

ECOTOXICOLOGÍA Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

CETÁCEOS BIOINDICADORES DE METALES PESADOS

Los cetáceos son animales longevos y depredadores tope de las redes alimentarias marinas, así resultan expuestos a las máximas concentraciones de contaminantes ambientales. El estado de sus poblaciones es un buen indicador de calidad del mar.

María Victoria Panebianco e Iris Cáceres-Saez

Seguramente todos, alguna vez, habrán escuchado o usado la palabra contaminación en una charla formal o informal. Si efectuamos una revisión en la red (a través de algún buscador como por ejemplo Google) aparecerán aproximadamente unos 51.700.000 resultados bajo la palabra "contaminación". Sin embargo, ¿tenemos todos la misma idea sobre el significado y la definición que comprende esta palabra?

La contaminación es la introducción al ambiente de materia o energía, en cantidades tales que pueden representar un peligro para los seres vivos, en particular la salud humana. Podemos nombrar varios tipos de contaminación, de origen terrestre, acuático o atmosférico, y siendo física (ruido), química (plaguicidas, metales) o biológica (toxinas). A la materia o energía introducida, de acuerdo a la definición, se la conoce como "agente contaminante". Este agente puede ser una sustancia natural o exógena en el ambiente bajo estudio. También es usual leer o escuchar la palabra polución (anglicismo derivado de *pollution*) la cual se refiere no solo a la presencia de un agente contaminante, sino al efecto que genera sobre los organismos o el ambiente.

En respuesta a la necesidad de evaluar la contaminación aparece una novedosa disciplina, la ecotoxicología; refiriéndose al estudio del efecto de compuestos químicos tóxicos sobre los seres vivos, especialmente en poblaciones, comunidades y ecosistemas. Esta definición fue introducida por el toxicólogo francés René Truhaut en 1969. Nuevamente, al realizar una búsqueda en la red sobre la palabra ecotoxicología, nos encontraremos con 642.000 resultados. Por su parte, los efectos ecotoxicológicos se refieren a los cambios producidos en la biota debido a la exposición a un agente contaminante (ver Glosario). Estos efectos pueden ser evidenciados en diferentes niveles de organización biológica, desde el nivel subcelular, tejidos, órganos y sistemas, organismo, comunidad, y ecosistema hasta alcanzar la biosfera. Asimismo, contempla el estudio sobre el destino y el transporte de los agentes contaminantes en la biosfera. La ecotoxicología es una rama de la toxicología, ciencia que estudia los efectos de los productos tóxicos o venenosos sobre el organismo. La evaluación del impacto de las actividades antrópicas sobre el ambiente, y, consecuentemente, sobre los organismos que los habitan, convierte a la ecotoxicología en una disciplina fundamental de estudio. Durante la segunda mitad del siglo XX, la transformación de los ecosistemas naturales -por fragmentación, pérdida de resiliencia, etc.- a una escala nunca vista en la historia del hombre, también creció el ímpetu en el desarrollo de la ecotoxicología.

Uno de los objetivos de esta disciplina es desarrollar y aplicar métodos que ayuden a entender la presencia y el origen, el destino y el efecto de los contaminantes en el ambiente. Los procedimientos y protocolos generados son un componente esencial de esta disciplina. Ejemplo de esto son el biomonitoreo y la bioindicación, métodos que obtienen información relativa a la calidad del ambiente. El biomonitoreo utiliza organismos -de cualquier grupo biológico incluido el hombre- para evaluar la contaminación y analizar posibles efectos sobre los organismos, como también el origen de los contaminantes, usando para esto, por ejemplo, biomarcadores.

Palabras clave: biomonitoreo, contaminación marina, metales pesados, delfines, Mar Argentino.

María Victoria Panebianco¹

Dra. en Biología
victoriapanebianco@gmail.com

Iris Cáceres-Saez²

Dra. en Biología
caceres.saez@gmail.com

¹Consultora independiente y divulgadora científica.

²Laboratorio de Ecología, Comportamiento y Mamíferos Marinos, Museo Argentino de Ciencias Naturales "Bernardino Rivadavia", Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Recibido: 19/12/2020. Aceptado: 18/10/2021.

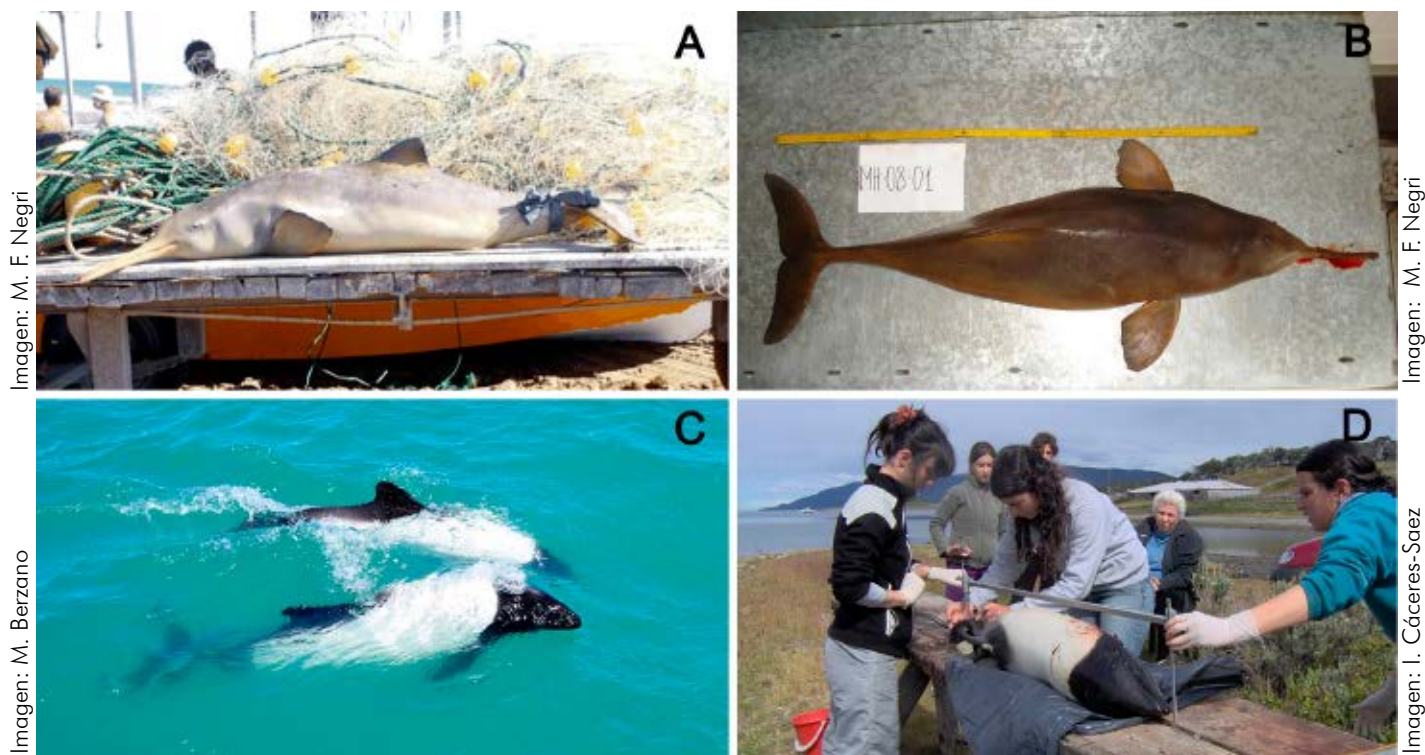


Imagen: M. F. Negri

Imagen: M. Berzano

Imagen: M. F. Negri

Imagen: I. Cáceres-Saez

Figura 1. A. Delfín franciscana proveniente de captura en redes de pesca costera artesanal en el sur de la provincia de Buenos Aires. B. Ejemplar dispuesto en laboratorio para ser medido y realizar su necropsia. C. Tonina overa en las costas de Patagonia, Argentina. D. Tonina overa proveniente de captura en redes de pesca costera artesanal del norte de Tierra del Fuego, Argentina, y dispuesta para realizar su necropsia.

Los biomarcadores son respuestas a distintos niveles de organización (celulares, histológicos, o cambios físicos o bioquímicos en el organismo) que permiten evaluar cuali-cuantitativamente la presencia de una sustancia o un elemento de los posibles efectos tóxicos. Por su parte, los bioindicadores son organismos o comunidades de organismos, cuyas reacciones se observan de manera representativa para evaluar una situación, dando pistas sobre la condición de todo el ecosistema. La bioindicación es una herramienta de la ecotoxicología que resume la información obtenida de los ecosistemas de forma tal, que pueda ser usada para evaluar un hábitat.

Indicadores biológicos

Los términos bioindicador, biomonitor, bioacumulador y biomarcador hacen referencia al organismo que responde ante el estrés ambiental. Se han utilizado de diversas maneras para describir diferentes enfoques al estudiar la contaminación de los distintos ambientes. En ecología y estudios ambientales, los términos "biomonitor" y "bioindicador" fueron utilizados y se siguen usando indistintamente, aunque esta terminología puede resultar confusa. Sin embargo, desde principios de los años '90 podemos observar una distinción en su uso. El biomonitoreo puede incluir un enfoque cualitativo y cuantitativo en la evaluación de la contaminación. Por ejemplo, el análisis químico de biomonitores (un organismo, una parte o una

comunidad de organismos) contiene información sobre los aspectos cuantitativos de la calidad del ambiente. Un biomonitor también es un bioindicador, excepto que cuantifica el impacto o el resultado final en un organismo o ecosistema y su salud. El biomonitoreo a gran escala utiliza bioacumuladores de plantas y animales, u organismos que acumulan varias sustancias químicas (incluyendo contaminantes) en los tejidos y órganos. La bioacumulación hace referencia al proceso de acumulación de dichas sustancias en los organismos, de forma que estos alcanzan concentraciones más elevadas que las que se encuentran en su alimento o en su ambiente.

Otro término frecuentemente utilizado es el de especies centinela. Son especies sensibles, monitores biológicos que, ante mínimos cambios, manifiestan respuestas importantes, por lo que se utilizan como sistemas de alarma ambiental. El término "centinela" se aplicó a las especies utilizadas en los primeros esfuerzos para detectar y mapear la radiactividad en la década del '50 y que luego se convirtió en el programa Mussel Watch, que representa el programa de monitoreo más consolidado y de mayor duración a nivel mundial. El proyecto fue desarrollado para analizar la tendencia de los niveles de alrededor de 100 contaminantes en sedimentos y moluscos bivalvos recolectados en más de 300 sitios costeros de Estados Unidos. El monitoreo se realiza de forma regular desde 1986 hasta la fecha, y expandiéndose a numerosos países costeros. El mismo

El delfín franciscana

El delfín franciscana es un pequeño delfín que recibe su nombre común debido al color de su piel, en tonos marrones (Figura 1, A y B), recordando a los hábitos de los monjes franciscanos. Resulta un modelo adecuado para ser considerado como especie centinela, además de ser endémica de Sudamérica. Las ventajas de realizar estudios de contaminantes en esta especie se ven potenciadas debido a su distribución, que se reduce a las aguas de la costa atlántica de Brasil, Uruguay y Argentina desde Itaúnas, Espíritu Santo, en Brasil, hasta el Golfo Nuevo, Chubut, Argentina (Figura 3); desplazándose en aguas marino-costeras y ocasionalmente en estuarios. Adicionalmente, la recuperación de ejemplares y su necropsia son viables debido a que aproximadamente entre 500 y 800 ejemplares mueren cada año en redes de pesca artesanal, de forma accidental, en Argentina. Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), es una Especie Vulnerable debido a la captura accidental y su población se estima en menos de 14.000 individuos para Argentina de acuerdo a los últimos estudios realizados. De persistir esta amenaza su población estará en serio peligro de extinción en 30 años. En la provincia de Buenos Aires se han realizado estudios sobre la viabilidad poblacional, encontrando que la especie no puede sostener los niveles actuales de mortalidad incidental siendo ésta una amenaza crítica para su población. Por tal motivo, la provincia de Buenos Aires en 2018 lo declaró Monumento Natural (Ley 14.992) para darle un resguardo legal y generar estrategias que aporten a su conservación.

se encuentra bajo la responsabilidad y el manejo de la Agencia Nacional de Administración de la Atmósfera y el Océano (NOAA, por sus siglas en inglés).

Sobre los metales pesados

Volviendo a nuestra primera búsqueda y analizando detenidamente los sitios web que aparecieron, vemos que las principales causas de contaminación son consecuencia de las actividades humanas. Las evidencias encontradas sobre este hecho, en un análisis más exhaustivo, ponen de manifiesto que los contaminantes son producidos por el hombre y no aparecen de forma natural en el ambiente (por ejemplo, desechos industriales y/o domésticos). Sin embargo, de aquí surge una pregunta: cuándo las sustancias químicas que aparecen como producto de un evento natural en el ambiente, ¿pueden ser consideradas como contaminantes? En primera instancia debemos diferenciar que las sustancias que estén contaminado sean tóxicas. Nos referimos a contaminantes, en el caso en que una sustancia o energía se encuentra en concentraciones, tiempos y lugar inusuales.

Por su parte, la toxicidad es la resultante de varios procesos: de la capacidad de la sustancia o energía de producir toxicidad, de la dosis *per se*, y de que el organismo que se expone pueda revertir o tolerar este mecanismo de acción (ver Glosario).

La mayoría de las sustancias ambientales que responden a esta pregunta son elementos inorgánicos. A estos elementos se los conoce también como metales traza -ya que su contenido en la Tierra es aproximadamente 0,0001% o menor- o metales pesados -por su concentración en la corteza terrestre menor a 0,1% en peso-. A pesar de su escasez en la corteza, estos elementos juegan un rol fundamental a

nivel químico y biológico en los ecosistemas naturales. Tal es así, que algunos de los metales son considerados esenciales para el desarrollo de la vida y su fisiología. A pesar de su baja abundancia, muchos metales pesados poseen implicancias sustanciales a nivel químico y biológico en cualquier ecosistema natural. Algunos metales pesados como zinc, cobre, hierro, cobalto y manganeso se definen esenciales para los organismos tanto vegetales como animales, ya que son necesarios para su normal funcionamiento fisiológico. Sin embargo, pueden ejercer efectos adversos en concentraciones superiores a las requeridas por los procesos fisiológicos en los que intervienen. Mientras que otros metales, como cadmio, mercurio y plomo son considerados no esenciales porque no presentan funciones biológicas conocidas, pero sí alta toxicidad, persistencia y biodisponibilidad, y han sido asociados a serios efectos adversos para la salud.

En un ambiente acuático como el marino, los metales ingresan mediante el transporte atmosférico, la descarga de los ríos, las escorrentías o las descargas originadas por procesos naturales (por ejemplo erosión, desgaste de rocas, lavado lento de suelos o rocas, sedimentación, actividad volcánica e incendios forestales). Los minerales en sí mismos son el origen de los elementos antes mencionados. Asimismo, ingresan a través de distintas fuentes antrópicas (por ejemplo el desarrollo y crecimiento de los centros urbanos, las actividades industriales y agrícola-ganaderas, las mineras y las refinerías). Estos elementos se movilizan en la Tierra circulando a través de todos los compartimientos (litósfera, hidrósfera, atmósfera y biósfera) con diferentes tiempos de residencia y siguiendo un ciclo. A este lo llamamos "el ciclo biogeoquímico" de los elementos. En los

La tonina overa

La tonina overa es un delfín comúnmente avistado a lo largo de la costa patagónica desde la península Valdés hasta la isla de Tierra del Fuego (Figura 3). También habitan aguas chilenas al sur de los 51°S, en el estrecho de Magallanes y en torno a las Islas Malvinas y el archipiélago Kerguelen ubicado en el océano Índico meridional. La especie se caracteriza por sus colores contrastantes de piel, blanco y negro (Figura 1, C y D). Las toninas overas se encuentran en aguas costeras frías a lo largo de costas abiertas, fiordos protegidos, bahías, puertos y desembocaduras de ríos. Dentro del Estrecho de Magallanes, prefieren las zonas con fuertes corrientes, como Primera y Segunda Angostura. En las Islas Malvinas, se encontró que esta especie tiene una distribución muy costera, con la mayoría de los registros de aguas parcialmente cerradas y dentro de los diez kilómetros de la costa. Fuera de la parte continental de América del Sur, estos delfines se observan en aguas de plataforma a menos de 200 metros de profundidad y con mayor frecuencia cerca de la costa (a menos de 60 km). La tonina overa es un depredador oportunista y principalmente se alimenta en mar abierto, siendo sus principales presas la sardina fueguina, los pejerreyes, la anchoíta, la merluza, el calamarete del sur y el calamar argentino, en aguas australes también se observó a las toninas overas explotando presas bentónicas como la centolla y el centellón. La especie está considerada como de Preocupación Menor por la UICN. Asimismo, la especie se encuentra en el Apéndice II de la Convención Internacional de Comercio de especies en peligro de extinción (CITES) y en la Convención de Especies Migratorias (CMS).

compartimientos correspondientes a suelos (fuente) y sedimentos (destino) permanecen entre cientos y millones de años, por lo que a estos compartimientos se los considera reservorios de estos elementos metálicos como también de otros metales traza. Es la actividad del hombre la que produce el ingreso y la consecuente alteración de los ciclos, afectando la velocidad de transporte entre los reservorios, y modificando la concentración y las especies físico-químicas, es decir la condición natural.

En las redes tróficas acuáticas, como las marinas, la energía fluye desde la base (fitoplancton, macroalgas, plantas halófitas, ver Glosario) hasta los depredadores superiores (peces, aves y mamíferos marinos) en forma lineal, unidireccional y también entre los eslabones de diferentes cadenas que se encuentran relacionadas ecológicamente. El ingreso de los metales pesados a las cadenas tróficas acuáticas puede generar procesos de biotransferencia, bioconcentración, bioacumulación y biomagnificación. En términos generales, la biotransferencia se refiere a la transferencia de metales desde una fuente de alimento hacia los consumidores, y bioacumulación a la incorporación de un contaminante por parte de un organismo desde un compartimento abiótico y/o biótico (alimento). La bioconcentración ocurre cuando

un organismo presenta concentraciones superiores a las de su ambiente, mientras que la biomagnificación se refiere al aumento en la concentración de un metal entre al menos dos niveles en una cadena trófica, lo que hace que cada organismo tenga en sus tejidos una concentración superior que la de su alimento. Estos procesos son dinámicos e incluyen numerosas variables relacionadas. El potencial de un contaminante para bioacumularse o biomagnificarse depende de las propiedades físico-químicas del compuesto (hidrofobicidad, especiación y persistencia), los factores ambientales (salinidad, temperatura, concentración del contaminante), los factores bióticos (hábitos y posición en la trama trófica, edad, sexo, madurez y eliminación o almacenamiento en formas no tóxicas), y la biodisponibilidad (actual ingreso del contaminante al ambiente, mecanismo de transporte, grado de contaminación). Esto expresa la complejidad de las redes tróficas de los ecosistemas marinos, así como, el desafío para comprender los mecanismos de transferencia de los metales pesados y predecir sus concentraciones en los organismos participantes, en particular los mamíferos marinos, que son predadores tope, así llamados por encontrarse en el nivel trófico más alto de su cadena.

Tabla 1. Concentración de cadmio y zinc (en $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco) en tejidos de delfines franciscana y tonina overa. Se informa el valor promedio y entre paréntesis el desvío estándar.

	Delfín franciscana		Tonina overa	
	Hígado	Riñón	Hígado	Riñón
Cadmio	2,25(2,27)	7,01(7,87)	2,53(1,75)	9,22(6,30)
Zinc	36,2(17,3)	22,8(4,98)	32,9(3,32)	31,73(2,46)

Los mamíferos marinos, bioindicadores

Al comienzo del texto explicamos la regla general de la ecotoxicología, y cómo en esta disciplina se usa a los organismos en contacto con agentes contaminantes como biomonitores o bioindicadores. Particularmente expuestos a niveles altos, se encuentran los principales depredadores vertebrados como los mamíferos y las aves, con una posición tope en las tramas tróficas, los cuales muestran así, una acumulación (ver Glosario) de contaminantes en concentraciones superiores a las normales. Por ejemplo, hoy sabemos que los mamíferos marinos, debido a su posición tope en la cadena trófica, su longevidad y su capacidad de acumular los agentes contaminantes por largos períodos de tiempo, son indicadores apropiados de los niveles de contaminantes (compuestos orgánicos persistentes o metales pesados) en el ambiente marino. Debido a esta capacidad de acumular los contaminantes por períodos prolongados de tiempo y a la imposibilidad de eliminarlos de sus tejidos, los organismos que se encuentren en el tope de la trama tendrán mayor concentración de contaminantes que aquellos que se encuentren en niveles más bajos. A medida que se incrementa el nivel trófico, la concentración de los contaminantes también va aumentando y acumulándose en los organismos. Aquí se da el proceso de biomagnificación. Sin embargo, los mamíferos marinos no son los únicos organismos capaces de acumular contaminantes en sus tejidos, los bivalvos en general, los anélidos y crustáceos, los peces, e incluso las aves pueden ser utilizados como herramientas de monitoreo ambiental.

Como se explicó anteriormente, uno de los métodos más difundidos para determinar la presencia de metales pesados en la biota de ambientes acuáticos es la utilización de los "organismos indicadores" o "centinelas" que mejor representan al ambiente elegido.

Desde hace más de cinco décadas de estudios, los mamíferos marinos son considerados como apropiados centinelas de los mares del mundo. En estos organismos la principal vía de exposición a contaminantes es a través de la ingesta del alimento, y en menor medida a través de la respiración pulmonar, la absorción a través de la piel y la ingesta de agua. Su exposición a un determinado tóxico es evaluada a través de su nivel de concentración en los órganos y tejidos en los que se acumula principalmente. Los metales pesados son transportados en el organismo a través de la sangre hasta llegar a los diferentes órganos y tejidos. En general, la mayor concentración se produce, el hígado y los riñones, por su implicancia en la detoxificación (ver Glosario). Es importante señalar que existen numerosos factores biológicos y ecológicos que influyen en la acumulación de

los metales y su toxicidad como la eliminación, la excreción y detoxificación, la edad, el sexo, el estado reproductivo, la madurez sexual (vinculada con la edad), la condición nutricional, la dieta y el área geográfica que habitan los individuos. Generalmente, la mayoría de los estudios de estas características se efectúan a partir del análisis de muestras que provienen de animales muertos, como se mencionó anteriormente.

Antecedentes en nuestro país

Los ecosistemas costero-marinos de Argentina están sujetos a la presión del desarrollo humano y actualmente es imposible encontrar áreas prístinas, aún en los sitios menos poblados. De ahí la importancia de establecer y dar seguimiento a programas de protección y conservación del ambiente. Es en este sentido que los bioindicadores marinos son fundamentales para identificar situaciones de contaminación (por compuestos orgánicos persistentes y metales pesados), evaluar la salud del ambiente, y asegurarnos que los ecosistemas están siendo protegidos efectivamente. El uso del biomonitoreo para la protección y conservación de los ecosistemas marinos es una tarea que requiere el apoyo del gobierno, de agencias intergubernamentales y no-gubernamentales, como también de la academia.

Si bien en las últimas décadas se registran trabajos

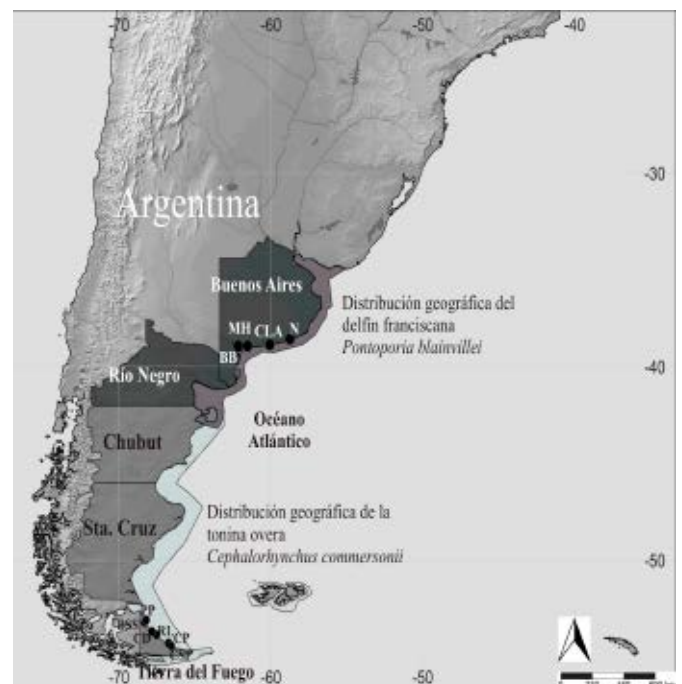


Figura 2. Distribución geográfica en Argentina del delfín franciscana y la tonina overa. Se muestran además las áreas de trabajo (Referencias: N: Necochea, CLA: Claromecó, MH: Monte Hermoso, PP: Península el Páramo, BSS: Bahía San Sebastián, CD: Cabo Domingo, CP: Cabo Peñas, RL: Río Láinez, CSP: Cabo San Pablo).

Esquema sobre la relación entre la contaminación y la polución. La eco-toxicología contribuye a dilucidar dicha relación determinando la presencia o ausencia de efectos sobre la biota.



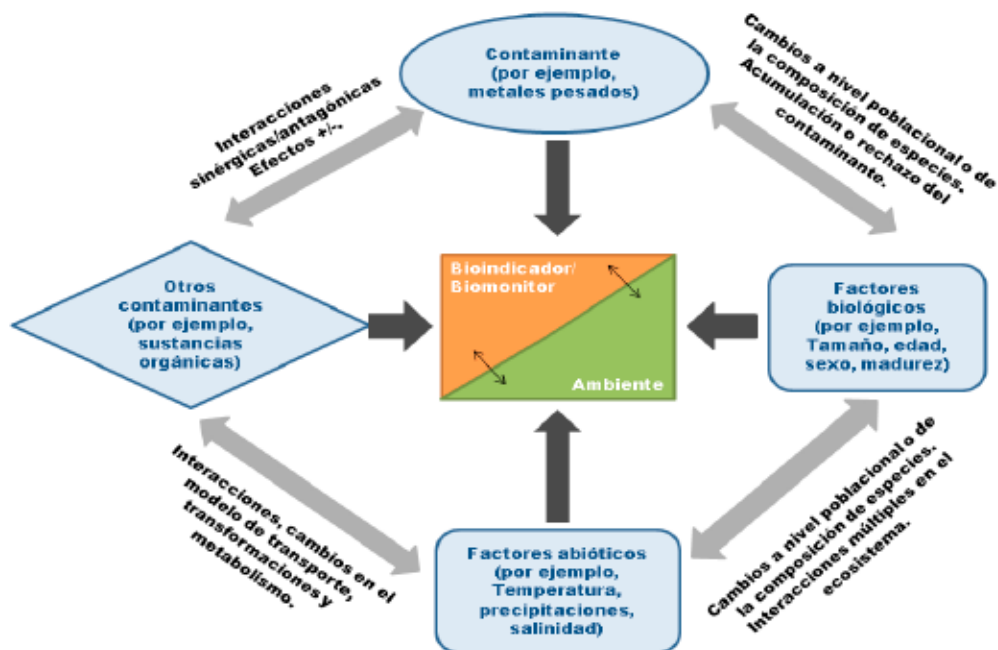
que informan la presencia de contaminantes entre los mamíferos marinos como los cetáceos, aún son escasos los trabajos que permiten establecer efectos a nivel poblacional o atribuir mortalidad a este factor.

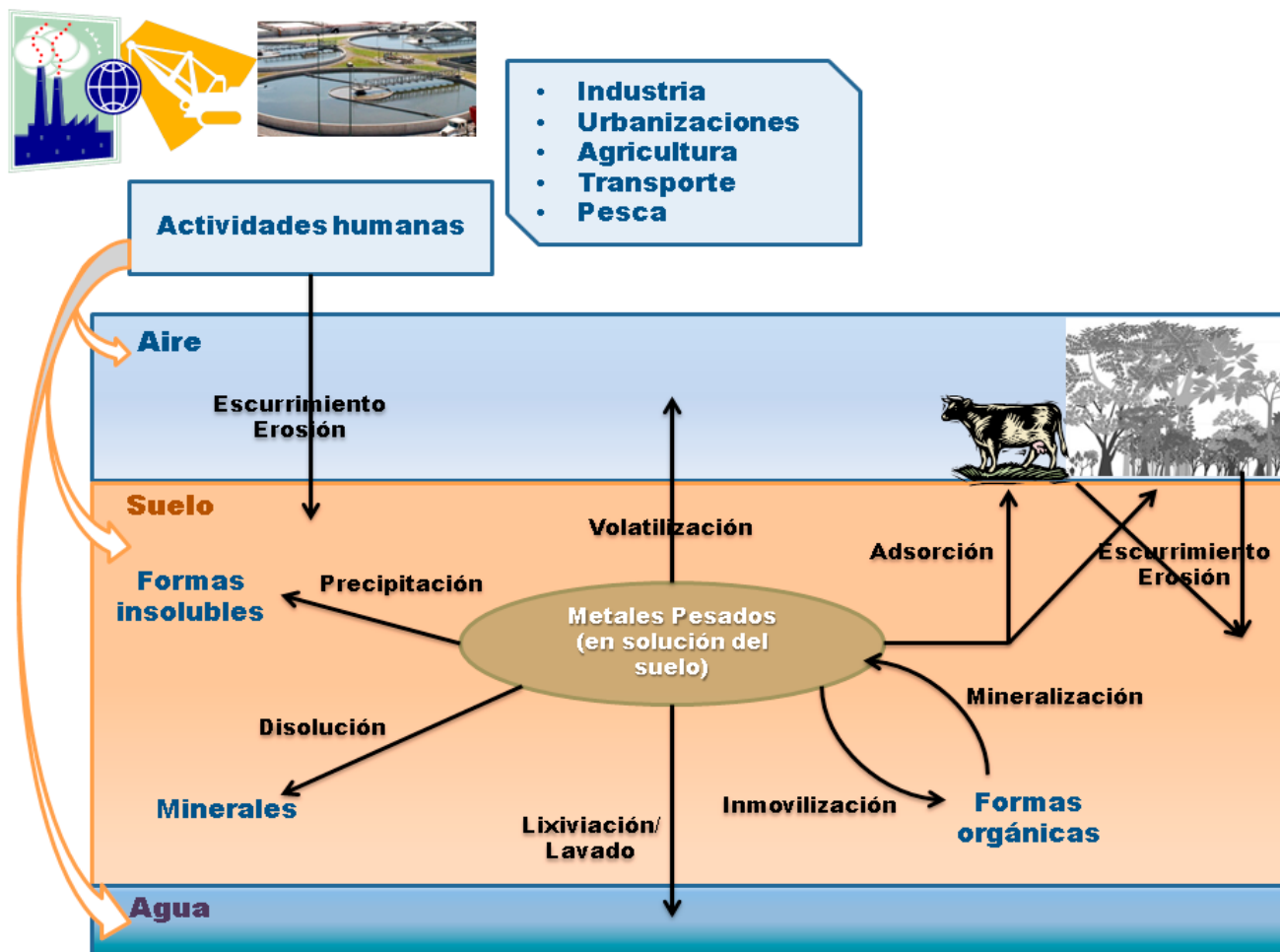
Esto resulta complejo por diversas causas como la obtención de muestras (el estado de conservación que usualmente no permite evaluar efectos de los contaminantes y causas de la muerte) y la protección legal de estos organismos, que hacen que este tipo de estudios no se puedan llevar a cabo como sucede con especies que son capturadas para realizar bioensayos. Esto se suma a la falta de información, más aún para las especies del hemisferio sur y sus poblaciones. En el Océano Atlántico sudoccidental, los mamíferos marinos enfrentan diferentes amenazas como la contaminación química y sonora, la captura incidental o *by-catch* (ver Glosario) y los efectos ocasionados por

el cambio climático, generando problemas vinculados con la conservación y la viabilidad de distintas especies y hábitats.

Los primeros estudios referenciados sobre el uso de mamíferos marinos como bioindicadores de contaminación ambiental en nuestro país surgen hacia finales de la década de los '80 y continúan hasta nuestros días. En el Mar Argentino se encuentran dos especies de pequeños cetáceos, la franciscana (*Pontoporia blainvillei*) y la tonina overa (*Cephalorhynchus commersonii*) (ver Recuadros; Figura 1), dos especies de delfines vulnerables a la captura incidental en redes de pesca, y que resultan susceptibles al impacto de la contaminación marina debido a sus hábitos predominantemente costeros. Estas especies, dominantes de las tramas tróficas marinas, muestran un amplio espectro dietario y

Esquema general de la interacción entre los agentes contaminantes y el ambiente.





Esquema del ciclo generalizado de los metales pesados.

poseen una longevidad extendida que establece tiempos relevantes de exposición a los contaminantes, características que permiten considerarlos como potenciales organismos monitores ambientales en el Mar Argentino. Estas particularidades, y el acceso a muestras en condiciones apropiadas para estudios ecotoxicológicos, fueron determinantes en la elección de las especies propuestas. En el caso del delfín franciscana, se han publicado numerosos trabajos científicos evidenciando la presencia de metales pesados y otros elementos traza en sus órganos, a lo largo de su distribución geográfica tanto en Argentina como Brasil. Para la tonina overa, los resultados resumidos aquí constituyen parte de los primeros antecedentes que conforman una línea de base sobre metales pesados para la especie en aguas subantárticas de Tierra del Fuego, Argentina.

Actualmente, los reglamentos nacionales que protegen a los mamíferos marinos de su manipulación, reducen el acceso a muestras para desarrollar estudios como el planteado aquí. En diversas ocasiones, los ejemplares encontrados en las costas no presentan un estado de conservación apropiado que permitan su análisis, y se requieren muestreos estrechamente relacionados con muertes recientes por enmalle

(capturas incidentales) (ver Figura 1, A y D) o eventos de varamientos. En los casos de estudio presentados aquí, los delfines hallados fueron sujetos a necropsias (ver Glosario) siguiendo protocolos estandarizados a nivel internacional (registro de medidas corporales y la extracción de muestras de tejidos y órganos) en la medida en que las condiciones del ejemplar y del lugar donde fue encontrado lo permitieran adecuadamente (ver Figura 1, B y C). En cada disección de ejemplar se seleccionaron muestras provenientes del hígado, del riñón (órganos blanco de relevancia metabólica y toxicológica) y de la piel, conservando estas muestras a -20°C en bolsas de polietileno hasta su procesamiento en laboratorio y posterior análisis de metales pesados.

¿Cómo analizamos los metales pesados?

Una de las técnicas empleadas para la determinación de los metales pesados en tejidos hepático, renal y cutáneo de la tonina overa fue el Análisis por Activación Neutrónica Instrumental (AANI). Esta es una técnica analítica multielemental no destructiva que consiste en la medición de las emisiones X y γ de los productos radiactivos generados en la muestra cuando es sometida al bombardeo con neutrones. Las reacciones nucleares con neutrones generan productos

radioactivos que permiten identificar el núcleo original estudiando la energía de las emisiones X y γ de los productos. El AANI permite la determinación de varios elementos a la vez, no necesita digestión o tratamiento químico alguno de la muestra, minimizándose los problemas de contaminación o pérdidas del elemento a analizar que tienen otras técnicas. El límite de detección del AANI varía en función del elemento que se estudia, la matriz y las condiciones de irradiación y medición, llegando a niveles de una parte en mil millones ($\mu\text{g g}^{-1}$). En contrapartida, los costos de este procedimiento son elevados, y la disponibilidad de la técnica es limitada, dado que se necesita un reactor nuclear para la irradiación de las muestras. En cuanto al procesamiento de las muestras, estas fueron liofilizadas (ver Glosario) hasta obtener un peso constante. Luego se tomaron fracciones de 100 a 150 mg de material liofilizado y se colocaron en ampollas de cuarzo. Posteriormente, las muestras se irradiaron en el reactor nuclear de investigación RA-6 del Centro Atómico Bariloche, de la Comisión Nacional de Energía Atómica.

Por otro lado, la determinación cuantitativa de las muestras de hígado y riñón de delfines franciscana se llevó a cabo mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica con llama aire/acetileno. Las lecturas fueron hechas con lámparas de cátodo hueco y para cada metal se siguió con las condiciones de lectura del equipo. Por otro lado, las muestras de piel de esta misma especie se analizaron mediante Espectrometría de Emisión Óptica (EEA) por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES). El plasma de acoplamiento inductivo (ICP) es una fuente de ionización que junto a un espectrofotómetro de emisión óptica (OES) constituye el equipo de ICP-OES. Para ambos casos de análisis químico, el método utilizado para la destrucción de la materia orgánica de las muestras analizadas fue una mineralización del tejido en medio ácido (ácido nítrico concentrado al 65% y ácido perclórico concentrado al 70%).

Resultados y comparación entre delfines

En este trabajo se presentan los resultados sobre la determinación de zinc y cadmio en tejidos hepático, renal y cutáneo de delfines franciscana y tonina overa. En ambas especies, al tratarse de un elemento traza esencial, el zinc fue el metal más abundante comparado con el cadmio (ver Tabla 1). Asimismo, el patrón de acumulación tisular (es decir, en los tejidos) entre las especies fue semejante, aunque la concentración de zinc resultó superior en la piel, respecto de los otros tejidos internos analizados. Entre el hígado y el riñón no hubo una diferencia para las concentraciones de zinc. La concentración de cadmio en el riñón y el hígado resultó similar entre ambos tejidos, mientras que en la

piel se encontró por debajo del límite de detección en ambas especies. Los metales esenciales se encuentran bajo regulación homeostática del organismo (es decir la capacidad de mantener una condición interna estable), generalmente manteniéndose en niveles fisiológicos para los procesos metabólicos que los involucran. Sin embargo, esto no significa que sus niveles de concentración puedan variar en un mismo tejido tanto intra- como interespecíficamente. El rango de concentración de zinc establecido de regulación fisiológica en el hígado de mamíferos marinos se encuentra entre 20 y 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco. Aquí observamos que las muestras de tejido hepático de la tonina overa presentaron valores entre 15,3 y 40,3 $\mu\text{g g}^{-1}$ quedando comprendidos dentro del límite establecido, al igual que para los delfines franciscana, cuyos valores estuvieron entre 14,19 y 75,26 $\mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco.

Los antecedentes publicados demuestran que las concentraciones de metales o elementos no esenciales en los tejidos están directamente relacionadas con la dieta (fuente) de los delfines. Sin embargo, es importante tener presente que hay otros procesos (por ejemplo metabolismo -asimilación, transformación, eliminación, edad, reproducción, diferencias entre machos y hembras por la gestación/lactancia-, etc.) que influyen en el nivel concreto de los elementos. El delfín franciscana presenta hábitos alimenticios de tipo generalista y oportunista, y su dieta se compone principalmente de peces, calamares y crustáceos. En particular, la anchoíta (nombre científico) ha sido señalada como vector del cadmio en los tejidos de los delfines franciscana que habitan aguas costeras del sur de la provincia de Buenos Aires. Al igual que este delfín, la tonina overa es un depredador oportunista y generalista, alimentándose principalmente en aguas costeras sobre la plataforma continental, tanto de presas pelágicas como bentónicas (ver Glosario). En aguas subantárticas de Tierra del Fuego, las principales presas de las toninas son la sardina fueguina, la merluza de cola, los peces nototénidos, el róbalo patagónico, el calamar patagónico, el pulpo, langostas, cangrejos y pequeños crustáceos. Se observa que la contribución de cadmio podría ser el resultado de una dieta enriquecida a base de cefalópodos (ver Glosario), principalmente de la pota argentina, *Illex argentinus* (grupo acumulador de cadmio) en la tonina overa. Tales diferencias en la dieta de ambas especies, podrían responder a los distintos patrones de acumulación de los metales analizados (ver Tabla 1). Esta información sirve de base en estos ecosistemas del mar argentino.

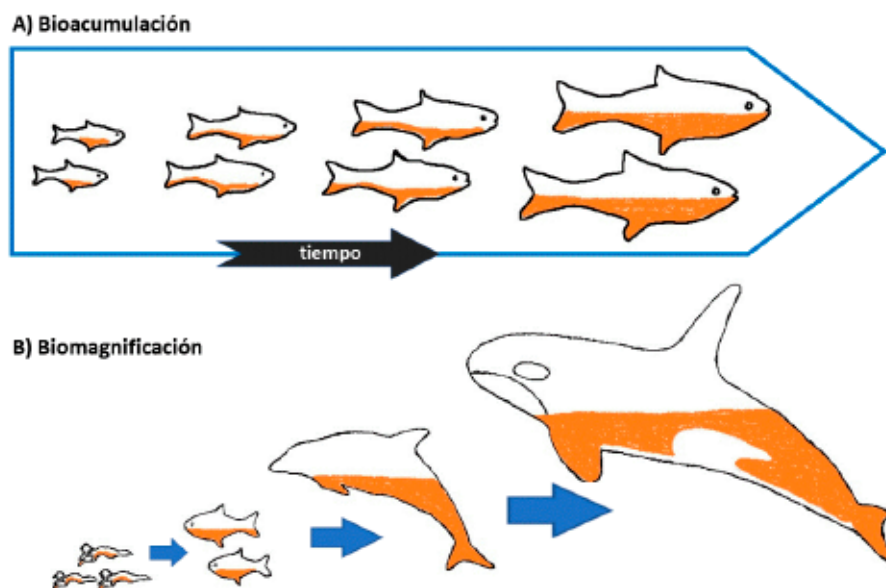
Es necesario hacer una mención especial a las concentraciones de zinc en la piel de ambas especies, lo cual resalta el hecho de que este tipo de estudios ecotoxicológicos son muy necesarios para ampliar

el conocimiento sobre estas especies de pequeños cetáceos, vulnerables y sometidos a una fuerte presión ambiental por el hombre. Estudios previos demuestran que niveles altos de zinc en la piel pueden estar asociados a su función protectora para la cicatrización de heridas, y contra el daño foto-oxidativo de los rayos ultravioleta (por ejemplo, la progresión tumoral). Se reconoce que es necesaria una alta concentración de zinc para las metaloenzimas (ver Glosario), la proliferación de células cutáneas, y el depósito de colágeno en los sitios de lesiones o heridas epidérmicas. Una posible razón de la concentración superior de zinc en piel de toninas puede estar relacionada con su distribución en aguas subantárticas, las cuales se encuentran más cercanas a la actual ubicación del adelgazamiento en la capa de ozono sobre el continente Antártico. Según el programa de Observación de Atmósfera Global de la Organización Meteorológica Mundial sobre el adelgazamiento de ozono en el año 2020, el área se encontraba entre los de mayor tamaño en los últimos quince años. El ozono es un gas incoloro que forma una tenue capa en la atmósfera y absorbe los componentes dañinos de la luz solar, conocidos como ultravioleta B o UV-B. La reducción del espesor de esta capa, supone un aumento en el riesgo de los organismos de contraer cáncer de piel, entre otras enfermedades.

Respecto al cadmio, las concentraciones superiores se registraron en el tejido renal de ambas especies, lo cual es consistente con la mayoría de los estudios realizados sobre mamíferos marinos. El cadmio se acumula preferentemente en el riñón, asociado a sus

funciones de filtración y acumulación. La relación de la concentración de cadmio entre el riñón y el hígado sirve como un índice de exposición, donde valores mayores a uno resultan indicativos de una exposición crónica (a bajos niveles de cadmio). Para los ejemplares analizados de tonina overa y de delfín franciscana, se observó que esta relación del cadmio entre el riñón y el hígado resultó mayor a uno, sugiriendo una posible exposición a dicho metal. Sin embargo, se debe tener en consideración que, cuando se analizan ejemplares juveniles o de una menor clase de edad, la acumulación de cadmio suele observarse en el hígado, y con la edad se denota un aumento de sus concentraciones en el riñón. Debido que los metales no esenciales (tóxicos) no son regulados metabólicamente, los niveles de cadmio determinados en los delfines pueden ser considerados como indicadores de niveles ambientales. Esto implicaría que ambas especies consumieron presas con un elevado contenido de cadmio en el ecosistema. Como metales no esenciales, se espera que se ubiquen últimos en el ordenamiento de concentraciones, luego de los esenciales, como también lo es que, de hallarse biodisponibles en el ambiente, los niveles detectables se encuentren en hígado, como efectivamente mostraron los resultados, ya que es allí donde típicamente se acumulan.

Como se planteó anteriormente, independientemente de los efectos nocivos y del impacto que la contaminación puede tener sobre una especie, población o ecosistema particular, la determinación de las concentraciones de contaminantes en un taxón específico puede resultar de utilidad para entender o



A. Esquema del proceso de Bioacumulación en los organismos a lo largo del tiempo. Se presenta un aumento de la concentración de un contaminante en un organismo a medida que crece. B. Biomagnificación en una red alimentaria marina. Las redes alimentarias tienen, por lo general, entre dos y cinco eslabones tróficos. La concentración de un contaminante es baja en los organismos productores y consumidores primarios, y se magnifica en los siguientes niveles de la red.

evaluar la calidad de un ecosistema. Teniendo en cuenta que los metales pesados son bioacumulativos, tienen propiedades que podrían causar efectos nocivos en los animales, por lo cual se requieren estudios futuros para evaluar los posibles riesgos ecotoxicológicos. Estudios previos sugieren que concentraciones mayores que $100 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco son tóxicas para mamíferos, manifestándose daños en el tejido renal. En el caso de la tonina overa, la concentración promedio en el riñón ($9,02 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco) y su valor máximo determinado ($17,2 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco), son inferiores al límite presentado. De igual forma, la concentración promedio en el tejido renal del delfín franciscana ($7,01 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco) y su valor máximo determinado ($29,85 \mu\text{g g}^{-1}$ de peso fresco) resultaron inferiores que el límite de toxicidad establecido. Más allá de los tejidos y especies de delfines bajo estudio, es importante mencionar que las concentraciones de cadmio determinadas en ambas especies no pueden señalarse como tóxicas para la salud de estos animales.

Consideraciones finales

Cabe mencionar que, aunque los cetáceos han sido y siguen siendo propuestos como buenos indicadores del ecosistema marino, en el caso de los cetáceos se presentan ciertas dificultades metodológicas relacionadas con la obtención de las muestras biológicas. Además, como no es factible acceder a muestras de distintos grupos etarios, sexo, distintos estadios fisiológicos (por ejemplo hembras preñadas o no, lactando o no, individuos maduros sexualmente o no), solo se dispone para su estudio lo que se encuentra en las expediciones. Es decir, son muestras fortuitas, y de esta manera, en ocasiones, resulta difícil señalarlos como óptimos indicadores. Si bien se dice y se usa esta capacidad, puede haber un sesgo sobre las muestras y queda información encubierta que es necesaria para completar el panorama que sería lo que brinda su uso como tales. En particular, las discusiones se centran en cuestiones asociadas con la condición inicial o estado de hallazgo del animal (conservación del cadáver), y la imposibilidad de tomar muestras, que obligan a obtenerlas de animales muertos con las consecuentes críticas que esto conlleva, especialmente en la dificultad de obtener un tamaño muestral adecuado que brinde robustez estadística a los resultados y, en otros casos, con la pérdida de información y calidad de las muestras obtenidas.

Numerosos animales llegan a la costa en áreas donde el esfuerzo de muestreo es escaso, se trata de áreas remotas o inaccesibles, o no hay establecida una sistematización de los muestreos. En numerosas ocasiones los recursos disponibles para realizar necropsias son limitados y, con frecuencia, el estado

de descomposición de los animales es avanzado, dándose por perdido el material biológico. Por lo expuesto anteriormente, en diversas ocasiones, los resultados se vuelven difíciles de comparar y el grado de exposición difícil de evaluar, a lo que se agrega también la variación existente entre los tejidos según el sexo, la edad, el estado nutricional y el estatus reproductivo de los individuos. Sin embargo, por el momento, estas condiciones de trabajo están entre las principales oportunidades de estudio sobre la ocurrencia y los niveles de contaminantes (por ejemplo metales pesados) en estos organismos y sus áreas de distribución

Agradecimientos

Extendemos nuestros agradecimientos a la Dirección de Fauna Silvestre Nación, Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable, Ushuaia, Tierra del Fuego, Argentina; y al Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible, provincia de Buenos Aires. A la Society for Marine Mammalogy (SMM) y a la Cetacean Society International (CSI) por la financiación recibida al trabajo de campo. Durante el transcurso de estos estudios se contó con becas doctorales y posdoctorales del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) a ambas autoras. Agradecemos particularmente la gentileza de la fotógrafa Marisa Berzano por compartir imágenes de toninas overas en aguas patagónicas.

Glosario

Acumulación: retención de una sustancia por un organismo diana, un órgano o una parte del medio ambiente, que conducen a un aumento de la cantidad o la concentración de la sustancia en los mismos.

Bentónicas: especies que viven en contacto o en dependencia directa con el fondo del mar o de los lagos continentales.

Captura incidental: (*by-catch*, por su denominación en inglés): animales capturados por operaciones de pesca que no constituyen blanco de la actividad.

Cefalópodos: clase de invertebrados marinos perteneciente al filo de los moluscos. Existen más de 800 especies actuales, comúnmente llamados pulpos, calamares y sepias.

Dosis: cantidad de sustancia administrada o absorbida por un individuo en proporción a su peso o volumen corporal, dentro de las 24 horas y condiciones determinadas. Se suele expresar en mg/Kg.

Detoxificación: la Real Academia Española no incluye en su diccionario el término detoxificación. Sin embargo, esta noción suele emplearse para aludir al proceso de neutralización y eliminación de una sustancia tóxica o perjudicial en un organismo.

Halófito: (*halos*= sal; *phyta*= planta de) término utilizado hace más de 200 años para definir a aquellas especies de vegetales que han hecho de los ecosistemas salinos su hábitat.

Liofilización: técnica de conservación de alimentos y materiales biológicos basado en el proceso de deshidratación de éstos. Consiste en congelar el producto y posteriormente remover el hielo por sublimación, aplicando calor en condiciones de vacío.

Metaloenzimas: término genérico para una proteína que contiene un ion metálico como cofactor. Las funciones de las metaloproteínas son muy variadas en las células, actuando como enzimas, proteínas de transporte y almacenamiento, y en la transducción de señales.

Necropsia: examen *post-mortem* de los órganos y tejidos corporales de un ejemplar para determinar la causa de la muerte o situaciones patológicas, y toma de muestras.

Pelágicas: especies de organismos que viven en aguas medias o cerca de la superficie, y que limitan al máximo su contacto con el fondo marino y la costa.

Resumen

Hoy en día, la ecotoxicología avanza en el estudio sobre la contaminación e interacción con la biota; su relevancia le permite al ser humano evaluar y conocer las acciones y los efectos de la contaminación sobre los seres vivos en nuestro planeta. Algunos organismos son apropiados bioindicadores, centinelas o monitores del estado de salud los ecosistemas. En el caso particular del ambiente marino, los cetáceos por su posición tope en las redes tróficas y su longevidad, se encuentran expuestos a la acumulación de metales pesados a través del alimento. De tal forma, estos organismos resultan apropiados bioindicadores de los ecosistemas marinos.

Para ampliar este tema

- Cáceres-Saez, I. (2014). Estudio de contenidos de metales pesados y otros elementos esenciales en ejemplares de tonina overa (*Cephalorhynchus c. commersonii*) de las costas de Tierra del Fuego. Universidad Nacional del Comahue, Centro Regional Universitario Bariloche, San Carlos de Bariloche. Tesis doctoral.
- Romero, M., Polizzi, P., Chiodi, L., Robles, A., Das, K., Gerpe, M. (2017). Metals as chemical tracers to discriminate ecological populations of threatened Franciscana dolphins (*Pontoporia blainvillei*) from Argentina. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 3940–3950.
- Newman, M. C. (2015). *Fundamentals of Ecotoxicology. The Science of Pollution. Fourth Edition* Boca Raton, USA: CRC Press.
- Panebianco, M.V. (2011). Análisis de los niveles de metales pesados (Pb, Cu, Cr, Zn, Ni y Cd) y aspectos reproductivos del delfín franciscana (*Pontoporia blainvillei*). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires. Tesis doctoral.
- Vos, J. G., Bossart, G. D., Fournier, M., O'Shea, T. (2003). *Toxicology of Marine Mammals*. London, UK: Taylor & Francis Group.