

Vanessa Labrada Martagón y Tania Zenteno Savín

Biomarcadores a microplásticos en fauna marina

Se revisan los efectos conocidos que el plástico ocasiona sobre la salud de la biota marina. El estudio y monitoreo de biomarcadores ambientales como respuestas de protección de las células ante la exposición a contaminantes permite comprender el daño generado, como estrés oxidativo, respuestas proinflamatorias, regulación inmune, genotoxicidad, neurotoxicidad, disrupción endocrina y patologías hepáticas.

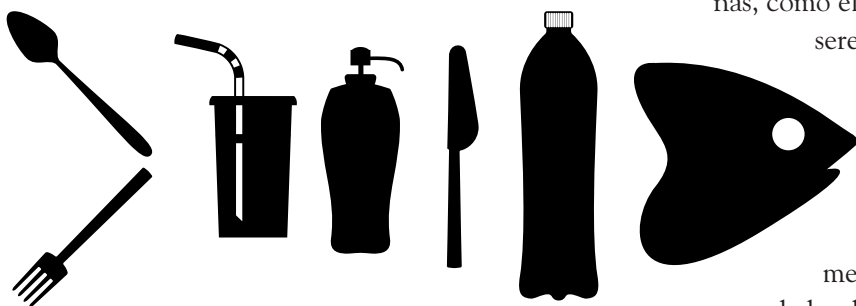
Introducción

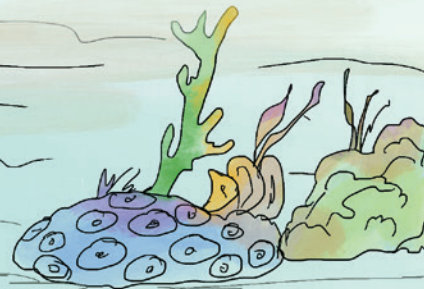
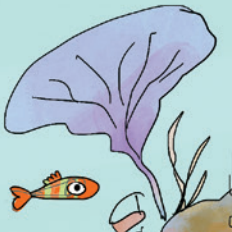
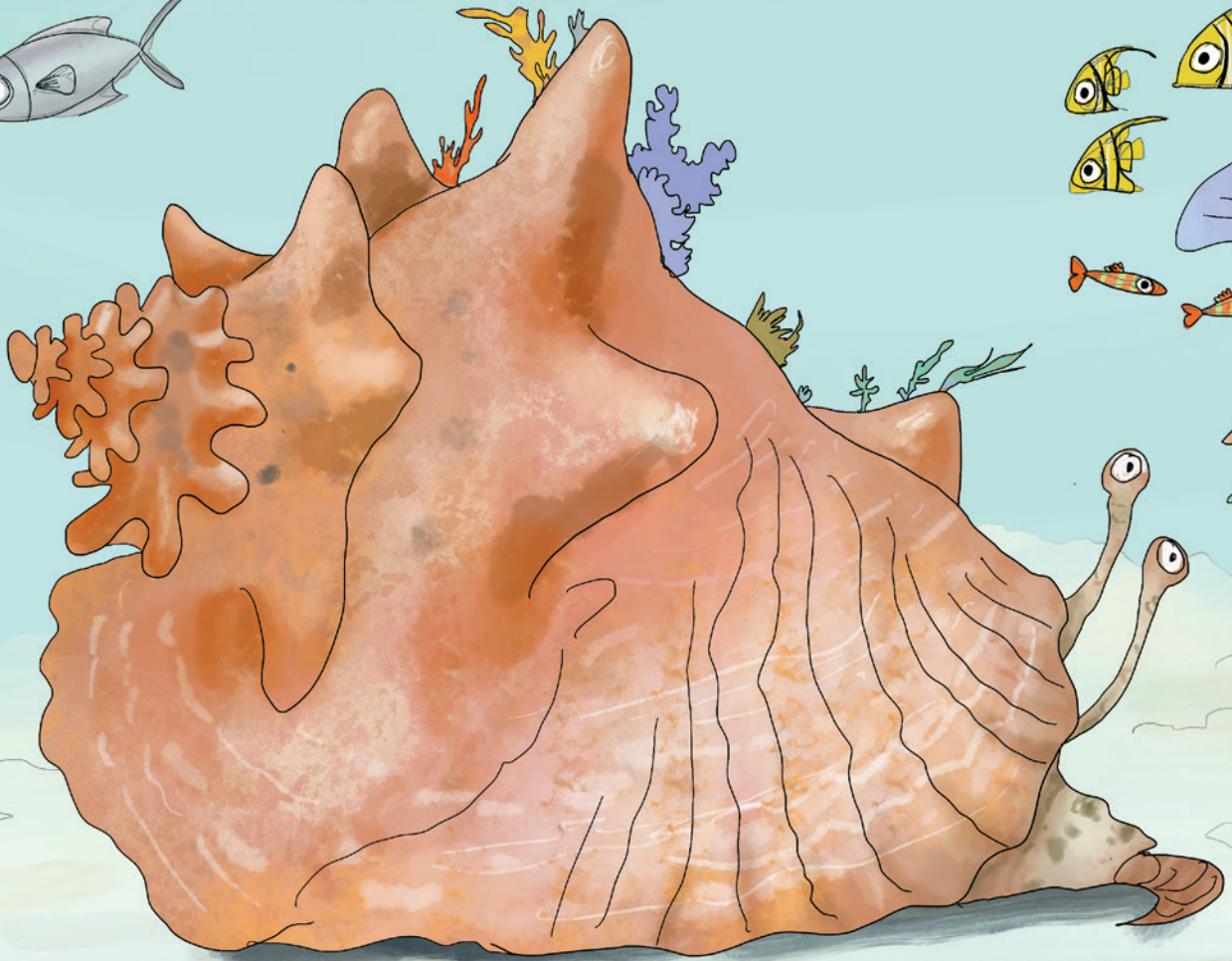
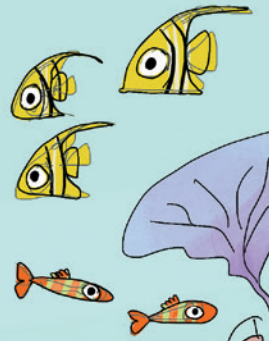
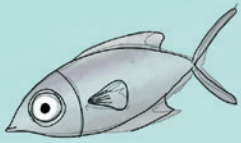
En la actualidad, la comunidad científica reconoce la relevancia y la prioridad que tiene mantener la salud desde un enfoque ecosistémico; sin embargo, no fue hasta la aparición de la enfermedad emergente COVID-19 que esta idea fue popularizada. El concepto de *salud ecosistémica* comprende que las consecuencias del incremento en la perturbación ambiental –la pérdida del hábitat, el cambio de uso del suelo, el aumento de contaminantes, entre otros– pueden extenderse a las poblaciones naturales y, en última instancia, a los ecosistemas. La población humana forma parte de dichos ecosistemas, por lo que las perso-

nas, como el resto de las poblaciones naturales, seremos, o ya somos, receptoras de los daños ambientales.

Los organismos de vida libre expuestos a ambientes perturbados (factores abióticos de estrés) pueden presentar daños metabólicos o una mayor susceptibilidad a desarrollar enfermedades. Si las poblaciones expuestas no son capaces de hacer frente

a las necesidades básicas (por ejemplo, refugio y alimento) en su medio natural, disminuirá su tasa de crecimiento, de supervivencia o de reproducción y, por ende, su abundancia y viabilidad. La consecuencia final incluye transformaciones en el ecosistema tales como la pérdida de biodiversidad, cambios en las relaciones entre





patógenos y sus hospederos, así como la aparición de enfermedades emergentes en la fauna silvestre, doméstica y en la población humana.

Mecanismos de defensa

Todos los organismos se encuentran expuestos, a lo largo de su vida, a factores estresantes naturales, tales como la luz ultravioleta (UV), metales pesados y florecimientos algales, así como a factores de origen humano, como los contaminantes orgánicos persistentes (COP), hidrocarburos, fármacos, basura plástica y microplásticos (partículas plásticas < 5 mm). En el transcurso de su evolución, la fauna y la flora han desarrollado una serie de mecanismos y sistemas complejos de protección ante las fluctuaciones ambientales y los agentes exógenos, como los mencionados anteriormente.

La piel, por ejemplo, es la primera línea de protección ante los agentes infecciosos. Así, los animales tenemos la capacidad de minimizar o reparar el daño mediante estos sistemas de defensa. Las estrategias pueden partir desde cambios en el comportamiento (por ejemplo, la locomoción a zonas más aptas) hasta cambios bioquímicos, enzimáticos o metabólicos (Fanjul, 2008). Estas adaptaciones se presentan tanto en protistas (arqueas, bacterias, protozoarios) como en invertebrados y vertebrados mayores, en todos con distinto grado de complejidad. Algunas especies tienen la capacidad de igualar su constitución interna a la del ambiente; otras generan corazas que las protegen físicamente de su ambiente o las mantienen aisladas de los cambios externos; mientras que unas más tienen adaptaciones que les permiten regular su **metabolismo** (como los metazoos).

Esa capacidad en las especies de mantener un equilibrio dinámico interno, controlado por mecanismos de regulación independientes, ante las diferentes perturbaciones ambientales, se conoce como homeostasis. Las modificaciones fisiológicas que adoptan los animales en respuesta a las alteraciones de su ambiente les permiten conservar sus sistemas en un estado constante y estable. Es así como mantienen la estabilidad interna y sobreviven ante las nuevas condiciones ambientales (Fanjul, 2008).

Detoxificación

Respuestas celulares que permiten al organismo eliminar la toxina o defender a la célula contra sus efectos adversos.

Metabolismo

Todos los procesos físicos y químicos que ocurren en las células para convertir o usar energía.



El ejemplo más claro de esto es el metabolismo de los xenobióticos, compuestos exógenos que ingresan a los organismos ya sea por contacto directo, inhalación o ingestión (Gupta, 2007). Los efectos de los xenobióticos como el mercurio, plomo, insecticidas, herbicidas, hidrocarburos, fármacos y compuestos plastificantes como los ftalatos, entre otros, se reflejan en distintos niveles de organización biológica (Stegeman y cols., 1992). Las respuestas bioquímicas son la primera línea de defensa en las células ante la exposición a sustancias tóxicas, así permiten eliminar a la toxina o defender a la célula contra los efectos adversos. Al conjunto de estas respuestas se le conoce como mecanismo de **detoxificación**. Durante este proceso ocurre la activación de compuestos inicialmente inertes y su transformación a metabolitos intermedios más reactivos que, de no ser contrarrestados, pueden generar un daño a los constituyentes celulares (como proteínas, lípidos o ADN) (Rodríguez, 2004). Los productos bioquímicos que se generan en el proceso de protección y reparación pueden tener consecuencias adversas e iniciar, de manera eventual, respuestas fisiológicas en los organismos. A largo plazo, el daño celular acumulado puede favorecer o contribuir al desarrollo de múltiples enfermedades, como el cáncer (Klaunig y Kamendulis, 2004).

Biomarcadores

La estrecha relación que existe entre las respuestas a nivel molecular y la presencia de xenobióticos ambientales ha aumentado paulatinamente el interés por estudiar la utilidad de dichas respuestas como marcadores de la exposición a contaminantes y los

efectos que pudieran estar presentando los organismos. De esta manera, un biomarcador se define como cualquier respuesta (molecular, celular, metabólica, morfológica) cuantificable que permite determinar que un organismo ha sido expuesto a un compuesto tóxico, o bien que permite cuantificar el daño generado por dicho contaminante. El biomarcador, entonces, será el indicador que podemos cuantificar y que relaciona el grado de disfunción que el contaminante produce en un organismo.

Los biomarcadores tienen distintos niveles de clasificación según la velocidad y el tipo de respuestas evaluadas. Pueden ser de índole bioquímico (concentración de macromoléculas), fisiológico (función de macromoléculas), histológico (conformación de tejidos) e incluso morfológicos (condición corporal). Los biomarcadores bioquímicos y fisiológicos tienen la ventaja de ser los más sensibles y de constituir la primera línea de respuesta detectable ante una alteración ambiental. Éstos reflejan únicamente el efecto del contaminante biológicamente disponible apuntando hacia posibles efectos negativos sobre un órgano o individuo. A su vez, el estudio de la combinación de varios tipos de marcadores biológicos permite generar una mejor interpretación de la respuesta metabólica ante las alteraciones ambientales, y así obtener una evaluación rápida del estado de salud de los organismos antes de llegar a observar efectos a nivel poblacional y ecológico.

Contaminantes plásticos

■ El conocimiento sobre los efectos del plástico es mayor en el ambiente acuático-marino que en el terrestre. De los artículos científicos publicados con resultados sobre la presencia o los efectos de los microplásticos, 83% se han realizado en organismos acuáticos (Wong y cols., 2020). En la actualidad, los estudios enfocados en determinar la presencia de plástico o microplástico en el ambiente marino demuestran que estos residuos han permeado en el ecosistema y en toda la red trófica sin ninguna distinción de filo (algas, invertebrados, peces, aves, mamíferos y reptiles), cuenca oceánica o hábitat (costero, oceánico, bentónico o pelágico).

Por ejemplo, un estudio de laboratorio mostró la adhesión de macropartículas plásticas en la superficie del cuerpo y apéndices externos de los **copéodos** marinos (*Tigriopus japonicus*) expuestos a diferentes concentraciones de poliestireno (Li y cols., 2020). Las algas también tienen la capacidad de absorber micro (< 5 mm) o nano (0.1 μm) plásticos por atracción electrostática (revisado por Wong y cols., 2020). Se puede inferir, entonces, que desde la base de la cadena trófica (productores primarios), los microplásticos quedan biodisponibles en el ambiente y pueden ser ingeridos –como se ha demostrado en múltiples estudios– por depredadores como invertebrados, peces, tiburones, tortugas y mamíferos marinos.

Los biomarcadores más utilizados para evaluar las respuestas de los organismos marinos ante la exposición al plástico y sus derivados son los bioquímicos de respuesta temprana, específicamente los indicadores de estrés oxidativo. Se ha demostrado en estudios de laboratorio que la exposición a microplásticos genera respuestas de estrés oxidativo en copéodos (*T. japonicus*), mejillones del Mediterráneo (*Mytilus galloprovincialis*), lenguados (*Paralichthys olivaceus*) y cultivos de células de riñón del salmón del Atlántico (*Salmo salar*). Se ha reportado un incremento en los niveles de producción de especies reactivas de oxígeno dentro de las células, en la actividad de las enzimas antioxidantes y en los daños a macromoléculas (como los lípidos en el hígado y el riñón), así como modificaciones en la expresión de genes relacionados con las defensas antioxidantes (Kang y cols., 2010; Yazdani y cols., 2016; Pittura y cols., 2018; Choi y cols., 2020). Dichas alteraciones relacionadas con las partículas de microplástico, y las sustancias químicas asociadas, son reconocidas en seres humanos, en animales de laboratorio –como ratas y ratones (Brassea y cols., 2022)– y en organismos acuáticos, como la pulga de agua (*Daphnia magna*), el pez zebra (*Danio rerio*) y la tilapia (*Oreochromis niloticus*) (Pérez-Albaladejo y cols., 2020). Sin embargo, hace falta un mayor número de estudios con organismos en su medio natural.

En una investigación realizada con peces múlidos obtenidos mediante la pesca comercial en España, se reportó la ingesta de microplásticos en una tercera

Copéodos
Crustáceos de 0.2 a 17 mm longitud que pueden formar parte del zooplancton.

parte de la muestra, sin un evidente daño oxidativo o a nivel celular en el hígado. En ese estudio se reportó únicamente un pequeño incremento en la actividad de la enzima antioxidante glutatión S-transferasa (GST), lo que sugiere una inducción del sistema antioxidante en estos peces (Alomar y cols., 2017). De esta manera, la determinación de alteraciones en poblaciones de vida libre es de suma importancia, ya que el estrés oxidativo produce la oxidación de macromoléculas como lípidos, proteínas y el ADN, con potenciales consecuencias estructurales y funcionales en los tejidos. El estrés oxidativo también está relacionado con estados de inflamación, enfermedades degenerativas, envejecimiento, el desarrollo de neoplasias y cáncer.

Otros biomarcadores incluidos en las evaluaciones de los efectos de contaminantes como los microplásticos son aquellos de la respuesta inmune y de estrés celular. En mejillones se han descrito alteraciones tanto en la transcripción de genes de respuesta inmune y de proteínas de choque térmico (marcador de estrés celular) como en la capacidad fagocítica de las células que componen el sistema inmune, el aumento en la proporción de granulocitos y la pérdida de la estabilidad de la membrana en hemocitos (células fagocíticas de los invertebrados) (Browne y cols., 2008; Pittura y cols., 2018). También se observaron cambios en la expresión de diversos genes involucrados en la respuesta inmune de las células del salmón del Atlántico expuestas al polímero plástico bisfenol A (Yazdani y cols., 2016). Dichos estudios demuestran que los organismos pueden presentar respuestas proinflamatorias y de modulación de la inmunidad innata ante la ingesta o exposición a los plásticos en el ambiente.

Pocos autores han evaluado el daño al ADN y las respuestas neurotóxicas ante la exposición al plástico. En los mejillones del Mediterráneo se reportó un aumento significativo de células con micronúcleos después de ser expuestos al polímero plástico polietileno, lo cual sugiere un daño genotóxico en el huso mitótico o la ruptura de cromosomas durante la mitosis celular. Tanto los mejillones como el pez gobio común (*Pomatoschistus microps*) presentaron alteraciones en la actividad de la enzima acetilcolinestrasa (AChE)

dependientes del tiempo de exposición a micropartículas de polietileno, lo cual denota efectos neurotóxicos en estos animales (Luís y cols., 2015; Pittura y cols., 2018). En el mismo estudio, se reportó una reducción del comportamiento predatorio del pez gobio tras la exposición al plástico (Luís y cols., 2015).

Los polímeros plásticos, como polietileno y poliestireno, así como los compuestos químicos asociados a éstos, como los ftalatos y el bisfenol, tienen la capacidad de alterar la función del sistema endocrino. Se han observado alteraciones en la expresión de genes que codifican para proteínas como la vitelogenina (necesaria para la formación del huevo) o receptores de hormonas (por ejemplo, en el pez japonés medaka, *Oryzias latipes*) (Rochman y cols., 2014); asimismo, se reportó una reducción en el número y tamaño de los oocitos (células precursoras del óvulo), un menor tamaño embrionario, así como un decremento en la velocidad espermática y en el crecimiento de larvas de ostiones (*Crassostrea gigas*) expuestas a poliestireno en condiciones controladas (Sussarellu y cols., 2016). Las alteraciones en el desarrollo temprano de los organismos y en la función reproductiva de los adultos ponen en riesgo el éxito reproductivo de las poblaciones silvestres.

Entre los parámetros clínicos incluidos como marcadores de exposición a contaminantes se han evaluado cambios en enzimas como la fosfatasa alcalina (ALP), lactato deshidrogenasa (LDH), aspartato transaminasa (AST) y alanina transaminasa (ALT), todas ellas como marcadores de desórdenes hepá-

Fagocítico
Células presentes en la sangre y otros tejidos animales, capaces de captar microorganismos y restos celulares.



tos. En un estudio de laboratorio con el lenguado (*Paralichthys olivaceus*) expuesto al dietilftalato (DEP, en concentraciones entre 300 y 900 µg/g), se observó un aumento en la actividad de las enzimas mencionadas (Kang y cols., 2010). Tras dos meses de exposición a una mezcla de polietileno y contaminantes químicos, como hidrocarburos (PAH) y bifenilos policlorinados (PCB), en el pez japonés medaka se observaron daños **subletales** en el hígado, incluida la reducción de glucógeno, vacuolización de grasas, hepatocitos neoplásicos, necrosis y formación temprana de tumores (Rochman y cols., 2014).

Los estudios que evalúan los efectos por la ingesta de microplásticos en los parámetros de vida de los organismos, tales como la supervivencia, fecundidad y desarrollo, son escasos debido a la complejidad para llevarlos a cabo. Los efectos reportados hasta ahora se han obtenido mediante estudios en laboratorio con organismos de fácil manejo y que tienen ciclos de vida cortos. En copépodos de agua salada (*T. japonicus*) se demostró que una mayor concentración y tamaño de la partícula del microplástico se relaciona con las tasas de supervivencia y fecundidad, la proporción entre sexos, así como los efectos negativos en la alimentación y excreción (Lee y cols., 2013; Yu y cols., 2020). El incremento en la mortalidad, como resultado de la ingesta del microplástico, se observa incluso en la siguiente generación de copépodos (Lee y cols., 2013).

■ Conclusión

■ Las consecuencias subletales en los organismos tras la ingesta y exposición a los microplásticos y sustancias tóxicas asociadas a éstos son variadas. Las respuestas tempranas observadas a nivel bioquímico incluyen la producción de especies reactivas, el aumento en los indicadores de estrés oxidativo, alteraciones en la transcripción y expresión de genes, daño al ADN, alteraciones fisiológicas por disrupción endocrina e, incluso, afectaciones a los parámetros poblacionales, tales como la probabilidad de supervivencia, tasas de fecundidad y desarrollo.

Aún falta mucho trabajo de investigación sobre el tipo y la frecuencia de los residuos plásticos que

ingiere la fauna en sus hábitats naturales para entender si los efectos estudiados en el laboratorio son también observados en los organismos de vida libre, así como para comprender los potenciales efectos sinérgicos de la variedad de plásticos disponibles en el ambiente. La continua ingesta y acumulación de microplásticos biodisponibles en el ambiente marino puede resultar en efectos crónicos a largo plazo. La poca capacidad de los organismos para hacer frente a sus necesidades nutrimentales y de comportamiento favorecerá la reducción de su éxito reproductivo y supervivencia, con afectaciones serias a la biodiversidad, los ecosistemas y, en consecuencia, a la salud pública (Guzzetti y cols., 2018).

Vanessa Labrada Martagón

Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
vanessa.labrada@uaslp.mx

Tania Zenteno Savín

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
tzenteno04@cibnor.mx

Subletales

Cambios fisiológicos o de comportamiento que debilitan el estado físico sin ocasionar la muerte inmediata del organismo.

Referencias específicas

- Fanjul, M. L. (2008), "Homeostasis y adaptación", en: M. L. Fanjul y M. Hiriart (eds.), *Biología funcional de los animales*, vol. I, 2.ª ed., México, Siglo XXI, pp. 15-26.
- Labrada Martagón, V. (2018), "Biomarcadores y salud ecológica", *Recursos Naturales y Sociedad*, 4(2): 9-20. Disponible en: <http://doi.org/10.18846/renaysoc.2018.04.04.02.0001>, consultado el 11 de febrero de 2022.
- Rodríguez, R. (2004), *Metabolismo de las toxinas ambientales*, México, FCE.
- Vázquez Gómez, A. G. y V. Labrada Martagón (2021), "Más allá de los popotes: efectos de la contaminación plástica en las tortugas marinas", *Recursos Naturales y Sociedad*, 7:17-40. Disponible en: https://www.cibnor.gob.mx/revista-rns/pdfs/vol7num1/2_MAS_ALLA_POPOTES.pdf, consultado el 11 de febrero de 2022.
- Zenteno Savín, T., V. Labrada Martagón y R. Gaxiola Robles (2019), "Respuestas fisiológicas de organismos marinos ante contaminantes", en: M. J. Rivera y P. Hernández (eds.), *Bioacumulación y transferencia de metales y contaminantes emergentes a través de las cadenas tróficas marinas*, Yucatán, Samsara, pp. 109-131.