

Efectos ecotoxicológicos de metales pesados sobre mamíferos marinos: Revisión sistemática

Ecotoxicological effects of heavy metals on marine mammals: A systematic review

Recibido: octubre 30 de 2024 | Revisado: diciembre 12 de 2024 | Aceptado: abril 26 de 2025

JOYCE ALESSANDRA MALCA-VALDEZ¹
RODRIGO ALONSO VILLANO-VILCHEZ¹
DANIELA ABIGAIL RUMICHE-PAREDES¹
ISABEL GONZALEZ-CARO¹
SANDRA CAMPOS-RODRÍGUEZ¹
DANIELA CRISTINA VILCHEZ-AGUILAR¹
JOAQUIN ALFONSO GARRETA-DIEZ¹
JOSÉ IANNAcone^{1,2}

RESUMEN

La contaminación por metales pesados proviene de actividades mineras, agrícolas y domésticas, afectando especialmente a los recursos hídricos, ya que se ha registrado que entre el 75% y 96% de los mares están contaminados, exponiendo a los mamíferos marinos a efectos ecotoxicológicos en un 60%. Las bases de los datos utilizados para la búsqueda de información fueron Scopus, ScienceDirect, Springer, Researchgate y Journal Wildlife Diseases. Además, para la revisión sistemática se utilizó la metodología PRISMA y fueron analizados 60 artículos. Según los resultados, la mayoría de los estudios son pertenecientes de los Estados Unidos, siendo la familia Delphinidae la de mayor número. Además, se observa que en un 93% los estudios se centran en efectos crónicos, relacionada con bioacumulación en hígado y riñones. Existe una correlación positiva con el tiempo de exposición y diferencias en la concentración de acuerdo con la profundidad del buceo. Se ha evidenciado que altas concentraciones de arsénico pueden debilitar el sistema inmunológico, haciendo a los animales más susceptibles a enfermedades infecciosas y altas concentraciones de Cadmio pueden causar daño renal crónico. Por otro lado, el 7% restante corresponde a los efectos agudos, entre ellos se aprecia que las concentraciones elevadas de mercurio y cadmio se relacionan con daños significativos en orgánulos celulares y con el sistema inmunológico. Por consiguiente, la contaminación por metales pesados en mamíferos marinos constituye un problema significativo debido a su persistencia, capacidad de bioacumulación y biomagnificación. Estos animales, ubicados en la cima de la cadena trófica, enfrentan diversas vías de exposición, siendo la alimentación la más relevante.

Palabras clave: ecotoxicología, efectos tóxicos, mamíferos marinos, océanos, metales pesados

ABSTRACT

Heavy metal pollution originates from mining, agricultural, and domestic activities, significantly impacting water resources. It has been reported that between 75% and 96% of the world's seas are contaminated, exposing marine mammals to ecotoxicological effects, with about 60% affected. The data sources used for this research include

- 1 Universidad Científica del Sur. Panamericana Sur km 19, Villa El Salvador, Lima - Perú
- 2 Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima - Perú

Autor de correspondencia:
joseiannacone@gmail.com

© Los autores. Este artículo es publicado por la Revista Campus de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de San Martín de Porres. Este artículo se distribuye en los términos de la Licencia Creative Commons Atribución No-Comercial – Compartir-Igual 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite el uso no comercial, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea debidamente citada. Para uso comercial contactar a: revistacampus@usmp.pe.

<https://>

Scopus, ScienceDirect, Springer, ResearchGate, and the Journal of Wildlife Diseases. Additionally, the PRISMA methodology was employed for a systematic review, analyzing 60 articles. The results indicate that most studies are from the United States, with the Delphinidae family being the most frequently studied. Furthermore, 93% of the studies focus on chronic effects related to bioaccumulation in the liver and kidneys. There is a positive correlation between exposure time and concentration differences according to diving depth. High concentrations of arsenic have been shown to weaken the immune system, making animals more susceptible to infectious diseases, while high levels of cadmium can cause chronic kidney damage. The remaining 7% of studies address acute effects, revealing that elevated concentrations of mercury and cadmium are associated with significant damage to cellular organelles and the immune system. Consequently, heavy metal pollution in marine mammals constitutes a significant problem due to its persistence, bioaccumulation, and biomagnification. These animals, positioned at the top of the food chain, face various exposure pathways, with dietary intake being the most significant.

Keywords: ecotoxicology, heavy metals, marine mammals, oceans, toxic effects.

Introducción

Los metales pesados son elementos naturales que poseen un alto peso atómico y una densidad de al menos cinco veces mayor a la del agua (Ali & Khan, 2018; Tchounwou *et al.*, 2012). Pueden provenir tanto de fuentes naturales como antropogénicas, y algunos son vitales para el metabolismo de los seres vivos, como el zinc (Zn), cobre (Cu), hierro (Fe), entre otros (Verma & Dwivedi, 2013); sin embargo, algunos de estos son tóxicos y se consideran como antinutrientes, tal es el caso del plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg), entre otros (Mittra *et al.*, 2022). A nivel mundial, se han presentado diversos casos de contaminación por metales pesados debido a las actividades mineras, agrícolas y/o domésticas, afectando principalmente a los recursos hídricos. De acuerdo con Li *et al.* (2022), entre el 75% y 96% de los mares europeos presentan altos niveles de metales pesados, lo que ha puesto en peligro aproximadamente al 60% de

mamíferos marinos (Schaap *et al.*, 2023). Otro recurso afectado es el suelo, pues se estima que 20 millones de hectáreas de tierras agrícolas se han visto contaminadas por metales pesados, siendo China el país más afectado debido a sus intensas actividades mineras y agrícolas (Mi *et al.*, 2024).

El Cd y el Hg son metales pesados de gran preocupación para la salud debido a su alta toxicidad. Para evaluar su impacto, es crucial considerar varios factores como: la dosis, la forma de exposición, las especies químicas, la edad, el sexo, la composición genética y el estado nutricional de los individuos expuestos (Sable *et al.*, 2024). Estos metales presentan una vida media biológica prolongada, lo que permite su acumulación en cultivos agrícolas, animales e incluso humanos (Naija & Yalcin, 2023). Al ingresar en la cadena trófica, estos metales pueden experimentar biomagnificación, alcanzando concentraciones extremas en los depredadores como los mamíferos.

Además, su capacidad para interferir con la cadena de transporte de electrones conduce a la muerte celular. (López *et al.*, 2019). Los principales efectos observados en mamíferos se relacionan con la neurotoxicidad, la inmunotoxicidad, lesiones hepáticas y renales (Brown *et al.*, 2021).

La presencia de metales pesados en especies de mamíferos marinos se ha convertido con el tiempo en un tema crucial debido al impacto de la contaminación ambiental en la salud de los ecosistemas. En primer lugar, se encuentran los mamíferos marinos como los Cetáceos (delfines, cachalotes, marsopas) y los Pinnípedos (lobo marino, león de mar, focas), investigaciones como la de Page *et al.* (2024), Machovsky *et al.* (2020) y Cagnazzi *et al.* (2020), han demostrado que la bioacumulación de metales como el mercurio, plomo y cadmio en sus tejidos genera problemas reproductivos, neurológicos y mortales dependiendo de la concentración y el tiempo de exposición. Un ejemplo de ello es la familia Delphinidae perteneciente a los cetáceos, elegidos por pertenecer al último nivel de la cadena trófica, esto significa que se alimentan de especies nativas de un ecosistema y que el ser humano consume y comercializa, por lo que se considerándola, así como una muestra representativa de la acumulación de metales en el fondo marino (Hauser-Davis *et al.*, 2020).

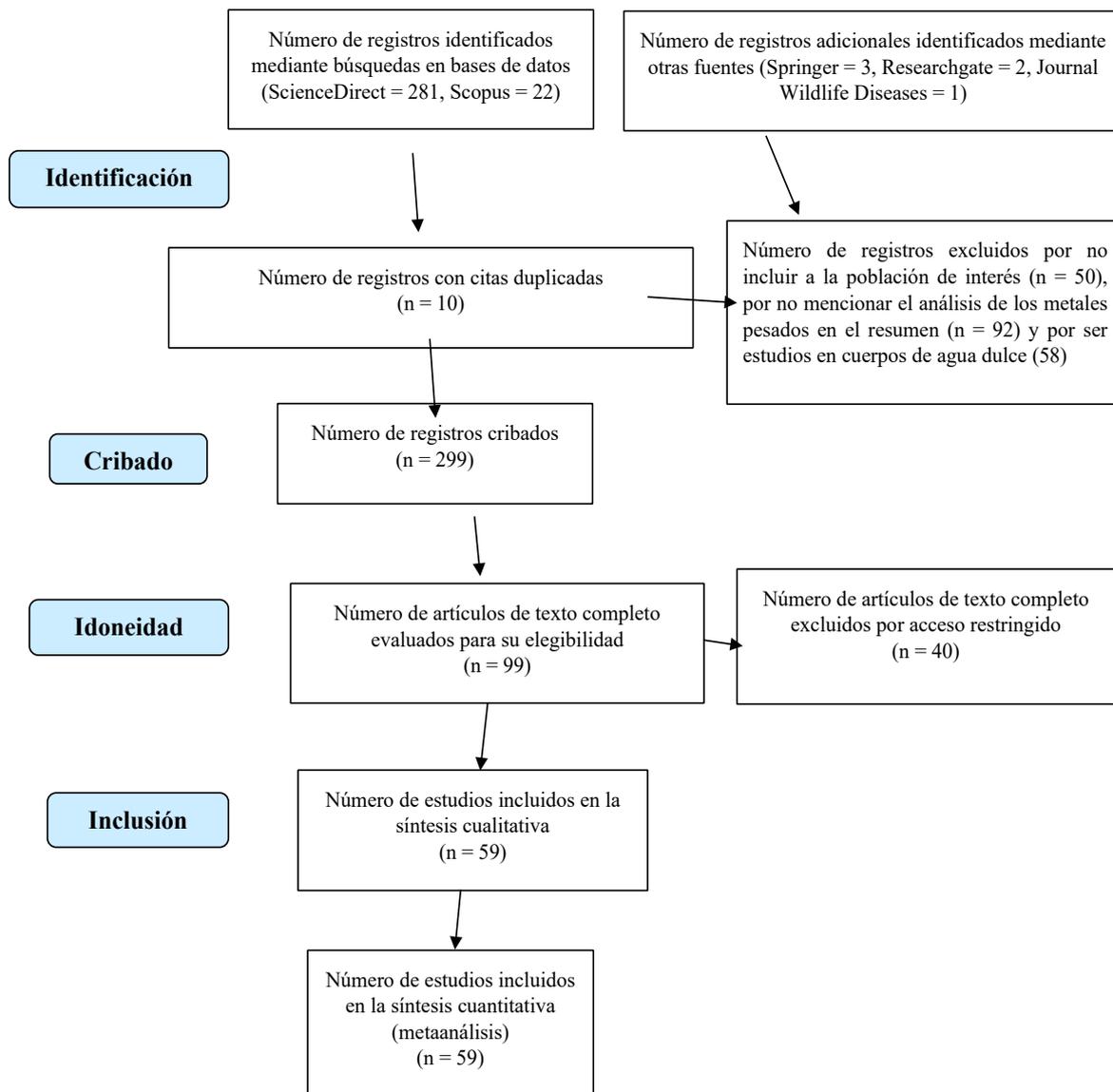
Por ello surge la importancia de evaluar y comprender el comportamiento de los metales pesados y su efecto en estas familias para prevenir y mitigar los riesgos

económicos, ecológicos y sociales a los que nos exponen estos contaminantes. El objetivo de esta investigación es describir los efectos de la exposición de metales pesados en mamíferos marinos.

Método

Se realizó una búsqueda detallada de publicaciones científicas en las bases de datos Scopus y ScienceDirect siguiendo los criterios PRISMA. Para ello, se empleó una ecuación de búsqueda, cuyas combinaciones fueron acompañadas con el conector booleano “AND”. Los términos utilizados fueron “toxic effects” AND “heavy metals” AND “marine mammals”. De acuerdo con ello, se obtuvieron 22 resultados en Scopus y 281 resultados en ScienceDirect, donde los criterios de inclusión fueron: (a) artículos originales, (b) artículos enfocados en nuestros objetivos (describir los efectos de la exposición de metales pesados en mamíferos marinos) y (c) en un período de publicación entre 1997 y 2024 (Figura 1). Por otro lado, los criterios de exclusión fueron: artículos con acceso restringido, artículos que no incluyan a nuestra población de interés (mamíferos marinos), artículos que no tengan análisis de metales pesados en el resumen y artículos con investigaciones en cuerpos de agua dulce. Por lo tanto, siguiendo los criterios de inclusión y exclusión, se incluyeron en la revisión un total de 59 estudios, siendo 44 de ScienceDirect, 9 de Scopus, 3 de Springer, 2 de Researchgate y 1 de Journal Wildlife Diseases. La base de datos completa se puede solicitar al autor corresponsal.

Figura 1
 Diagrama de flujo PRISMA



Resultados y Discusión

Artículos por país

Dentro de los 59 artículos evaluados, la mayoría de estos pertenece a los Estados Unidos, con un total de 12 artículos repartidos en los distintos estados de este país, tal y como Alaska, California, Georgia y Florida. Estas investigaciones basaron sus resultados en estudios hechos con delfines comunes (*Delphinus delphis*)

en su gran mayoría, al igual que con otros países. Otras especies usadas para los estudios con metales pesados fueron las nutrias marinas (*Enhydra lutris*) y las marsopas (*Phocoena phocoena*). Seguido de Estados Unidos, Francia fue el segundo país con más artículos encontrados (5), de los cuales tres hacen estudios con delfines, al igual que con Estados Unidos. En América del sur se encontraron tan solo 10 artículos, predominando Argentina (4), seguido de Chile (3) y Brasil (3).

En Perú no se encontraron este tipo de estudios en las revistas y bases de datos seleccionadas; sin embargo, sí se hallaron estudios similares en trabajos de tesis. Por tanto, se considera que se debe incentivar la publicación de estas investigaciones respecto al efecto de los metales pesados, principalmente de Hg y Cd, en mamíferos marinos de las aguas costeras del Perú, identificar sus efectos en la cadena trófica e implicancias en la salud de estos ecosistemas de importancia nacional.

Temporalidad de artículos

La cantidad de investigaciones publicadas acerca de los efectos tóxicos de metales en mamíferos marinos ha experimentado un crecimiento constante desde 1997. Para el desarrollo de este trabajo de investigación, se ha observado

que el año con el mayor número de publicaciones seleccionadas fue el 2023, con un total de ocho artículos publicados en ese año, donde se demuestra una mayor preocupación por esta problemática, seguido de siete artículos publicados en 2024 y cinco artículos publicados en 2005, mientras que en el resto de los años se publicaron entre uno y tres artículos (Figura 2). El aumento en las publicaciones se debe a mayor conciencia ambiental, avances tecnológicos, políticas más estrictas y el impacto del cambio climático y actividades humanas. Los picos en 2023 y 2024 reflejan un renovado interés y urgencia, posiblemente por eventos específicos o nuevos descubrimientos. En contraste, los años con menos publicaciones podrían deberse a cambios en prioridades de investigación o financiamiento

Figura 2

Número de artículos según el año de publicación para evaluar los efectos de la exposición de metales pesados en mamíferos marinos



Familias de mamíferos marinos estudiados

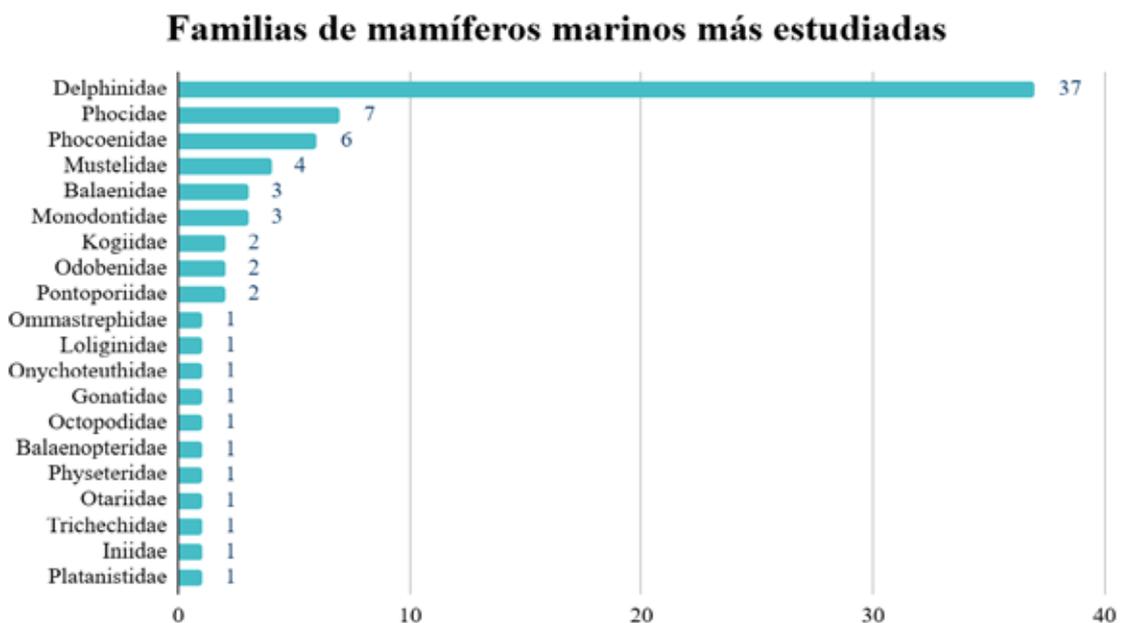
De acuerdo con los artículos publicados y estudios realizados en diversos países, la siguiente gráfica proporciona una representación visual y clara acerca de las familias de mamíferos marinos más estudiadas (Figura 3). La familia con mayor número de estudios es Delphinidae, con un total de 37 artículos, seguida de la familia Phocidae con siete artículos, Phocoenidae con seis artículos, Mustelidae con cuatro artículos, y Balaenidae y Monodontidae con tres artículos cada una. Las familias Kogiidae, Odobenidae y Pontoporiidae cuentan con dos artículos cada una. Por otro lado, las familias Ommastrephidae, Loliginidae, Onychoteuthidae, Gonatidae, Balaenopteridae, Physeteridae, Otariidae,

Trichechidae, Iniidae y Platanistidae tienen un artículo cada una.

Esta distribución destaca el enfoque en la familia Delphinidae, debido a su amplia distribución y susceptibilidad a la contaminación marina. Las familias Phocidae y Phocoenidae también reciben atención por preocupaciones sobre la salud de focas y marsopas en áreas contaminadas. Las familias menos estudiadas, con uno o dos artículos, indican áreas de investigación emergentes o menos accesibles, necesitando mayor exploración. Por lo cual, la variabilidad en el número de estudios sugiere diferencias en la disponibilidad de datos, el interés científico y el acceso a estas especies para investigación.

Figura 3

Familias de mamíferos marinos más utilizadas para evaluar los efectos de la exposición de metales pesados



Metales más estudiados por artículos

En la Figura 4 se presentan los metales más estudiados en los artículos ecotoxicológicos seleccionados sobre

mamíferos marinos. Los resultados indican que el Hg es el metal más investigado, con un total de 41 estudios, seguido por el Cd con 33 estudios y el Zn con 28 estudios. El Pb y el Cu también se destacan con

23 y 23 estudios respectivamente. Otros metales con una frecuencia significativa de estudios incluyen el Cr con 12 investigaciones, el níquel (Ni) con ocho estudios, y el Fe con cinco estudios. Tanto el manganeso (Mn) como el cobalto (Co) son objeto de cuatro estudios cada uno, mientras que el aluminio (Al) tiene 3 estudios. Metales menos investigados incluyen el vanadio (V) y la plata (Ag), cada uno con dos estudios, y finalmente el estaño (Sn) y el titanio (Ti), ambos con un solo estudio. Estos resultados subrayan una mayor preocupación y enfoque en la investigación sobre los efectos ecotoxicológicos del mercurio, el cadmio y el zinc en los mamíferos marinos, probablemente debido a su prevalencia y toxicidad en los ecosistemas marinos.

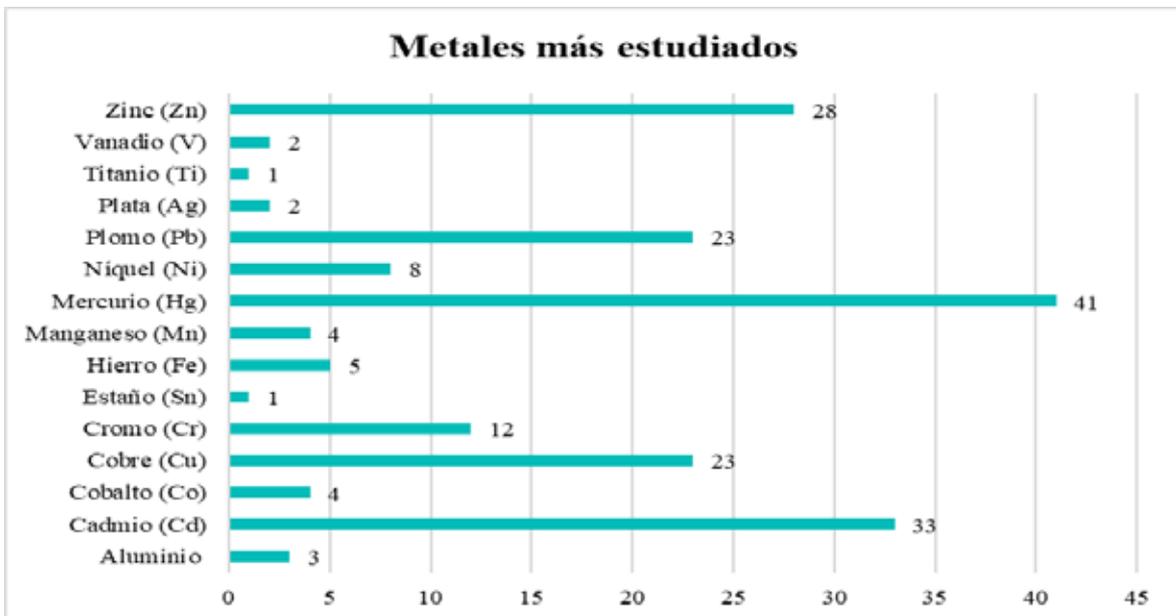
Esta prioridad puede estar justificada dado que el mercurio,

especialmente en su forma metilmercurio, es altamente tóxico y se bioacumula en la cadena alimentaria, afectando gravemente a los predadores superiores como los mamíferos marinos (Clarkson & Magos, 2006). Asimismo, el cadmio es conocido por su toxicidad renal y efectos negativos en el sistema reproductivo de los animales, lo cual podría explicar su alta frecuencia de estudio (Jarup, 2003).

El zinc, aunque esencial en pequeñas cantidades, puede ser tóxico a niveles elevados, afectando la función inmunológica y el desarrollo de los organismos marinos (Bury *et al.*, 2003). La notable diferencia en la cantidad de estudios dedicados a estos metales frente a otros menos investigados, como el vanadio (V) o el titanio (Ti), puede también reflejar diferencias en su prevalencia y toxicidad en los ambientes marinos.

Figura 4

Metales más utilizados en estudios ecotoxicológicos en mamíferos marinos



Efectos según el tipo de ensayo más usado por artículos

La gran mayoría de los estudios se

centra en efectos crónicos, representando el 97% de los ensayos. En contraste, solo el 3% de los estudios se enfoca en efectos agudos. Esta clara preferencia

por la investigación de efectos crónicos indica una preocupación predominante por las consecuencias a largo plazo de la exposición a contaminantes en los mamíferos marinos. La diferencia significativa entre el número de estudios crónicos y agudos sugiere que los investigadores consideran crucial entender cómo la exposición prolongada y a bajas dosis de contaminantes puede afectar la salud y la supervivencia de estos animales, en comparación con los efectos inmediatos y a corto plazo (López *et al.*, 2019).

Bioacumulación por metales pesados en mamíferos marinos

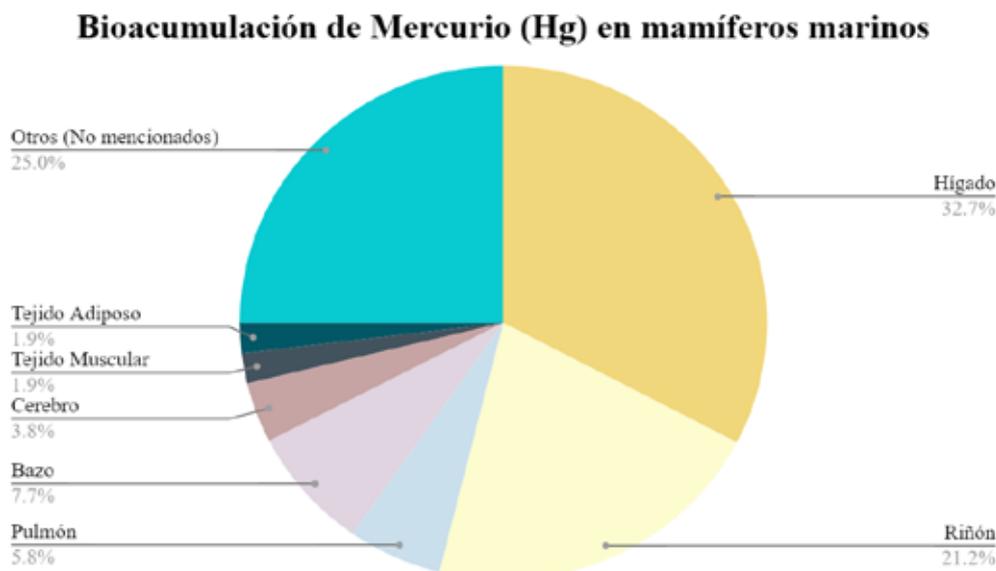
Se escogió al Hg y al Cd debido a la cantidad de información recolectada de cada uno de estos metales. Así mismo debido a que según la revisión bibliográfica son los dos contaminantes que se encuentran en mayor cantidad entre los mamíferos marinos, esto destaca la importancia de conocer cuál es la distribución de estos en cuanto a su bioacumulación.

Bioacumulación de Hg en mamíferos marinos

En la Figura 5, se observa que la bioacumulación del mercurio en el organismo de mamíferos se presenta de manera diferencial en distintos tejidos y órganos. Se han observado los siguientes porcentajes de acumulación en diferentes partes del organismo. Los órganos que presentan la mayor cantidad de bioacumulación son el hígado con un 32,7 %, los riñones con un 21,2%, el bazo con un 7,7% y el pulmón con 5,8%. Por otro lado, se observa en menor medida bioacumulación en el cerebro con 3,8 %, músculos y grasa corporal con 1,9%. Finalmente, existe un 25% de artículos que no mencionan de manera explícita si el mercurio se bioacumulaba o tendía a encontrarse en algún órgano en específico. Sin embargo, a partir de estos resultados se evidencia la tendencia del mercurio a acumularse principalmente en órganos vitales como el hígado, los riñones y el bazo.

Figura 5

Bioacumulación de mercurio (Hg) en el organismo de los mamíferos marinos.



Según la revisión bibliográfica, el hígado es el principal órgano de acumulación de mercurio en los mamíferos marinos, con concentraciones que son de diez a cien veces más altas que en el músculo. Esto se debe a la capacidad del hígado para desintoxicar el metilmercurio (MeHg) a través de la desmetilación, resultando en una acumulación continua de mercurio inorgánico (Hg inorgánico) (Liu *et al.*, 2023). Además, el papel del hígado en la desintoxicación y transformación del MeHg es crucial, ya que el mercurio puede ser excretado en la bilis, reabsorbido por el intestino o acumulado por los riñones para su posterior redistribución (Gosnell *et al.*, 2024). En segundo lugar, se encontraron los riñones, quienes también presentan una significativa bioacumulación de mercurio, almacenando una fracción considerable del metal y participando en las rutas de excreción (Stockin *et al.*, 2023). La alta capacidad de los riñones para acumular mercurio está bien documentada y es coherente con la alta afinidad del MeHg por los grupos sulfhidrilo presentes en las proteínas (Lozano-Bilbao *et al.*, 2021). Los grupos sulfhidrilo, también conocidos como grupos tiol, contienen un átomo de azufre unido a un átomo de hidrógeno (-SH) y son muy reactivos, formando enlaces fuertes con metales pesados como el mercurio.

Luego están el bazo y el pulmón, estos también muestran una notable acumulación de mercurio. Por un lado, la acumulación en el pulmón, la cual puede estar relacionada con la inhalación directa de mercurio desde la atmósfera a través de los alvéolos (Brand *et al.*, 2020), lo que podría explicar los valores relativamente altos encontrados en este órgano. Esta vía de exposición es especialmente relevante

para mamíferos marinos, que respiran aire y carecen de branquias excretoras como los peces. Por otro lado, en el bazo el mercurio se puede acumular debido a su afinidad por los glóbulos rojos y otros componentes sanguíneos que se procesan en dicho órgano (García-Cegarra *et al.*, 2024). Asimismo, este órgano actúa como un filtro de la sangre, removiendo células sanguíneas viejas o dañadas y atrapando partículas extrañas, incluyendo metales pesados como el mercurio (Pellissó *et al.*, 2008). Además de ello, el bazo contiene tejido linfático que puede atraer y retener mercurio, especialmente en forma de compuestos unidos a proteínas (Lahaye *et al.*, 2007).

En el caso del cerebro, este mostró una menor acumulación de mercurio comparado con otros órganos, lo que puede estar relacionado con la barrera hematoencefálica que limita la absorción de mercurio en el sistema nervioso central. Sin embargo, la hipófisis, una región no protegida por esta barrera, puede presentar mayores concentraciones de mercurio (Liu *et al.*, 2017). La acumulación de mercurio en la hipófisis es preocupante debido a sus funciones endocrinas y las propiedades de alteración endocrina del mercurio (Kamel *et al.*, 2014). En contraste, el músculo y la grasa corporal mostraron las concentraciones más bajas de mercurio. La mioglobina en los músculos tiene una alta afinidad por los grupos sulfhidrilo, lo que puede llevar a una acumulación de MeHg en este tejido, aunque en menor medida que en el hígado y los riñones (Wise *et al.*, 2019).

Bioacumulación de cadmio (Cd) en mamíferos marinos

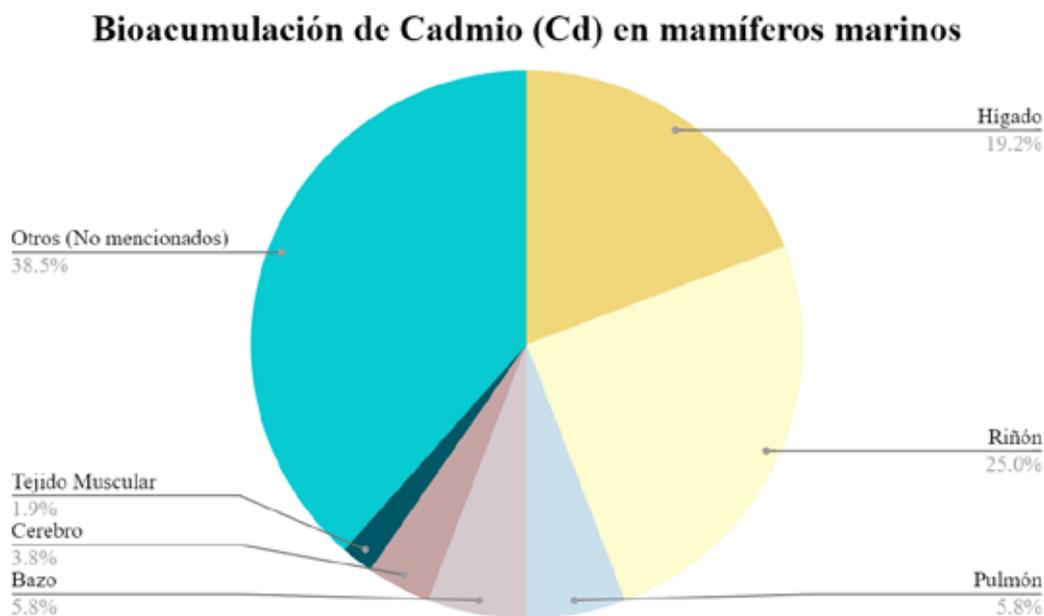
En la Figura 6, se observa que la bioacumulación del Cd en el organismo

de mamíferos se presenta de manera diferencial en distintos tejidos y órganos. Se han observado los siguientes porcentajes de acumulación en diferentes partes del organismo. Los órganos que presentan la mayor cantidad de bioacumulación son los riñones con un 25 % y el hígado con un 19,2 %. Por otro lado, se observa en menor medida bioacumulación en el pulmón con 5,8 %, el bazo con 5,8 %,

cerebro con 3,8 % y músculos con 1,9 %. Finalmente, existe un 38,5 % de artículos que no mencionan de manera explícita si el cadmio se bioacumulaba o tendía a encontrarse en algún órgano en específico. Sin embargo, a partir de estos resultados se evidencia la tendencia del cadmio a acumularse principalmente en órganos vitales como los riñones y el hígado.

Figura 6

Bioacumulación de cadmio (Cd) en el organismo de los mamíferos marinos.



En el caso de los resultados para cadmio, fueron similares a los del mercurio. Los riñones son los principales órganos de acumulación de este metal pesado, debido a la capacidad del cadmio para desplazar y sustituir al zinc en la metalotioneína (MT), lo que induce su acumulación (Gajdosechova *et al.*, 2016). La metalotioneína es una proteína de bajo peso molecular rica en cisteína que se une a metales pesados, ayudando en la desintoxicación y almacenamiento de estos metales dentro del organismo. La alta afinidad del cadmio por los

riñones es un factor determinante en su bioacumulación. En las nutrias marinas, el cadmio a resultado presente en altas concentraciones en los tejidos del riñón, seguido por el hígado y biomagnificado en ambos órganos (Brown *et al.*, 2021). Además, las concentraciones de cadmio en ambos órganos han demostrado aumentar con la longitud corporal de la nutria marina. Por tanto, se han encontrado concentraciones más bajas en las nutrias marinas más jóvenes y más altas en las nutrias marinas de 5 años o más (Brown *et al.*, 2021). Este incremento del Cd

con el aumento de la edad en mamíferos marinos se ha encontrado también en focas (*Phoca vitulina*) (Miles *et al.*, 1992), lobos marinos del norte (*Callorhinus ursinus* Romero, 2016) y morsas del Pacífico (*Odobenus rosmarus divergens*) (Warburton & Seagars, 1993).

Por otro lado, el pulmón y el bazo presentan menores niveles de acumulación de cadmio (5,8% cada uno), lo que puede estar relacionado con la menor capacidad de estos órganos para acumular metales pesados en comparación con los riñones y el hígado (Nyman *et al.*, 2002). Seguido de ello, se encuentran el cerebro y los músculos, que mostraron las concentraciones más bajas de cadmio (3,8% y 1,9%, respectivamente). La baja bioacumulación en el músculo se alinea con estudios previos que han encontrado que los músculos, siendo tejidos metabólicamente de menor actividad, tienden a acumular menos cadmio (Lahaye *et al.*, 2007).

Finalmente, las fuentes dietéticas juegan un papel crucial en la bioacumulación de mercurio y cadmio en mamíferos marinos. Los calamares y otros cefalópodos, que son parte importante de la dieta de mamíferos marinos como

Stenella coeruleoalba (delfín listado) y *Tursiops truncatus* (delfín nariz de botella), son conocidos por ser vectores significativos de cadmio (Wang & Pfeiffer, 2001). Además, los invertebrados como crustáceos y cefalópodos también contribuyen a la carga de cadmio debido a su alta concentración en ambientes salinos.

Familias y especies utilizadas en estudios ecotoxicológicos

De las 14 familias de mamíferos marinos utilizados en los diferentes estudios recopilados, se han registrado, 25 géneros, 44 especies y 87 estudios realizados donde se analizaron dichas especies. Las familias con mayor riqueza y diversidad de especies fueron Delphinidae y Phocidae con 20 y cinco especies respectivamente, donde los géneros más estudiados fueron *Tursiops* (12) y *Delphinus* (10) ambas, pertenecientes a la familia Delphinidae. En total la familia Delphinidae presentó alrededor del 52,87% de estudios utilizados en 46 experiencias y la familia Phocidae el 12,64% en 12 estudios realizados. La Tabla 1 muestra el detalle de esta información.

Tabla 1

Número de experiencias registradas por familia de mamíferos marinos para evaluar los efectos de la exposición de metales pesados

Familia	Género	Número de especies registradas	Número de estudios hallados	Porcentaje de estudios registrados
Balaenidae	<i>Balaena mysticetus</i>	1	3	3,45
	Subtotal	1	3	3,45
Balaenopteridae	<i>Balaenoptera</i>	2	2	2,30
	<i>Megaptera</i>	1	1	1,15
	Subtotal	3	3	3,45
Delphinidae	<i>Orcaella</i>	1	1	1,15
	<i>Cephalorhynchus</i>	1	1	1,15
	<i>Delphinus</i>	2	10	11,49
	<i>Globicephala</i>	2	3	3,45
	<i>Grampus</i>	1	2	2,30
	<i>Lagenorhynchus</i>	2	2	2,30
	<i>Peponocephala</i>	1	1	1,15
	<i>Pseudorca</i>	1	1	1,15
	<i>Sotalia</i>	1	2	2,30
	<i>Sousa</i>	3	4	4,60
	<i>Stenella</i>	3	7	8,05
	<i>Tursiops</i>	2	12	13,79
	Subtotal	20	46	52,87
Iniidae	<i>Pontoporia</i>	1	1	1,15
	Subtotal	1	1	1,15
Kogiidae	<i>Kogia</i>	2	3	3,45
	Subtotal	2	3	3,45
Monodontidae	<i>Delphinapterus</i>	1	3	3,45
	<i>Monodon</i>	1	1	1,15
	Subtotal	2	4	4,60
Mustelidae	<i>Enhydra</i>	1	2	2,30
	Subtotal	1	2	2,30
Odobenidae	<i>Odobenus</i>	1	2	2,30
	Subtotal	1	2	2,30
Otariidae	<i>Neophoca</i>	1	1	1,15
	Subtotal	1	1	1,15
Phocidae	<i>Cystophora</i>	1	1	1,15
	<i>Halichoerus</i>	1	2	2,30
	<i>Pagophilus</i>	1	1	1,15
	<i>Phoca</i>	1	3	3,45
	<i>Pusa</i>	1	4	4,60
	Subtotal	5	11	12,64

	<i>Neophocaena</i>	2	2	2,30
Phocoenidae	<i>Phocoena</i>	2	4	4,60
	Subtotal	4	6	6,90
Physeteridae	<i>Physeter</i>	1	2	2,30
	Subtotal	1	2	2,30
Platanistidae	<i>Platanista</i>	1	1	1,15
	Subtotal	1	1	1,15
Pontoporiidae	<i>Pontoporia</i>	1	2	2,30
	Subtotal	1	2	2,30
Total		44	87	100

Predominancia de las familias Delphinidae y Phocidae en Estudios de mamíferos marinos

Los mamíferos marinos son buenos indicadores de los cambios a medio y largo plazo en el medio ambiente porque tienen una vida relativamente larga, ya que se encuentran en el vértice de la cadena alimentaria y porque poseen importantes reservas de tejido adiposo (grasa). Ante ello, muchas sustancias inertes y lipofílicas pueden depositarse en la grasa, otras sustancias pueden metabolizarse principalmente en períodos de estrés fisiológico como en el embarazo y la lactancia, las temperaturas extremas y en los casos de inanición. Los delfines en particular pueden representar también ejemplos de diversas patologías que pueden afectar a otros mamíferos marinos, más difícilmente contactables por sus características de especie (es decir, animales de grandes dimensiones) o por sus aguas profundas del mar abierto o su rareza específica. Gran cantidad de agentes contaminantes, unidos a disrupciones endocrinas ya han sido encontrados en Cetáceos (Naso *et al.*, 2003).

La mayoría de las especies estudiadas son las que se encuentran en las proximidades de las costas, con

la excepción del cachalote (*Physeter macrocephalus*), representante de la vida en el mar abierto y profundo. Sin embargo, muchos de los datos proceden de animales varados. Todavía no se sabe con certeza si la etiología de estas alteraciones endocrinas y reproductivas se debe efectivamente a los agentes contaminantes marinos (Naso *et al.*, 2003).

Por otro lado, como depredadores superiores, las focas son susceptibles a las sustancias químicas persistentes que se bioacumulan progresivamente en cada nivel trófico. Por ejemplo, la foca ocelada del Báltico, *Phoca hispida botnica*, es una subespecie aislada de la foca ocelada del Ártico, *Phoca hispida*. La población de foca anillada del Báltico ha sufrido fallos reproductivos desde finales de los años 60 (Houde *et al.*, 2017). Además de oclusiones uterinas, se han descrito úlceras intestinales, arteriosclerosis, hiperplasia corticosuprarrenal, glomerulopatía, lesiones cutáneas y deformaciones de las garras (Routti *et al.*, 2016). Los cambios observados se han relacionado con contaminantes ambientales, principalmente hidrocarburos clorados, aunque otros contaminantes también pueden ser factores de riesgo potenciales. Estos efectos crónicos evaluados las hace excelentes especies para determinar

contaminación en las cadenas tróficas y ecosistemas marinos.

Predominancia de los géneros *Tursiops*, *Delphinus* y *Stenella* en estudios de mamíferos marinos.

Tursiops

Como un cetáceo ampliamente distribuido que exhibe fidelidad al sitio en ambientes costeros cercanos, junto con una historia de vida bien caracterizada y una capacidad para bioacumular metales, los delfines nariz de botella pueden servir como una especie de campana meteorológica indicadora de cambios en el ambiente (Luo *et al.*, 2016).

Delphinus

Los delfines comunes de pico largo (*Delphinus capensis*) habitan principalmente las aguas costeras de los océanos tropicales y templados cálidos (Monteiro, 2016). Su área de distribución incluye partes de África occidental y meridional, gran parte del oeste del oeste de Sudamérica, el sur de California hasta las costas de Perú y zonas alrededor de Japón, Taiwán y Corea. El delfín común de pico largo tiene una dieta variada, que consiste en muchas especies de peces y calamares que viven a profundidades de menos de 200 metros (Gui, 2016). La población de delfines comunes (*Delphinus delphis*) se enfrenta a numerosas amenazas antropogénicas y medioambientales. Como depredador superior, la especie es susceptible a la bioacumulación y biomagnificación de contaminantes debido a su posición trófica y su prolongada vida útil de al menos 30 años (aunque la mayoría de los individuos no sobreviven más allá de los 20 años

de edad) (Gosnell *et al.*, 2024) y, por tanto, se ha empleado como principal especie en el Atlántico nororiental para el seguimiento de oligoelementos (Carvalho *et al.*, 2013; Monteiro *et al.*, 2016).

Stenella

El delfín rayado está clasificado mundialmente como de “Preocupación menor” por la UICN (Briceño *et al.*, 2020). Sin embargo, muchas de sus poblaciones han sido señaladas como “vulnerables”, como es el caso de las poblaciones del mediterráneo (Aguilar, 2000) donde conforman el 60% de los varamientos en este mar. En este sentido, la investigación con estos animales marinos varados puede aportar información sustancial sobre la salud y la ecología de estas especies fascinantes, pero a menudo poco conocidas, a la vez que ayudan a problemas de conservación a los que pueden enfrentarse (Perrin *et al.*, 2001). La acumulación a largo plazo de datos de varamientos facilita la investigación de tendencias y patrones espaciotemporales en el número de varamientos y la mortalidad. Los exámenes post mortem proporcionan además una visión única de parámetros más amplios como la edad, el sexo, el estado corporal, la causa de la muerte, los niveles de patrones reproductivos, dieta, carga de enfermedades y patología de la población varada (Chan *et al.*, 2017).

Efectos crónicos o agudos causados por metales pesados

Los estudios se enfocan en los efectos crónico y agudos, así como los impactos en la salud y el desarrollo de estas especies. Se evalúan varios metales como fuente de contaminación como el Zn, Pb,

Cu, Cd, Cr, As, selenio (Se), Fe, Hg, entre otros, estos metales pueden acumularse en los tejidos de los organismos vivos y causar efectos adversos crónicos, especialmente en mamíferos marinos como delfines, ballenas y focas. Los resultados mostraron que los artículos que evalúan efectos crónicos son predominantes, con 57 estudios, en comparación con solo dos

estudios que se centraron en los efectos agudos. De igual manera en la Tabla 2 se identificó que de todas las familias estudiadas los dos estudios con efectos agudos fueron de la familia Delphinidae, en cuanto a la cantidad de estudios que consideraron otras familias se encontró un total de 23 artículos.

Tabla 2

Cantidad de estudios que tienen como resultados efectos crónicos y agudos de acuerdo con las familias de mamíferos acuáticos.

Familias	Crónicos	Agudos
Delphinidae	34	2
Phocidae, Phocoenidae, Balaenidae, Monodontidae, Mustelidae, Kogiidae, Odobenidae, Pontoporiidae, Ommastrephidae, Loliginidae, Onychoteuthidae, Gonatidae, Octopodidae, Balaenopteridae, Physeteridae, Otariidae, Trichechidae, Iniidae y Platanistidae	23	-
Total	57	2

Los efectos crónicos son relacionados a efectos adversos luego de una exposición a largo plazo a niveles bajos de uno o más tóxicos, y estos efectos pueden ser letales o subletales (Carriquiriborde, 2021). Según los resultados obtenidos en las investigaciones, se mantuvo una correlación con el largo tiempo de exposición. Para la familia Delphinidae, Lozano-Bilbao *et al.* (2021) se menciona que los animales que bucean a gran profundidad difieren en sus concentraciones de Cr, Cu, Mg, Mn, Mo y Zn respecto a los que bucean a poca profundidad en músculo, esto demuestra que los delfines que interactúan más en superficie y donde se encuentran más contaminantes presentan altas concentraciones de metales. De igual manera en otro estudio se menciona que las concentraciones de Hg y Se en riñón e hígado mostraron una correlación significativa con la edad ($p < 0,0001$) (Stockin *et al.*, 2023), explicando que mientras más edad y tiempo de exposición

tenga la especie más concentración de metales están presentes en el cuerpo. Por otro lado, la acumulación de metales podría conducir a una condición de estrés en los delfines dañando sus defensas inmunológicas, haciendo que los cetáceos estén más expuestos a infecciones (Cardellicchio *et al.*, 2000), así mismo en la familia Phocoenidae también se ven resultados con respecto a efectos por concentración de metales.

En el estudio de Bennett *et al.* (2001), analizaron las autopsias de 86 marsopas comunes encontradas muertas en la costa, observando que las fallecidas por enfermedades infecciosas presentaban concentraciones más altas de mercurio (Hg), selenio (Se) y una mayor relación molar Hg: Se y zinc (Zn) en comparación con las muertas por traumatismos físicos. La redistribución de Zn asociada a la respuesta infecciosa sugiere que la exposición crónica al Hg pudo aumentar la susceptibilidad de las

maresopas a enfermedades infecciosas. Se ha evidenciado que altas concentraciones de arsénico pueden debilitar el sistema inmunológico, haciendo a los animales más susceptibles a enfermedades infecciosas (Stuart & Jepson, 2017), así concentraciones de Cadmio pueden causar daño renal crónico, mientras que el plomo puede afectar la función hepática, impidiendo la desintoxicación adecuada del organismo, junto con reducción de la fertilidad, abortos espontáneos y malformaciones en crías (Das *et al.*, 2023).

El mercurio puede causar daños en el sistema nervioso central, provocando cambios de comportamiento, coordinación motora deficiente y disminución de la capacidad cognitiva (O'Shea, 1999). Por último, los efectos crónicos de los metales pesados en mamíferos marinos preocupan por la bioacumulación y biomagnificación en el ecosistema marino. La investigación ecotoxicológica es crucial para identificar y mitigar estos efectos, protegiendo así la salud de los mamíferos marinos y preservando la biodiversidad de los océanos. Según Cáceres-Saez *et al.* (2013) mencionan que los resultados de su investigación sugieren que los delfines de Commerson son buenos bioindicadores de la calidad ambiental del océano Atlántico sudoccidental.

En relación con los efectos agudos, se entiende que ocurren por una exposición corta. Por ejemplo, en peces u otros organismos acuáticos, se consideran efectos agudos a los que ocurren entre unas horas y días luego de la exposición, y suelen ser bastante severos (Carriquiriborde, 2023). Para el caso del mercurio sobre las células renales, se destaca que la

exposición a corto plazo a este metal pesado induce daño significativo en los orgánulos celulares. Existe una marcada hinchazón mitocondrial, alteraciones en el retículo endoplasmático y vacuolización de nucleolos. Estos cambios morfológicos son indicativos de oncosis y necrosis, procesos que sugieren una respuesta celular inmediata y severa ante la toxicidad del mercurio (Wang & Pfeiffer, 2001). La presencia de mercurio altera la cadena de transporte de electrones, induce el agotamiento de la glutación, genera estrés oxidativo y aumenta los niveles de especies reactivas de oxígeno (Seydi & Pourahmad, 2022). Por otro lado, la inflamación del retículo endoplasmático se relaciona con la inducción del estrés oxidativo en las células, que se refleja en mayor producción de radicales libres, lo cual promueve el daño tisular (Wang *et al.*, 2024), así como representa una acción indirecta sobre el ADN (Lins *et al.*, 2021). Además, esta investigación reveló los impactos del mercurio en el sistema inmunológico de los cetáceos. Se observó que la apoptosis es el proceso por el cual las células mueren después de la exposición al cadmio y al mercurio. La fagocitosis disminuyó con concentraciones de 5 mg/L de mercurio, 50 mg/L de aluminio y 10 mg/L de cadmio. También se registró una reducción significativa en la respuesta linfoproliferativa con exposiciones a 1 mg/L de mercurio, 10 mg/L de cadmio y 50 mg/L de plomo (Pellissó *et al.*, 2008).

Estos resultados se respaldan con los estudios de Delgado-Suarez *et al.* (2023), ya que se ha demostrado que sustancias como el HgCl y el MeHg inhiben las funciones de los linfocitos, tanto en la proliferación, en la expresión de marcadores de activación de superficie celular y la producción de citoquinas. Se

debe a que en los mamíferos marinos el MeHg genera una alteración en la síntesis in vitro de la hormona esteroides, la cual tiene la función de modular las respuestas anti-inflamatorias e inmunes. Además, existe una relación inversa significativa entre las concentraciones de Hg en la sangre y los marcadores de función endocrina, en el número de linfocitos, eosinófilos y plaquetas, esto asociado a que una exposición continua de este metal en el cerebro termina dañando a eje hipotalámico-pituitario cuya función es la regulación de la actividad tiroidea.

En conjunto, estos estudios subrayan la vulnerabilidad de los mamíferos acuáticos a la contaminación ambiental y resaltan la importancia de comprender los efectos a largo plazo y corto plazo de exposición a diferentes contaminantes para diseñar estrategias efectivas de conservación y gestión ambiental.

Conclusiones

La contaminación por metales pesados en mamíferos marinos es un problema alarmante, debido a que son la mayor amenaza toxicológica por su persistencia, bioacumulación y biomagnificación. En este estudio, se ha identificado que la familia marina más estudiada es Delphinidae, donde los metales con mayores efectos ecotoxicológicos son el mercurio, cadmio y zinc. Además, existen más estudios con

investigación de los efectos crónicos, que revela la preocupación destacada por comprender las repercusiones a largo plazo de la contaminación en estos animales marinos. La bioacumulación de mercurio en mamíferos marinos tiene una tendencia a acumularse en órganos vitales como hígado > riñón > bazo, respectivamente. El hígado se destaca como el principal sitio de acumulación para el mercurio, atribuido a su capacidad para desintoxicar y convertir el metilmercurio en formas inorgánicas. La acumulación puede afectar mucho a los mamíferos marinos, ya que el mercurio inorgánico se puede redistribuir y causar daños en sistemas orgánicos. Además, se destaca la influencia del mercurio en el sistema inmunológico de los cetáceos, afectando procesos como la apoptosis y la respuesta linfoproliferativa. La inhibición de funciones celulares esenciales, como la proliferación de linfocitos y la producción de citoquinas, resalta la vulnerabilidad de estos mamíferos marinos a la exposición continua a metales pesados como el mercurio. Se observa una relación adversa entre las concentraciones de mercurio en la sangre y la función endocrina, sugiriendo efectos perjudiciales en el eje hipotalámico-pituitario y la regulación hormonal. Finalmente, estos resultados subrayan la necesidad urgente de investigar más sobre los efectos agudos y crónicos del mercurio en mamíferos marinos, así como implementar estrategias efectivas de monitoreo y gestión para proteger la salud de estos animales en sus hábitats marinos.

Referencias

- Aguilar, A. (2000). Population biology, conservation threats and status of Mediterranean striped dolphins (*Stenella coeruleoalba*). *J. Cetacean Res. Manage.*, 2(1), 17-26. <https://doi.org/10.47536/jcrm.v2i1.485>
- Bennett, P. M., Jepson, P. D., Law, R. J., Jones, B. R., Kuiken, T., Baker, J. R., ... & Kirkwood, J. K. (2001). Exposure to heavy metals and infectious disease mortality in harbour porpoises from England and Wales. *Environmental pollution*, 112(1), 33-40. doi:10.1016/s0269-7491(00)00105-6
- Brand, A. F., Hynes, J., Walker, L. A., Pereira, M. G., Lawlor, A. J., Williams, R. J., ... & Chadwick, E. A. (2020). Biological and anthropogenic predictors of metal concentration in the Eurasian otter, a sentinel of freshwater ecosystems. *Environmental Pollution*, 266, 115280. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115280>
- Briceño, Y. A., Ramírez, S., Bolaños-Jimenez, J., Sánchez, L., Bermúdez-Villapol, L., González, M., ... & Pirela, D. (2020). A live-stranding of a Clymene dolphin (*Stenella clymene*, Gray, 1850) in the Gulf of Venezuela: first record for the southern Caribbean. *Latin American Journal of Aquatic Mammals*, 15(1), 33-36. DOI: <https://doi.org/10.5597.00260>
- Brown, K. L., Atkinson, S., Furin, C. G., Mueter, F. J., & Gerlach, R. (2021). Metals in the stomach contents and brain, gonad, kidney, and liver tissues of subsistence-harvested northern sea otters (*Enhydra lutris kenyoni*) from Icy Strait, Alaska. *Marine Pollution Bulletin*, 166, 112183. doi: 10.1016/j.marpolbul.2021.112183
- Cáceres-Saez, I., Haro, D., Blank, O., Lobo, A. A., Dougnac, C., Arredondo, C., ... & Guevara, S. R. (2018). High status of mercury and selenium in false killer whales (*Pseudorca crassidens*, Owen 1846) stranded on Southern South America: A possible toxicological concern?. *Chemosphere*, 199, 637-646. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.046>
- Cardellicchio, N., Giandomenico, S., Ragone, P., & Di Leo, A. (2000). Tissue distribution of metals in striped dolphins (*Stenella coeruleoalba*) from the Apulian coasts, Southern Italy. *Marine Environmental Research*, 49(1), 55-66. doi:10.1016/s0141-1136(99)00048-3
- Carriquiriborde, P., Fernandino, J. I., López, C. G., de San Benito, E., Gutierrez-Villagomez, J. M., Cristos, D., ... & Somoza, G. M. (2023). Atrazine alters early sexual development of the South American silverside, *Odontesthes bonariensis*. *Aquatic*

- Toxicology*, 254, 106366. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106366>
- Das, S., Kar, I., & Patra, A. K. (2023). Cadmium induced bioaccumulation, histopathology, gene regulation in fish and its amelioration—A review. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 79, 127202. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2023.127202>
- Delgado-Suarez, I., Lozano-Bilbao, E., Hardisson, A., Paz, S., & Gutiérrez, Á. J. (2023). Metal and trace element concentrations in cetaceans worldwide: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 192, 115010. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115010>
- Gajdosechova, Z., Brownlow, A., Cottin, N. T., Fernandes, M., Read, F. L., Urgast, D. S., ... & Krupp, E. M. (2016). Possible link between Hg and Cd accumulation in the brain of long-finned pilot whales (*Globicephala melas*). *Science of the total environment*, 545, 407-413 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.082>.
- García-Cegarra, A. M., Hall, A., & Martínez-López, E. (2024). Bycatch and pollution are the main threats for Burmeister's porpoises inhabiting a high-industrialized bay in the Humboldt Current System. *Environmental Research*, 251, 118621. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118621>
- Gosnell, O., McHugh, B., Minto, C., McGovern, E., Rogan, E., Caurant, F., Pierce, G. J., Das, K., O'Donovan, J., Aylis Emerit, & Murphy, S. (2024). Trace element concentrations in common dolphins (*Delphinus delphis*) in the Celtic Seas ecoregion: Interelement relationships and effects of life history and health status. *Environment International*, 108826–108826. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108826>
- Gui, D., Karczmarski, L., Yu, R. Q., Plön, S., Chen, L., Tu, Q., ... & Wu, Y. (2016). Profiling and spatial variation analysis of persistent organic pollutants in South African delphinids. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 4008-4017. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06009>
- Hauser-Davis, R. A., Figueiredo, L., Lemos, L., de Moura, J. F., Rocha, R. C., Saint'Pierre, T., ... & Siciliano, S. (2020). Subcellular cadmium, lead and mercury compartmentalization in guiana dolphins (*Sotalia guianensis*) From Southeastern Brazil. *Frontiers in Marine Science*, 7, 584195. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.584195>
- Houde, M., Wang, X., Ferguson, S. H., Gagnon, P., Brown, T. M., Tanabe, S., ... & Muir, D. C. G. (2017). Spatial and temporal trends of alternative flame retardants and polybrominated diphenyl ethers in ringed seals (*Phoca hispida*) across the Canadian Arctic.

- Environmental Pollution*, 223, 266-276. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.023>
- Kamel, L. D., Yahia, B., Mohammed, B., & Zitouni, B. (2014). Heavy metals in soft tissues of short-beaked common dolphins (*Delphinus delphis*) stranded along the Algerian west coast. *Open Journal of Marine Science*, 2014. DOI:10.4236/ojms.2014.42012
- Lahaye, V., Bustamante, P., Dabin, W., Churlaud, C., & Caurant, F. (2007). Trace element levels in foetus–mother pairs of short-beaked common dolphins (*Delphinus delphis*) stranded along the French coasts. *Environment International*, 33(8), 1021-1028. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.05.008>
- Lins, B. B., Casare, F. A. M., Fontenele, F. F., Gonçalves, G. L., & Oliveira-Souza, M. (2021). Long-term angiotensin II infusion induces oxidative and endoplasmic reticulum stress and modulates Na⁺ transporters through the nephron. *Frontiers in Physiology*, 12, 642752. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.642752>
- Liu, J., Chen, B., Jefferson, T. A., Wang, H., & Yang, G. (2017). Trace element concentrations, risks and their correlation with metallothionein genes polymorphism: A case study of narrow-ridged finless porpoises (*Neophocaena asiaeorientalis*) in the East China Sea. *Science of the total environment*, 575, 628-638.
- López-Berenguer, G., Peñalver, J., & Martínez-López, E. (2019). A critical review about neurotoxic effects in marine mammals of mercury and other trace elements. *Chemosphere*, 246, 125688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125688>
- Lozano-Bilbao, E., Jesús Alcázar-Treviño, Alduán, M., Lozano, G., Hardisson, A., Rubio, C., Dailos González-Weller, Paz, S., Carrillo, M., & Gutiérrez, Á. J. (2021). Metal content in stranded pelagic vs deep-diving cetaceans in the Canary Islands. *Chemosphere*, 285, 131441–131441. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131441>
- Luo, H. Y., Chen, H. Y., Chen, H. G., & Shih, H. H. (2016). Scavenging hagfish as a transport host of Anisakid nematodes. *Veterinary Parasitology*, 218, 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2016.01.005>
- Machovsky, G. E., Von, G., Romero, M. A., Rodríguez, D. H. y Gerpe, M. S. (2020). Linking cadmium and mercury accumulation to nutritional intake in common dolphins (*Delphinus delphis*) from Patagonia, Argentina. *Environmental pollution*, 263, 114480. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114480>
- Mi, B., Xiao, W., Tu, N., & Wu, F. (2024). Selection of pollution-safe head cabbage: Interaction of

- multiple heavy metals in soil on bioaccumulation and transfer. *Food Chemistry*, 452, 139615–139615. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139615>
- Miles, A.K., Calkins, D.G., Coon, N.C., 1992. Toxic elements and organochlorines in harbor seals (*Phoca vitulina richardsi*), Kodiak, Alaska, USA. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 48, 727–732. DOI: 10.1007/BF00195994
- Monteiro, S. S., Torres, J., Ferreira, M., Marçalo, A., Nicolau, L., Vingada, J. V., & Eira, C. (2016). Ecological variables influencing trace element concentrations in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*, Montagu 1821) stranded in continental Portugal. *Science of the total environment*, 544, 837–844. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.037>
- Naija, A. y Yalcin, H. C. (2023). Evaluation of cadmium and mercury on cardiovascular and neurological systems: Effects on humans and fish. *Toxicology Reports*, 10, 498–508. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2023.04.009>
- Nyman, M., Koistinen, J., Fant, M. L., Vartiainen, T., & Helle, E. (2002). Current levels of DDT, PCB and trace elements in the Baltic ringed seals (*Phoca hispida baltica*) and grey seals (*Halichoerus grypus*). *Environmental Pollution*, 119(3), 399–412. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00339-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00339-6)
- O’Shea, T. J. (1999). Environmental contaminants and marine mammals. In J. E. Reynolds Y S.A. Rommel (Eds.), *Biology of Marine Mammals*. Smithsonian Institution Press. <https://doi.org/10.2326/jjo.55.88>
- Page, A., Hay, C., Marks, W., Bennett, B., Gribble, M. O., Noke Durden, W., Stolen, M., Jablonski, T., Gordon, N., Kolkmeier, T., Jiang, M., Pegg, N., Brown, H., y Burton, S. (2024). Trace element bioaccumulation, tissue distribution, and elimination in odontocetes stranded in Florida and Georgia, USA over a 15-year period (2007–2021). *Heliyon*, 10(3), e25552. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25552>
- Pellissó, S. C., Munoz, M. J., Carballo, M., & Sánchez-Vizcaíno, J. M. (2008). Determination of the immunotoxic potential of heavy metals on the functional activity of bottlenose dolphin leukocytes in vitro. *Veterinary immunology and immunopathology*, 121(3–4), 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.vetimm.2007.09.009>
- William F. P. “*Stenella attenuata*,” *Mammalian Species* 2001(683), 1–8, (26 December 2001). [https://doi.org/10.1644/1545-1410\(2001\)683<0001:SA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1644/1545-1410(2001)683<0001:SA>2.0.CO;2)
- Romero-Calderón, A. G., Morales-Vela, B., Rosiles-Martínez, R., Olivera-Gómez, L. D., & Delgado-Estrella, A. (2016). Metals in

- bone tissue of Antillean manatees from the Gulf of Mexico and Chetumal Bay, Mexico. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 96, 9-14. <https://www.proquest.com/openview/a0ff99ec4ee1b48a4fa9953bb0b45d09/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>
- Routti, H., Gabrielsen, G. W., Herzke, D., Kovacs, K. M., & Lydersen, C. (2016). Spatial and temporal trends in perfluoroalkyl substances (PFASs) in ringed seals (*Pusa hispida*) from Svalbard. *Environmental Pollution*, 214, 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.016>
- Sable, H., Singh, V., Kumar, V., Roy, A., Pandit, S., Kaur, K. y Malik, S. (2024). Toxicological and bioremediation profiling of nonessential heavy metals (mercury, chromium, cadmium, aluminium) and their impact on human health: A review. *Toxicologie Analytique et Clinique*, 36(3), 205-234. <https://doi.org/10.1016/j.toxac.2024.03.096>
- Schaap, I., Buedenbender, L., Johann, S., Henner, H. y Gulsah, D. (2023). Impact of chemical pollution on threatened marine mammals: A systematic review. *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132203-132203. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132203>
- Seydi, E. y Pourahmad, J. (2022). The effect of mercury on the mitochondria. *Mitochondrial Intoxication*, 547-555. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-88462-4.00017-1>
- Stockin, K. A., Machovsky-Capuska, G. E., Palmer, E. I., & Amiot, C. (2023). Multidimensional trace metals and nutritional niche differ between sexually immature and mature common dolphins (*Delphinus delphis*). *Environmental Pollution*, 333, 121935-121935
- Stuart-Smith, S. J., & Jepson, P. D. (2017). Persistent threats need persistent counteraction: Responding to PCB pollution in marine mammals. *Marine Policy*, 84, 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.06.033>
- Wang, A., & Pfeiffer, C. J. (2001). Cytopathology induced by mercuric chloride and methylmercury in cultured renal cells of the Atlantic spotted dolphin (*Stenella plagiodon*). *Journal of Submicroscopic Cytology and Pathology*, 33(1-2), 7-16.
- Wang, Y., Wang, Y., Agarry, I. E., Zhou, C., Shi, H., Zeng, Q., ... & Chen, K. (2024). Changes in toxicity after mixing imidacloprid and cadmium: enhanced, diminished, or both? From a perspective of oxidative stress, lipid metabolism, and amino acid metabolism in mice. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(51), 111099-111112. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29980-x>
- Wang, Z., Liu, S., Cheng, Z., Xu, G., Li, F., Bu, Q., ... & An, X. (2024). Endoplasmic reticulum stress exa-

cerbates microplastics-induced toxicity in animal cells. *Food Research International*, 175, 113818. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113818>

Warburton, J., Seagars, D.J., 1993. Heavy metals concentrations in liver and kidney tissues of Pacific walrus: Continuation of a baseline study. USFWS Technical Report R7/MMM 93-1, Marine Mammals Management, Fish and Wildlife Service, Region 7, Alaska, U.S. Department of the Interior, Anchorage, AK, 23 pp. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ex0XAQAIAAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=+Heavy+metals+concentrations+in+liver+and+kidney+tissues+of+Pacific+walrus:+Continuation+of+a+baseline+study.&ots=3g9H-q9szP-&sig=qPr8GwHzf3G-jANsLIzgWw4R8b7s#v=one-page&q=Heavy%20metals%20>

concentrations%20in%20liver%20and%20kidney%20tissues%20of%20Pacific%20walrus%3A%20Continuation%20of%20a%20baseline%20study.&f=false

Wise Jr, J. P., Wise, J. T., Wise, C. F., Wise, S. S., Zhu, C., Browning, C. L., ... & Wise Sr, J. P. (2019). Metal levels in whales from the Gulf of Maine: a one environmental health approach. *Chemosphere*, 216, 653-660. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.120

Woshner, V. M., O'Hara, T. M., Bratton, G. R., Suydam, R. S., & Beasley, V. R. (2001). Concentrations and interactions of selected essential and non-essential elements in bowhead and beluga whales of Arctic Alaska. *Journal of Wildlife Diseases*, 37(4), 693-710. <https://doi.org/10.7589/0090-3558-37.4.693>