

## Nuestros mares: el efecto del cambio climático, sus toxinas, su contaminación y su conservación

Our seas: the effect of climate change, its toxins, its pollution and its conservation

Martín Gabriel Frías-Espericueta<sup>1</sup>  , Tammy Natalia Arellano-Morales<sup>2</sup>  Mónica Anabel Ortiz-Arellano<sup>1</sup>  , Alejandra Sánchez-Betancourt<sup>3</sup>  Javier Ramírez Rochín<sup>1,4</sup>  , Carmen Cristina Osuna-Martínez<sup>1</sup>  Marcela Guillermina Fregoso-López<sup>4</sup>  , Víctor Núñez Flores<sup>1</sup>  Carolina G. Delgado Alvarez<sup>5,6</sup>  , Magdalena Elizabeth Bergés-Tiznado<sup>5</sup>  Carolina Bojórquez-Sánchez<sup>5</sup>  Gladys Valencia-Castañeda<sup>4</sup>  & Marisela Aguilar-Juárez<sup>1\*</sup> 

### Resumen

Los ecosistemas marinos desempeñan un papel crucial en la regulación del clima, la provisión de alimentos y el mantenimiento de diversos servicios ecosistémicos. Sin embargo, las actividades humanas han disminuido su resiliencia, provocando pérdida de biodiversidad y alteración de procesos ecológicos esenciales. La presente revisión trata sobre la situación actual de nuestros mares y los retos que enfrentan. Se abordan los efectos del cambio climático, acidificación oceánica y la presencia de toxinas marinas, como las conotoxinas y otras biotoxinas producidas por el fitoplankton. También se analizan distintas formas de contaminación, entre ellas los residuos sólidos urbanos, los microplásticos, la eutrofización, los derrames de petróleo y los metales pesados. Finalmente, se presentan algunas estrategias de mitigación que buscan reducir estos impactos, proteger la salud de los ecosistemas marinos; así como fomentar la educación interdisciplinaria en ciencias del mar, que resulta crucial para asegurar la sostenibilidad de los océanos a las generaciones futuras.

**Palabras clave:** Biodiversidad, acidificación, eutrofización, biotoxinas, mitigación.

### Abstract

Marine ecosystems play a crucial role in regulating the climate, providing food, and maintaining various ecosystem services. However, human activities have diminished their resilience, leading to biodiversity loss and the disruption of essential ecological processes. This review addresses the current status of our oceans and the challenges they face. It addresses the effects of climate change, ocean acidification, and the presence of marine toxins, such as conotoxins and other biotoxins produced by phytoplankton. It also analyzes various forms of pollution, including urban solid wastes, microplastics, eutrophication, oil spills, and heavy metals. Finally, it proposes several mitigation strategies aimed at mitigating these impacts, protecting the health of marine ecosystems, and promoting interdisciplinary education in marine sciences, which is essential for ensuring ocean sustainability for future generations.

**Key words:** Biodiversity, acidification, eutrophication, biotoxins, mitigation.

**Recibido:** 24 de julio de 2025.

**Corregido:** 26 de septiembre de 2025.

**Aceptado:** 21 de noviembre de 2025.

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Paseo Claussen s/n, Col. Los Pinos, Mazatlán Sinaloa, C.P. 82000 México.

<sup>2</sup> Preparatoria Antonio Rosales, Universidad Autónoma de Sinaloa, Ejército mexicano s/n, Col. Centro, Mazatlán Sinaloa, C.P. 82000 México.

<sup>3</sup> Unidad Académica Preparatoria Rubén Jaramillo, Universidad Autónoma de Sinaloa. Av. Ejército Mexicano s/n Esq. Av. Universidad. Fracc. Tellería, Mazatlán, Sinaloa, CP 82017, México.

<sup>4</sup> Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Unidad Académica Mazatlán, Calle Joel Montes Camarena s/n, Carro del Vigía, Mazatlán, Sinaloa 82047, México.

<sup>5</sup> Ingeniería Ambiental y Sustentabilidad, Universidad Politécnica de Sinaloa. Carretera Municipal Libre Lote Higueras-Km 3, Genaro Estrada, Mazatlán, Sinaloa 82199, México.

<sup>6</sup> Programa de Estancias Posdoctorales Nacionales, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación comisionada al Laboratorio de Ecotoxicología, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Unidad Mazatlán, México.

\* Autor de correspondencia: maguilar@uas.edu.mx (MAJ)

## Introducción

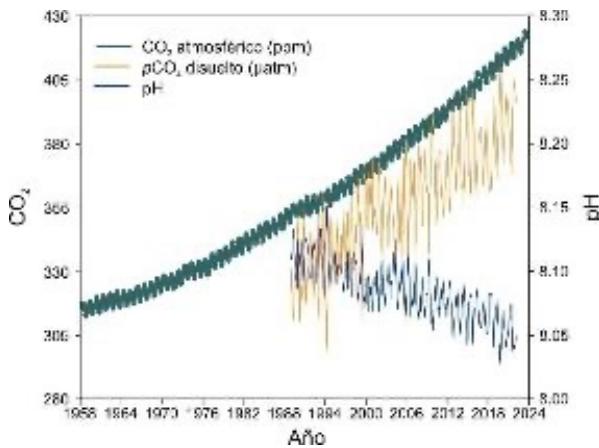
Los ecosistemas acuáticos presentan cierto grado de resiliencia; no obstante, una vez que se rebasa este límite, no necesariamente regresarán al estado inicial y desafortunadamente la biodiversidad suele ser la más afectada (Sánchez 2007). De tal manera que se han implementado medidas para evitar el daño a estos ecosistemas y asegurar la sostenibilidad de dichos ambientes para las generaciones futuras (Anónimo 2023).

En diversos estudios se ha mostrado que nuestros mares se encuentran cada vez con mayor nivel de contaminación, afectando significativamente los ecosistemas marinos y a la biodiversidad de los océanos; y por consecuencia a la humanidad (Landrigan *et al.* 2020). Por lo anterior, resulta relevante que la sociedad cuente con información que ayude a entender los efectos de la contaminación ambiental sobre los ecosistemas acuáticos, mismos que están disminuyendo su productividad, biodiversidad, y por consecuencia la capacidad de brindarnos bienes y servicios ecosistémicos como el reciclado de nutrientes, regulación del clima global, fuente de alimentos, entre otros.

La presente revisión muestra algunos de los impactos de la civilización humana en nuestros mares, específicamente en los efectos del cambio climático, la contaminación por residuos sólidos, microplásticos, derrames de hidrocarburos del petróleo, metales y materia orgánica; así como la importancia de la conservación de sus recursos biológicos, biotoxinas y productos con potencial fármaco-biológico.

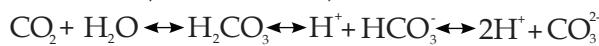
## Efecto del cambio climático: la acidificación oceánica

Desde el año 1958 a la fecha, se ha determinado un importante incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (38%), ocasionado principalmente por el uso de combustibles fósiles, producción de cemento y deforestación (Anónimo 2025). Durante dicho periodo, las aguas oceánicas han capturado entre el 26 y 30% de dichas emisiones de CO<sub>2</sub> (IPCC 2022, Friedlingstein *et al.* 2023), situación que ha generado, además de calentamiento global, una disminución del pH en el agua de mar, fenómeno conocido como acidificación oceánica (AO) (Figura 1).



**Figura 1.** Relación entre las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico, CO<sub>2</sub> disuelto y pH del agua de mar durante el periodo de 1958-2024 determinada en la estación meteorológica de Mauna Loa, Hawái. Datos tomados del portal PMEL Carbon Program, NOAA (2025).

La AO es resultado del desequilibrio causado por la disolución de CO<sub>2</sub> sobre la química del agua de mar, particularmente del sistema carbonatos, que funciona como un sistema de amortiguamiento del pH, el cual se explica en la siguiente ecuación (Millero 2013):



El CO<sub>2</sub> atmosférico al entrar en el océano, reacciona con el agua, formando ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que, por ser un ácido débil, se disocia rápidamente en iones hidrógeno (H<sup>+</sup>) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). El aumento en la concentración de H<sup>+</sup>

provoca que el pH del agua disminuya, sin embargo, los iones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) reaccionan con los  $\text{H}^+$  para formar  $\text{HCO}_3^-$ , manteniendo relativamente estable el pH del agua de mar. No obstante, el constante aumento de la disolución de  $\text{CO}_2$  provoca mayor liberación de  $\text{H}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$  en el agua de mar, así como un decremento de los  $\text{CO}_3^{2-}$ , resultando en la disminución del pH.

La disminución de la concentración de  $\text{CO}_3^{2-}$  es una problemática de gran relevancia porque afecta la distribución y abundancia de los organismos calcificadores (e.g., foraminíferos, cocolitofóridos, arrecifes de coral, algas calcáreas y moluscos), los cuales precipitan  $\text{CaCO}_3$  en forma de aragonita y calcita (principales minerales de  $\text{CaCO}_3$  presentes el océano) para la construcción de sus exoesqueletos, mediante un proceso conocido como biomineralización (IPCC 2022). Por tanto, un incremento en la AO provoca erosión en las estructuras calcáreas de dichos organismos, lo que implica mayor gasto energético durante el desarrollo de la biomineralización.

Dicha problemática ayuda a entender los eventos de blanqueamiento (muerte del arrecife de coral) observados durante las últimas cuatro décadas, que han provocado una reducción del 40% en la cobertura global de arrecifes de coral (Tebbett *et al.* 2023). Se estima que de mantenerse las emisiones actuales de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, la producción de  $\text{CaCO}_3$  podría disminuir significativamente para el año 2100; es decir, que la erosión podría superar a la biomineralización, y de esta manera comprometer la supervivencia de los arrecifes coralinos a nivel global (Cornwall *et al.* 2021).

Además, la AO también puede incrementar la toxicidad de otros contaminantes relevantes para los

ecosistemas costeros como los metales. Esto se debe a que la disminución del pH incrementa la solubilidad y la capacidad de acumulación de los metales en los organismos (Belivermis *et al.* 2020). Este fenómeno se ha observado en bivalvos como el ostión *Magallana gigas* (Thunberg 1793) y el mejillón *Mytilus edulis* (Linnaeus 1758) con relación a metales como el cadmio, cobre y plomo, entre otras especies, las cuales por ser organismos calcificadores son considerados vulnerables a la AO, sobre todo cuando se encuentran en etapas tempranas de su ciclo de vida.

## Sus toxinas

### Conotoxinas

Los organismos marinos han desarrollado una variedad de mecanismos fisiológicos, morfológicos y conductuales para sobrevivir y prosperar en su ecosistema. Uno de estos mecanismos es la producción de moléculas bioactivas, como péptidos y proteínas, con características estructurales, diversidad y propiedades funcionales distintivas, en comparación con las sustancias aisladas de plantas terrestres (Okeke *et al.* 2024, Shahidi & Saeid 2025).

En particular, los caracoles de la familia Conidae, conocidos comúnmente como caracoles cono (Fig. 2A), habitan ambientes marinos que van desde la zona intermareal en playas poco profundas hasta profundidades superiores a 1,000 m, con una distribución geográfica en los océanos tropicales Índico, Pacífico y Atlántico (Keen 1971, Michel-Morffón *et al.* 2019). A lo largo de millones de años, estos organismos han desarrollado mecanismos bioquímicos sofisticados; entre los cuales destaca la producción de toxinas como una ventaja evolutiva clave para su supervivencia y éxito como



Figura 1. A) Caracol cono (familia Conidae). B) *Conus purpurascens* cazando a un pez.

depredadores en el ecosistema marino (Fig. 2B). Estas toxinas están compuestas por un conjunto diverso de péptidos, que actúan con alta precisión sobre receptores y canales del sistema neuromuscular de presas y depredadores.

Su potente toxina está formada por un coctel de moléculas farmacológicamente activas dominadas por péptidos ricos en cisteína y son conocidas como conotoxinas (Jin *et al.* 2019, Peck *et al.* 2025). Cada especie, produce un veneno que contiene de cientos a miles de toxinas peptídicas, con un nivel sorprendentemente alto de variación intra-especie que distingue a estos caracoles cono de otras especies venenosas, como arañas y escorpiones (Jin *et al.* 2019, Margiotta *et al.* 2022).

Cada una de estas conotoxinas está diseñada para actuar sobre blancos moleculares específicos, como canales iónicos y receptores del sistema nervioso y muscular de sus presas, bloqueando la transmisión de los impulsos eléctricos entre las neuronas y los músculos, impidiendo que la señal nerviosa llegue a su destino, provocando casi instantáneamente diferentes tipos de parálisis (Olivera *et al.* 1994, Bautista 2018).

De acuerdo con Li *et al.* (2025), actualmente las conotoxinas tienen diversas aplicaciones en varios campos como: (1) la Farmacología, utilizándose

en el desarrollo de fármacos selectivos para el manejo del dolor, la diabetes y las enfermedades neurodegenerativas; (2) en la Neurociencia, al dirigirse a canales iónicos y receptores específicos, las conotoxinas regulan la neurotransmisión y las funciones celulares, lo que avanza en el estudio de la señalización y los circuitos neuronales; (3) como antimicrobiano, como los mutantes de la  $\alpha$ -conotoxina RgIA que demuestran actividad antimicrobiana, lo que ofrece nuevas oportunidades para el desarrollo de antibióticos; (4) En el diagnóstico, las conotoxinas se exploran como nuevas herramientas de diagnóstico para la detección temprana de enfermedades; (5) Administración de fármacos y terapias contra el cáncer, el conjugado  $\alpha$ -ImI-paclitaxel se muestra prometedor en la reducción del tamaño del tumor y la toxicidad sistémica, lo que sugiere un nuevo enfoque para la terapia del cáncer; (6) Biología estructural, las conotoxinas contribuyen a la investigación de la biosíntesis de péptidos y la cristalización de receptores, lo que respalda el desarrollo de fármacos y la ciencia básica.

### Biotoxinas

Si bien, los seres humanos aprovechamos una gran cantidad de recursos que se extraen de los mares y océanos; es

importante mencionar que, en ocasiones, se debe tener cuidado con el consumo de ciertos productos pesqueros, debido a los compuestos químicos que contienen. Una gran parte de dichos compuestos son de origen antropogénico, producto de los procesos de contaminación que generamos los seres humanos. Sin embargo, existen sustancias y compuestos generados por los organismos marinos que pueden afectar la salud humana cuando los alimentos provenientes de la pesca y/o acuicultura actúan como vectores.

Tal es el caso de las biotoxinas marinas (también conocidas como ficotoxinas), las cuales, son producidas por diferentes especies de microalgas (Anónimo 2005). Este grupo de organismos fotosintéticos es diverso e incluyen especies de diferentes subgrupos (filos), como Cyanophyta, Chlorophyta, Pyrrophyta, entre otros, que son organismos unicelulares o multicelulares (Olmedo-Galarza 2019). Estos microorganismos (que integran al fitoplancton) pueden reproducirse de manera exacerbada y formar floraciones algales nocivas (FAN, también conocidas como “mareas rojas”), lo cual se refiere a la proliferación de algas tóxicas y/o no tóxicas que representan una amenaza potencial para los seres humanos, los organismos acuáticos y/o los entornos acuáticos.

Dependiendo del tipo de toxinas asociadas con las FAN y de los síntomas de intoxicación presentados por los humanos, estas toxinas pueden provocar intoxicaciones por consumo de mariscos de tipo diarreicas, paralizante, amnésica, y neurotóxica (DSP, PSP, ASP y NSP respectivamente, por sus siglas en inglés), entre otras (Yuan *et al.* 2024). Estas intoxicaciones se pueden presentar cuando los humanos ingerimos moluscos bivalvos (i.e. ostiones, mejillones, almejas), ya que

se alimentan por filtración. Esto causa que las toxinas se concentren al interior de los tejidos de los organismos, cuyo consumo puede generar la intoxicación en humanos e, incluso, provocar su muerte (Anónimo 2005). Por ello, es importante conocer la procedencia de los mariscos para consumo humano y respetar los períodos de veda sanitaria establecidos por las autoridades correspondientes.

## **Su contaminación**

### **Residuos sólidos urbanos**

De todos los contaminantes que llegan al mar, los residuos sólidos de origen urbano (RSU) también se deben de considerar como una amenaza a la salud de nuestros mares, debido a la diversidad de tipos y formas que presentan. Estos se generan por las actividades diarias en entornos urbanos, principalmente en los hogares, comercios, oficinas y espacios públicos. Estos RSU incluyen materiales orgánicos, como restos de comida y jardinería, e inorgánicos, como plásticos, cartón, vidrio, metales, entre otros. Si estos residuos no se gestionan adecuadamente, especialmente de áreas urbanas con sistemas de gestión deficientes se convierten en basura y aunque su origen es terrestre (alrededor del 80%), estos residuos en ocasiones suelen tener como destino final el océano (EEA 2023).

Entre estos desechos encontramos bolsas, botellas, empaques, colillas de cigarrillo y utensilios de un solo uso, los cuales son considerados una fuente persistente de contaminación. El impacto de esta situación es múltiple: (1) Si hablamos del nivel ecológico, esta basura afecta directamente a la fauna marina, ya sea por ingestión o por atrapamientos que alteran su comportamiento, reproducción o supervivencia. En este sentido, se han

encontrado microplásticos en peces, moluscos e incluso en el agua potable, lo que representa riesgos potenciales para la vida silvestre y para la salud humana (Anónimo 2021, Fernandes *et al.* 2025); (2) En el plano económico, las actividades productivas como la pesca y el turismo sufren pérdidas, al deteriorarse la calidad ambiental de las zonas costeras.

Cabe mencionar que millones de toneladas de residuos terminan en los océanos cada año, de los cuales se estima que solo los desechos plásticos representan entre 19 y 23 millones de toneladas anuales (Anónimo 2025). Desafortunadamente, la gestión de estos RSU refleja serias deficiencias en muchas ciudades costeras.

Lo anterior pone en manifiesto que, contar con un sistema consistente para manejar los RSU no es un elegible, sino un requerimiento. Si entendemos la gestión de los residuos como un eslabón dentro de la cadena de sostenibilidad, podríamos construir ciudades más limpias, resilientes y responsables con el mar, con todos los ecosistemas y con cualquier forma de vida. Dado que los residuos puedan ser valorizados económicamente, es importante reconocer que el mejor residuo es aquel que no se genera. La basura que llega al mar es apenas la "punta del iceberg" de una sociedad que necesita replantear sus hábitos de consumo. Por eso, es sumamente importante impulsar políticas públicas orientadas a la limitación y reducción de productos de un solo uso y apostar por un modelo de economía circular.

### ***Microplásticos***

Uno de los contaminantes que ha acaparado la atención de la comunidad científica internacional es el plástico. Los desechos plásticos que son arrojados al ambiente

sufren procesos de fragmentación que los convierten en micro-plásticos ( $\mu$ P's), cuyas dimensiones oscilan entre 1-5,000  $\mu$ m. Estas pequeñas fracciones representan un problema ambiental global con impactos directos sobre la biota marina, incluido el hombre (Solomon & Palanisami 2016). El plástico es un material sintético a base de polímeros como polietileno, poliamida, poliéster, tereftalato de polietileno, entre otros, sintetizado a partir de combustibles fósiles. Entre sus principales características destacan su bajo costo, de fácil y rápida fabricación, durable y ligero (Coyle *et al.* 2020).

Debido a estas características, el uso de plástico en el año de 2023 generó una demanda de alrededor de 413.8 millones de toneladas (Plastic Europe 2024), y se estima que para el año 2050 la producción ascienda a 2,000 millones de toneladas (Anónimo 2016). Jambeck *et al.* (2015) consideraron que, debido al mal manejo de los desechos plásticos, entre 4.8 y 12.7 millones de toneladas han sido depositadas/arrojadas a nuestros mares, una cifra que incrementa día con día. Al igual que otros contaminantes (e.g. metales, plaguicidas), los  $\mu$ P's son considerados como componentes tóxicos para los organismos acuáticos (Gola *et al.* 2021).

De acuerdo con Guzzetti *et al.* (2018), los  $\mu$ P's son fácilmente ingeridos por los organismos marinos debido a su pequeño tamaño y representan una real amenaza para la biota marina y los ecosistemas. Estos autores señalan que el problema no es solo la ingestión de los  $\mu$ P's, sino que estos polímeros tienen la capacidad de adsorber y concentrar otros contaminantes (e.g. metales tóxicos), los cuales pueden ser transferidos a otros organismos en las tramas tróficas.

## *Eutrofización e hipoxia*

Uno de los elementos más importantes que soporta la vida en el planeta, es el oxígeno. En la atmósfera, este elemento es uno de los gases principales, y constituye el 21% del aire que respiramos todos los seres vivos. En el ambiente acuático, el oxígeno entra al agua a través de dos procesos: (1) la difusión desde la atmósfera que ocurre cuando el oxígeno del aire se disuelve en la superficie del agua, por la acción del viento y las olas que mezclan el agua, facilitando su disolución; y (2) por la fotosíntesis de los organismos acuáticos, tales como plantas, algas (micro y macro), y cianobacterias que se alimentan del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y lo liberan como oxígeno disuelto (OD) (Millero 2013).

En los ecosistemas oceánicos, el OD se consume naturalmente debido a la respiración de los organismos, a la descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos, y otros procesos tales como reacciones químicas que ocurren en el cuerpo de agua; sin embargo, debido a la intensificación de las actividades antropogénicas, se acelera el consumo de oxígeno disuelto, en el cual, si la concentración de OD disminuye por debajo de 2 mg/L, se le conoce como hipoxia; y cuando el OD disminuye hasta niveles de ausencia, se le conoce como anoxia (Herrera-Becerril *et al.* 2022). A nivel mundial, se encuentran zonas hipóxicas e inclusive anóxicas donde sólo algunos organismos unicelulares como las bacterias pueden sobrevivir a estas condiciones, y a estas zonas se les conoce como zonas de mínimo de oxígeno (ZMO). Cabe señalar, que la ZMO más extensa del mundo se localiza en el Pacífico mexicano, desde la entrada del Golfo de California hasta Panamá, abarcando profundidades desde los 100 hasta 1,000 m, aproximadamente (Ruvalcaba-Aroche

*et al.* 2023).

Por otro lado, otro proceso que se considera una gran problemática actual y que promueve la formación de hipoxia o zonas muertas es la eutrofización. Este proceso ocurre cuando el sistema acuático recibe altas cargas de nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo), lo cual provoca crecimientos exponenciales de algas y microalgas, mismas que al morir forman parte de la materia orgánica en descomposición, proceso bacteriano que demanda oxígeno, limitando su disponibilidad para otros organismos como peces, crustáceos, moluscos, entre otros (Kitsiou & Karydis 2011, Yao *et al.* 2025).

De acuerdo con el Instituto de Recursos Mundiales (WRI 2011), en las costas mexicanas se encuentran tres sitios eutrofizados (Mazatlán, Mérida y Chetumal); y tres sitios con hipoxia (Ciudad del Carmen, Cancún y Chetumal) (Fig. 3), los cuales podrían incrementar en número e intensidad en nuestro país, a medida que incremente la contaminación ambiental. Esto tendría consecuencias adversas sobre la biodiversidad de especies marinas y la abundancia de los recursos pesqueros.

## **Derrames de hidrocarburos del petróleo**

El vertido de hidrocarburos a los océanos por accidentes en los pozos petroleros o por accidentes durante su transporte marítimo son comunes, y pueden causar severos daños e incluso consecuencias irreversibles para los ecosistemas marinos, incluido su flora y fauna (Bhattacharjee & Dutta 2022).

A estos grandes derrames de hidrocarburos en los océanos se les conoce como “marea negra”, los cuales



Figura 3. Zonas eutróficas e hipóticas en las costas mexicanas.

se observan como una mancha oleosa en la superficie de nuestros mares afectados. Dada la expansión de estos derrames, que es comúnmente muy amplia, las consecuencias suelen ser dañinas para esos ecosistemas (Lahoz 2025).

Un derrame de petróleo genera una capa superficial que obstruye el paso de la luz solar e impide la fotosíntesis, afectando de esta forma la producción primaria del ecosistema, y a todos los organismos que habitan esa zona. Además, cuando las aves están en contacto con este contaminante, les daña sus plumas, lo que impide que puedan volar y provoca la muerte de estos organismos (Capurro *et al.* 2022). En México, un derrame de petróleo muy conocido fue el del pozo Ixtoc I, el cual se considera como el tercero más grande del mundo, que afectó significativamente a las poblaciones de peces del Golfo de México (Amezcua *et al.* 2016).

## Metales

Los metales pesados, son elementos químicos con una densidad superior a 4.5 g/cm<sup>3</sup>, algunos de ellos son esenciales para los seres vivos, pero en concentraciones elevadas, suelen ser tóxicos. Otro grupo de metales son aquellos considerados como tóxicos, aún a bajas concentraciones; ejemplos de ellos son el mercurio, el plomo, el cadmio, el cromo y el arsénico. Su particularidad radica en que, a diferencia de otros contaminantes, estos no se degradan fácilmente y, por el contrario, persisten en el ambiente por décadas (Tokar *et al.* 2011, Häder *et al.* 2020). Actualmente, se les considera uno de los principales contaminantes de los cuerpos de agua. Pero ¿cómo llegan hasta ellos? Una pequeña fracción proviene de fuentes naturales como la erosión, el vulcanismo o el intemperismo; sin embargo, la mayor parte tiene origen antropogénico, principalmente a través de actividades como la minería, el uso de agroquímicos y fertilizantes en la agricultura, la industria

petroquímica, la quema de combustibles fósiles y las descargas de agua residual sin tratamiento (Oehlenschläger 2002, Zhang & Wong 2007).

Una vez que estos elementos potencialmente tóxicos alcanzan los océanos, cada uno sigue rutas distintas hasta llegar a los sedimentos. Posteriormente, los organismos acuáticos los capturan por diferentes vías (principalmente por la respiración y alimentación), y mediante el consumo de productos derivados de la pesca, llegan finalmente a los seres humanos (Ali *et al.* 2019). Por lo tanto, estos contaminantes pueden tener importantes repercusiones en las redes tróficas, ya que provocan daños en el sistema nervioso y reproductivo, generan estrés oxidativo y afectan diversas funciones fisiológicas de organismos acuáticos, como peces, moluscos e incluso el fitoplancton (Guo *et al.* 2017, Tan *et al.* 2019). Este problema puede intensificarse debido a dos procesos clave entre los metales pesados y los organismos vivos. Uno de ellos es la bioacumulación, que ocurre cuando un organismo captura estos elementos tóxicos más rápido que su capacidad de eliminación, lo que provoca su acumulación a lo largo del tiempo en tejidos como el músculo y el hígado (Oros 2025). Por otra parte, la biomagnificación es considerada un proceso donde la concentración de estos elementos incrementa progresivamente a lo largo de las redes tróficas. Esto explica porque los depredadores tope, como los tiburones, pez espada o el atún, suelen presentar concentraciones más altas de metales pesados, respecto a organismos como sardinas, camarones etc. (Ding *et al.* 2022).

Por lo anterior, los metales potencialmente tóxicos (Hg, Cd, Pb, etc.) representan una amenaza significativa para los ecosistemas marinos y la salud

humana, siendo el consumo de peces y mariscos contaminados la principal vía de exposición a estos elementos tóxico en las personas (Khoshnood & Khoshnood 2013). Entre los efectos ocasionados por metales en humanos, están los daños neurológicos, renales, cáncer, enfermedades cardiovasculares y alteraciones en el desarrollo infantil (Coelho *et al.* 2014). Por ejemplo, el mercurio afecta gravemente el sistema nervioso, especialmente en mujeres embarazadas, causando malformaciones en los fetos (Lebel *et al.* 1996); el plomo, por su parte, reduce las capacidades cognitivas en niños (Li *et al.* 2014). Asimismo, el arsénico, el cadmio y el cromo han sido asociados con distintos tipos de cáncer y enfermedades respiratorias (Żukowska & Biziuk 2008).

### Alternativas para mitigar contaminantes en el medio estuarino y marino

El impacto antropogénico de los ecosistemas marinos representa un problema ambiental para la diversidad de especies. Existen mecanismos para mitigar el efecto de los contaminantes en el medio marino a través de estrategias físicas, químicas y biológicas cuyos tratamientos se pueden llevar a cabo de en el sitio impactado, así como fuera del mismo (Amato *et al.* 2026).

La forma más eficaz de remediar es prevenir el transporte de contaminantes hacia los sistemas acuáticos receptores, especialmente el mar. En este sentido, iniciando desde las cuencas de drenaje que pueden llegar al medio estuarino, cuando la contaminación es por elementos potencialmente tóxicos (EPTs), se pueden implementar sistemas pasivos de tratamiento, como humedales artificiales y biorreactores, que permiten la remoción sin requerir energía externa (Pat-Espadas

*et al.* 2018). En estos sistemas, los EPTs se eliminan a través de una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que actúan sinérgicamente. Entre los mecanismos más relevantes, se encuentran la precipitación química (como hidróxidos o sulfuros metálicos), la adsorción sobre partículas del sustrato o materia orgánica, la filtración y sedimentación de sólidos, así como la bioacumulación en tejidos de plantas tolerantes a metales. Incluso las bacterias reductoras de sulfato también desempeñan una función importante al favorecer la formación de sulfuros metálicos insolubles en condiciones anaerobias (Anónimo 2025).

Ahora bien, cuando los EPTs alcanzan el ambiente marino, la remediación se vuelve más compleja. No obstante, existe un repertorio probado de acciones fisicoquímicas y soluciones basadas en la naturaleza que pueden mitigar su impacto ecológico. Una opción general de remediación ampliamente estudiada consiste en recubrir los sedimentos con capas de materiales que aíslan o inmovilizan los contaminantes. El uso de biochar, un material rico en carbono producido mediante pirolisis de biomasa como material de recubrimiento, ha mostrado resultados prometedores en la inmovilización de metales en sedimentos marinos contaminados. Este material, con gran área superficial y capacidad de adsorción, puede reducir significativamente la biodisponibilidad de metales como Cu, Zn, Cd y Pb, al formar una barrera física y química que limite su movilización hacia la columna de agua (Yang *et al.* 2021, Zhang *et al.* 2025). La implementación de capas delgadas con materiales adsorbentes, como carbón activado granular y silicatos de calcio, ha demostrado ser una estrategia prometedora en estudios experimentales.

En particular, se ha reportado una disminución del 42% al 98% en la liberación de metales como Pb y Cd hacia el agua intersticial, disminuyendo así su movilidad y riesgo ambiental (Wikström *et al.* 2024).

Las estrategias basadas en la vegetación costera también han demostrado ser eficaces en la remediación de EPTs en sedimentos marinos. En particular, los manglares poseen un notable potencial fitoestabilizador para metales como As, Pb, Ni y Cr, principalmente a través de sus raíces, donde inducen la formación de placas férricas y aplican mecanismos de exclusión celular, promoviendo la estabilización de los EPTs y reduciendo su riesgo de redisolución (Yadav *et al.* 2023, Rahman *et al.* 2024). La restauración de estos ecosistemas en zonas estuarinas aporta múltiples beneficios, ya que actúan como filtros naturales que retienen partículas contaminadas y mejoran la calidad del agua (Yadav *et al.* 2023). Así, conservar la estabilidad ecológica y la biodiversidad de los manglares representa una estrategia natural, sostenible y cost-efectiva para mitigar la contaminación en ambientes costeros.

Así mismo, una estrategia adicional viable, especialmente para zonas costeras, es la restauración de arrecifes de ostiones, los cuales pueden controlar eficazmente el flujo de metales y nutrientes hacia los ecosistemas marinos, mediante su capacidad filtradora, capturando contaminantes en partículas suspendidas y acumulándolos en biomasa que posteriormente puede ser removida del sistema (Chakraborty 2017).

## **Su conservación**

A nivel mundial, la conservación de los recursos marinos toma diferentes

estrategias que incluyen políticas y compromisos de apoyo mutuo entre diferentes países (Friedlander 2018, Lotze 2021). No obstante, el valor aplicado a los recursos genéticos podría en la actualidad ser desconocido, por lo que se debe considerar que la extinción de cualquier especie representa una pérdida potencial de un recurso económico (Anónimo 1984). En México, el Convenio sobre la Diversidad Biológica establece que los diferentes estados deben reglamentar su conservación dentro y fuera de las áreas protegidas, cuidar las especies y las poblaciones amenazadas, así como restaurar los ecosistemas degradados (Llano-Vázquez & Fernández-Borja 2017). Bajo este contexto, la conservación de la biodiversidad biológica puede ser abordada mediante diversas estrategias *in vivo* (Anónimo 2007), las cuales pueden ser complementadas con nuevas biotecnologías reproductivas, criogénicas y Bancos de Genes (Gibson & Pullin 2005).

Entre las alternativas criogénicas, la criopreservación considera la conservación de material biológico como células, tejidos, órganos en temperaturas de -196 °C (Betsy & Kumar 2020). Esto resulta relevante en la optimización de los programas de cultivo de especies de importancia comercial, en la disminución de los efectos de endogamia en estos sistemas y en la repoblación de organismos al medio natural (Guaje-Ramírez & Medina-Robles 2023); incluso, la importancia del uso de la criogenia en el suministro de gametos y resguardo de líneas genéticas (Medina-Robles *et al.* 2005).

### **La educación en las ciencias del mar**

Landigan *et al.* (2020) comentan que la educación en ciencias del mar es un aspecto importante para entender todos

los impactos ambientales que generan las actividades humanas. Por lo tanto, se requiere que los profesionistas cuenten con una formación interdisciplinaria que incluya aspectos biológicos, químicos, físicos y geológicos de los mares.

En muchos países existen campañas de sostenibilidad de los recursos marinos, los cuales cuentan con tecnologías adecuadas para que no exista una sobreexplotación de dichos recursos, dado que de ellos dependen muchos aspectos de la vida en la tierra, como son los alimentos (Costello *et al.* 2020). Debemos hacer conciencia de la importancia de los océanos y el impacto que generan nuestras acciones y/o actividades sobre ellos, y esto a través de una participación responsable y de acciones, garantizando preservar al máximo todas sus especies y sus recursos.

### **Conclusión**

Con respecto a la contaminación de nuestros mares, resulta urgente reforzar la regulación ambiental, mejorar el monitoreo de contaminantes en los ecosistemas marinos y fomentar prácticas industriales sostenibles. La conciencia ciudadana también tiene gran importancia en la protección de los océanos y de la salud humana.

Finalmente, se debe tener en mente que la conservación no es solo una cuestión moral, pues su preservación es un punto crítico para la supervivencia del planeta. Desafíos como la pérdida de hábitat, el cambio climático y la contaminación requieren de un trabajo en conjunto de los diferentes sectores, a fin de crear nuevas alternativas para afrontar estos desafíos, partiendo de una concienciación pública y de políticas que promuevan prácticas sostenibles en pro de la conservación de la biodiversidad, como ha sido comentado

en varias investigaciones (Lotze 2021, Mahanayak 2024).

## Agradecimientos

A Angela M. Ureña Milán por su apoyo durante la elaboración de este manuscrito. A dos revisores anónimos que contribuyeron a mejorar este trabajos con sus aportaciones.

## Referencias

- Ali, H., E. Khan & I. Ilahi.** 2019. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry* 2019(4): 1-14. DOI:10.1155/2019/6730305
- Amato, A., A. Becci, G. Merli, F. Beolchini & A. Dell'Anno.** 2026. Environmental sustainability assessment of remediation alternatives for highly contaminated marine sediments. *Journal of Environmental Sciences* 159: 731-740. DOI:10.1016/j.jes.2025.04.084
- Amezcu-Linares, F., F. Amezcu & B. Gil-Manrique.** 2016. Effects of the Ixtoc I Oil Spill on fish assemblages in the Southern Gulf of Mexico. Consultado el 15 de septiembre 2025. <https://geocris.unam.mx/entities/publication/def7c46b-af5d-4a53-a5a1-08fec8ed527f>
- Anónimo.** 1984. Conservación de los recursos genéticos de los peces: problemas y recomendaciones. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación / Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <http://www.fao.org/docrep/005/ad013s/ad013s00.htm>
- Anónimo.** 2005. Estudio FAO: Alimentación y nutrición, biotoxinas marinas. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 292 pp. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/y5486s>.
- Anónimo.** 2007. Conservation Programmes In: Barbara Rischkowsky y Dafydd Pilling (eds.), The State of the World's Animal Genetic Resources for Food and Agriculture. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Rome, 243-263 p. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://www.fao.org/4/a1250e/a1250e.pdf>.
- Anónimo.** 2016. Marine plastic debris and microplastics: Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://www.unep.org/resources/publication/marine-plastic-debris-and-microplastics-global-lessons-and-research-inspire>
- Anónimo.** 2021. From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. Nairobi: United Nations Environment Programme. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://www.unep.org/resources/report/pollution-solution-global-assessment-marine-litter-and-plastic-pollution>
- Anónimo** 2023. Informe de los objetivos de desarrollo sostenible. Organización de las Naciones Unidas. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Anónimo.** 2025. PMEL Carbon Program. National Oceanic and Atmospheric Administration of USA). Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://www.pmel.noaa.gov/co2/file/Hawaii+Carbon+Dioxide+Time-Series>.
- Anónimo.** 2025. Contaminación por plásticos y basura marina. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Consulta el 05 de septiembre de 2025: <https://www.unep.org/topics/ocean-seas-and-coasts/ecosystem-degradation-pollution/plastic-pollution-marine-litter>
- Anónimo.** 2025. Constructed wetlands. Environmental Protection Agency. Consultado el 15 de agosto de 2025: <https://www.epa.gov/wetlands/constructed-wetlands>.
- Bautista, J. G.** 2018. Las conotoxinas. El Pulgar del Panda. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://www.elpulgardelpanda.com/las-conotoxinas/>
- Belivermis, M., M. Besson, P. Swarzenskib, F. Oberhaenslib, A. Taylor & M. Metian.** 2020. Influence of pH on Pb accumulation in the blue mussel, *Mytilus edulis*. *Marine Pollution Bulletin* 156: 111203. DOI:10.1016/j.marpolbul.2020.111203
- Betsy, J. & S. Kumar.** 2020. Cryopreservation: History and development. Pp:135-150 In: Betsy J. & Kumar S. (eds.), *Cryopreservation of fish gametes*, Springer Nature, Singapore.
- Bhattacharjee, S. & T. Dutta.** 2022. Chapter 1 - An overview of oil pollution and oil-spilling incidents. *Advances in Oil-Water Separation* 2022: 3-15. DOI:10.1016/B978-0-323-89978-9.00014-8

- Capurro, V. P., J. C. Martínez, C. A. Bustamante & E. O. Carhuaz.** 2022. Daño ambiental en el litoral marino peruano causado por el derrame de petróleo (enero 2022) en la refinería La Pampilla. *Manglar* 19(1): 67-75. DOI:10.17268/manglar.2022.009
- Chakraborty, P.** 2017. Oyster reef restoration in controlling coastal pollution around India: A viewpoint. *Marine Pollution Bulletin* 115(1-2): 190-193. DOI:10.1016/j.marpolbul.2016.11.059
- Coelho, P., S. Costa, C. Costa, S. Silva, A. Walter, J. Ranville, M. R. Pastorinho, C. Harrington, A. Taylor, V. Dall'Armi, R. Zoffoli, C. Candeias, E. Ferreira da Silva, S. Bonassi, B. Laffon & J. P. Teixeira.** 2014. Biomonitoring of several toxic metal(loid)s in different biological matrices from environmentally and occupationally exposed populations from Panasqueira mine area, Portugal. *Environmental Geochemistry and Health* 36(2): 255-269. DOI: 10.1007/s10653-013-9562-7
- Cornwall, C. E., S. Comeau, N.A. Kornder & C.T. Perry.** 2021. Global declines in coral reef calcium carbonate production under ocean acidification and warming. *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences* 118(21): e2015265118. DOI:10.1073/pnas.2015265118
- Costello, C., L. Cao, S. Gelcich, M. A. Cisneros-Mata, C. M. Free, H. E. Froehlich, C. D. Golden, G. Ishimura, J. Maier, I. Macadam-Somer, T. Mangin, M. C. Melnychuk, M. Miyahara, C. L. de Moor, R. Naylor, L. Nøstbakken, E. Ojea, E. O'Reilly, A. M. Parma, A. J. Plantinga, S. H. Thilsted & J. Lubchenco.** 2020. The future of food from the sea. *Nature* 588: 95-100. DOI: 10.1038/s41586-020-2616-y
- Coyle, R., G. Hardiman & K. O' Driscoll.** 2020. Microplastics in the marine environment: A review of their sources, distribution processes, uptake and exchange in ecosystems. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 2: 100010. DOI: 10.1016/j.cscee.2020.100010
- Ding, C., J. Chen, F. Zhu, L. Chai, Z. Lin, K. Zhang & Y. Shi.** 2022. Biological toxicity of heavy metal (loid)s in natural environments: From microbes to humans. *Frontiers in Environmental Science* 10: 920957. DOI: 10.3389/fenvs.2022.920957
- EEA.** 2023. From source to sea - The untold story of marine litter. European Environment Agency. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/from-source-to-sea-the-untold-story-of-marine-litter>.
- Fernandes, M. C., L. M. de Faria Leite, M. R. F. da Costa, L. V. Fregolente & G. P. Nogueira.** 2025. Microplastics in the marine environment: Impacts, identification and treatments. *Bioresource Technology Reports* 29: 102073. DOI:10.1016/j.biteb.2025.102073
- Friedlander, A. M.** 2018. Marine conservation in Oceania: Past, present, and future. *Marine Pollution Bulletin* 135:139-149. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.05.064
- Friedlingstein, P., M. Sullivan, M. W. Jones, R. M. Andrew, D. C. E. Bakker, J. Hauck, P. Landschützer, et al.** 2023. Global carbon budget 2023. *Earth System Science Data* 15: 5301-5369. DOI: 10.5194/essd-15-5301-2023
- Gibson, J. P. & S. V. Pullin.** 2005. Conservation of livestock and fish genetic resources. Cientific Report. Institute for Genetics and bioinformatics, University of New England, 3-29 p.
- Gola, D., P. K. Tyagi, A. Arya, N. Chauhan, M. Agarwal, S. K. Singh & S. S. Gola.** 2021. The impact of microplastics on marine environment: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 16: 100552. DOI:10.1016/j.enmm.2021.100552
- Guaje-Ramírez, D.N. & V. M. Medina-Robles.** 2023. Antioxidantes en la crioconservación de semen de peces: una revisión con énfasis en especies de agua dulce de Sur América. *Orinoquia* 27(2): 1-20. DOI: 10.22579/20112629.765
- Guo, J., Y. Kang & Y. Feng.** 2017. Bioassessment of heavy metal toxicity and enhancement of heavy metal removal by sulfate-reducing bacteria in the presence of zero valent iron. *Journal of Environmental Management* 203(Pt 1): 278-285.
- Guzzetti, E., A. Sureda, S. Tejada & C. Faggio.** 2018. Microplastic in marine organism: Environmental and toxicological effects. *Environmental Toxicology and Pharmacology* 64: 164-171. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.07.075
- Häder, D. P., A. T. Banaszak, V. E. Villafañe, M. A. Narvarte, R. A. González & E. W. Helbling.** 2020. Anthropogenic pollution of aquatic ecosystems: Emerging problems with global implications. *Science of the Total Environment* 713: 136586. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136586
- Herrera-Becerril, C. A., J. A. Sánchez-Cabeza, L. F. Álvarez-Sánchez, A. R. Lara-Cera, A. C. Ruiz-Fernández, J. G. Cardoso-Mohedano, M. L. Machain-Castillo & F. Colas.** 2022. Statistical identification of coastal hypoxia events controlled

- by wind-induced upwelling. *Continental Shelf Research* 233: 104634. DOI:10.1016/j.csr.2021.104634
- IPCC.** 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
- Jambeck, J. R., R. Geyer, C. Wilcox, T. R. Siegler, M. Perryman, A. Andrade, R. Narayan & K. L. Law.** 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347: 768-771. DOI: 10.1126/science.1260352
- Jin, A. H., M. Muttenthaler, S. Dutertre, S. W. A. Himaya, Q. Kaas, D. J. Craik, R. J. Lewis & P. F. Alewood.** 2019. Conotoxins: Chemistry and biology. *Chemical Reviews* 119(21): 11510-11549. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00207
- Keen, A.M.** 1971. Sea shells of tropical west America: Marine mollusks from Baja California to Peru. Stanford University Press, Stanford, 1126 pp.
- Khoshnood, Z. & R. Khoshnood.** 2013. Health risks evaluation of heavy metals in seafood. *Transylvanian Review of Systematical and Ecological Research* 15(1): 137-144. DOI: 10.2478/trser-2013-0012
- Kitsiou, D. & M. Karydis.** 2011. Coastal marine eutrophication assessment: a review on data analysis. *Environmental International* 37: 778-801. DOI:10.1016/j.envint.2011.02.004
- Lahoz, E.** 2025. Mareas negras: qué son, impacto y las más graves en la historia. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://dkv.es/corporativo/medioambiente/mareas-negras-que-son-impacto-y-mas-graves-en-historia>.
- Landigan, P. J., J. J. Stegeman, L. E. Fleming, D. Allemand, D. M. Anderson, L. C. Backer, F. Brucker-Davis, N. Chevalier, L. Corra, D. Czerucka, M. Y. D. Bottein, B. Demeneix, M. Depledge, D. D. Deheyn, C. J. Dorman, I. P. Féniche, S. Fisher, F. Gaill, F. Galgani, W. H. Gaze, L. Giuliano, P. Grandjean, M. E. Hahn, A. Hamdoun, P. Hess, B. Judson, A. Laborde, J. McGlade, J. Mu, A. Mustapha, M. Neira, R. T. Noble, M. L. Pedrotti, C. Reddy, J. Rocklöv, U. M. Scharler, H. Shanmugam, G. Taghian, J. A. J. M. Van de Water, L. Vezzulli, P. Weihe, A. Zeka, H. Raps & P. Rampal.** 2020. Human health and ocean pollution. *Annals of Global Health* 8:151. DOI: 10.5334/aogh.2831
- Lebel, J., D. Mergler & M. Lucotte.** 1996. Evidence of early nervous system dysfunction in Amazonian populations exposed to low-levels of methylmercury. *Neurotoxicology* 17: 157-168.
- Li, R., J. Yu, D. Ye, S. Liu, H. Zhang, H. Lin, J. Feng & K. Deng.** 2025. Conotoxins: Classification, prediction, and future directions in bioinformatics. *Toxins* 17(2): 78. DOI: 10.3390/toxins17020078
- Li, Z., Z. Ma, T. J. Van Der Kuijp, Z. Yuan & L. Huang.** 2014. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Science of The Total Environment* 468-469: 843-853. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.090
- Llano-Vázquez, M. & H. Fernández-Borja.** 2017. Análisis y propuestas para la conservación de la biodiversidad en México 1995-2017. Ciudad de México, 120 pp. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://desarrollo.fmcn.org/wp-content/uploads/2025/06/OZtfQc4vZyAcsCBFQRezbjE9hJvgeN3tXJZnrjY5.pdf>.
- Lotze, K. H.** 2021. Marine biodiversity conservation. *Current Biology Magazine* 31(19): R114-R1224. DOI:10.1016/j.cub.2021.06.084.
- Mahanayak, B.** 2024. Ex-situ and in-situ conservation of wild life. *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences* 18(03): 277-282. DOI:10.30574/wjbphs.2024.18.3.0371
- Margiotta, F., L. Micheli, C. Ciampi, C. Ghelardini, J. M. McIntosh & L. D. C. Mannelli.** 2022. Conus regius-derived conotoxins: Novel therapeutic opportunities from a marine organism. *Marine Drugs* 20(12): 773. DOI:10.3390/md20120773.
- Medina-Robles, V., Y. Velasco-Santamaría & P. E. Cruz-Casallas.** 2005. Aspectos generales de la crioconservación espermática en peces teleósteos. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 18(1): 34-48.
- Michel-Morfín, J. E., G. A. Medina-Vargas, V. Landa-Jaime, J. Arciniega-Flores, M. B. Aguilar & E. P. Heimer de la Cotera.** 2019. Ecological and population characteristics of the seashell *Conus princeps* on the Pacific coast of central Mexico. *Ciencias Marinas* 45(2): 77-89. DOI:10.7773/cm.v45i2.2925
- Millero, F.** 2013. Chemical Oceanography. 4a ed., Taylor and Francis, CRC Press, New York, 591 pp.
- Newman, M. C. & M. A. Unger.** 2003. Fundamentals of ecotoxicology. 2a ed., Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, 480 pp.
- Oehlenschläger, J.** 2002. Identifying heavy metals in fish. Pp: 95-113 In: Bremner H. A. (ed.), Safety

- and quality issues in fish processing, Woodhead Publishing, Oxford.
- Okeke, E. S., I. U. Okagu, K. Chukwudzie, T. C. Ezike & T. P. C. Ezeorba. 2024.** Marine-derived bioactive proteins and peptides: A review of current knowledge on anticancer potentials, clinical trials, and future prospects. *Natural Product Communications* 19(3). DOI:10.1177/1934578X241239
- Olivera, B. M., G. P. Miljanich, J. Ramachandran & M. E. Adams. 1994.** Calcium channel diversity and neurotransmitter release: the omega-conotoxins and omega-agatoxins. *Annual Review of Biochemistry* 63(1): 823-867. DOI:10.1146/annurev.bi.63.070194.004135
- Olmedo-Galarza, V. 2019.** Carbohydrates and proteins in microalgae: Potential functional foods. *Brazilian Journal of Food Technology* 22: 1-12.
- Oros, A. 2025.** Bioaccumulation and trophic transfer of heavy metals in marine fish: Ecological and ecosystem-level impacts. *Journal of Xenobiotics* 15(2): 59. DOI:10.3390/jox15020059
- Pat-Espadas, A. M., R. Loredo Portales, L. E. Amabilis-Sosa, G. Gómez & G. Vidal. 2018.** Review of constructed wetlands for acid mine drainage treatment. *Water* 10(11): 1685. DOI: 10.3390/w10111685
- Peck, Y., D. T. Wilson, D. Lennox-Bulow, J. Giribaldi, J. Seymour, S. Dutertre, K. J. Rosengren, M. J. Liddell & N. L. Daly Daly. 2025.** Structural characterization of a cysteine-rich conotoxin, sigma ( $\sigma$ ) S-GVIIIA, extracted from the defensive venom of the marine cone snail *Conus geographus*. *Biochemical Journal* 482(11): 639-653. DOI:10.1042/BCJ20240753
- Plastic Europe. 2024.** Plastics - the fast Facts 2024. Consultado el 05 de septiembre de 2025: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- Rahman, S. U., J. C. Han, Y. Zhou, M. Ahmad, B. Li, Y. Wang & I. Ahmad. 2024.** Adaptation and remediation strategies of mangroves against heavy metal contamination in global coastal ecosystems: a review. *Journal of Cleaner Production* 441: 140868. DOI:10.1016/j.jclepro.2024.140868
- Ruvalcaba-Aroche, E. D., E. D. Sánchez-Pérez & L. Sánchez-Velasco 2023.** El oxígeno en el Pacífico mexicano: cambios en los últimos 60 años. *Recursos Naturales y Sociedad* 9(1): 85-92.
- Sánchez, O. 2007.** Los Escenarios acuáticos. Ecosistemas acuáticos: diversidad, procesos, problemática y conservación. Pp: 9-36 In: Sánchez, O., Herzig, M., E. Peters, R. Márquez-Huitzil y L. Zambrano (eds.), Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México, SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología, U.S. fish & Wildlife Service, Unidos para la Conservación, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Ciudad de México.
- Shahidi, F. & A. Saeid. 2025.** Bioactivity of marine-derived peptides and proteins: A review. *Marine Drugs* 23(4): 157. DOI: 10.3390/MD23040157
- Solomon, O. O. & T. Palanisami. 2016.** Microplastics in the marine environment: current status, assessment methodologies, impacts and solutions. *Journal of Pollution Effects & Control* 4: 1000161. DOI:10.4172/2375-4397.1000161
- Tan, Q. G., S. Lu, R. Chen & J. Peng. 2019.** Making acute tests more ecologically relevant: Cadmium bioaccumulation and toxicity in an estuarine clam under various salinities modeled in a toxicokinetic - toxicodynamic framework. *Environmental, Science & Technology* 53(5): 2873-2880. DOI:10.1021/acs.est.8b07095
- Tebbett, S. B., S. R. Connolly & D. R. Bellwood. 2023.** Benthic composition changes on coral reefs at global scales. *Nature ecology and evolution* 7: 71-81. DOI:10.1038/s41559-022-01937-2
- Tokar, E. J., L. Benbrahim-Tallaa & M. P. Waalkes. 2011.** Metal ions in human cancer development. *Metal Ions in Life Sciences* 8: 375-401.
- Wikström, J., S. C. Forsberg, A. Maciute, F. J. Nascimento, S. Bonaglia & J. S. Gunnarsson. 2024.** Thin-layer capping with granular activated carbon and calcium-silicate to remediate organic and metal polluted harbor sediment-A mesocosm study. *Science of the Total Environment* 946: 174263. DOI:10.1016/j.scitotenv.2024.174263
- WRI. 2011.** Eutrophication & Hypoxia Map Data Set. World Resources Institute. World Resources Institute. Consultado el 25 de julio de 2025: <http://www.wri.org/resources/data-sets/eutrophication-hypoxia-map-data-set>.
- Yadav, K. K., N. Gupta, S. Prasad, L. C. Malav, J. K. Bhutto, A. Ahmad & S. Chaiprapat. 2023.** An eco-sustainable approach towards heavy metals remediation by mangroves from the coastal environment: A critical review. *Marine Pollution Bulletin* 188: 114569. DOI:10.1016/j.marpolbul.2022.114569
- Yang, Y., S. Ye, C. Zhang, G. Zeng, X. Tan, B. Song**

- & Q. Chen.** 2021. Application of biochar for the remediation of polluted sediments. *Journal of Hazardous Materials* 404: 124052. DOI:10.1016/j.jhazmat.2020.124052
- Yao, L., W. Wang, K. Yu, Z. Song, K. Lei & L. An.** 2025. Assessment of marine eutrophication: challenges and solutions ahead. *Marine Pollution Bulletin* 216: 117977. DOI:10.1016/j.marpolbul.2025.117977
- Yuan, K. K.; H. Y. Li & W. D. Yang.** 2024. Marine algal toxins and public health: Insights from shellfish and fish, the main biological vectors. *Marine Drugs* 2024 22(11): 510. DOI:10.3390/MD22110510
- Zhang, I. & M. H. Wong.** 2007. Environmental mercury contamination in China: sources and impacts. *Environment International* 33: 108-121. DOI:10.1016/j.envint.2006.06.022
- Zhang, J., C. Liu, J. Ling, W. Zhou, Y. Wang, H. Cheng, X. Huang, Q. Yang, W. Zhang, T. Liang, Y. Zhang & J. Dong.** 2025. Revealing the potential of biochar for heavy metal polluted seagrass remediation from microbial perspective. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 292: 117991. DOI:10.1016/j.ecoenv.2025.117991
- Żukowska, J. & M. Biziuk.** 2008. Methodological evaluation of method for dietary heavy metal intake. *Journal of Food Science* 73(2): R21-R29. DOI:10.1111/j.1750-3841.2007.00648.x.