






RESEARCH ARTICLE

Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) en el Medio Ambiente: Impacto, fuentes y estrategias de Mitigación

Castillo Reinoso Ana ¹   Guzmán Guaraca Adriana ²  López Pino María José ³ 
Guanga Casco Edwin ¹ 

¹ Facultad de Informática y Electrónica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

² Facultad de Recursos Naturales, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

³ Facultad de Salud Pública, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

 Correspondencia: ana.castillo@esepoch.edu.ec  +593 0987993687

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj63092>

Resumen: Los contaminantes orgánicos persistentes (COP) son contaminantes tóxicos ampliamente distribuidos que representan un riesgo tanto para los seres humanos como para la vida silvestre. Son compuestos tóxicos persistentes y pueden biomagnificarse con cada nivel de la cadena alimentaria. Esta investigación busca describir los impactos, fuentes y mecanismos de los COPs, mediante revisión sistemática de la literatura, utilizando palabras clave en inglés en bases de datos científicas que permitan obtener la información necesaria para dotar de recomendaciones de mejora. Los principales resultados se dividen en secciones, destacando la distribución de los COP en lugares remotos, su presencia en recursos de agua dulce y su impacto en la cadena alimentaria. Es importante abordar la contaminación por COP, proponiendo estrategias de mitigación como la biorremediación y la fitorremediación, resaltando su eficacia y menor impacto ambiental en comparación con métodos convencionales.

Palabras claves: contaminantes, impactos, COPs, riesgos, mitigación

Persistent Organic Pollutants (POPs) in the Environment: Impacts, Sources and Mitigation Strategies

Abstract: Persistent organic pollutants (POPs) are widely distributed toxic pollutants that pose a risk to both humans and wildlife. They are persistent toxic compounds and can biomagnify at every level of the food chain. This research aims to describe the impacts, sources and mechanisms of POPs through a systematic review of the literature, using keywords in scientific databases to obtain the information necessary to provide recommendations for improvement. The main results are divided into sections, highlighting the distribution of POPs in remote locations, their presence in freshwater resources and their impact on the food chain. It is important to address POPs pollution, proposing mitigation



Cita: Castillo Reinoso, A., Guzmán Guaraca, A., López Pino, M. J., & Guanga Casco, E. (2023). Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) en el Medio Ambiente: Impacto, fuentes y estrategias de Mitigación. Green World Journal, 6(3), 92. <https://doi.org/10.53313/gwj62092>

Received: 11/Oct/2023

Accepted: 26/Dec/2023

Published: 31/Dec/2023

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor-in-Chief / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Editor's note: CaMeRa remains neutral with respect to legal claims resulting from published content. The responsibility for published information rests entirely with the authors.



© 2023 CaMeRa license, Green World Journal. This article is an open access document distributed under the terms and conditions of the license. Creative Commons Attribution (CC BY). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

strategies such as bioremediation and phytoremediation, highlighting their effectiveness and lower environmental impact compared to conventional methods.

Keywords: pollutants, impacts, POPs, risks, mitigation

1. Introducción

Contaminantes orgánicos persistentes (COP), como pesticidas organoclorados, hexaclorobencenos, pentaclorobencenos (PeCB), DDE-DDT (1,37 µg/g), policlorobifenilos (PCB), policloronaftalenos (PCN) y policloroestirenos, dibenzodioxinas policloradas y dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF), las aminas aromáticas son residuos químicos industriales producidos de forma no intencionada. Los contaminantes orgánicos persistentes (COP) son uno de los principales contribuyentes a la contaminación ambiental. Los COP pueden llegar al medio ambiente a través de escorrentías agrícolas, efluentes industriales, escorrentías urbanas, sistemas de drenaje y deposiciones de la atmósfera y lixiviados de vertederos [1]. Debido a sus características únicas que incluyen; semivolatilidad, vidas medias largas, naturaleza recalcitrante, impacto toxicológico nocivo, transporte a larga distancia, capacidad de transformación y bioacumulación, se convirtieron en un tema de preocupación. A través del canal diversificado, deteriora el entorno, es decir, el suelo, el agua y el aire.

La presencia de COP en aguas residuales industriales conlleva una serie de efectos ecológicos y económicos negativos, tales como: provocar problemas de sabor y olor en los suministros de agua, formación de espuma y materiales flotantes, coloración del agua, inhibición de los procesos naturales de autopurificación, indeseados efectos sobre los organismos vivos. La aparición de PCDD y PCDF, PCN, PBDE y PCB en los sedimentos del suelo no solo reduce su fertilidad sino que también deteriora sus cualidades con el tiempo [2]. También plantean efectos negativos sobre la salud humana [3].

Se han firmado muchos tratados internacionales, incluido el Convenio de Estocolmo sobre COP, para controlar las emisiones de COP y reducir la contaminación ambiental. Pero el DDT todavía se utiliza en los países en desarrollo para controlar enfermedades como la malaria [4]. Varios países africanos, incluida Sudáfrica, todavía utilizan DDT con regularidad [5]. Aunque el uso y la producción de COP han estado prohibidos durante varias décadas, todavía hay COP como los HAP, los PBDE, los pesticidas organoclorados y los PCB en todas partes, incluso en zonas remotas [6]. La exposición a los COP se produce a través del aire, el agua y los alimentos [7] y, a pesar de las restricciones, estos químicos todavía están presentes en la vida silvestre y en los seres humanos en niveles preocupantes debido a sus características persistentes.

Las zonas urbanas e industriales muestran los niveles más altos de exposición a los COP [8], que pueden tener efectos perjudiciales para la vida silvestre y la salud humana. Esto puede ser particularmente grave para especies longevas que ocupan posiciones más altas dentro de las redes alimentarias debido a procesos de bioacumulación y biomagnificación [9].

Bajo esta perspectiva el objetivo de la presente investigación es describir los impactos, fuentes y mecanismos de los COPs en el ambiente, mediante revisión bibliográfica a fin de proponer recomendaciones de mejora.

2. Metodología.

Para abordar el objetivo de la investigación concerniente a los impactos, fuentes y estrategias de mitigación, mediante revisión sistemática de la literatura centrada en el análisis de diferentes documentos publicados en bases de datos científicos de alto impacto como Scopus y Web of

Science. Para ello se utilizó palabras claves en idioma inglés como “COPs” “Organic pollutants”, “POP pollution”, “Impacts of POPs”, “mitigation strategies”.

Una vez obtenidos los resultados de la búsqueda con sus respectivos filtros, se analizaron los títulos, términos relacionados y resúmenes de cada publicación con el propósito de seleccionar la información relevante para la temática. Se obtuvieron 26 documentos mediante análisis para cada temática de relevancia de acuerdo con los criterios de búsqueda.

Posteriormente se realizó un análisis de la información recopilada y se dividió en 3 secciones los resultados. La primera sección comprende la distribución de los COPs, la segunda describe los impactos de los COPs al ambiente y el ser humano y la tercera sección se enfoca en las fuentes por las cuales estos contaminantes ingresan al ambiente, finalmente la cuarta sección describe las estrategias de mitigación para el tratamiento de COPs. Después de analizar los resultados de la primera y segunda sección de la metodología se procedió a plantear recomendaciones de mejora con el propósito de mitigar impactos y afectaciones que generan dichos contaminantes.

3. Resultados

3.1. Distribución de los COPs

Los COP se encuentran en lugares remotos, lejos de su lugar principal de liberación. Los residuos de COP se liberan al aire, el agua y la tierra desde fuentes potenciales indias y extranjeras [10]. El vapor de los COP viaja en las corrientes de aire de la atmósfera. Este proceso se repite muchas veces y el efecto se llama efecto saltamontes. De esta manera, los COP se desplazan miles de kilómetros desde las latitudes más cálidas de la Tierra hasta las latitudes más frías del Polo Norte y el Polo Sur. Se presentan como contaminación en el aire y, después de enfriarse, se depositan en la tierra y el agua y se depositan en los sedimentos del agua y del suelo [11]. Una cantidad significativa de diferentes tipos de COP se liberan en el aire principalmente mediante procesos de volatilización y combustión y son favorables para el transporte a larga distancia en comparación con otros transportes lentos, como el de las corrientes oceánicas y los ríos [12].

En el escenario actual, todos los recursos de agua dulce están contaminados por COP. Estos contaminantes entran en el ciclo del agua a través de la infiltración y después de interactuar con el agua superficial, finalmente llegan a las aguas subterráneas [13].

Los COP, en particular los pesticidas, ingresan al suelo cuando se utilizan con fines agrícolas. También se escurre del suelo sin un tratamiento adecuado de las plantas o por su derrame durante la propagación. Hay varios factores que afectan la indulgencia de pesticidas dañinos en el suelo. Esto incluye las condiciones climáticas, las propiedades del suelo, la naturaleza del químico, el método de cultivo y el patrón de riego [13]. Los pesticidas permanecen en el suelo, llegan a las aguas subterráneas y contaminan el agua y, en última instancia, afectan a la población de esa región. Sin embargo, los pesticidas son motivo de gran preocupación ya que siguen siendo insolubles en agua y persisten en el suelo [14]

3.2. Impactos de los COPs

Los COP son tóxicos debido a su naturaleza bioacumulativa, lipófila y persistente. Los seres humanos están expuestos principalmente a estos congéneres tóxicos a través de la dieta, los accidentes, la ocupación y el medio ambiente (tanto exterior como interior). Tanto la población humana como la vida silvestre están sujetas a una exposición aguda (exposición a corto plazo a altas concentraciones) y crónica (exposición a largo plazo a concentraciones más bajas) a COP durante su vida, causando diversos problemas de salud y enfermedades [15].

Los COP sufren una biomagnificación y se encuentran en mayor concentración en los niveles superiores de la cadena alimentaria [13]. La persona que consume una dieta no vegetariana se ve muy afectada por los COP. No sólo los humanos sino también los animales se ven muy afectados por estos productos químicos. Con frecuencia se ha observado que diversas enfermedades, anomalías y disminución del número de animales están asociados con su exposición a estos contaminantes tóxicos. Los peces, aves y mamíferos mostraron defectos de nacimiento y anomalías de comportamiento en presencia de COP. La exposición a COP también produce complicaciones gastroenterológicas y dermatológicas [16].

Asimismo, los contaminantes orgánicos persistentes interfieren con el sistema reproductivo y reducen la supervivencia de aves, mamíferos y peces a través de alteraciones endocrinas y efectos de supresión inmune [17]. Por ejemplo, se observó falla reproductiva y adelgazamiento de la cáscara de los huevos debido principalmente a la exposición al DDT y al DDE *en el águila de cola blanca (Haliaeetus albicilla)*, lo que llevó al casi colapso de la población sueca en la segunda mitad del siglo XX [18]

3.3. Fuentes

Antes de la década de 1950, los COP se desarrollaban intencionalmente en grandes cantidades con fines industriales y agrícolas. Cuando terminó la Segunda Guerra Mundial, los científicos comenzaron a notar que cierto grupo de sustancias químicas persiste en el medio ambiente durante mucho tiempo. El libro de Rachel Carson "Primavera silenciosa" de 1962 fue un hito y dio lugar al movimiento ecologista y a la sensibilización hacia los COP. Después de dos décadas en 1999, el mundo está traumatizado por el incidente de la crisis de las dioxinas en Bélgica. Esto promueve una gran atención mundial a la contaminación por compuestos similares a las dioxinas. Se han firmado muchos tratados internacionales, incluido el Convenio de Estocolmo del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) sobre COP, para controlar las emisiones de COP y reducir la contaminación ambiental [19].

En 2001, se adoptó el Convenio de Estocolmo sobre COP para regular el uso de 12 sustancias químicas notorias (conocidas como COP heredadas), entre ellas dos sustancias químicas industriales (bifenilos policlorados y hexaclorobenceno); dos subproductos no deseados, dioxinas y furanos y ocho pesticidas (aldrín, clordano, DDT, dieldrín, endrín, heptacloro, mirex y toxafeno). Los hexaclorociclohexanos (HCH), el ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS) y sus sales, y los éteres de difenilo polibromados (PBDE), incluido el deca-BDE, fueron nominados como COP adicionales en 2009 [20]. En 2013, los hexabromociclododecanos (HBCD) se consideraron COP legados en virtud del Convenio de Estocolmo. Además, los naftalenos policlorados (PCN) y las parafinas cloradas de cadena corta (PCCC) fueron nominados recientemente como COP emergentes en 2015 y 2017, respectivamente. Hasta ahora, el Convenio de Estocolmo ha clasificado 27 moléculas orgánicas apolares como COP [19].

Los COP se dividen en tres subgrupos principales: i) Plaguicidas organoclorados que se han utilizado deliberadamente en la agricultura, por ejemplo, endosulfán, lindano, diclorodifeniltricloroetano (DDT), dieldrín, clordano, pentaclorofenol (PCP), diclorodifenildicloroetano (DDE), dicofol, heptacloro, mirex, etc. ii) Productos químicos producidos industrialmente, incluidos naftalenos policlorados (PCN), bifenilos policlorados (PCB), hexaclorobencenos (HCB), éteres de difenilo polibromados (PBDE) y compuestos poliperfluorados (PFC), bifenilos polibromados (PBB). . iii) Los subproductos industriales producidos no intencionalmente incluyen los HCB, las dibenzo-p-dioxinas policloradas/dibenzofuranos policlorados (PCDD/PCDF) y los PCN [21].

Las fuentes industriales importantes de COP son las industrias química, textil y de tintes, de pulpa y papel, petroquímica, metalúrgica, imprenta, cloro-álcalina, herbicida y de producción de

cemento etc. (Tabla 1) [22]. Los pesticidas COP llegan al medio ambiente durante el transporte, el almacenamiento, la eliminación y el uso agrícola. Los PCB se utilizan generalmente como aislante en transformadores y condensadores, fluidos de intercambio de calor, como aditivo en papel autocopiativo y plásticos que se liberan al medio ambiente por evaporación y derrames. Muchos procesos industriales (térmicos (combustión de combustibles e incineración de residuos, industria ferrosa, producción de coque y aluminio, transporte por carretera, síntesis química de sustancias cloradas) liberan COP como HAP, dioxinas/furanos y hexaclorobenceno como subproductos que se emiten directamente en el aire [23].

Tabla 1. Fuentes industriales de COP.

Industrias	COP producidos
Industria química	PCDD y PCDF
Industria textil y de tintes.	PCDD, PCDF, aminas aromáticas, dioxazina, antraquinona, pentaclorofenol, cloranilo, ftalocianina, compuestos fenólicos.
Industria de pulpa y papel	PCDD, PCDF, PCB, PCN, policloroantracenos, tetracloroazo y azoxibencenos, taninos, clorofenoles, biocidas, ácidos grasos, ácidos resínicos y cloroligina.
Industria petroquímica	HAP
Industria de la impresión	PCB, naftaleno, BAP, pireno, antraceno,
Tratamiento de lixiviados de vertedero	HAP, PCDD, PCDF, dibenzotiofenos policlorados (PCDT) y éteres de difenilo polibromados (PBDE)
Industria clorocalina	PCDD, PCDF, PCB y PCN
Industria culinaria	PCDD, PCDF, PCB, HCB y pentaclorobenceno (PeCB)
Industria de herbicidas	PCDD, PCDF como dibenzofurano o 2-clorodibenzofurano, <i>acenafteno</i> , fenantreno, flúor, 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (2,3,7,8-TCDD),
Industria del cemento	PCDD, PCDF
Industria farmacéutica	HAP como <i>acenafteno</i> , <i>fluoranteno</i> ,
Industria de pigmentos	HAP como <i>acenafteno</i> , antraceno, fluoreno, pireno,

3.4. Estrategias de mitigación.

Remediar sitios contaminados con COP es una de las preocupaciones que prevalecen desde hace décadas y para ello se utilizan diversas tecnologías. Las tecnologías de remediación que se utilizan para sitios contaminados con COP incluyen biorremediación, remediación térmica, degradación fotocatalítica, dechloración con catalizadores metálicos e inhibidores de dioxinas como compuestos de nitrógeno y azufre [24]. Los métodos físicos y químicos para tratar los sitios contaminados con dioxinas son bastante costosos en comparación con la biodegradación y la biorremediación. El método de tratamiento biológico ha ganado atención y se ha vuelto popular debido a su mínimo impacto ambiental y su naturaleza económica [25].

Según la ubicación del proyecto de tratamiento y remediación de COP, las tecnologías de remediación se clasifican en remediación ex situ e in situ. Las tecnologías in situ son más económicas ya que no necesitan transferencias a larga distancia y son fáciles de operar en el sitio contaminado, mientras que las ex situ, como sugiere el nombre, requieren la transferencia de contaminantes a un sitio específico donde se instala una planta de tratamiento [26]. Las técnicas de remediación ex situ son bastante costosas ya que necesitamos extraer toda el agua subterránea contaminada o excavar todo el suelo contaminado, para lo cual necesitamos maquinaria y mano de obra adicionales en comparación con las opciones de tratamiento in situ. Pero también tiene su propia ventaja de que la condición hidrogeológica del sitio no afecta el proceso de tratamiento y es altamente efectivo con bajo riesgo ambiental [27].

El método comúnmente utilizado para el tratamiento de COP es la biorremediación. Es un método eficiente y rentable que utiliza la capacidad de degradación de los COP de los microorganismos [28]. Los diversos grupos de microorganismos están presentes en todas partes y pueden trabajar incluso en condiciones extremas. Tienen la capacidad de degradar estos contaminantes mediante un mecanismo catalítico eficiente. Aunque la biorremediación gana mucho interés en la comunidad científica, también tiene algunas limitaciones, como la baja biodisponibilidad de los contaminantes, la falta de enzimas para un contaminante específico, la toxicidad de los contaminantes para los microbios útiles y la falta de valores de prueba de eficacia para la biorremediación [29].

Otro método de remediación de COP ampliamente utilizado es el proceso de coagulación y floculación [1]. Este método se aplica a aguas residuales contaminadas con COP. Esto es muy eficaz para eliminar contaminantes orgánicos. El coagulante comúnmente utilizado en este proceso es el sulfato de aluminio (alumbre), ya que es fácilmente disponible y rentable. La adición de coagulante y el ajuste del pH conducen a la desestabilización de las partículas coloidales, seguida de la floculación [1].

La fitorremediación también está ganando atención para la remediación in situ de suelos contaminados con COP [30]. Las plantas diseñadas para la remediación de COP han dado resultados muy prometedores y han demostrado ser una solución al problema más respetuosa con el medio ambiente [31]. Este método es adecuado para sitios muy grandes donde es problemático tratar con métodos ex situ. Las ventajas de utilizar plantas para el tratamiento son: (1) ayuda a reducir la pérdida de la capa superior del suelo; (2) ecológica y estéticamente deseable; (3) La diversidad de plantas aumenta la cantidad de microbios y la diversidad; y (4) inducir microbios y metabolizar xenobióticos con ellos. Como todas las técnicas, las limitaciones de la fitorremediación requieren mucho tiempo, es decir, las plantas necesitan tiempo para crecer y establecerse; Costo adicional asociado con la plantación, cultivo y monitoreo de contaminantes [30].

4. Conclusión

La investigación enfatiza la gravedad de la contaminación por Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) y sus efectos multidimensionales en el medio ambiente y la salud humana. A pesar de los esfuerzos internacionales, la presencia persistente de COP como el DDT en regiones específicas, como algunos países africanos, sugiere desafíos significativos en la implementación efectiva de los tratados existentes. Esto plantea la cuestión de la necesidad de estrategias más rigurosas y medidas de aplicación para abordar la persistencia de ciertos COP y garantizar su eliminación global.

La revisión bibliográfica destaca la ubicuidad de los COP, su transporte a larga distancia y su presencia en diferentes compartimentos ambientales, desde el aire hasta el suelo y el agua. Este fenómeno subraya la complejidad de abordar la contaminación por COP, ya que estos compuestos pueden afectar múltiples aspectos del entorno. La contaminación en el agua, en particular, plantea riesgos directos para la biodiversidad y la salud humana, dado que los COP ingresan al ciclo del agua, afectando tanto las aguas superficiales como las subterráneas.

La exposición crónica y aguda a COP, a través de la dieta y otros medios, destaca la amenaza continua para la salud humana y la vida silvestre. La biomagnificación y biomagnificación de estos contaminantes, especialmente en especies de nivel trófico superior, señalan la necesidad de medidas urgentes. La relación entre la exposición a COP y diversas enfermedades en humanos y animales, desde enfermedades gastrointestinales hasta problemas neurológicos, pone de

manifiesto la urgencia de abordar estos problemas en términos de salud pública y conservación de la biodiversidad.

Las estrategias de mitigación, como la biorremediación y la fitorremediación, ofrecen enfoques prometedores para combatir la contaminación por COP. Sin embargo, se destaca la necesidad de equilibrar la eficacia con la viabilidad económica y ambiental, así como la consideración de limitaciones como la toxicidad de los contaminantes para los microorganismos útiles. Además, la comparación entre las tecnologías de remediación in situ y ex situ resalta la importancia de adaptar las estrategias según la ubicación y las condiciones específicas del sitio.

Financiamiento: La investigación no fue financiada por ninguna entidad.

Conflictos de interés: Los autores declaran la no existencia de conflicto de interés alguno.

Referencias

1. Pariatamby, A.; Kee, Y.L. Persistent Organic Pollutants Management and Remediation. *Procedia Environ. Sci.* **2016**, *31*, 842–848.
2. Odabasi, M.; Ozgunerge Falay, E.; Tuna, G.; Altioek, H.; Kara, M.; Dumanoglu, Y.; Bayram, A.; Tolunay, D.; Elbir, T. Biomonitoring the Spatial and Historical Variations of Persistent Organic Pollutants (POPs) in an Industrial Region. *Environ. Sci. Technol.* **2015**, *49*, 2105–2114.
3. Donato, F.; Moneda, M.; Portolani, N.; Rossini, A.; Molfino, S.; Ministrini, S.; Contessi, G.B.; Pesenti, S.; De Palma, G.; Gaia, A. Polychlorinated Biphenyls and Risk of Hepatocellular Carcinoma in the Population Living in a Highly Polluted Area in Italy. *Sci. Rep.* **2021**, *11*, 3064.
4. Thompson, L.A.; Darwish, W.S.; Ikenaka, Y.; Nakayama, S.M.M.; Mizukawa, H.; Ishizuka, M. Organochlorine Pesticide Contamination of Foods in Africa: Incidence and Public Health Significance. *J. Vet. Med. Sci.* **2017**, *79*, 751–764.
5. Govaerts, A.; Verhaert, V.; Covaci, A.; Jaspers, V.L.B.; Berg, O.K.; Addo-Bediako, A.; Jooste, A.; Bervoets, L. Distribution and Bioaccumulation of POPs and Mercury in the Ga-Selati River (South Africa) and the Rivers Gudbrandsdalslågen and Rena (Norway). *Environ. Int.* **2018**, *121*, 1319–1330.
6. Rigét, F.; Vorkamp, K.; Bossi, R.; Sonne, C.; Letcher, R.J.; Dietz, R. Twenty Years of Monitoring of Persistent Organic Pollutants in Greenland Biota. A Review. *Environ. Pollut.* **2016**, *217*, 114–123.
7. Schwarzenbach, R.P.; Gschwend, P.M.; Imboden, D.M. *Environmental Organic Chemistry*; John Wiley & Sons, 2016; ISBN 1118767047.
8. Sun, P.; Basu, I.; Blanchard, P.; Brice, K.A.; Hites, R.A. Temporal and Spatial Trends of Atmospheric Polychlorinated Biphenyl Concentrations near the Great Lakes. *Environ. Sci. Technol.* **2007**, *41*, 1131–1136.
9. Henny, C.J.; Kaiser, J.L.; Grove, R.A.; Johnson, B.L.; Letcher, R.J. Polybrominated Diphenyl Ether Flame Retardants in Eggs May Reduce Reproductive Success of Ospreys in Oregon and Washington, USA. *Ecotoxicology* **2009**, *18*, 802–813.
10. Avino, P.; Russo, M. V A Comprehensive Review of Analytical Methods for Determining Persistent Organic Pollutants in Air, Soil, Water and Waste. *Curr. Org. Chem.* **2018**, *22*, 939–953.
11. Windsor, F.M.; Pereira, M.G.; Tyler, C.R.; Ormerod, S.J. Biological Traits and the Transfer of Persistent Organic Pollutants through River Food Webs. *Environ. Sci. Technol.* **2019**, *53*, 13246–13256.
12. Bogdal, C.; Scheringer, M.; Abad, E.; Abalos, M.; Van Bavel, B.; Hagberg, J.; Fiedler, H.

- Worldwide Distribution of Persistent Organic Pollutants in Air, Including Results of Air Monitoring by Passive Air Sampling in Five Continents. *TrAC Trends Anal. Chem.* **2013**, *46*, 150–161.
13. Devi, P.I.; Thomas, J.; Raju, R.K. Pesticide Consumption in India: A Spatiotemporal Analysis *§. Agric. Econ. Res. Rev.* **2017**, *30*, 163–172.
 14. Devi, N.L.; Chakraborty, P.; Shihua, Q.; Zhang, G. Selected Organochlorine Pesticides (OCPs) in Surface Soils from Three Major States from the Northeastern Part of India. *Environ. Monit. Assess.* **2013**, *185*, 6667–6676.
 15. Zacharia, J.T. Degradation Pathways of Persistent Organic Pollutants (POPs) in the Environment. *Persistent Org. Pollut.* **2019**, 17–30.
 16. Ahmed, H.; Sharif, A.; Bakht, S.; Javed, F.; Hassan, W. Persistent Organic Pollutants and Neurological Disorders: From Exposure to Preventive Interventions. In *Environmental Contaminants and Neurological Disorders*; Springer, 2021; pp. 231–247.
 17. Dietz, R.; Letcher, R.J.; Desforges, J.-P.; Eulaers, I.; Sonne, C.; Wilson, S.; Andersen-Ranberg, E.; Basu, N.; Barst, B.D.; Bustnes, J.O. Current State of Knowledge on Biological Effects from Contaminants on Arctic Wildlife and Fish. *Sci. Total Environ.* **2019**, *696*, 133792.
 18. Jiménez Montalbán, P.J. Contaminantes Ambientales Persistentes y Su Influencia Sobre El Éxito Reproductor En Una Colonia de Gaviota de Audouin (*Ichtyaetus Audouinii*) En El Mediterráneo Occidental. *Proy. Investig.* **2018**.
 19. García Hernández, J.A. Estado Del Arte de Los Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) En Colombia Entre Los Años 2007–2017.
 20. Ramírez, M.A.Y.; García, A.G.; Barrera, J. El Convenio de Estocolmo Sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes y Sus Implicaciones Para México. *Gac. Ecológica* **2003**, 7–28.
 21. Madrigal, P.N.; Valor, I. El Uso Agrícola de Los Lodos de EDAR y Los COPs: Evaluación Del Destino Medioambiental de Los COPs Existentes En Los Lodos. *Ing. química* **2008**, 188–196.
 22. Astoviza, M.J. Evaluación de La Distribución de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) En Aire En La Zona de La Cuenca Del Plata Mediante Muestreadores Pasivos Artificiales 2014.
 23. Brusseau, M.L.; Artiola, J.F. Chapter 12 – Chemical Contaminants. In; Brusseau, M.L., Pepper, I.L., Gerba, C.P.B.T.–E. and P.S. (Third E., Eds.; Academic Press, 2019; pp. 175–190 ISBN 978-0-12-814719-1.
 24. Khasawneh, O.F.S.; Palaniandy, P. Removal of Organic Pollutants from Water by Fe₂O₃/TiO₂ Based Photocatalytic Degradation: A Review. *Environ. Technol. Innov.* **2021**, *21*, 101230.
 25. Jeon, J.-R.; Murugesan, K.; Baldrian, P.; Schmidt, S.; Chang, Y.-S. Aerobic Bacterial Catabolism of Persistent Organic Pollutants—Potential Impact of Biotic and Abiotic Interaction. *Curr. Opin. Biotechnol.* **2016**, *38*, 71–78.
 26. Camacho-Jiménez, L.; González-Ruiz, R.; Yepiz-Plascencia, G. Persistent Organic Pollutants (POPs) in Marine Crustaceans: Bioaccumulation, Physiological and Cellular Responses. *Mar. Environ. Res.* **2023**, *192*, 106184, doi:<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106184>.
 27. Vakarelska, E.; Nedyalkova, M.; Vasighi, M.; Simeonov, V. Persistent Organic Pollutants (POPs) – QSPR Classification Models by Means of Machine Learning Strategies. *Chemosphere* **2022**, *287*, 132189, doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132189>.

28. Boudh, S.; Singh, J.S.; Chaturvedi, P. Microbial Resources Mediated Bioremediation of Persistent Organic Pollutants. In *new and future developments in microbial biotechnology and bioengineering*; Elsevier, 2019; pp. 283–294.
29. Bharagava, R.N.; Saxena, G.; Mulla, S.I. Introduction to Industrial Wastes Containing Organic and Inorganic Pollutants and Bioremediation Approaches for Environmental Management. *Bioremediation Ind. Waste Environ. Saf. Vol. I Ind. Waste Its Manag.* **2020**, 1–18.
30. Tarla, D.N.; Erickson, L.E.; Hettiarachchi, G.M.; Amadi, S.I.; Galkaduwa, M.; Davis, L.C.; Nurzhanova, A.; Pidlisnyuk, V. Phytoremediation and Bioremediation of Pesticide–Contaminated Soil. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 1217.
31. Rylott, E.L.; Johnston, E.J.; Bruce, N.C. Harnessing Microbial Gene Pools to Remediate Persistent Organic Pollutants Using Genetically Modified Plants—a Viable Technology? *J. Exp. Bot.* **2015**, *66*, 6519–6533.



© 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>