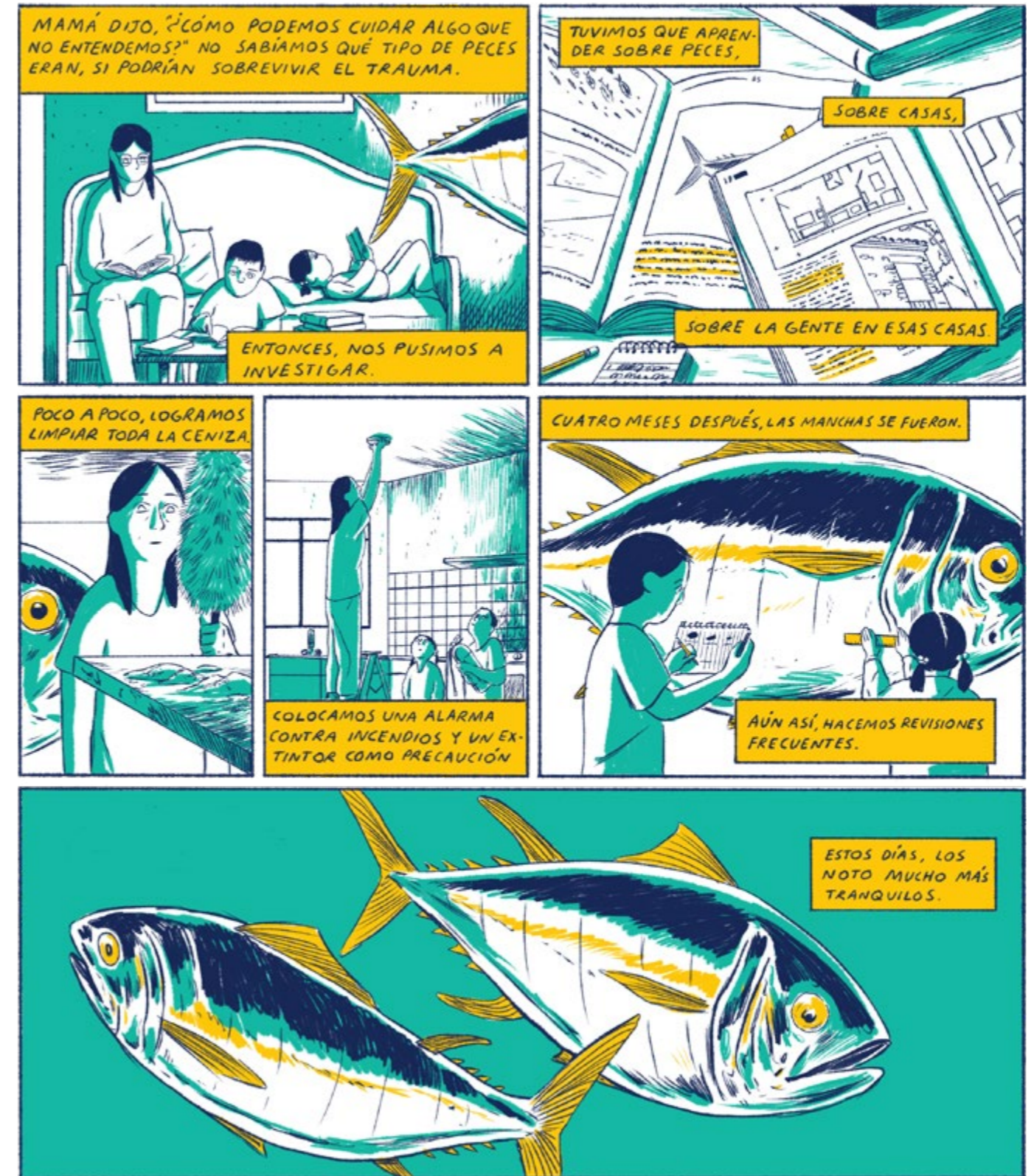
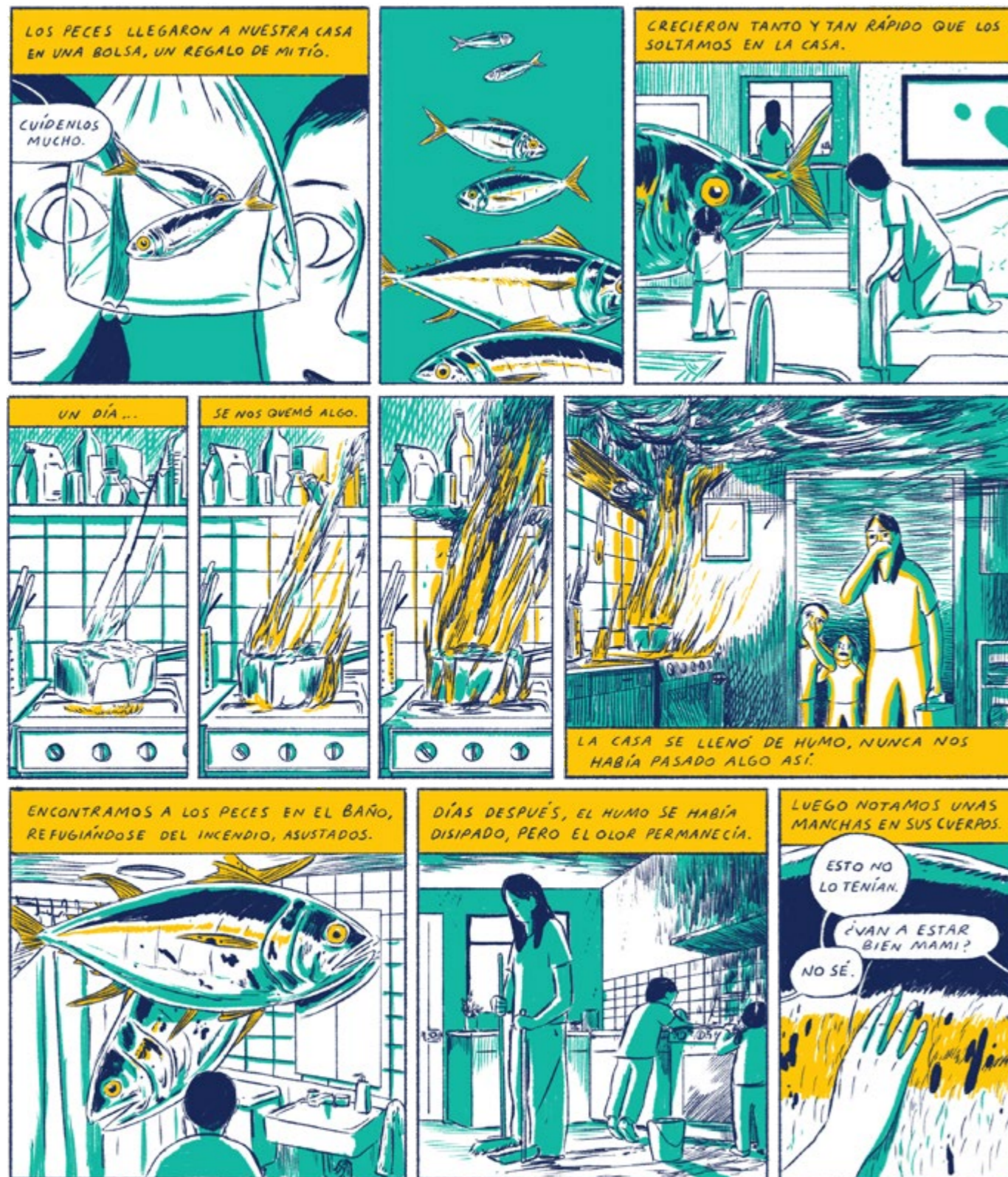
importante para el desarrollo de la tecnología mexicana. En la figura 4 se muestra el vehículo construido por ingenieros mexicanos en el proceso de pruebas en el mar (ambiente relevante), las cuales fueron llevadas a cabo los días 18 y 19 de agosto de 2021 en la Bahía de Todos Santos en Ensenada, Baja California, México.

Se ejecutaron diez pruebas exitosas del vehículo

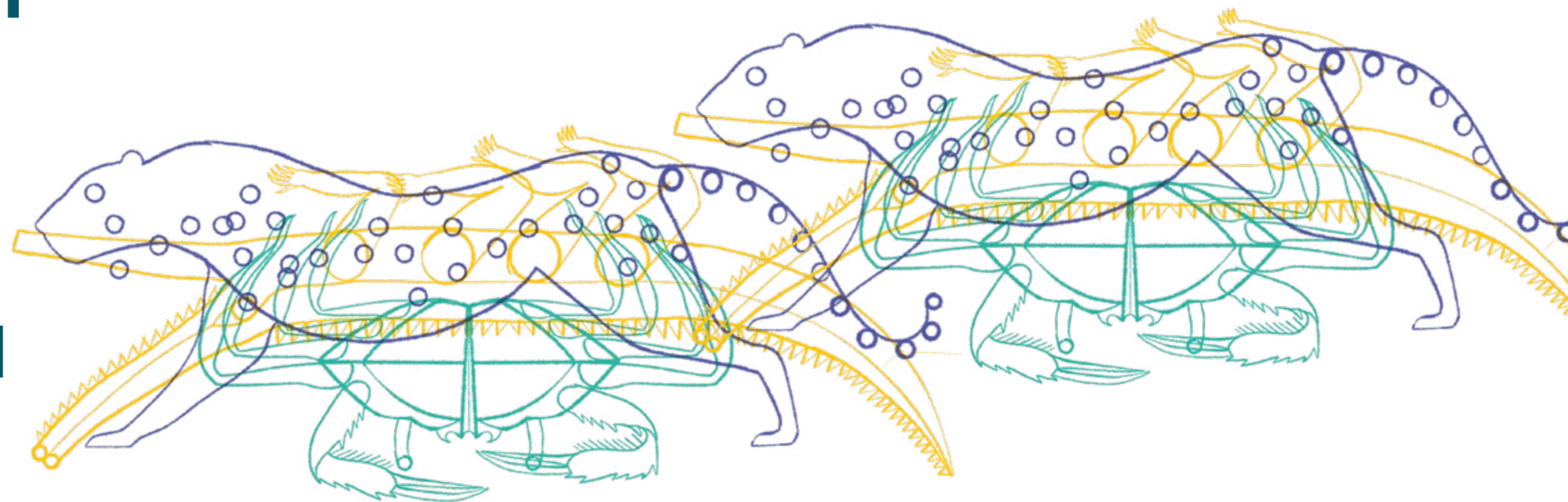
submarino hasta una profundidad máxima de 50 m, recopilando información importante del funcionamiento del vehículo, para continuar con el proceso natural de mejoras en la maduración tecnológica de la plataforma, siendo una gran oportunidad para continuar con el impulso al desarrollo de tecnologías mexicanas con base científica y alcanzar la soberanía tecnológica.

Se ha realizado el análisis de la información obtenida de las pruebas en el mar del vehículo submarino *glider* Kay Juul 2, identificando mejoras sustanciales para continuar con la evolución de los sistemas del vehículo submarino y en una siguiente fase realizar las pruebas a profundidad nominal de diseño (200 m de profundidad) para probar el modo autónomo durante un periodo de tiempo más largo.

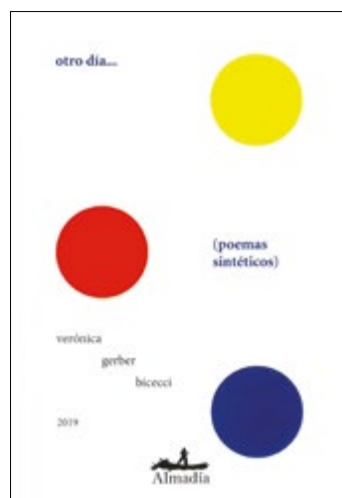
Dos peces



Inundación poética: fluidos, derrames y toxicidad



Nuria Angélica Sánchez Matías



Verónica Gerber Bicecci, *otro día... (poemas sintéticos)*, Almadía y Bookmate Limited, 2019.

Vivimos en estado de contaminación, sin saber nunca a ciencia cierta cuánto nos exponemos mediante la ingesta, la respiración y el contacto con la materialidad del entorno. Como piedra de río, erosionada por la caricia del agua, el cuerpo se desgasta en la oxidación cotidiana. En cambio, pareciera que a las obras de arte se les confecciona un destino distinto, uno de trascendencia y eternidad. Pinturas, esculturas y construcciones arquitectónicas son protegidas de las

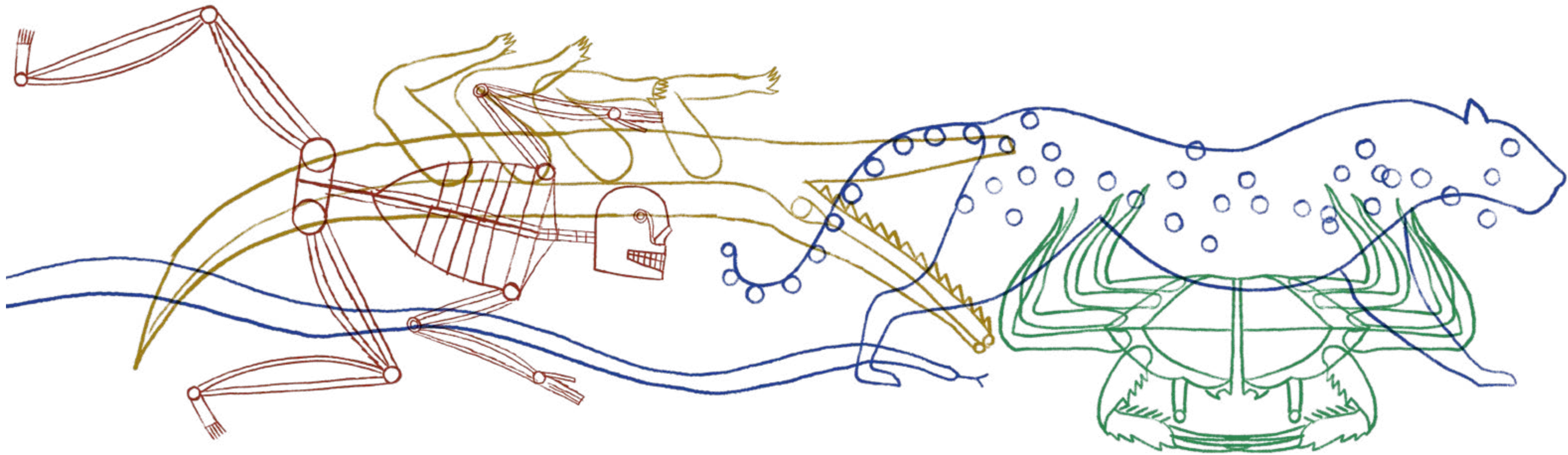
inclemencias climáticas y de potenciales daños humanos, mientras que las obras cumbre de la literatura se reimprimen continuamente. Existe, por ejemplo, un aura de misterio y divinidad en la poesía que hasta cierto punto la ha mantenido alejada de nosotros, preservada de posibles manipulaciones profanas.

Verónica Gerber ha quebrado esta jaula. *otro día... (poemas sintéticos)* es una obra inundada, una obra que se desborda y nos revela las alteraciones que los diversos

contaminantes han causado en el mundo. Cien años después de la publicación de *otro día... (poemas sintéticos)* del escritor mexicano José Juan Tablada, en su momento una innovadora introducción del haikú en las letras hispánicas, y a cuarenta y dos años del envío al espacio exterior de múltiples fotografías y esquemas en las sondas Voyager, Gerber deja correr acetona sobre ellas. El resultado es una mezcla heterogénea de imágenes borradas y hallazgos inquietantes de

la web sobre la actual crisis social y medioambiental. El poemario, originalmente una instalación museística de piezas de pared, procesa los contaminantes de dos formas: Por una parte, Gerber realiza un destilado de la cultura. Como una máquina centrífuga, los haikús separan los sedimentos de la cultura poética que solía acercarse a la naturaleza únicamente para loarla, admirarla, congelarla en el paisaje. La artista y escritora exhuma los diversos sustratos de la

crisis ambiental y denuncia el extractivismo minero mediante la mención de «sustancias cancerígenas» que forman una capa sobre la población; el calentamiento global a través de la nueva hidrografía de «los polos, en el deshielo» y del «perfume cítrico» que deja la estela de los huracanes, y los derrames tóxicos de petróleo al convertirlos en una «mancha tornasol» en la que la blancura de un cisne lucha por sobrevivir. Pero los fluidos y flujos que devastan el planeta exceden



lo concreto, por lo que Gerber alude entonces a la economía del capital, basada en la explotación de trabajadoras en las maquilas y de trabajadores indocumentados en las construcciones, en la tala imparable de los bosques, reducidos a «extensión monocroma de las empresas».

Por otra parte, Gerber combina y mezcla experimentalmente diversos referentes para crear una cultura de la preservación que resulta radical dentro del canon poético. En general,

los poemas suelen ser una solución heterogénea, formados sólo por palabras, pero en *otro día...* se inserta el sedimento extraño de una imagen. Esta rarefacción, además, se ve exacerbada debido a la acción corrosiva de la acetona sobre ella. Gerber dibujó con el solvente la silueta de los animales a los que Tablada cantó en su poemario. El resultado son imágenes que desafían las convenciones ópticas: visualidades superpuestas, imprecisas, borrosas,

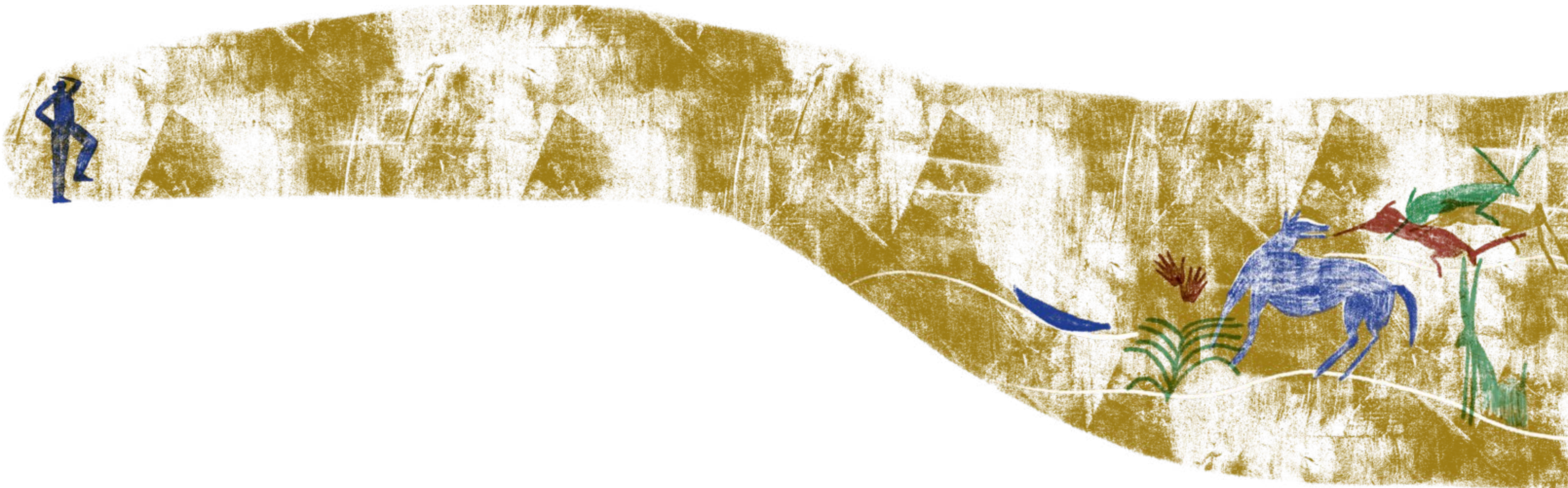
compuestas por presencias y ausencias, para marcar la inminente extinción de las especies. Pero, ¿acaso presagia Gerber el colapso total en el que todo ser vivo devendrá fantasma? Mientras que algunos haikús pronostican un futuro en el que la miel de las abejas desaparecerá, en otros, las arañas siguen secretando y tejiendo telarañas. El flujo no se detiene, pese a las explosiones, las mutaciones y los destierros.

¿Cómo tomar inspiración de estos resquicios para trasladarlos a la agenda

personal y política? Gerber introduce primero la necesidad de documentarse respecto a la crisis ambiental. Resulta sintomático que la autora haya consultado noticias en Google, un buscador internáutico que despliega los resultados en una línea del tiempo, para convertirlas en poesía. Esto indica, además de la introducción de un cuerpo extraño al léxico literario, que la toxicidad puede transformarse. Huir del contagio, como ejemplifica un poema, hacia la Luna, no es una opción, en

cambio, ha de considerarse con seriedad el asunto, destinar tiempo, cabeza y corazón para evitar el colapso.

Introduce también el escepticismo hacia las promesas del productivismo. Pienso en el azúcar, elemento dulce que causa placer en el paladar, pero que puede propiciar erosión dentaria, formación de cavidades y muerte del nervio mediante todos sus avatares, empezando por el fluir de las bebidas que consumimos. Comparo el azúcar con los aceites, cuya



coloración sobre las baldosas crea una «mancha tornasol» fascinante, pero que en realidad causa estragos, como los derrames petroleros en el océano. En la búsqueda de elementos preciosos, de objetos mercantiles y de combustibles perfectos, la ciencia y la tecnología se han retrotraído hacia la alquimia en vez de avanzar, en la imaginación especulativa, hacia un futuro habitable. Científicos,

pareciera cuestionar Gerber, ¿qué los separa hoy de la oscuridad alquímica que el método racionalista pretendía erradicar?

Desde el fondo del mar, las criaturas no pueden ya ver la superficie. Gerber mina, borra y vuelve invisibles las imágenes con que pensábamos el mundo, sin conciencia de la crisis social y ambiental, para aliarse con ellas. Petróleo y acetona, nuestro ojo no alcanza a mirar a través de

estas manchas el planeta perfectamente equilibrado que, en la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés), Carl Sagan y su equipo fotografiaron para los seres extraterrestres. La poesía comprometida poco tiene que ver con el arte canónico y la película romántica de la globalización, que hoy no advierte que su *locus amoenus* está sumergido en petróleo y repleto de plastiglomerado.

La poesía ambiental de *otro día...* (*poemas sintéticos*), poesía ecocrítica que nos sumerge en los fluidos de la contemporaneidad, es la mixtura tanto tiempo negada entre arte y ciencia. Hoy aspira más a ser corrosiva antes que canonizadora, inestable más que paisajística y a servir como combustible —imaginativo, limpio y afectivo— de la restauración, la preservación y la justicia ambiental.



Estudio de la artista.



Marea IV, 2018.
Óleo sobre tela, 180 x 250 cm.

Manuela Generali: mares íntimos

Kevin Arvizu de la Teja

*Como el agua y el aire,
como el tiempo y la tierra,
como el recuerdo y el olvido,
como los conceptos mismos
de abstracción y figuración,
en la pintura de Generali
todo fluye y, por tanto,
todo se erosiona.*

Luis Carlos Emerich

Desde muy pequeña, Manuela Generali estuvo en contacto con el agua. En Lugano, donde nació en 1948, había un lago que una vez al año inundaba toda la ciudad; a ella le encantaba ver a los cisnes flotar entre calles y restaurantes. Generali vivió allí hasta que terminó la preparatoria. Siempre recuerda a los amigos que llegaban desde otros pueblos, en pequeños barcos, para asistir a la escuela y afirma que, como en casi toda su pintura, allí el agua era determinante.

A los once años, por fin, conoció el mar. Desde su estudio en la Ciudad de México, una urbe condicionada también por el lago de su historia, Manuela cuenta cómo el olor del agua salada penetró en su memoria: «esa cosa no tiene fin». Desde entonces el océano se volvió un tema central de su vida y, por supuesto, de su creación artística.

En 1967, Manuela Generali se mudó a Londres para comenzar sus estudios artísticos en el Wimbledon

College of Arts. A partir de entonces, inició su travesía por el mundo. Durante diez años viajó con un colectivo de cineastas por Oriente, Medio Oriente y América del Sur, donde navegó en un barco de madera italiano, que aún recuerda con nitidez: «Una noche, todos lloraban y rezaban frente a un inmenso muro de agua. Por la mañana todo estaba tranquilo, nos subieron a cubierta y todo calmado, hasta vimos una ballena. Y bueno, todo eso de mítico que tiene el mar es mi tema».

Los océanos, los barcos y las tempestades aparecen recurrentemente en sus obras. En ellas vemos la mano del hombre en la naturaleza: paisajes marinos de agua revuelta por el pasar de las máquinas creadas para los viajes humanos. Imponentes

cascos de hierro oxidado que surcan el mar.

Generali arribó a Argentina en plena dictadura, en sus pinturas denuncia con un doloroso acento las crueldades que experimentó de primera mano. Después vivió en Perú por algunos años, hasta que emigró a México en 1978, donde estudió en la Escuela Nacional de Artes Plásticas; ha pintado en esta ciudad desde entonces. La escena del arte del México de los ochenta derramaba pintores jóvenes que buscaban soluciones a sus inquietudes estéticas. «Eran los días en que la pintura, o por lo menos la interfase del cuadro, regresaba al escaparate del mundo del arte», escribe Erick Castillo (2005) en la presentación del catálogo de *Vaivén*, exposición individual de Generali en el Museo de Arte Moderno,

sobre la llegada de la artista a México.

Todos precisamos del agua para vivir, pero Manuela la necesita para subsistir en su pintura; el agua es su primer amor, en ella encuentra la luz que está buscando. Generali es una artista en toda la extensión romántica de la palabra: el genio creador aislado que pasa largas horas con su obra y tiene una relación estrechísima con ella: «Puedo pasarme todo un día en el estudio buscando el blanco exacto, obsesionada porque a éste le falta un poquito de azul, un poquito de ocre».

Guillermo Fadanelli escribe sobre la obra de Generali que en ésta «la presencia humana se halla latente en la atmósfera que emana de los lienzos: intimidad revelada al espectador». Justo esto es lo que sorprende de sus pinturas:

esa destreza derramada sobre un lienzo personal creado desde el espacio más íntimo de los recuerdos y vivencias. Una artista que ha decidido alejarse de la crueldad y la violencia para sumergirse en el agua, que la hace inmensamente feliz.

A través de los años, Generali ha logrado capturar esos momentos íntimos con el pincel y la técnica. Sus cuadros nos recuerdan los paisajes de Turner, que hacen de la naturaleza un personaje dentro de la pintura. En sus creaciones, la artista ha conseguido manejar la luz con una destreza sobresaliente, lo que le permite atribuirle al mar una personalidad y una presencia dignas de un protagonista con quien se podría sostener un diálogo. La fuente de luz crea atmósferas únicas.

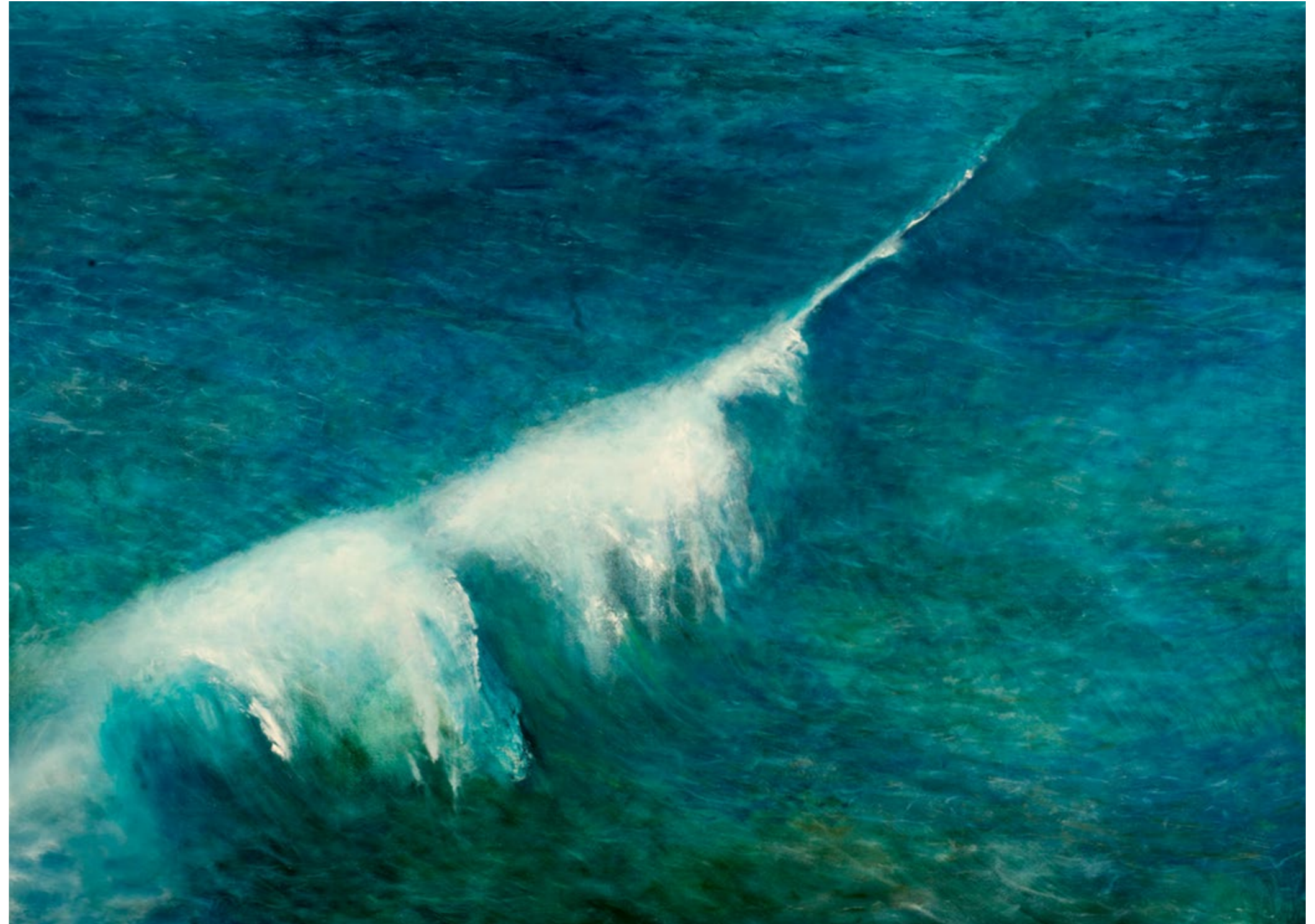
La fascinación de Manuela por el agua y la materia la ha llevado a conocerlas a ambas de manera muy estrecha: la pintura por la pintura, el agua por el agua. Esa búsqueda la conduce a masas y fuentes de agua llenas de luz y oscuridad, a tormentas en una playa, a las lluvias que coronan un océano revuelto: «El mar tiene una superficie y es una superficie que se puede decir que es profunda

[...] eso es lo que me atrae del agua, es siempre cambiante, además cambia con la luz. Puedes tener una relación con el agua, con el mar. Hay en mí una obsesión con ella».

Manuela baila con las olas y las corrientes, con la fluidez de los óleos y los colores, estalla en las tormentas. No necesita referencias visuales para representar los cuerpos de agua: «pintar el agua es muy fácil porque tiene un ritmo». Ese ritmo está perfectamente plasmado en los paisajes marítimos; la vida y experiencia en el mar le permiten disfrutar una libertad única en la creación artística.

Representar el océano desde la Ciudad de México es una tarea un tanto imposible, pero Generali se permite viajar en busca de una extensión de agua digna de retratarse. Cuando llegó la pandemia, buscó plasmar su encierro en pinturas más pequeñas: «Voy a pintar albercas, porque así me siento, como que estoy en una alberca, esto me ayuda a vivir de alguna manera».

En los lienzos de Generali podemos explorar paisajes de todas índoles: internos, externos, tranquilos y tempestuosos, naturales y creados por el hombre. Se puede naufragar tanto



Causa y efecto, 2019.
Óleo sobre tela, 180 x 250 cm.



Números anteriores

Núm. 1

Agua

Septiembre-octubre 2021

Núm. 2 | Especial

Ciencia de frontera

Octubre 2022



Próximos números

Núm. 4

*Pronaces Salud I:
Transformación de la
investigación en salud*

Noviembre 2022

Núm. 5

*Pronaces Salud II:
Rumbo a la investigación
con incidencia*

Diciembre 2022



en el mar como en una biblioteca, intercambiar los masivos barcos que se oxidan por sillones en los cuales navegan los libros de estanterías monocromáticas interminables, otro de sus temas predilectos: filas de libros sin presencia humana que se asemejan a la inmensidad del océano. Espacios solemnes a la espera de un viajero errante que los recorra.

Generali pinta opuestos, por un lado, las tormentas y tempestades que arrasan con todo, por el otro, la calma de una playa bañada de sol. De la inmensidad pasamos a los mosaicos azules distorsionados por la refracción del agua. Pinta la superficie y la profundidad y plasma el líquido en imágenes que se balancean entre el realismo y lo abstracto. Podemos acercarnos y ver cada uno de los trazos y veladuras interpuestas, para después alejarnos y encontrarnos con un pedazo de agua nítida y clara. Hay viajes y destinos, gigantescos barcos que parten el océano. Pilotes y muelles que marcan el comienzo o el fin de un viaje.

Hoy en día, Manuela Generali hace lo que más le gusta. Limitada físicamente,

suele trabajar piezas más pequeñas, aunque continúa con los lienzos empapados de veladuras de pintura que denotan la maestría de su obra. Un lienzo, en tonos azul verdosos, recargado sobre la pared de su estudio, parece irradiar luz propia, refractada en los colores del arcoíris sobre una onda aguamarina. Frente a éste, vemos la cresta de una tranquila ola y la espuma del agua salada. En el otro extremo, los bañistas en albercas y las playas amarillas perfiladas por palmeras.

Manuela es una viajera inmóvil. Desde su radiante estudio, flota en inmensos buques de óleo sobre mares de luz trazada en el lugar exacto, en el tono correcto. Nos ahogamos en la enormidad de sus aguas. Con sus pinturas podemos maravillarnos de la fuerza natural del océano, contemplar la mano humana en buques transatlánticos que presumen sus enormes cascos y perdernos en vastas bibliotecas desoladas. Sin duda, el sentir del ritmo marino le otorga la libertad deseada y a nosotros los espectadores nos concede asombrarnos con la intimidad de lo inaprensible.

