

# Contaminantes orgánicos persistentes: Impactos y medidas de control

## Persistent organic pollutants: Impacts and control measures

Cesar R. Castro López<sup>1\*</sup>; Luis M. Castillo Rodríguez<sup>2</sup>

1 Servicio Nacional de Sanidad Agraria – SENASA, Perú.

2 Departamento de Química, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú

\* Autor corresponsal: [crnatural1@gmail.com](mailto:crnatural1@gmail.com) (C. R. Castro López).

ORCID de los autores:

C. R. Castro López: <https://orcid.org/0000-0002-0797-7389>

L. M. Castillo Rodríguez: <https://orcid.org/0000-0002-5806-6112>

### RESUMEN

Los contaminantes orgánicos persistentes (COP) representan un problema ambiental significativo debido a su toxicidad, con una alta capacidad para persistir en el entorno, resistencia a los métodos de degradación convencionales, la capacidad de acumulación en organismos vivos y su magnificación en las cadenas tróficas o alimentarias. En este artículo de revisión, se examinan los impactos en la salud y en los componentes medio ambientales. También se abordan las estrategias y medidas de control, mitigación y/o minimización de los COP. Se identifica a las actividades agrícolas, industriales, la inadecuada disposición final de los residuos sólidos y la falta de tratamiento de las aguas residuales como las principales fuentes de emisión de COP. Además, se analizan tecnologías innovadoras y prometedoras, como la nanotecnología, biorremediación, rizorremediación, biocarbón, técnicas de cromatografía, ultrasonido, entre otras, para el tratamiento adecuado de los COP. La revisión destaca tanto las ventajas como las limitaciones de estas tecnologías, señalando áreas que aún requieren desarrollos para lograr tratamientos eficaces. También se mencionan alternativas más económicas y ecológicas, para contrarrestar los impactos de los COP.

**Palabras clave:** Contaminantes orgánicos; Impactos; Persistencia; Toxicidad, Bioacumulación.

### ABSTRACT

Persistent organic pollutants (POPs) represent a significant environmental problem due to their toxicity, with a high capacity to persist in the environment, resistance to conventional degradation methods, the ability to accumulate in living organisms and their magnification in food chains or food. In this review article, the impacts on health and environmental components are examined. Strategies and measures for control, mitigation and/or minimization of POPs are also addressed. Agricultural and industrial activities, inadequate final disposal of solid waste and lack of wastewater treatment are identified as the main sources of POP emissions. In addition, innovative and promising technologies are analyzed, such as nanotechnology, bioremediation, rhizoremediation, biochar, chromatography techniques, ultrasound, among others, for the adequate treatment of POPs. The review highlights both the advantages and limitations of these technologies, pointing out areas that still require developments to achieve effective treatments. More economical and ecological alternatives are also mentioned to counteract the impacts of POPs.

**Keywords:** Organic contaminants; Impacts; Persistence; Toxicity, Bioaccumulation.

Recibido: 30-11-2023.

Aceptado: 10-03-2024.



Esta obra está publicada bajo la licencia [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## INTRODUCCIÓN

Los contaminantes orgánicos persistentes (COP) son compuestos químicos que se caracterizan por su resistencia a la degradación ambiental, lo que les permite persistir en el medio ambiente durante largos períodos de tiempo. Estos compuestos incluyen pesticidas, productos químicos industriales y subproductos, así como contaminantes resultantes de actividades como la quema de combustibles fósiles y la generación de desechos. El crecimiento de la población mundial exige una intensificación de los procesos antropogénicos, lo que conduce entre otras cosas, a la contaminación del medio ambiente terrestre y acuático con compuestos orgánicos persistentes (Wagner et al., 2021). Así mismo, Ighalo et al., (2022). Indica que la intensificación de la urbanización y de las actividades industriales exagera significativamente la distribución de contaminaciones tóxicas en el medio acuoso, y que estas afectan los seres humanos y la vida silvestre y es necesario desarrollar un enfoque simple, seguro y sostenible para eliminar los COP.

El primer instrumento a nivel internacional y que es jurídicamente vinculante para la regulación y tratamiento respecto a los COP es el Convenio de Estocolmo, cuyo objetivo principal es proteger la salud humana y el medio ambiente, en la actualidad el convenio enumera un grupo de 28 compuestos tóxicos de diferentes clases químicas, este grupo incluye productos químicos utilizados en la agricultura (pesticidas), la industria (por ejemplo, bifenilos policlorados, éteres de difenilo polibromados, compuestos perfluorados), así como subproductos industriales o de combustión no intencionales como las dioxinas, furanos entre otras; por las características de dispersión de éstos contaminantes se han identificado en el aire, el agua, el suelo/sedimentos y la biota en todo el mundo, incluso en regiones remotas donde nunca se han utilizado, siendo la circulación de masas de aire y aguas los mayores medios de transporte a largas distancias de los COP (Drevenkar & Mendaš, 2023).

La presencia de COP es un asunto muy serio, tanto para el medio ambiente como para el desarrollo económico y social a nivel global, además cabe resaltar el aumento gradual de la concentración a medida que avanzamos en la cadena alimentaria. (Negrete-Bolagay et al., 2021). Por otro lado el hecho de haber encontrado rastros de pesticidas y sustancias tóxicas del medio ambiente en los alimentos que consumimos están directamente relacionadas con el desarrollo a una vida saludable (Combi et al., 2022).

Conjuncionar todos los esfuerzos en la eliminación de los COP hasta donde sea posible, empezando por aquellos que plantean mayores problemas para la salud y el medio ambiente son urgentes, todos los esfuerzos por la promoción del intercambio de información, la sensibilización y la educación para que toda la ciudadanía tenga conciencia del peligro real que suponen estas sustancias son necesarias e inaplazables.



Figura 1. Fuentes, características e impactos.

### Enfoque integral sobre los riesgos para la salud y el ambiente asociados a los contaminantes orgánicos persistentes (COP)

Los contaminantes orgánicos persistentes (COP), son sustancias químicas que suponen una amenaza para la salud humana y el medio ambiente de todo el planeta, debido a que permanecen en el medio ambiente, al ser resistentes a la degradación, son bioacumulables, se incorporan en los tejidos de los seres vivos, pudiendo aumentar de concentración según se sube a niveles más altos de la cadena trófica, son tóxicas para la salud humana y el medio ambiente, y tienen potencial para transportarse a larga distancia, pudiendo llegar a regiones en las que nunca se han producido o utilizado (Compuestos orgánicos persistentes y salud, 2022).

La comprensión actual de cómo los procesos físicos y ecológicos impulsados por el cambio climático influyen en los niveles de contaminantes orgánicos persistentes (COP). Se destaca cómo el cambio climático puede interactuar con otros factores estresantes para impactar la toxicidad de los contaminantes (Borgå et al., 2022).

El crecimiento de la población mundial exige una intensificación de los procesos antropogénicos, lo que conduce, entre otras cosas, a la contaminación del medio ambiente terrestre y acuático con compuestos orgánicos tóxicos. Su resistencia química relativamente alta dio lugar a una prohibición mundial o un control estricto del uso de COP. La mayoría de los COP se utilizaban habitualmente como pesticidas y, lamentablemente, algunos de ellos

todavía se utilizan como ayuda en las prácticas agrícolas (Wagner et al., 2021).

El Convenio de Estocolmo insta a los países a reducir las emisiones y liberaciones de contaminantes orgánicos persistentes (COP), implementando medidas regulatorias que prohíban y restrinjan la fabricación y uso de estos compuestos químicos. La normativa y restricciones aplicables a cada producto químico pueden ser consultadas en el listado de Sustancias y Productos Químicos Existentes, Prohibidos y Restringidos.

Según el Convenio de Estocolmo, los Contaminantes Orgánicos Persistentes se establecen dos categorías:

- **Contaminantes COP intencionales:** Se utilizan en el proceso industrial o se producen como resultado de éste. Hace falta adoptar e implementar medidas de control para reducir o eliminar las emisiones que comportan su producción y uso. Eso sí, su producción y uso están prohibidas o restringidas a ciertas excepciones.
- **Contaminantes COP no intencionales:** Se originan como subproductos derivados de reacciones químicas o de procesos. Estas incluyen el hexaclorobenzè, el pentaclorobenzè, los bifenils policlorados, las dibenzoparadióxinas policloradas y los dibenzofuranos policlorados. Así mismo, el convenio de Estocolmo clasifica las sustancias COP en cinco anexos, en función de las medidas que se han decidido adoptar sobre ellas (eliminación, restricción o reducción de emisiones) o de la fase del proceso de evaluación de riesgos en que se encuentren:

**Tabla 1**  
COP enumerados según el Convenio de Estocolmo

| SUSTANCIA QUÍMICA  | ACRÓNIMO      | CATEGORÍA | ANEXO |
|--|---------------|-----------|-------|
| 1 Aldrin   |               | P         | A     |
| 2 Alfa-hexaclorociclohexano                                | $\alpha$ -HCH | P         | A     |
| 3 Beta-hexaclorociclohexano                                | $\beta$ -HCH  | P         | A     |
| 4 Clordano   |               | P         | A     |
| 5 Clordecona   |               | P         | A     |
| 6 Éter de decabromodifenilo                                | Deca-BDE      | I         | A     |
| 7 Dicofol  |               | P         | A     |
| 8 Diclorodifeniltricloroetano                              | DDT           | P         | A     |
| 9 Dieldrin   |               | P         | B     |
| 10 Endosulfán  |               | P         | A     |
| 11 Endrín  |               | P         | A     |
| 12 Gamma-hexaclorociclohexano                              | $\gamma$ -HCH | P         | A     |
| 13 Heptacloro  |               | P         | A     |
| 14 Hexabromobifenilo                                       | HBB           | P         | B     |
| 15 Hexabromociclododecano                                  | HBCD          | I         | A     |
| 16 Éter de hexabromodifenilo y éter de heptabromodifenilo  | PBDE          | P         | A     |
| 17 Hexaclorobenceno  | HCB           | I,P,UP    | A     |
| 18 Hexaclorobutadieno                                      | HCBD          | I,UP      | AyC   |
| 19 Mirex   |               | P         | AyC   |
| 20 Pentaclorobenceno                                       | PeCB          | I,P,UP    | A     |
| 21 Pentaclorofenol, sus sales y ésteres                    | PCP           | P         | AyC   |
| 22 Ácido perfluorooctano sulfónico                         | PFOS          | I,P       | A     |
| 23 Ácido perfluorooctanoico                                | PFOA          | I         | B     |
| 24 Bifenilos policlorados                                  | PCB           | I,UP      | A     |
| 25 Dibenzo-para-dioxinas policloradas                      | PCDD          | UP        | AyC   |
| 26 Dibenzofuranos policlorados                             | PCDF          | UP        | C     |
| 27 Naftalenos policlorados                                 | PCN           | I,UP      | C     |
| 28 Parafinas cloradas de cadena corta                      | SCCPs         | I         | AyC   |
| 29 Éter de tetrabromodifenilo y éter de pentabromodifenilo | PBDE          | P         | A     |
| 30 Toxafeno  |               | P         | A     |

Fuente: Adoptado del convenio de Estocolmo 2021.

P = Plaguicida, I = Industrial; UP = Producción no intencionada, Anexo A = Eliminación,

Anexo B = Restricción; Anexo C = Producción no intencionada.

**Tabla 2**  
Clasificación según anexos de los COP

| Anexo                  | Medidas y Fases de Evaluación de COP según el Convenio de Estocolmo   |
|------------------------|---|
| COP Anexo A            | Sustancias a Eliminar: Se refiere a sustancias COP que deben ser eliminadas de manera prioritaria.  |
| COP Anexo B            | Sustancias Sujetas a Restricciones de Uso: Incluye sustancias COP cuyo uso está sujeto a restricciones específicas.   |
| COP Anexo C            | Sustancias con Emisiones a Reducir: Contiene sustancias COP para las cuales se deben implementar medidas para reducir sus emisiones.  |
| Candidato COP Anexo D  | Sustancia Intrínsecamente Candidata a COP: Se refiere a sustancias que, por sus propiedades intrínsecas, cumplen los criterios para ser consideradas COP.   |
| Candidato COP Anexo E  | Sustancia con Evaluación de Riesgos Adicionales: Incluye sustancias que, además de cumplir con los criterios de selección como COP, presentan evaluación de riesgos que indica su capacidad para ser transportadas a larga distancia y causar efectos adversos en la salud humana y/o en el medio ambiente. |
| Candidato COP Anexo F: | Sustancias COP que Requieren Acción Global: Sustancias que han superado las etapas de evaluación de los Anexos D y E. Se encuentran en fase de evaluación para determinar medidas globales a adoptar, como eliminación, reducción de emisiones o restricción.   |

Fuente: Adoptado del convenio de Estocolmo.

### Los contaminantes orgánicos persistentes y su impacto en la salud humana

Los artículos revisados sugieren que los contaminantes orgánicos persistentes (COP) pueden generar problemas en la salud humana. Según Ighalo et al. (2022), la exposición a estos contaminantes puede ocasionar diversas complicaciones, como alteraciones endocrinas, enfermedades cardiovasculares, cáncer, diabetes, defectos de nacimiento, así como disfunciones en los sistemas inmunológico y reproductivo.

Los estudios realizados por Ling et al. (2024) revelaron una preocupante contaminación por bifenilos policlorados (PCB) en la cuenca de Taihu, China, siendo el polvo el medio más afectado. La exposición principal a PCB en la población local se atribuye al agua y los alimentos. Aunque no se identificaron riesgos no cancerígenos, el riesgo de cáncer para los residentes supera los umbrales de seguridad establecidos. Los adultos presentan el mayor riesgo, destacando la necesidad de medidas preventivas, especialmente en la regulación de la ingesta de alimentos y la concentración de PCB en el agua.

La investigación revela que los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) están contaminando fuertemente las aguas subterráneas y los sedimentos. Se observa una dispersión de HAP en los sedimentos, y se identifican riesgos cancerígenos para la salud humana, especialmente en adultos y mediante el contacto dérmico (Lu et al., 2024)

Según Qadeer et al. (2024) la comparación entre éteres de difenilo polibromados (PBDE) y éteres organofosforados (OPE) destaca similitudes en sus propiedades físicoquímicas, comportamientos ambientales y concentraciones globales. A pesar de su prohibición como contaminantes orgánicos persistentes, los OPE han aumentado, incluso superando a los PBDE en regiones prístinas. Ambos grupos muestran potencial de bioacumulación y transferencia trófica, con valores de factores de bioacumulación y magnificación trófica que indican riesgos. Además, comparten criterios de toxicidad, subrayando la inadecuada sustitución de los PBDE por los OPE.

En el estudio sobre parafinas cloradas de cadena corta (PCCC) y sus efectos en células hepáticas humanas, se aplicó la tecnología metabolómica a diferentes concentraciones de PCCC (1 µg/L, 10 µg/L y 100 µg/L). Se encontraron perturbaciones metabólicas notables, especialmente en vías

relacionadas con el metabolismo de aminoácidos, nucleótidos y lípidos. Se identificaron 72 metabolitos diferenciales, destacando cambios en los lípidos de las membranas celulares y la inhibición de la β-oxidación de ácidos grasos. Estos resultados sugieren posibles efectos adversos, como daño a las biomembranas y alteraciones en la producción de energía celular (Luo et al., 2024).

Syed et al. (2023) destacan que la exposición al diclorodimetiltricloroetano (DDT), un contaminante orgánico persistente, está asociada con problemas de salud reproductiva femenina. Se encontraron pruebas de reducción de la fecundabilidad, mayor riesgo de partos prematuros, alteraciones en la síntesis de hormonas reproductivas y posibles vínculos con cánceres reproductivos.

La exposición a dioxinas o PCB-153 aumenta el crecimiento y la metástasis de células cancerígenas de próstata, según modelos ex vivo y ratones NOD-SCID. Además, los pacientes expuestos muestran un significativo aumento en el histoscore de ACAT1. Estos resultados señalan la importancia de comprender los mecanismos subyacentes para desarrollar estrategias terapéuticas y preventivas más efectivas en el manejo del cáncer de próstata asociado a COP (Buñay et al., 2023)

Rokni et al. (2023) revisan el estado de la contaminación por contaminantes orgánicos persistentes (COP) en alimentos y su impacto en la salud. Se destaca la conexión entre la exposición a COP y diversas enfermedades como cáncer, diabetes, obesidad y trastornos metabólicos. La investigación señala la atmósfera y el consumo de productos del mar como fuentes significativas de exposición en la población surcoreana, resaltando preocupaciones sobre la salud pública.

Los datos disponibles proporcionan evidencia convincente que implica a los contaminantes orgánicos persistentes (COP) como un factor contribuyente en la alteración del homeostasis de la glucosa, la disfunción de las células β y la perturbación de las vías metabólicas y del estrés oxidativo en los islotes de Langerhans. Por lo tanto, en los estudios de toxicidad por COP, es crucial considerar al páncreas endocrino como una evaluación primordial (Hoyeck et al., 2022).

En la investigación realizada por (Matta et al., 2022) indica que algunos COP participan en procesos metabólicos que promueven la inflamación, y esto podría estar relacionado con el desarrollo de casos graves de endometriosis. Por

otro lado, se ha comprobado que los COP afectan la capacidad de las mujeres para concebir en seres humanos, debido fundamentalmente a que muchos de estos productos químicos a pesar de estar prohibidos se encuentran presentes en las cadenas alimentarias (Bjørvang et al., 2021).

En el estudio realizado por Iribarne-Durán et al. (2024) sobre las concentraciones de COP y la actividad xenoestrogénica combinada en placentas de mujeres, se detectaron residuos de pesticidas organoclorados y bifenilos policlorados en las muestras estudiadas, siendo DDT el principal metabolito presente en las placentas.

Según Caba-Flores et al. (2023) señalan que los COP y los plásticos, específicamente sus subproductos de degradación como los microplásticos, están presentes en productos de consumo humano y otras formas de vida, incluyendo animales y plantas. Estos contaminantes también se encuentran en sustitutos de leche y en la leche materna. Hasta la fecha, no se conoce completamente cuáles son los efectos de los microplásticos y los contaminantes orgánicos persistentes cuando se ingieren durante los primeros 1000 días de vida, que representan la primera y más importante etapa para la programación de la salud de la descendencia

En su investigación, Ferreira et al. (2023) observaron asociaciones significativas entre el sobrepeso/obesidad antes del embarazo y las concentraciones de diclorodifenildicloroetano (ppDDE), bifenilo policlorado (PCB)74, PCB138, PCB153, PCB170, PCB180, PCB totales, 4PCB totales, 2 plaguicidas organoclorados (OCP) totales y COP totales. Se reveló que tanto el sobrepeso/obesidad pregestacional como la ingesta total de lípidos durante el embarazo estuvieron asociados con las concentraciones de COP en la leche de mujeres.

Otro impacto de preocupación para la salud humana relacionado con los COP es la producción y el uso actual de las parafinas cloradas (CP). Según los estudios de Krätschmer et al. (2021) sobre los niveles de parafina clorada en comparación con otros COP encontrados en muestras combinadas de leche humana de madres primíparas en 53 países, se detectaron CP en muestras agrupadas de todos estos países. Las parafinas cloradas representaron entre el 18% y el 46% del total de COP en la leche humana, siendo superadas solo por el diclorodifeniltricloroetano (DDT). Las concentraciones de parafinas cloradas superaron las concentraciones de bifenilos policlorados (PCB) en las muestras agrupadas de la mayoría de los países.

Las últimas investigaciones sugieren cada vez más la posibilidad de que la exposición crónica a COP contribuya a la aparición del cáncer de mama. La asociación observada entre la exposición a los COP y el avance del cáncer de mama podría estar relacionada con un mejor pronóstico de los tumores debido al secuestro de los COP en el tejido adiposo (Barrios-Rodríguez et al., 2023).

Asimismo, varios COP muestran asociaciones positivas con marcadores de lesión hepática y la incidencia de enfermedad hepática, lo que sugiere que las toxinas ambientales son factores de riesgo

importantes para la enfermedad hepática crónica, según indican los estudios de Hakkarainen et al. (2023). En algunas muestras sobre estudios de la presencia de COP en la cadena alimenticia se encontraron niveles de PCB considerados peligrosos para la salud humana (Giosuè et al., 2022).

Una gran cantidad de estudios han corroborado una asociación entre la disbiosis microbiana intestinal inducida por COP y la prevalencia de trastornos. La ingestión de bifenilos policlorados, éteres de difenilo polibromados o plaguicidas organoclorados influyó en el metabolismo de los ácidos biliares a través de la alteración de la actividad hidrolasa de sales biliares de los géneros *Lactobacillus*, *Clostridium* o *Bacteroides*. Al mismo tiempo, algunos productos químicos, como el el diclorodifenildicloroetileno, tienen el potencial de elevar la proporción de proteobacterias y firmicutes/bacterioidetes, lo que influye en su actividad metabólica, y ello conduce a una mayor síntesis de ácidos grasos de cadena corta, con la consiguiente obesidad o un estado prediabético. Se destaca el impacto de la exposición a los COP en la composición de la microbiota intestinal y la actividad metabólica, junto con una descripción de sus correspondientes consecuencias en la fisiología del huésped (Popli et al., 2022).

#### **Consecuencias de los COP en los Componentes Bióticos del Medio Ambiente**

Las características de los COP han recibido considerable atención en las últimas décadas debido a la cada vez más clara afección en la vida de los seres humanos y la vida silvestre (Ighalo et al., 2022). Estos COP también vienen generando preocupación en diversos ecosistemas frágiles, como los humedales costeros, que incluyen manglares, praderas de pastos marinos y marismas (Girones et al., 2021).

En sus investigaciones Sardenne et al. (2024) examinaron cinco especies, que incluyeron dos tipos de peces, dos de moluscos y un crustáceo, en tres ubicaciones de muestreo durante el año 2017. Los niveles de contaminación de COP y TM se situaron por debajo de los límites máximos aceptados para productos marinos, incluyendo Cd y Pb. No se detectó presencia de DDT en ninguna de las muestras analizadas. Se observaron diferencias más notables entre las especies que entre las ubicaciones, aunque cabe destacar que los resultados podrían estar influenciados por un diseño de muestreo desequilibrado. La ostra *Crassostrea gasar* fue identificada como la especie más contaminada, sugiriendo su idoneidad como candidata para evaluar la contaminación ambiental en la región. Además, se encontraron niveles interesantes desde el punto de vista nutricional de elementos esenciales como Fe, Zn y Mn en las especies estudiadas.

En las investigaciones sobre xenobióticos y metales en erizos realizadas por Rasmussen et al. (2024), sus resultados evidenciaron la detección de una amplia variedad de pesticidas, COP, que incluyeron compuestos organoclorados y BFR (retardantes de llama bromados), así como metales y metaloides,

en muestras de erizos recolectadas en diversas ubicaciones de Europa. En algunos casos, se observaron concentraciones letales de estos compuestos, ocasionando envenenamiento fatal en los erizos. Además, en otros casos, se describieron efectos adversos para la salud, como hiperplasia biliar, en los erizos afectados.

Se revela la exposición a largo plazo de tortugas golfinas adultas (*Lepidochelys olivacea*) a contaminantes orgánicos persistentes (COP) durante la temporada de anidación. Se identificaron veintisiete analitos de COP en las muestras de sangre, mostrando concentraciones elevadas en comparación con otros estudios. Estas concentraciones elevadas pueden tener efectos adversos en la salud de las tortugas, incluyendo cambios hematológicos, bioquímicos, en el sistema inmunológico y actividad enzimática asociada al estrés oxidativo (Flores-Ramírez et al., 2024).

Massone et al. (2023) determinaron las concentraciones de organoclorados (OC) y bifenilos policlorados (PCB) en el tejido muscular de cincuenta muestras de sardina (*Sardinella brasiliensis*). Las concentraciones de 18 pesticidas organoclorados (PCO) estuvieron por debajo del límite, estos hallazgos, aunque preliminares, representan una base para futuras comparaciones e investigaciones para ampliar los datos aquí generados, como la determinación del factor de bioacumulación y la relación entre los cambios globales y la dinámica de los COP en el medio ambiente.

Las bajas concentraciones de PCB y OCP encontradas en aves carroñeras del norte de España indican que, como ya se ha demostrado en otras especies y sistemas de estudio, la implementación de regulaciones restrictivas sobre estos contaminantes, vigentes, ha sido eficaz. Sin embargo, es aconsejable mantener una vigilancia a este respecto porque ciertos individuos, en nuestro caso los buitres leonados, han mostrado niveles notablemente altos de pesticidas organoclorados (Muñoz-Arnanz et al., 2024).

El estudio de los COP en tilapia (*Oreochromis niloticus*) silvestre y cultivada determinó concentraciones de pesticidas organoclorados (OCP), bifenilos policlorados, difenilos polibromados, y sustancias perfluoroalquilas (PFAS) en muestras de hígado de esta especie. Los compuestos de PFAS, perfluorooctano (PFOS), ácido perfluorodecanoico y ácido perfluorononanoico solo se detectaron en peces silvestres, con los niveles medios de PFOS más altos. En el 78% de los peces silvestres y el 8% de los peces de piscifactoría, las concentraciones de éteres de difenilo polibromados estaban por encima de los límites estándares de calidad ambiental de la biota establecidos por la UE (Simukoko et al., 2023).

En la investigación de Noren et al. (2024) se examinaron muestras de placenta, sangre y leche de delfines mulares, *Tursiops truncatus*, para evaluar la transferencia de contaminantes maternos. Se destacó una mayor eficiencia en la transferencia de contaminantes a los terneros, especialmente para los isómeros del DDT con 4 a 6 PCB de cloro, p,p'-DDD, p,p'-DDT, o,p'-DDD y o,p'

-DDE, trans - nonaclaro, cis - nonaclaro, epóxido de heptaclaro, nonaclaro III y oxiclordano. Al final del periodo de lactancia, los niveles de COP en el suero de los terneros superaron significativamente a los de sus madres. Estos resultados proporcionan información clave sobre la transferencia de contaminantes en el ecosistema marino y los posibles riesgos asociados con la exposición a COP en los terneros odontocetos en desarrollo.

Los riesgos ecológicos asociados a los compuestos detectados fueron mayormente bajos ( $RQ < 0,1$ ) o moderados ( $0,1 \leq RQ < 1$ ) para peces, *Daphnia magna* y algas en la mayoría de los sitios de estudio. Sin embargo, la acumulación total de  $RQ (\sum RQ \geq 1)$  en la mayoría de los sitios de ambos estuarios sugiere posibles preocupaciones ecológicas para estos organismos. Esto indica que, si presentes en ambos estuarios, podrían estar expuestos a riesgos ecológicos debido a los compuestos con retardantes de llama organofosforados acumulados. Se enfatiza la necesidad de futuros estudios que no solo aborden los patrones de bioacumulación de estos compuestos, sino que también busquen formas sostenibles de reducir su presencia en estos entornos estuarinos (Olisah et al., 2024).

En investigaciones centradas en el rodaballo (*Scophthalmus maeoticus*), un pez bentónico de interés comercial poco explorado, se identificaron pesticidas organoclorados (OCP) y bifenilos policlorados (PCB). Estos compuestos, presentes no solo en el agua y sedimentos, sino también en los músculos, branquias, gónadas e hígados del rodaballo, muestran una predominancia de COP (p,p'-DDT y sus metabolitos p,p'-DDE, p,p'-DDD) en los tejidos del pez. La presencia de estos contaminantes orgánicos plantea un riesgo para la salud humana al superar las concentraciones máximas permitidas para el consumo humano en Rumania y la Unión Europea (Danilov et al., 2023). La sabida contaminación de los COP sobre la biota es innegable, específicamente por los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP); estos compuestos tóxicos vienen afectando a unos de los grupos de vertebrados más amenazados, los elasmobranquios (tiburones y rayas). Sin embargo, faltan estudios para determinar la relación sobre la contaminación por HAP de elasmobranquios y ver los riesgos potenciales para la salud humana (Monteiro et al., 2023). Por otro lado, el uso generalizado de compuestos clorados en las últimas décadas están reflejando en las concentraciones de tejido de pescado comestible (Machado Torres & Krykhtine, 2023).

El nexo entre el medio ambiente, los alimentos y la salud se probó en el campo mediante el análisis de muestras de peces y sedimentos del cinturón industrial de Eloor-Edayar, un solitario punto crítico de COP. Se observó que las muestras de peces de los puntos críticos tenían niveles 8 veces más altos de dibenzo-p-dioxinas/furanos policlorados (PCDD/F) y niveles 30 veces más altos de bifenilos policlorados (PCB) que los sitios de control (Kumar et al., 2023).

En el estudio llevado a cabo por van der Schyff et al. (2021) se evaluaron las concentraciones de COP en huevos de aves marinas en el Océano Índico

occidental. Los resultados revelaron que los huevos de charrán negro presentaban las concentraciones medias más elevadas de la mayoría de los contaminantes orgánicos persistentes, seguidos por los charranes de hadas, los pollos salvajes y los polluelos comunes.

Utilizando el enfoque de equivalencia tóxica (TEQ) de la OMS, Fiedler et al. (2023) en los estudios realizados para detectar COP similares a las dioxinas (dl-COP), como los dibenzodioxinas policloradas (PCDD), dibenzofuranos (PCDF) y bifenilos (PCB), las análisis encontraron que la biota de origen animal es la matriz principal de la contaminación por dlCOP.

Los procesos físicos y ecológicos impulsados por el cambio climático influyen en los niveles de COP y contaminantes de preocupación emergente en el Ártico (CEAC) en la biota y las redes alimentarias del Ártico. Las especies que se desplazan hacia el norte pueden actuar como biovectores de COP y CEAC en las redes alimentarias marinas del Ártico. Los cambios en la posición trófica pueden alterar las concentraciones de COP en las poblaciones de especies del Ártico. Las reducciones en la condición corporal están asociadas con aumentos en los niveles de COP en alguna biota (Borgå et al., 2022).

Los disruptores endocrinos (o sustancias químicas disruptivas endocrinas, EDC) persistentes interactúan con los sistemas endocrinos de los animales al interferir con las concentraciones o actividades de las hormonas o sus receptores, lo que conduce a disfunciones reproductivas, del desarrollo, metabólicas o del comportamiento. Muchos EDC agonizan o antagonizan los receptores hormonales, mientras que otros modulan las actividades de las enzimas involucradas en la síntesis o el metabolismo de las hormonas o alteran la expresión de genes que codifican receptores u hormonas proteicas (Roark, 2020).

### **El Legado de los Contaminantes Orgánicos Persistentes en el Mundo Abiótico.**

Actualmente se sabe cómo los procesos físicos y ecológicos impulsados por el cambio climático influyen en los niveles de los contaminantes orgánicos persistentes, en el estudio desarrollado por Borgå et al. (2022) resaltan como estos cambios en el clima pueden interactuar con otros factores estresantes para impactar o activar sobre la toxicidad de los contaminantes.

La coexistencia de COP en 20 muestras de polvo exterior y 49 muestras de suelo recolectadas de 7 sitios de desechos electrónicos. Se examinaron retardantes de llama halogenados heredados y alternativos, bifenilos policlorados (PCB) y pesticidas organoclorados (OCP). Se destaca la presencia por primera vez de retardantes de llama alternativos, como decabromodifeniletano (DBDPE) y sin y anti-declorano plus (DP), en Nigeria. Las concentraciones totales variaron, con 10 éteres de difenilo polibromados (PBDE) siendo los más predominantes en polvo, mientras que DBDPE lideraba en el suelo. Los PBDE fueron los principales contaminantes en sitios de desmantelamiento de desechos electrónicos,

mientras que los PCB dominaron en vertederos. Se identificó una asociación significativa entre DBDPE y la contaminación en ambos tipos de sitios (Folarin et al., 2024)

Para Warren-Vega et al. (2023) en la actualidad, la contaminación del agua se ha convertido en una amenaza seria para el medio ambiente, con consecuencias negativas tanto para la vida silvestre como para la salud humana, esto debido a que los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes son difíciles de eliminar mediante los métodos disponibles en la actualidad.

Se examinó la presencia de pesticidas organoclorados (OCP) y sus metabolitos en superficie y suelo en Vietnam. A pesar de la prolongada aplicación de OCP, las concentraciones en el suelo central fueron ligeramente más bajas que en la superficie, con excepción de los isómeros de hexaclorociclohexano (HCH). Los compuestos más predominantes fueron p,p'-DDT, p,p'-DDE, dicofol más p,p'-DBP y p,p'-DDD. La uniformidad en la distribución de HCH indicó la ausencia de uso reciente. Se observaron concentraciones más altas de DDT en el centro-norte y presencia de endosulfán (END) en el sur. Los riesgos asociados con estos contaminantes en suelos agrícolas fueron en su mayoría aceptables, aunque algunas áreas superficiales mostraron un riesgo potencial de cáncer debido a la ingesta de vegetales contaminados. Este estudio subraya la importancia de evaluar cuidadosamente los riesgos en tierras agrícolas con historial de aplicación de OCP (Ding et al., 2024).

Los estudios de Esen et al. (2023) sobre la presencia de COP en aire y suelo en Turquía y Perú, destacan la escasez de mediciones simultáneas en ambos entornos. Se analizaron hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (PCB) y pesticidas organoclorados (OCP). Las concentraciones de COP en el aire fueron más altas en Turquía, mientras que en el suelo fueron comparables en ambos países. Las fracciones de fugacidad aire-suelo indicaron diferentes intercambios, con volatilización neta para bajos pesos moleculares y deposición neta para altos pesos moleculares. El suelo se identificó como fuente secundaria de COP de bajo peso molecular en la atmósfera y como sumidero para los de alto peso molecular.

Štrbac et al. (2024) en los bosques de hayas de montaña, las concentraciones totales de Organoclorados Persistentes ( $\Sigma$  20 OCP) en la capa superficial del suelo (0-40 cm) oscilan entre 24,46  $\mu\text{g}/\text{kg}$  y 331,11  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , mientras que a una profundidad de 40-80 cm van de 15,80  $\mu\text{g}/\text{kg}$  a 247,12  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Las concentraciones de Bifenilos Policlorados ( $\Sigma$  6 PCB) varían de 9,21 a 95,28  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en la capa superficial y de 8,07 a 66,56  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en la subcapa del suelo. La concentración total de Éteres de Difenilo Polibromados ( $\Sigma$  7 PBDE) en la capa superficial del suelo va de 1,38 a 29,68  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , y en la subcapa del suelo, de 1,01 a 53,31  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Por último, la concentración total de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos ( $\Sigma$  16 PAH) varía de 271,52 a 1154,52  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en la capa superficial y de 318,95 a 1052,54  $\mu\text{g}/\text{kg}$  en la subcapa del suelo. Estos

resultados son fundamentales para establecer medidas de protección ambiental en bosques de hayas a nivel internacional, nacional y regional.

Uno de las fuentes de dispersión de los COP sobre el medio acuático es a través de la deposición atmosférica seca y húmeda de estos contaminantes, las cuales se adhieren a las partículas del suelo en las escorrentías de agua o aguas residuales. Debido a su tendencia a absorber partículas suspendidas, los COP se acumulan en sedimentos acuáticos (marinos, fluviales, lacustres) como uno de sus principales sumideros (Drevenkar & Mendaš, 2023).

Los EDC en el medio marino terminan en la columna de agua, en organismos y adsorbidos en sedimentos poco profundos. Algunos EDC son susceptibles a la degradación, pero, no obstante, están perpetuamente presentes en los sistemas marinos debido a su reposición continua y, por lo tanto, se consideran pseudopersistentes. Otros son notablemente estables y resisten la degradación y, por lo tanto, se consideran persistentes (Roark, 2020).

Al hacer los estudios sobre los niveles actuales, el ciclo biogeoquímico y los efectos de los COP en los humedales costeros, se revela la existencia de COP en sus sedimentos, y estas podrían estar causando daños a la biota. A pesar de ello, los estudios toxicológicos sobre algunas plantas y microorganismos de humedales costeros mostraron una alta tolerancia a los contaminantes (Girones et al., 2021).

El deshielo del permafrost está influyendo en las concentraciones de COP en los ecosistemas de agua dulce. Los parámetros físicos del clima, incluidos los índices de oscilación climática, las precipitaciones, la salinidad del agua, la edad del hielo marino y la calidad del hielo marino, muestran asociaciones estadísticas con los COP (Borgå et al., 2022).

La contaminación del suelo con contaminantes orgánicos se ha visto acelerada por el desarrollo agrícola e industrial y plantea una gran amenaza para los ecosistemas globales y la salud humana (Xiang et al., 2022). En el agua y los sedimentos se acumulan compuestos más persistentes, como los HAP de alto peso molecular o el  $\beta$ -HCH (Prekrasna et al., 2022).

La contaminación del suelo con contaminantes orgánicos se ha visto acelerada por el desarrollo agrícola e industrial y plantea una gran amenaza para los ecosistemas globales y la salud humana (Xiang et al., 2022). A lo largo de las fases de producción, uso y disposición, los plásticos interactúan con los contaminantes orgánicos persistentes (COP), acumulándolos a través de diversos mecanismos, especialmente en los suelos. Este proceso conduce a una acumulación y coexistencia de estos elementos en el medio ambiente (Chakraborty et al., 2022).

Se determinaron concentraciones de COP durante dos años en el aire de 42 países de Asia, África, América Latina y el Pacífico mediante el uso de poliuretano, espumas instaladas en muestreadores pasivos. Los compuestos incluidos fueron bifenilos policlorados (PCB), pesticidas organoclorados

(OCP), difeniléteres polibromados (PBDE), un bifenilo polibromado y diastereómeros de hexabromociclododecano (HBCD). El DDT total y los PCB tuvieron las concentraciones más altas en aproximadamente el 50% de las muestras. Sin embargo, en la mayoría de los lugares se observa una tendencia decreciente para los PCB, DDT y la mayoría de los demás OCP (de Boer et al., 2023).

Corea del Sur es un punto crítico de contaminación por COP en la parte sur de Asia; Según los hallazgos, los HAP, PCB, BFR y PBDE contaminaron significativamente su atmósfera, sin embargo, la contaminación por COP en Corea del Sur tiende a disminuir en comparación con los niveles de contaminación en países vecinos como Japón y China (Rezania et al., 2022).

### **Estrategias Integradas para el control y mitigación de los Contaminantes Orgánicos Persistentes**

Entre otras técnicas convencionales, el proceso de adsorción ha demostrado ser un método más eficaz para eliminar los COP y cumplir en mayor medida con las normas de vertido. Los nanomateriales pueden adsorber eficazmente los COP de soluciones acuosas. Se logró una eficiencia de eliminación por adsorción >70% para la mayoría de los COP. Los principales mecanismos para la absorción de COP por los nanoadsorbentes incluyen la interacción electrostática, la interacción hidrofóbica (van der Waals,  $\pi$ - $\pi$  y donante-aceptor de electrones) y los enlaces de hidrógeno. El nanoadsorbente puede mantener una eliminación adsorptiva de > 90% de COP durante aproximadamente 3 ciclos y es reutilizable hasta por 10 ciclos (Ighalo et al., 2022).

Tian et al. (2024) destaca la importancia de las tecnologías de membranas eficientes para el tratamiento del agua. A pesar de décadas de investigación, los desafíos persistentes en la permeabilidad y selectividad de las membranas sintéticas han motivado la búsqueda de soluciones innovadoras. La investigación presenta una membrana de vermiculita funcionalizada con cobalto bidimensional (Co@VMT), que fusiona la filtración por membrana con la catálisis por nanoconfinamiento. Esta membrana demuestra una permeabilidad al agua de 122,4 L·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>·bar<sup>-1</sup>, superando considerablemente a las membranas convencionales. Estos resultados resaltan la necesidad urgente de enfoques innovadores para mejorar la eficiencia de las tecnologías de membranas en el tratamiento del agua.

Los nanocompuestos híbridos han surgido como nanoplataformas novedosas para la remediación de aguas residuales mediante las degradaciones fotocatalíticas de COP. Informan sobre la fabricación económica de nuevas nanoplataformas y sus nanocompuestos híbridos binarios y ternarios de nanotubos de carbono de paredes múltiples que utilizan un método sencillo de ultrasonificación. Los compuestos híbridos ternarios exhiben una excelente eficacia de degradación fotocatalítica (93,5%) para la rosa de bengala de las aguas residuales con iluminación UV. Debido a su



excelente rendimiento y robusta estabilidad, los compuestos ternarios diseñados poseen un enorme potencial para degradar contaminantes orgánicos diversificados para el tratamiento de aguas residuales (Phor et al., 2023).

La nanorremediación es una estrategia novedosa para la eliminación segura y a largo plazo de los COP, las últimas innovaciones y visiones futuras de los métodos de nanorremediación utilizadas para la descontaminación son la nanofotocatálisis y la nanodetección para la mitigación de los COP, sin embargo se continúa discutiendo las consecuencias ambientales de la nanotecnología (Fei et al., 2022). Los nanomateriales biofabricados y sus mecanismos subyacentes exhiben fenómenos únicos como contacto electrostático, interacciones de sitios tensioactivos y la catálisis foto y enzimática ayudan en la desintoxicación de diversos contaminantes orgánicos (Cherian & Jamal, 2023).

Los materiales a base de grafeno, incluido el grafeno, el óxido de grafeno, el óxido de grafeno reducido, los nanocompuestos de polímeros de grafeno y los híbridos metálicos de nanopartículas de grafeno, se han convertido en herramientas valiosas en tecnologías energéticas y de remediación ambiental (Singh et al., 2024).

En su estudio (Kumar et al., 2023) exploran el papel crucial de los microbios en la gestión de COP. Sugieren la biorremediación microbiana como una alternativa eficaz para el tratamiento de COP, abarcando compuestos como pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, bifenilos policlorados, productos farmacéuticos y de cuidado personal. Según los hallazgos, esta metodología no solo es más eficiente en comparación con otras opciones, sino también más rentable. El estudio enfatiza el papel vital desempeñado por las bacterias en la biotransformación y solubilización de los COP, lo que contribuye significativamente a la reducción de su toxicidad.

Los bifenilos policlorados (PCB) persisten y se bioacumulan en el entorno, provenientes tanto de fuentes urbanas e industriales primarias como de fuentes secundarias como suelos y océanos. Específicamente, los PCB con cloro medio exhiben suficiente volatilidad y persistencia para transportarse preferentemente hacia aguas más frías. En climas más cálidos, solo los congéneres con mayor contenido de cloro son lo bastante persistentes como para acumularse finalmente en peces. Nuestro análisis y modelado proporcionan un punto de partida para desarrollar sistemas más efectivos de seguimiento de las fuentes de contaminación por PCB observadas en el pescado (Selle et al., 2024).

Dat et al. (2024) lograron con éxito modificar el nitruro de carbono grafitico mediante el dopaje simultáneo de selenio y fluoruro. La investigación fotoquímica reveló que este co-dopaje mejoró las propiedades ópticas, incluyendo la reducción de la banda prohibida y la disminución de la tasa de recombinación de electrones y huecos. Este material modificado exhibió una notable mejora en la actividad fotocatalítica, aplicándose con éxito en la degradación de compuestos orgánicos

persistentes y la producción de peróxido de hidrógeno. Los resultados mostraron un significativo aumento en el porcentaje de degradación, con una eliminación del 99,96% para el azul de metileno y del 86,38 % para la tetraciclina. Además, demostró una alta compatibilidad y excelente reutilización durante cuatro ciclos.

La fitorremediación, empleando plantas y sus microbiomas asociados, ha emergido como una estrategia altamente prometedora para hacer frente a la contaminación ambiental. Las interacciones simbióticas entre plantas y microorganismos no solo refuerzan la eficacia de la fitorremediación, sino que también destacan el papel crucial de las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas. Estas bacterias, a menudo utilizadas para potenciar la remediación de contaminantes orgánicos en el suelo, desempeñan un papel fundamental en el éxito de este enfoque (Xiang et al., 2022).

La fitorremediación es una técnica que utiliza plantas y microorganismos rizosféricos asociados para estabilizar, degradar, transformar o eliminar xenobióticos de entornos contaminados. Según los estudios de Roe & MacFarlane (2022), se destaca que las plantas halofitas han demostrado ser prometedoras como especies de fitorremediación. Esto se debe a su aparente capacidad de tolerancia a la sal, los metales y los contaminantes orgánicos de manera simultánea.

La rizorremediación emerge como una tecnología prometedora para la eliminación de COP del suelo, con un enfoque especial en el benzo[a]pireno (BaP). Mediante sondeos de isótopos estables, se identificaron ocho microorganismos degradadores de BaP, destacando que la mayoría de ellos, como *Ilumatobacter* y *Singulisphaera*, fueron relacionados por primera vez con la biodegradación de BaP. Este estudio aporta información valiosa sobre los mecanismos de rizorremediación aplicados a COP en suelos contaminados con petróleo (Zhao et al., 2023).

En una investigación llevada a cabo por Xia & Lin (2022), se utilizó *Trichoderma reesei* portador del gen de lacasa de *Pycnoporus sanguineus* para llevar a cabo la biodegradación mediante enzimas en un proceso de fermentación en estado sólido. Se observó que esta metodología logró de manera eficaz la biorremediación de COP mediante el proceso de degradación, prescindiendo de la necesidad de añadir mediadores.

Según Hamdan & Salam (2023), se vuelve indispensable el desarrollo de técnicas avanzadas de remediación, como las pilas de combustible microbianas de sedimentos, para tratar los contaminantes presentes en sedimentos acuáticos. Esta técnica, diseñada específicamente para la generación de energía y la remediación de contaminantes orgánicos persistentes atrapados en los sedimentos, se basa en el principio de establecer una conexión eléctrica entre el sedimento anaeróbico y la columna de agua aeróbica suprayacente. Esto implica la utilización de un aceptor de electrones terminal inagotable, mejorando así la biodegradación de los contaminantes en los sedimentos acuáticos.

Las tecnologías sostenibles han experimentado avances recientes en la degradación microbiana de los perfluorocarburos (PFC) más detectados, como el ácido perfluorooctanoico (PFOA) y el ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS) presentes en cuerpos de agua. Una alternativa prometedora para la descontaminación radica en la susceptibilidad de estos compuestos a la biodegradación por microorganismos como *Acidimicrobium sp.* cepa A6, cepa YAB1 de *Pseudomonas parafulva*, cepa HJ4 de *Pseudomonas plecoglossicidia* 2.4-D y cepa HJ4 de *Pseudomonas aeruginosa* (Khumalo et al., 2022). Los tratamientos avanzados abarcan diversas tecnologías para mejorar la calidad de los efluentes de destilería posmetanado. Entre las opciones físicas, se destacan tecnologías de separación de membranas que hacen uso de grafeno, así como membranas de intercambio iónico y ultrafiltración. En cuanto a los métodos químicos, se incluyen las avanzadas técnicas de oxidación, la electrocoagulación y las tecnologías fotocatalíticas. Los tratamientos biológicos, como el tratamiento microbiano y enzimático, también desempeñan un papel crucial. Además, los métodos híbridos, como las pilas de combustible microbianas (MFC), los organismos genéticamente modificados (OGM) y las tecnologías de humedales artificiales, según lo señalado por (Tripathi et al., 2022), emergen como nuevos enfoques prometedores para abordar estos desafíos.

El estudio de Shih et al. (2024) examinaron la eficacia del carbón activado magnéticamente (MAC) en la recuperación de suelos contaminados con sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS). Se observó una recuperación óptima del MAC cuando las proporciones agua/suelo eran  $<0,07$  o  $>1$ . La adsorción de PFAS por el MAC se vio influenciada por el contenido orgánico del suelo y el pH. En suelos arenosos ácidos con bajo contenido orgánico, se lograron altas eliminaciones de PFAS después de tres meses de incubación con MAC. Sin embargo, la eficacia fue limitada en suelos con alto contenido de materia orgánica. Además, el estudio evaluó la aplicación del MAC para remediar suelos afectados por PFAS, con resultados variables. La combinación de MAC y la tecnología de tratamiento hidrotermal alcalino (HALT) demostró ser prometedora, ya que HALT pudo destruir y desfluorar PFAS adsorbidos en el MAC gastado, conservando sus propiedades magnéticas y capacidad de sorción. Esta estrategia, con una baja huella energética, podría ser una solución efectiva para la remediación de suelos contaminados con PFAS.

El biocarbón ha captado la atención, destacando por su proceso de fabricación, tratamiento y fácil eliminación. Este material, de menor costo y mayor eficiencia, presenta un potencial considerable en la remediación de contaminantes orgánicos. La aplicación de biocarbón en el suelo tiene un impacto significativo en procesos como la biodegradación, lixiviación y sorción/desorción de contaminantes orgánicos (Haider et al., 2022). En esa misma idea (Nguyen et al., 2023) indican que el biocarbón es un producto obtenido mediante la pirólisis de desechos orgánicos, es rico en carbono

y simultáneamente mejora la calidad del suelo contaminados.

En presencia de biocarbón, se observaron interacciones positivas más frecuentes en las redes de coexistencia de la comunidad bacteriana, junto con una mayor estabilidad de la red y un mayor número de taxones clave, incluidos potenciales degradadores. Estos hallazgos ofrecen una estrategia prometedora para la descontaminación de entornos complejos y la recuperación de las funciones ecológicas del suelo. Cabe destacar que el biocarbón desempeñó un papel crucial en la colonización de inoculantes, los procesos de ensamblaje comunitario y la multifunción del microbioma (Qi et al., 2023).

Según Prekrasna et al. (2022), Rivera-Pérez et al. (2022), las concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), bifenilos policlorados (PCB) y hexaclorociclohexano (HCH) pueden determinarse mediante la técnica de cromatografía de gases (GC) acoplada a espectrometría de masas (MS) y detectores de captura de electrones (ECD). Como detalla Ferreira et al. (2023) sobre la relación entre el sobrepeso/ obesidad materna y las concentraciones de COP en la leche humana lo llevó a cabo mediante cromatografía de gases y espectrometría de masas de triple cuadrupolo.

La detección no objetivo (NTS) basada en espectrometría de masas de alta resolución (HRMS) es un enfoque poderoso para la determinación simultánea de múltiples clases de contaminantes ambientales en muestras complejas de biota. El procedimiento NTS incluyó extracción con mezclas de solventes orgánicos, limpieza por cromatografía de permeación en gel de alta resolución de dos pasos, fraccionamiento, cromatografía de gases (GC), análisis HRMS en ionización electrónica (EI) e ionización química de iones negativos por captura de electrones (ECNI) (Rebryk & Haglund, 2022).

Las ciclodextrinas (CD) son adsorbentes de contaminantes, son económicos y respetuosos con el medio ambiente, además son relativamente fáciles de usar y se han descrito muchas técnicas para su funcionalización; podrían usarse para eliminar diferentes contaminantes mediante el uso de diversos métodos, por ejemplo, adsorción/extracción, lavado de suelos y procesos electrocinéticos/catalíticos (Wacławek et al., 2022).

Las estructuras orgánicas covalentes (COF) son materiales valiosos construidos mediante fuertes interacciones covalentes entre monómeros bloqueados. Estos materiales tienen un enorme potencial para eliminar y detectar contaminantes orgánicos persistentes debido a su alta capacidad de adsorción, gran superficie, estructura porosa y reciclabilidad (Paz et al., 2023).

La síntesis de microesferas porosas de polisulfona UiO-66@, mejoradas con puntos cuánticos de carbono, utilizando un innovador enfoque de plantilla de emulsión Pickering. Estas microesferas huecas exhiben una arquitectura distintiva, proporcionando una alta superficie específica. El material compuesto muestra una mejora significativa en la degradación fotocatalítica tanto del azul de metileno como de la tetraciclina bajo

irradiación de luz visible. Destacamos la excepcional reciclabilidad y estabilidad del material, subrayando su potencial como una solución sostenible y eficaz para la remediación de aguas residuales y la degradación de contaminantes orgánicos (Zhao et al., 2024). La fotocatalisis ha sido reconocida desde hace mucho tiempo como un enfoque prometedor para abordar la remediación ambiental. El grafeno y sus derivados se han utilizado ampliamente como soporte para semiconductores y fotocatalizadores, existe un progreso actual en el diseño y síntesis de estos, así como su uso en la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos (Ahmed & Mohamed, 2022).

Los estudios de Ding et al. (2024) proponen un enfoque sostenible para obtener un catalizador tipo Fenton a partir de desechos de tungsteno, denominado WC@Co recuperado. Este catalizador, obtenido mediante tratamiento térmico de lodos de tungsteno húmedos, demuestra una alta eficiencia en la activación del peroximonosulfato (PMS). La estructura única de WC@Co/PMS facilita la generación mejorada de especies reactivas, permitiendo una alta capacidad de oxidación y estabilidad en la degradación de contaminantes orgánicos persistentes. Esta estrategia logra con éxito el reciclaje de metales como el tungsteno y el cobalto para la remediación ambiental.

La exploración de catalizadores heterogéneos eficientes para la eliminación de contaminantes orgánicos persistentes es extremadamente atractiva. Li et al. (2023) diseñaron catalizadores mediante una ruta hidrotermal fácil para activar el peroximonosulfato (PMS) bajo irradiación con luz visible para la degradación de contaminantes orgánicos.

La eliminación de la contaminación en suelos afectados por lindano se logra a través de métodos como la deshidrocloración o dechloración, la hidrólisis alcalina, la hidrogenólisis, y la subsiguiente

carbonización, que son identificadas como las principales formas de degradación del lindano en el suelo (Zhang et al., 2023).

Para la remediación de suelos contaminados con plaguicidas mediante el uso del persulfato activado y adición de tensioactivos se convierte en una alternativa; Se utilizaron tensioactivos para mejorar la solubilización de los contaminantes y la oxidación del persulfato activado (PS) para degradar los contaminantes. Cuanto mayor sea la concentración del tensioactivo, mayor será la concentración de contaminantes orgánicos clorados en la emulsión (Checa-Fernández et al., 2023)

En el contexto de los COP, la técnica del ultrasonido (US) es una de las alternativas más prometedoras y económicamente viables para degradar contaminantes orgánicos. La técnica del ultrasonido como un proceso de oxidación avanzado (POA) para agotar contaminantes orgánicos de diversas clases en ambientes acuosos, esta técnica está en crecimiento para desarrollar todo el potencial de la ecografía como un POA útil (de Andrade et al., 2021).

Las consecuencias del depósito de contaminantes orgánicos persistentes, como los bifenilos policlorados (PCB), en los sedimentos de aguas profundas del océano son inciertas. Los PCB se encuentran en sedimentos tanto en áreas profundas como superficiales, y su presencia aumenta de manera exponencial. Por lo tanto, se plantea la sugerencia de que las fosas marinas no constituyen la forma adecuada de eliminación final para estos contaminantes orgánicos persistentes (Sobek et al., 2023).

Se examinaron investigaciones que exploran la influencia de la proteómica en la toxicología humana de los COP y se identificó una tendencia en aumento. Esto sugiere que el enfoque de la proteómica en el estudio de los COP ha ganado más interés, generando un mayor impulso hacia investigaciones contemporáneas (Guillotín & Delcourt, 2022).

## CONCLUSIONES

Los Compuestos Orgánicos Persistentes (COP) tienen un impacto significativo en la salud humana y el medio ambiente, provocando alteraciones endocrinas, enfermedades cardiovasculares, cáncer, y afectados ecosistemas frágiles como los humedales costeros, fuentes de agua, aire y suelos.

Las principales fuentes de contaminación por COP incluyen actividades agrícolas e industriales, la disposición inadecuada de residuos sólidos y la falta de tratamiento de aguas residuales.

Se han propuesto diversas tecnologías y enfoques para la mitigación y remediación de los COP, como el uso de nanomateriales, la aplicación de ultrasonido, la biorremediación, la biorremediación microbiana, la fitorremediación, la rizorremediación, la biodegradación enzimática, entre otros.

Existe un interés creciente en la proteómica en la toxicología humana de los COP, lo que sugiere un enfoque emergente en la investigación.

Se destaca la importancia de promover el intercambio de información, la sensibilización y la educación sobre los peligros de los COP, así como la búsqueda de

alternativas más económicas y ecológicas para contrarrestar sus impactos.

Para avanzar en nuestro entendimiento y abordar las complejidades de la contaminación por COP en las poblaciones de interés para la conservación, se sugieren áreas de investigación futura. En primer lugar, sería valioso investigar más a fondo la resistencia genética de las poblaciones a la exposición crónica a COP, lo que ayudaría a diseñar estrategias de conservación más eficaces. Además, resulta esencial ampliar la vigilancia de los niveles de COP en diversos hábitats, tanto acuáticos como terrestres, abordando la diversidad de especies y ecosistemas involucrados. Asimismo, la realización de estudios a largo plazo que evalúen el impacto de las medidas de gestión actuales en la reducción de la contaminación y su efecto en la salud de las poblaciones se vuelve fundamental para orientar las futuras estrategias de conservación.

En resumen, el documento aborda la problemática de los COP, sus impactos, fuentes de contaminación, tecnologías de mitigación, y la importancia de la sensibilización y educación sobre este tema.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2022). Recent progress in semiconductor/graphene photocatalysts: Synthesis, photocatalytic applications, and challenges. *RSC Advances*, 13(1), 421-439. Scopus. <https://doi.org/10.1039/d2ra07225d>
- Barrios-Rodríguez, R., Garde, C., Pérez-Carrascosa, F. M., Expósito, J., Peinado, F. M., Fernández Rodríguez, M., Requena, P., Salcedo-Bellido, I., & Arrebola, J. P. (2023). Associations of accumulated persistent organic pollutants in breast adipose tissue with the evolution of breast cancer after surgery. *Science of the Total Environment*, 897. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165373>
- Björvang, R. D., Hassan, J., Stefopoulou, M., Gemzell-Danielsson, K., Pedrelli, M., Kiviranta, H., Rantakokko, P., Ruokojärvi, P., Lindh, C. H., Acharya, G., & Damdimopoulou, P. (2021). Persistent organic pollutants and the size of ovarian reserve in reproductive-aged women. *Environment International*, 155, 106589. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106589>
- Borgå, K., McKinney, M. A., Routti, H., Fernie, K. J., Giebichenstein, J., Hallanger, I., & Muir, D. C. G. (2022). The influence of global climate change on accumulation and toxicity of persistent organic pollutants and chemicals of emerging concern in Arctic food webs. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 24(10), 1544-1576. Scopus. <https://doi.org/10.1039/d1em00469g>
- Buñay, J., Kossai, M., Damon-Soubeyrant, C., De Haze, A., Saru, J.-P., Trousson, A., de Joussineau, C., Bouchareb, E., Kocer, A., Vialat, M., Dallel, S., Degoul, F., Bost, F., Clavel, S., Penault-Llorca, F., Valli, M.-P., Guy, L., Matthews, J., Renaud, Y., ... Baron, S. (2023). Persistent organic pollutants promote aggressiveness in prostate cancer. *Oncogene*, 42(38), Article 38. <https://doi.org/10.1038/s41388-023-02788-2>
- Caba-Flores, M. D., Martínez-Valenzuela, C., Cárdenas-Tueme, M., & Camacho-Morales, A. (2023). Micro problems with macro consequences: Accumulation of persistent organic pollutants and microplastics in human breast milk and in human milk substitutes. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(42), 95139-95154. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29182-5>
- Chakraborty, P., Chandra, S., Dimmen, M. V., Hurley, R., Mohanty, S., Bharat, G. K., Steindal, E. H., Olsen, M., & Nizzetto, L. (2022). Interlinkage Between Persistent Organic Pollutants and Plastic in the Waste Management System of India: An Overview. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 109(6), 927-936. <https://doi.org/10.1007/s00128-022-03466-x>
- Checa-Fernández, A., Santos, A., Romero, A., & Domínguez, C. M. (2023). Remediation of real soils polluted with pesticides by activated persulfate and surfactant addition. *Journal of Water Process Engineering*, 53. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103829>
- Cherian, T., & Jamal, W. (2023). Use of green inspired nanomaterials for the biological remediation of pollutants. En *Bioremediation Technologies: For Wastewater and Sustainable Circular Bioeconomy* (pp. 275-292). Scopus. <https://doi.org/10.1515/9783111016825-015>
- Combi, T., Montone, R. C., Corada-Fernández, C., Lara-Martín, P. A., Gusmao, J. B., & de Oliveira Santos, M. C. (2022). Persistent organic pollutants and contaminants of emerging concern in spinner dolphins (*Stenella longirostris*) from the Western Atlantic Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 174, 113263. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.113263>
- Compuestos orgánicos persistentes y salud. (2022). *Revista Española Endocrinología Pediátrica*, 13 Suppl. <https://doi.org/10.3266/RevEspEndocrinolPediatri.pre2022.Apr.732>
- Dat, T. D., Minh, D. T. C., An, H., Hai, N. D., Nam, N. T. H., Lam, N. H., & Hieu, N. H. (2024). Synthesis of selenium and fluorine co-doped graphitic carbon nitride for photodegradation of toxic organic pollutants and hydrogen peroxide photoproduction. *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 21. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100920>
- de Andrade, F. V., Augusti, R., & de Lima, G. M. (2021). Ultrasound for the remediation of contaminated waters with persistent organic pollutants: A short review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105719. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2021.105719>
- de Boer, J., van Dijk, R., Abalos, M., & Abad, E. (2023). Persistent organic pollutants in air from Asia, Africa, Latin America, and the Pacific. *Chemosphere*, 324, 138271. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138271>
- Ding, T., Zhu, M., Yan, L., Liu, Z., Zhou, P., Shi, G., & Yue, D. (2024). Resourceful recovery of WC@Co for organic pollutants treatment via Fenton-like reaction. *Separation and Purification Technology*, 341. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126653>
- Ding, Y., Qin, S., Huang, H., Tang, X., Li, X., Zhang, Y., Chen, W., Nguyen, L.-P., & Qi, S. (2024). Selected pesticidal POPs and metabolites in the soil of five Vietnamese cities: Sources, fate, and health risk implications. *Environmental Pollution*, 342. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123043>
- Drevenkar, V., & Mendaš, G. (2023). Environmental Monitoring and Analysis of Persistent Organic Pollutants. *Toxics*, 11(6), 535. <https://doi.org/10.3390/toxics11060535>
- Esen, F., Cordova Del Aguila, D. A., & Sari, M. F. (2023). Air and soil concentrations of persistent organic pollutants in Bursa (Türkiye) and Yurimaguas (Peru): Air-soil exchange and gas-phase flux. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 16(11), 2239-2255. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11869-023-01400-6>
- Fei, L., Bilal, M., Qamar, S. A., Imran, H. M., Riasat, A., Jahangeer, M., Ghafoor, M., Ali, N., & Iqbal, H. M. N. (2022). Nano-remediation technologies for the sustainable mitigation of persistent organic pollutants. *Environmental Research*, 211, 113060. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113060>
- Ferreira, A. L. L., Freitas-Costa, N., da Silva Rosa Freire, S., Figueiredo, A. C. C., Padilha, M., Alves-Santos, N. H., & Kac, G. (2023). Association of pre-pregnancy maternal overweight/obesity and dietary intake during pregnancy with the concentrations of persistent organic pollutants in the human milk of women from Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(15), 44999-45014. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25308-x>
- Fiedler, H., Ábalos, M., Parera, J., Abad, E., Lohmann, N., Neugebauer, F., Rottler, H., & Horstmann, M. (2023). Dioxin-like POPs in national samples from global monitoring plan projects (2017–2019). *Chemosphere*, 325. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138386>
- Flores-Ramírez, R., Mendoza-Rivera, S. P., García-Grajales, J., Buenrostro-Silva, A., Sanjuan-Meza, E. U., Berumen-Rodríguez, A. A., & Espinosa-Reyes, G. (2024). Persistent organic pollutants in the olive ridley turtle (*Lepidochelys olivacea*) during the nesting stage in the "La Escobilla" Sanctuary, Oaxaca, Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(7), 10911-10919. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31833-0>
- Folarin, B. T., Poma, G., Yin, S., Altamirano, J. C., Oluseyi, T., Badru, G., & Covaci, A. (2024). Assessment of legacy and alternative halogenated organic pollutants in outdoor dust and soil from e-waste sites in Nigeria: Concentrations, patterns, and implications for human exposure. *Environmental Pollution*, 342. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123032>
- Giosuè, C., D'Agostino, F., Maniaci, G., Avellone, G., Sciortino, M., De Caro, V., Bonanno, A., Ponte, M., Alabiso, M., & Di Grigoli, A. (2022). Persistent Organic Pollutants and Fatty Acid Profile in a Typical Cheese from Extensive Farms: First Assessment of Human Exposure by Dietary Intake. *Animals: An Open Access Journal from MDPI*, 12(24), 3476. <https://doi.org/10.3390/ani12243476>
- Girones, L., Oliva, A. L., Negrin, V. L., Marcovecchio, J. E., & Arias, A. H. (2021). Persistent organic pollutants (POPs) in coastal wetlands: A review of their occurrences, toxic effects, and biogeochemical cycling. *Marine Pollution Bulletin*, 172, 112864. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112864>
- Guillotin, S., & Delcourt, N. (2022). Studying the Impact of Persistent Organic Pollutants Exposure on Human Health by Proteomic Analysis: A Systematic Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 14271. <https://doi.org/10.3390/ijms232214271>
- Haider, F. U., Wang, X., Zulfiqar, U., Farooq, M., Hussain, S., Mehmood, T., Naveed, M., Li, Y., Liqun, C., Saeed, Q., Ahmad, I., & Mustafa, A. (2022). Biochar application for remediation of organic toxic pollutants in contaminated soils: An update. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 248. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114322>
- Hakkarainen, K., Rantakokko, P., Koponen, J., Ruokojärvi, P., Korkalainen, M., Salomaa, V., Jula, A., Männistö, S., Perola, M., Lundqvist, A., Männistö, V., & Åberg, F. (2023). Persistent organic pollutants associate with liver disease in a Finnish general population sample. *Liver International: Official Journal of the International Association for the Study of the Liver*, 43(10), 2177-2185. <https://doi.org/10.1111/liv.15645>

- Hamdan, H. Z., & Salam, D. A. (2023). Sediment microbial fuel cells for bioremediation of pollutants and power generation: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(5), 2761-2787. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01625-y>
- Hoyeck, M. P., Matteo, G., MacFarlane, E. M., Perera, I., & Bruin, J. E. (2022). Persistent organic pollutants and  $\beta$ -cell toxicity: A comprehensive review. *American Journal of Physiology. Endocrinology and Metabolism*, 322(5), E383-E413. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00358.2021>
- Ighalo, J. O., Yap, P.-S., Iwuozor, K. O., Aniagor, C. O., Liu, T., Dulta, K., Iwuchukwu, F. U., & Rangabhashiyam, S. (2022). Adsorption of persistent organic pollutants (POPs) from the aqueous environment by nano-adsorbents: A review. *Environmental Research*, 212. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113123>
- Iribarne-Durán, L. M., Castellero-Rosales, I., Peinado, F. M., Artacho-Cordón, F., Molina-Molina, J. M., Medianero, E., Nicolás-Delgado, S. I., Sánchez-Pinzón, L., Núñez-Samudio, V., Vela-Soria, F., Olea, N., & Alvarado-González, N. E. (2024). Placental concentrations of xenoestrogenic organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls and assessment of their xenoestrogenicity in the PA-MAMI mother-child cohort. *Environmental Research*, 241, 117622. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117622>
- Khumalo, S. M., Bakare, B. F., & Rathilal, S. (2022). The Occurrence and Bioremediation of Emerging Polyfluorinated Compounds in Water Bodies: A Mini Review. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(23). Scopus. <https://doi.org/10.3390/app122312196>
- Krätschmer, K., Malisch, R., & Vetter, W. (2021). Chlorinated Paraffin Levels in Relation to Other Persistent Organic Pollutants Found in Pooled Human Milk Samples from Primiparous Mothers in 53 Countries. *Environmental Health Perspectives*, 129(8), 87004. <https://doi.org/10.1289/EHP7696>
- Kumar, M., Saggú, S. K., Pratibha, P., Singh, S. K., & Kumar, S. (2023). Exploring the role of microbes for the management of persistent organic pollutants. *Journal of Environmental Management*, 344. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118492>
- Li, S.-T., Chang, L., Wang, K., Xie, J., Chen, W., Huang, G.-B., & Yin, H. (2023). Z-scheme MnO<sub>2</sub>/Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> heterojunctions with efficient peroxymonosulfate activation for organic pollutant removal. *Chemosphere*, 341. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140117>
- Ling, J., Yan, Z., Liu, X., Men, S., Wei, C., Wang, Z., & Zheng, X. (2024). Health risk assessment and development of human health ambient water quality criteria for PCBs in Taihu Basin, China. *Science of the Total Environment*, 920. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170669>
- Lu, L., Chen, Y., Zou, S., Wang, Z., & Fan, L. (2024). The sources, diffusion, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of a typical underground river in South China. *Environmental Earth Sciences*, 83(3). Scopus. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11395-z>
- Luo, Y., Geng, N.-B., Chen, S.-S., Cheng, L., Zhang, H.-J., & Chen, J.-P. (2024). Metabolomic interference induced by short-chain chlorinated paraffins in human normal hepatic cells. *Se pu = Chinese journal of chromatography*, 42(2), 176-184. Scopus. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1123.2023.10037>
- Machado Torres, J. P., & Krykhtine, F. L. P. (2023). *Persistent Organic Pollutants (POPs) in fish biota of Guanabara Bay at Rio de Janeiro—Brazil*. 407. Scopus. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340704001>
- Massone, C. G., Dos Santos, A. A., Ferreira, P. G., & Carreira, R. da S. (2023). Persistent Organic Pollutants (POPs) in Sardine (*Sardinella brasiliensis*): Biomonitoring and Potential Human Health Effects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(3), 2036. <https://doi.org/10.3390/ijerph20032036>
- Matta, K., Lefebvre, T., Vigneau, E., Cariou, V., Marchand, P., Guitton, Y., Royer, A.-L., Ploteau, S., Le Bizec, B., Antignac, J.-P., & Cano-Sancho, G. (2022). Associations between persistent organic pollutants and endometriosis: A multiblock approach integrating metabolic and cytokine profiling. *Environment International*, 158, 106926. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106926>
- Monteiro, F. C., Carreira, R. D. S., Gramlich, K. C., de Pinho, J. V., Massone, C. G., Vianna, M., & Hauser-Davis, R. A. (2023). A systematic review on polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in elasmobranchs and associated human health risks. *Marine Pollution Bulletin*, 195. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115535>
- Muñoz-Arnanz, J., Cortés-Avizanda, A., Donázar-Aramendía, I., Arrondo, E., Ceballos, O., Colomer-Vidal, P., Jiménez, B., & Donázar, J. A. (2024). Levels of persistent organic pollutants (POPs) and the role of anthropic subsidies in the diet of avian scavengers tracked by stable isotopes. *Environmental Pollution*, 343, 123188. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123188>
- Negrete-Bolagay, D., Zamora-Ledezma, C., Chuya-Sumba, C., De Sousa, F. B., Whitehead, D., Alexis, F., & Guerrero, V. H. (2021). Persistent organic pollutants: The trade-off between potential risks and sustainable remediation methods. *Journal of Environmental Management*, 300, 113737. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113737>
- Nguyen, T.-B., Sherpa, K., Bui, X.-T., Nguyen, V.-T., Vo, T.-D.-H., Ho, H.-T.-T., Chen, C.-W., & Dong, C.-D. (2023). Biochar for soil remediation: A comprehensive review of current research on pollutant removal. *Environmental Pollution*, 337. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122571>
- Noren, D. P., Johnson, S., Boyd, D., Ylitalo, G. M., Lundin, J., McCormley, M., & Jensen, E. D. (2024). La dinámica de la transferencia de contaminantes orgánicos persistentes (COP) de las hembras del delfín mular (*Tursiops truncatus*) a sus terneros durante la lactancia. *Science of The Total Environment*, 907, 167888. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167888>
- Olisah, C., Rubidge, G., Human, L. R. D., & Adams, J. B. (2024). Investigation of alkyl, aryl, and chlorinated OPFRs in sediments from estuarine systems: Seasonal variation, spatial distribution and ecological risks assessment. *Environmental Research*, 250. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118465>
- Paz, R., Viltres, H., Gupta, N. K., Phung, V., Srinivasan, S., Rajabzadeh, A. R., & Leyva, C. (2023). Covalent organic frameworks as highly versatile materials for the removal and electrochemical sensing of organic pollutants. *Chemosphere*, 342. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140145>
- Phor, L., Ankush, Suman, Malik, J., Sharma, S., Sonia, Chaudhary, V., Rani, G. M., Kumar, A., Kumar, P., & Chahal, S. (2023). Magnetically separable NiZn-ferrite/CeO<sub>2</sub> nanorods/GNT ternary composites for photocatalytic removal of organic pollutants. *Journal of Molecular Liquids*, 390. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123064>
- Popli, S., Badgujar, P. C., Agarwal, T., Bhushan, B., & Mishra, V. (2022). Persistent organic pollutants in foods, their interplay with gut microbiota and resultant toxicity. *Science of the Total Environment*, 832. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155084>
- Prekrasna, I., Pavlovska, M., Oleinik, I., Dykyi, E., Slobodnik, J., Alygizakis, N., Solomenko, L., & Stoica, E. (2022). Bacterial communities of the Black Sea exhibit activity against persistent organic pollutants in the water column and sediments. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 234. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113367>
- Qadeer, A., Mubeen, S., Liu, M., Bekele, T. G., Ohoro, C. R., Adeniji, A. O., Alraih, A. M., Ajmal, Z., Alshammari, A. S., Al-Hadeethi, Y., Archundia, D., Yuan, S., Jiang, X., Wang, S., Li, X., & Sauv e, S. (2024). Global environmental and toxicological impacts of polybrominated diphenyl ethers versus organophosphate esters: A comparative analysis and regrettable substitution dilemma. *Journal of Hazardous Materials*, 466. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133543>
- Qi, X., Zhu, M., Yuan, Y., Dang, Z., & Yin, H. (2023). Bioremediation of PBDEs and heavy metals co-contaminated soil in e-waste dismantling sites by *Pseudomonas plecoglossicida* assisted with biochar. *Journal of Hazardous Materials*, 460. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132408>
- Rasmussen, S. L., Pertoldi, C., Roslev, P., Vorkamp, K., & Nielsen, J. L. (2024). A Review of the Occurrence of Metals and Xenobiotics in European Hedgehogs (*Erinaceus europaeus*). *Animals*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ani14020232>
- Rebryk, A., & Haglund, P. (2022). Comprehensive non-target screening of biomagnifying organic contaminants in the Baltic Sea food web. *Science of the Total Environment*, 851. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158280>
- Rezania, S., Talaiekhazani, A., Oryani, B., Cho, J., Barghi, M., Rupani, P. F., & Kamali, M. (2022). Occurrence of persistent organic pollutants (POPs) in the atmosphere of South Korea: A review. *Environmental Pollution*, 307. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119586>
- Rivera-Pérez, A., Romero-González, R., & Garrido Frenich, A. (2022). Persistent organic pollutants (PCBs and PCDD/Fs), PAHs, and plasticizers in spices, herbs, and tea—A review of chromatographic methods from the last decade (2010-2020).

- Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(19), 5224-5244. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1883546>
- Roark, A. M. C. (2020). Endocrine Disruptors and Marine Systems. In *Encyclopedia of the World's Biomes: Volumes 1-5* (Vols. 1-5, pp. V5-188). Scopus. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12426-1>
- Roe, R. A. L., & MacFarlane, G. R. (2022). The potential of saltmarsh halophytes for phytoremediation of metals and persistent organic pollutants: An Australian perspective. *Marine Pollution Bulletin*, 180, 113811. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113811>
- Rokni, L., Rezaei, M., Rafieizonooz, M., Khankhajeh, E., Mohammadi, A. A., & Rezaia, S. (2023). Effect of Persistent Organic Pollutants on Human Health in South Korea: A Review of the Reported Diseases. *Sustainability (Switzerland)*, 15(14). Scopus. <https://doi.org/10.3390/su151410851>
- Sardenne, F., Le Loc'h, F., Bodin, N., Mve-Beh, J.-H., Munaron, J.-M., Mbega, J.-D., Nzigou, A. R., Sadio, O., Budzinski, H., & Leboulanger, C. (2024). Persistent organic pollutants and trace metals in selected marine organisms from the Akanda National Park, Gabon (Central Africa). *Marine Pollution Bulletin*, 199, 116009. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.116009>
- Shih, C.-H., Kim, J., Yang, S.-H., Soker, O., Strathmann, T. J., & Chu, K.-H. (2024). Remediation of PFAS-impacted soils using magnetic activated carbon (MAC) and hydrothermal alkaline treatment (HALT). *Science of the Total Environment*, 912. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168931>
- Simukoko, C. K., Mwakalapa, E. B., Muzandu, K., Mutoloki, S., Evensen, Ø., Ræder, E. M., Müller, M. B., Polder, A., & Lyche, J. L. (2023). Persistent organic pollutants (POPs) and per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in liver from wild and farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) from Lake Kariba, Zambia: Levels and geographic trends and considerations in relation to environmental quality standards (EQSs). *Environmental Research*, 232. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116226>
- Singh, R., Samuel, M. S., Ravikumar, M., Ethiraj, S., & Kumar, M. (2024). Graphene materials in pollution trace detection and environmental improvement. *Environmental Research*, 243, 117830. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117830>
- Sobek, A., Abel, S., Sanei, H., Bonaglia, S., Li, Z., Horlitz, G., Rudra, A., Oguri, K., & Glud, R. N. (2023). Organic matter degradation causes enrichment of organic pollutants in hadal sediments. *Nature Communications*, 14(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37718-z>
- Štrbac, S., Kašanin-Grubin, M., Stojić, N., Pezo, L., Lončar, B., Tognetti, R., & Pucarević, M. (2024). Persistent organic pollutants in soil samples from mountain beech forests across Europe. *Plant and Soil*, 495(1-2), 313-339. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06329-4>
- Syed, S., Qasim, S., Ejaz, M., Sammar, Khan, N., Ali, H., Zaker, H., Hatzidaki, E., Mamoulakis, C., Tsatsakis, A., Shah, S. T. A., & Amir, S. (2023). Effects of Dichlorodiphenyltrichloroethane on the Female Reproductive Tract Leading to Infertility and Cancer: Systematic Search and Review. *Toxics*, 11(9). Scopus. <https://doi.org/10.3390/toxics11090725>
- Tian, M., Liu, Y., Zhang, S., Yu, C., Ostrikov, K. (Ken), & Zhang, Z. (2024). Overcoming the permeability-selectivity challenge in water purification using two-dimensional cobalt-functionalized vermiculite membrane. *Nature Communications*, 15(1), 391. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44699-0>
- Tripathi, S., Purchase, D., Chandra, R., Nadda, A. K., & Bhargava, P. C. (2022). Mitigation of hazards and risks of emerging pollutants through innovative treatment techniques of post methanated distillery effluent—A review. *Chemosphere*, 300. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134586>
- van der Schyff, V., Kwet Yive, N. S. C., Polder, A., Cole, N. C., Tatayah, V., Kylin, H., & Bouwman, H. (2021). Persistent organic pollutants in sea bird eggs from the Indian Ocean's Mascarene Basin. *The Science of the Total Environment*, 771, 145348. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145348>
- Waclawek, S., Krawczyk, K., Silvestri, D., Padil, V. V. T., Řezanka, M., Černík, M., & Jaroniec, M. (2022). Cyclodextrin-based strategies for removal of persistent organic pollutants. *Advances in Colloid and Interface Science*, 310. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2022.102807>
- Wagner, M., Andrew Lin, K.-Y., Oh, W.-D., & Lisak, G. (2021). Metal-organic frameworks for pesticidal persistent organic pollutants detection and adsorption—A mini review. *Journal of Hazardous Materials*, 413, 125325. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125325>
- Warren-Vega, W. M., Campos-Rodríguez, A., Zárate-Guzmán, A. I., & Romero-Cano, L. A. (2023). A Current Review of Water Pollutants in American Continent: Trends and Perspectives in Detection, Health Risks, and Treatment Technologies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4499. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054499>
- Xia, Y., & Lin, X. (2022). Efficient biodegradation of straw and persistent organic pollutants by a novel strategy using recombinant *Trichoderma reesei*. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(1). Scopus. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00581-9>
- Xiang, L., Harindintwali, J. D., Wang, F., Redmile-Gordon, M., Chang, S. X., Fu, Y., He, C., Muhoza, B., Brahushi, F., Bolan, N., Jiang, X., Ok, Y. S., Rinklebe, J., Schaeffer, A., Zhu, Y.-G., Tiedje, J. M., & Xing, B. (2022). Integrating Biochar, Bacteria, and Plants for Sustainable Remediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants. *Environmental Science and Technology*, 56(23), 16546-16566. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02976>
- Zhang, Z., Zhou, Z., Liu, X., Zhang, H., Xu, H., Lin, C., He, M., & Ouyang, W. (2023). Mechanochemical remediation of lindane-contaminated soils assisted by CaO: Performance, mechanism and overall assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 458. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131985>
- Zhao, R., Hu, F., Zhang, Y., Dong, B., Li, Z., Qu, W., Liu, C., Song, Z., Lu, P., Ji, D., Liu, W., & Yu, D. (2024). Carbon quantum dots/UiO-66@polysulfone porous microspheres fabricated via pickering emulsion template for pollutant removal. *Separation and Purification Technology*, 337. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126367>
- Zhao, X., Li, J., Zhang, D., Jiang, L., Wang, Y., Hu, B., Wang, S., Dai, Y., Luo, C., & Zhang, G. (2023). Unveiling the novel role of ryegrass rhizospheric metabolites in benzo[a]pyrene biodegradation. *Environment International*, 180. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108215>