

## Review [Revisión]



## USOS DEL CANNABIS EN LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS †

### [USES OF CANNABIS IN THE BIOREMEDIATION OF SOILS CONTAMINATED WITH HEAVY METALS]

Manuela Cáceres-Cáceres<sup>1</sup>, Juan David Daza-Burgos<sup>1</sup>,  
José David Serna-Morales<sup>1</sup> and Leonardo Alberto Ríos-Osorio<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Antioquia, Escuela de Microbiología, Calle 67 # 53 – 108, Bloque 6, oficina 111, Medellín, Colombia, C.P. 050010. Emails: [manuela.caceres@udea.edu.co](mailto:manuela.caceres@udea.edu.co), [david.daza@udea.edu.co](mailto:david.daza@udea.edu.co), [josed.serna@udea.edu.co](mailto:josed.serna@udea.edu.co).

<sup>2</sup>Universidad de Antioquia, Escuela de Microbiología, Grupo de Investigación Salud y Sostenibilidad, Calle 67 # 53 – 108, Bloque 5, oficina 238, Medellín, Colombia, C.P. 050010. Email: [leonardo.rios@udea.edu.co](mailto:leonardo.rios@udea.edu.co)

\*Corresponding author

#### SUMMARY

**Background.** Bioremediation of soils contaminated with heavy metals is a vital area of research given the growing concern about environmental contamination. However, understanding of the ability of *Cannabis sativa* for this task has been limited. **Objective.** undertake a thorough analysis of the existing scientific literature to assess the role of Cannabis systematically and critically in the bioremediation of soils contaminated with heavy metals, emphasizing its effectiveness and potential applicability in restoring ecosystems affected by pollution. **Methodology.** A systematic review of the scientific literature was carried out, consulting databases such as ScienceDirect, Scopus, and SpringerLink. Relevant studies investigating the ability of *Cannabis sativa* to accumulate heavy metals and the factors affecting this process were selected and analyzed. **Results.** It was found that *Cannabis sativa*, especially the sativa variety and subvarieties such as Henola and Bialobrzeskie, exhibit a notable hyperaccumulation capacity of heavy metals, especially in roots and stems. Factors such as soil type, metal concentration, and weather conditions affect its effectiveness. **Implications.** These findings have important implications for agriculture and environmental management, offering a sustainable and less invasive alternative for the remediation of contaminated soils. However, the need to balance bioremediation with agricultural production and to properly manage the resulting waste is highlighted. **Conclusions.** *Cannabis sativa* shows promising potential in the bioremediation of soils contaminated with heavy metals. Its hyperaccumulating capacity and the factors that influence its effectiveness offer significant opportunities for environmental restoration, remediation and sustainable resource management. The importance of future research is emphasized to maximize its effectiveness and minimize its impact on agricultural production.

**Key words:** *Cannabis sativa*; Bioremediation; Heavy metals; Phytoremediation; Metal accumulation; Contaminated soils.

#### RESUMEN

**Antecedentes.** La biorremediación de suelos contaminados con metales pesados es un área de investigación vital dada la preocupación creciente por la contaminación ambiental. Sin embargo, la comprensión de la capacidad de *Cannabis sativa* para esta tarea ha sido limitada. **Objetivo.** Realizar un análisis exhaustivo de la literatura científica disponible para evaluar de manera sistemática y crítica el papel del Cannabis en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados, destacando su eficacia y potencial aplicabilidad en la restauración de ecosistemas afectados por la contaminación. **Metodología.** Se realizó una revisión sistemática de la literatura científica, consultando bases de datos como ScienceDirect, Scopus y SpringerLink. Se seleccionaron y analizaron estudios relevantes que investigaran la capacidad de *Cannabis sativa* para acumular metales pesados y los factores que afectan este proceso. **Resultados.** Se encontró que *Cannabis sativa*, especialmente la variedad sativa y subvariedades como Henola y Bialobrzeskie, exhibe una notable capacidad hiperacumuladora de metales pesados,

† Submitted June 17, 2024 – Accepted November 6, 2024. <http://doi.org/10.56369/tsaes.5693>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = Manuela Cáceres-Cáceres: <https://orcid.org/0009-0000-8921-7078>; Juan David Daza -Burgos: <http://orcid.org/0009-0008-8823-1108>; José David Serna-Morales: <http://orcid.org/0009-0008-9120-7109>; Leonardo Alberto Ríos-Osorio: <http://orcid.org/0000-0002-7127-4629>

especialmente en raíces y tallos. Los factores como el tipo de suelo, la concentración de metales y las condiciones climáticas afectan su eficacia. **Implicaciones.** Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para la agricultura y la gestión ambiental, ofreciendo una alternativa sostenible y menos invasiva para la remediación de suelos contaminados. Sin embargo, se destaca la necesidad de equilibrar la biorremediación con la producción agrícola y de gestionar adecuadamente los residuos resultantes. **Conclusiones.** *Cannabis sativa* muestra un potencial prometedor en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. Su capacidad hiperacumuladora y los factores que influyen en su eficacia ofrecen oportunidades significativas para la remediación y restauración ambiental, así como para la gestión sostenible de recursos. Se enfatiza la importancia de futuras investigaciones para maximizar su eficacia y minimizar su impacto en la producción agrícola.

**Palabras clave:** Acumulación de metales; Biorremediación; *Cannabis sativa*; Fitorremediación; Metales pesados; Suelos contaminados.

## INTRODUCCIÓN

La remediación es el proceso de corrección o mitigación de los efectos negativos en los sistemas naturales, que pueden haber sido causados por actividades humanas o eventos de la naturaleza. El proceso de remediación también puede involucrar la eliminación o reducción de la contaminación del aire, agua o suelo, la restauración de hábitats degradados o la recuperación de ecosistemas dañados (Ghule y Ramteke, 2022). La remediación de los contaminantes está influenciada por el origen, el tipo y naturaleza de la matriz, las propiedades fisicoquímicas, concentración del contaminante y su toxicidad (Song *et al.*, 2022).

Existen varios métodos de remediación de suelos contaminados: la remediación física, que incluye procesos como la extracción de vapor de suelo (SVE) para compuestos volátiles; la remediación química, que involucra técnicas como la oxidación/reducción para tratar contaminantes como metales pesados; y la remediación biológica, que utiliza organismos vivos, como en la fitorremediación, donde plantas absorben contaminantes en sus tejidos (Azhar *et al.*, 2022); ahora bien la fitorremediación como método para mitigar el impacto ambiental causado por agentes contaminantes en el suelo, presenta muchas ventajas como: es una técnica económica, respetuosa a los procesos ecológicos edáficos y el hecho de ser una tecnología social estética y ambientalmente más aceptada. Dentro de algunas de las plantas más utilizadas en la fitorremediación podemos encontrar una gran variedad de plantas, entre las más conocidas están: *Allium sativum* L., *Aloe vera* L., *Asparagus racemosus* L., *Bacopa monnieri* L., *Catharanthus roseus* L., *Curcuma longa* L., *Cannabis sativa* L. y *Cannabis indica* L. (Mendarte-Alquisira *et al.*, 2021; Kafle *et al.*, 2022).

*Cannabis* es una planta que ha sido objeto de controversia debido a su asociación con sustancias ilegales, sin embargo, se ha investigado ampliamente por sus posibles propiedades medicinales y beneficios económicos. La legalización en varios países ha facilitado un mayor desarrollo científico y tecnológico en relación con

esta planta. Las diferencias genéticas entre las cepas influyen en las propiedades medicinales y económicas. La investigación y desarrollo continúan avanzando según se profundiza la comprensión de sus usos (Small, 2015). Tiene una característica que se adapta a diferentes tipos de suelo y ha demostrado tener capacidad para tolerar la contaminación por metales pesados (MP) mediante mecanismos específicos de la planta (Béatrice De Vos *et al.*, 2022). Además, posee un sistema de raíces que le otorga la capacidad de penetrar a grandes profundidades y como resultado la extracción de metales, su rendimiento tisular y tolerancia permite su acumulación y supervivencia bajo condiciones de estrés cuando hay altas concentraciones de metales pesados (Moscariello *et al.*, 2021) en compuestos tales como: pesticidas, solventes, explosivos, petróleo crudo, hidrocarburos poliaromáticos y toxinas.

La creciente presencia de agentes contaminantes en los últimos años ha generado una comprensible preocupación ambiental. Esta atención ha impulsado un mayor interés en investigar y comprender cómo interactúa *cannabis* con los metales pesados, así como su potencial para abordar y remediar la contaminación del suelo. Esta investigación busca identificar las estrategias y procesos mediante los cuales *cannabis* podría contribuir al manejo y saneamiento de suelos contaminados por metales pesados, lo que sería valioso para la remediación y restauración ambiental y la gestión sostenible de los recursos naturales (Alegbeleye *et al.*, 2017).

Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación es realizar un análisis exhaustivo de la literatura científica disponible para evaluar de manera sistemática y crítica el papel de *cannabis* en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados, identificando los estudios relevantes, sintetizando la evidencia científica y proporcionando una revisión integral de los mecanismos y resultados relacionados con esta aplicación, con el propósito de ofrecer una visión completa y actualizada de su potencial como solución en este contexto.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Estrategias de búsqueda

El presente estudio adoptó un enfoque sistemático para examinar las estrategias de biorremediación proporcionadas por *cannabis* en el manejo de suelos contaminados por metales pesados. Esta investigación teórica fue realizada de acuerdo con la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Urrútia y Bonfill, 2010), la pregunta de investigación planteada fue ¿Cuáles son los usos del *cannabis* en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados?

En primera instancia se consultaron cuatro bases de datos, dos especializadas (ScienceDirect y SpringerLink), una multidisciplinaria (Scopus) y una de literatura gris (Google Académico), a partir de las cuales se realizó una búsqueda sistemática de literatura teniendo en cuenta criterios de sensibilidad con el uso de descriptores DeCS y conectores booleanos para lograr la máxima especificidad en la búsqueda. Se utilizó la siguiente ruta de búsqueda de acuerdo con el tópico elegido y las bases de datos empleada: (*cannabis* OR *hemp*) AND ("environmental restoration and remediation" OR remediation) AND "heavy metals". Por último, esta estrategia de búsqueda se enfocó en identificar artículos relevantes con una antigüedad no superior a diez años, abarcando el período desde 2013 hasta 2023.

### Criterios de inclusión y exclusión

Los criterios de selección de estudios se establecieron con base en la pregunta de investigación y se aplicaron de manera uniforme para garantizar coherencia y calidad en los resultados. Se incluyeron únicamente artículos originales en inglés, publicados en revistas indexadas y con una antigüedad no superior a diez años. Además, se aplicaron criterios de inclusión adicionales que abordó aspectos esenciales de los estudios, como el tipo de metal sometido a remediación, el método utilizado, el tipo de suelo sujeto a biorremediación, el mecanismo de acción y el porcentaje de biorremediación logrado.

### Reproducibilidad

El criterio de reproducibilidad se garantizó mediante la aplicación de los criterios de exclusión e inclusión de forma independiente por los investigadores y el asesor, las discrepancias que se presentaron en algunos artículos fueron resueltas por un cuarto investigador.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siguiendo los criterios de búsqueda previamente establecidos, se recopilaron 66 artículos publicados entre 2013 y 2023, de los cuales 13 corresponden a la base de datos de ScienceDirect, 34 a Scopus y 19 a SpringerLink. Empleando las herramientas Microsoft® Excel y EndNote Web, se eliminaron 6 artículos duplicados, para un total de 60 artículos resultantes; de los cuales fueron descartados 48 artículos por no cumplir con los criterios de inclusión o cumplir los criterios de exclusión determinados de acuerdo con la pregunta de investigación. Finalmente, la revisión sistemática se realizó con 12 artículos de investigación originales, además de la literatura científica no indexada encontrada en Google, Scholar correspondiente a 5 artículos científicos; dando un total de 17 artículos analizados (Figura 1).

### Análisis bibliométrico

Entre los 17 artículos seleccionados para la revisión sistemática, se encontró que los estudios relacionados con la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados se llevaron a cabo en 9 países, de los cuales el país con mayor número de publicaciones es Italia, con un total de 7 artículos, seguido de Polonia e India ambos con 2 publicaciones; por otra parte, los países que registraron el número más bajo de publicaciones revisadas son Croacia, Estados Unidos, Bélgica, Pakistán, República Checa y Francia, todos con una publicación (Figura 2).

Italia se reconoce como un país de tradición en la investigación sobre *cannabis*, esto se remonta desde los tiempos del Imperio Romano, estas antiguas civilizaciones utilizaban los productos derivados de *cannabis*, con fines medicinales, para rendir homenaje a sus deidades y en la elaboración de cuerdas, tejidos y artesanías (Amendola *et al.* 2021). Actualmente, este país en virtud de los usos industriales y médicos que posee *Cannabis sativa* implementó en su territorio la Ley 242 del 2 de diciembre de 2016, la cual promueve el cultivo de *cannabis*, convirtiendo a Italia como el cuarto país europeo en producción de *cannabis* con fines investigativos, lo que lo catapultó a ser uno de los países con más investigaciones en la fitorremediación de suelos contaminados utilizando *cannabis*. Los expertos de la industria predijeron un aumento global del mercado de *Cannabis sativa* de 3.300 millones de dólares durante 2020-2024 (Amendola *et al.*, 2021). En relación con los periodos de tiempo en los cuales se realizaron las investigaciones se puede mencionar como en los años 2019 y 2021 se ubica la mayor cantidad de publicaciones con 8 artículos (Figura 3).

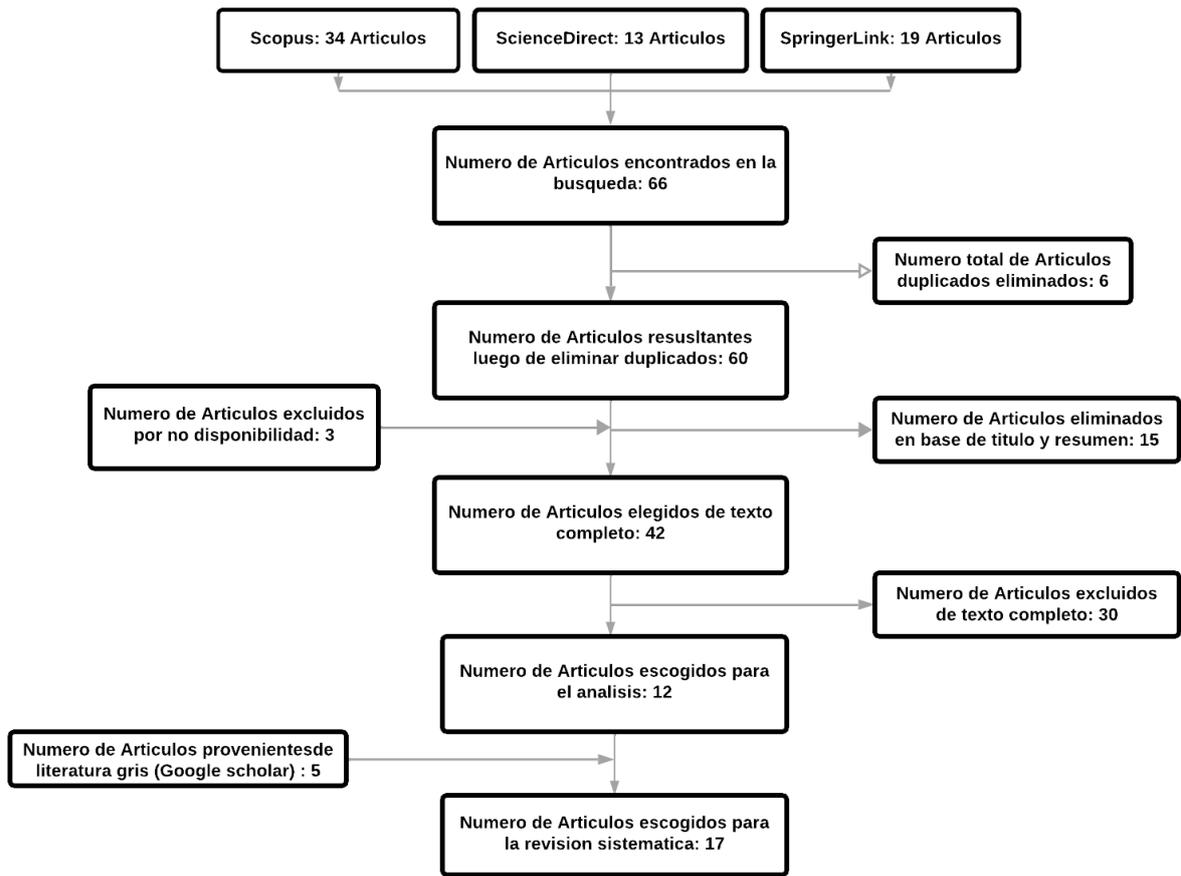


Figura 1. Diagrama del proceso de búsqueda de los artículos empleados en la revista.

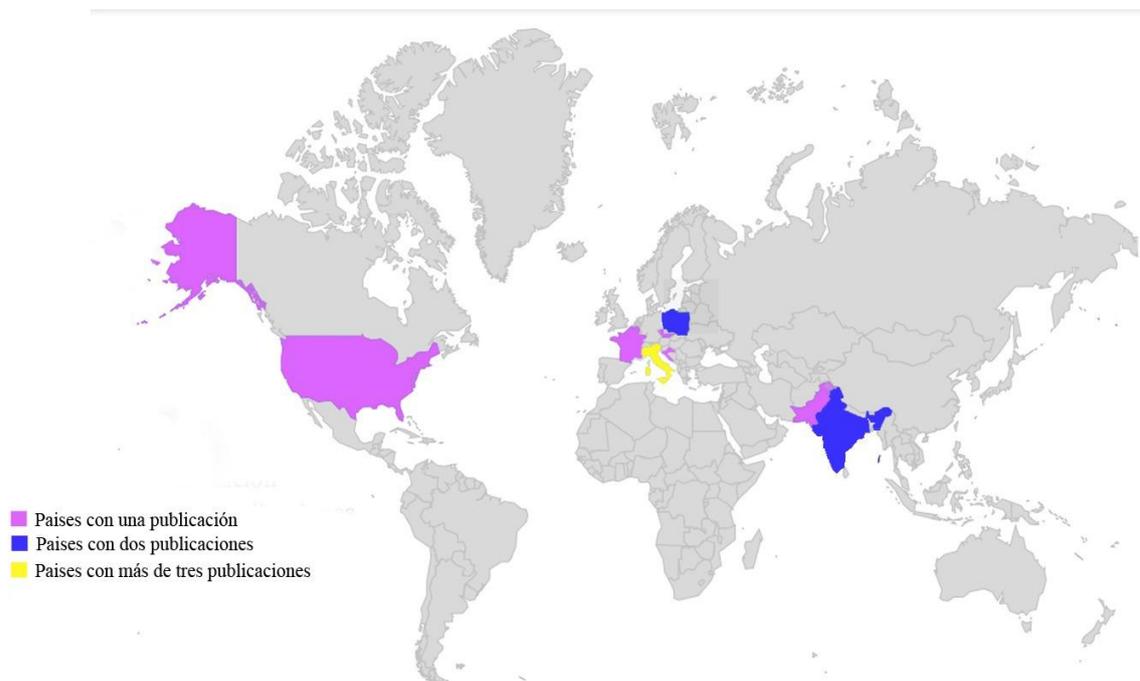
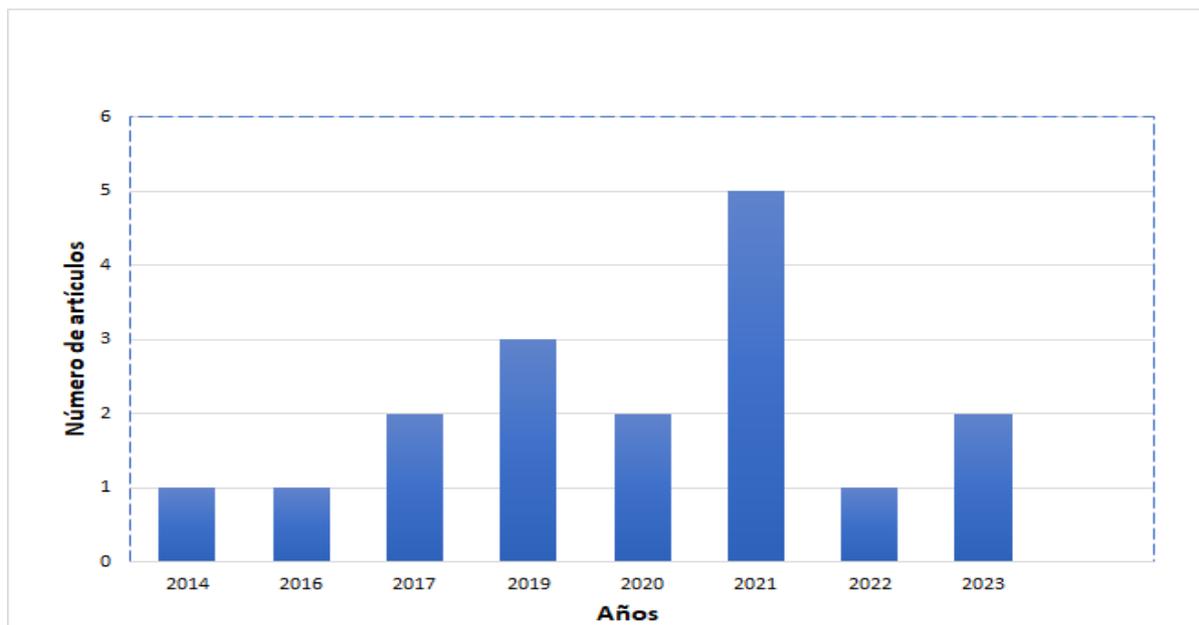


Figura 2. Distribución geográfica del número de publicaciones sobre biorremediación de suelos con *Cannabis sativa*.



**Figura 3.** Número de artículos empleados en la revisión sistemática publicados en el intervalo 2013- 2023.

### Variedades del Cannabis en el proceso de biorremediación

*Cannabis* ha desempeñado un papel esencial en diversas industrias, incluyendo la textil, petrolera, papelera, automotriz, construcción de biocombustibles, de alimentos funcionales, cosmética, cuidado personal y farmacéutica. Sus semillas y fibras son valiosos recursos que se han empleado ampliamente. Además, *cannabis* ha sido objeto de estudios de fitorremediación, utilizándolo para remediar ambientes contaminados por metales pesados, lo que subraya aún más su importancia y versatilidad en múltiples aplicaciones. Estos aspectos hacen del *cannabis* una planta de gran relevancia histórica y contemporánea en el mundo vegetal (Covarrubias-Torres, 2019).

*Cannabis*, también conocido como cáñamo industrial, es una planta herbácea perteneciente a la familia Cannabaceae. Se trata de una especie dioica, que exhibe flores masculinas y femeninas en su estructura vegetal. Su notoria versatilidad se refleja en su capacidad para adaptarse a diversos entornos, siempre que el pH del suelo se mantenga entre 5 y 7, su temperatura óptima de crecimiento se encuentre entre 16 y 27 °C. Esta planta puede alcanzar una altura hasta los 6 metros (Golia *et al.*, 2023). El género *Cannabis* comprende trece especies reconocidas por el Jardín Botánico de Missouri, entre las que se encuentran *C. sativa* y *C. indica*, además de variadas subespecies (Ángeles-López *et al.*, 2014).

La variedad de *cannabis* que más se utilizó para la fitorremediación de suelos contaminados con

metales pesados fue la de tipo *Cannabis sativa*; siendo esta variedad el objeto de estudio en la gran mayoría de los artículos analizados, a su vez subvariedades como Henola y Bialobrzeskie presentaron un potencial biorremediador, la cual, al ser una planta hiperacumuladora, tiene la capacidad de fitoacumulación radicular, lo que le permite absorber, trasladar y concentrar metales pesados presentes en suelos contaminados (Ángeles-López *et al.*, 2014).

Dentro de los estudios realizados con *Cannabis sativa* se pudo evidenciar su efecto biorremediador en suelos contaminados con metales pesados, sometida a metodologías experimentales con el fin de analizar qué parte, extracto o la planta completa generó mejores rendimientos en el proceso de biorremediación con metales presentes en los suelos contaminados. El análisis exhaustivo de los 17 artículos (Tabla 1) evidenció que el 20 % de estos evalúan la capacidad biorremediadora del área total de la planta, otro 30 % describe los cambios en la arquitectura de la raíz de *cannabis* y 50 % mide la capacidad biorremediadora en el tallo de las plantas.

*Cannabis* al ser una planta hiperacumuladora utiliza como mecanismos de acción la fitoextracción o fitoacumulación como estrategia de fitorremediación; se evidenció en esta investigación que *cannabis* puede acumular más de 1000 mg/kg de metales pesados en su interior, cuando crece en suelos contaminados, además de ello, se evidenció que la eficiencia de la fitoextracción de la planta puede estar determinada por dos factores claves: la capacidad de hiperacumular metales pesados y la producción de biomasa (Golia *et al.*, 2023).

**Tabla 1. Citas de los artículos elegidos con su respectiva información; también se encuentran los artículos de revistas no indexadas correspondientes a la literatura gris.**

Autor	Revista	DOI	Base de datos
Vaverková <i>et al.</i> , 2019	Waste and Biomass Valorization	10.1007/s12649-017-0058-z	Springerlink
Picchi <i>et al.</i> , 2022	Environmental Science and Pollution Research	10.1007/s11356-021-16673-6	Springerlink
Béatrice De Vos <i>et al.</i> , 2023	Environmental Science and Pollution Research	10.1007/s11356-023-25198-z	Springerlink
Pudełko <i>et al.</i> , 2021	Industrial Crops and Products	10.1016/j.indcrop.2021.113921	ScienceDirect
Praspaliauskas <i>et al.</i> , 2020	Industrial Crops and Products	10.1016/j.indcrop.2020.112396	ScienceDirect
Béatrice De Vos <i>et al.</i> , 2022	Industrial Crops and Products	10.1016/j.indcrop.2022.114592	ScienceDirect
Chandra <i>et al.</i> , 2017	Ecological Engineering	10.1016/j.ecoleng.2016.10.017	ScienceDirect
Testa <i>et al.</i> , 2023	Agronomy	10.3390/agronomy13040995	Scopus
Golia <i>et al.</i> , 2023	Sustainable Chemistry and Pharmacy	10.1016/J.SCP.2022.100961	Scopus
Grifoni <i>et al.</i> , 2021	Environmental Science and Pollution Research	10.1007/s11356-021-14074-3	Scopus
Ullah <i>et al.</i> , 2019	Science of the Total Environment	10.1007/s11270-019-4089-x	Scopus
Mańkowski <i>et al.</i> , 2020	Handbook of Natural Fibres: Volume 2: Processing and Applications	10.1016/B978-0-12-818782-1.00011-0	Scopus
Galić <i>et al.</i> 2019	Journal of Central European Agriculture	10.5513/JCEA01/20.2.2201	Scholar Google
Pietrini <i>et al.</i> 2019	MDPI Water	10.3390/w11040808	Scholar Google
Ferrarini <i>et al.</i> 2021	Frontiers of microbiology	10.3389/fmicb.2021.645893	Scholar Google
Ahmad <i>et al.</i> 2015	International Journal of Phytoremediation	10.1080/15226514.2013.828018	Scholar Google
Wielgusz <i>et al.</i> 2022	Industrial Crops & Products	10.1016/j.indcrop.2021.114245	Scholar Google

Ahora bien, es evidente el potencial que tiene *cannabis* en procesos biotecnológicos, medicinales y artesanales, pero a su vez, es una planta que se usa con fines recreativos los cuales en muchos aspectos sobrepasan la línea de la legalidad, es por ello, que su comercialización aún, es restringida; por esta razón la implementación de esta planta con fines biorremediadores dependen de la legislación vigente aplicada para cada país, por ejemplo, en Colombia desde el 2017, se expidió el decreto 613 que define el autocultivo como pluralidad de plantas de *cannabis* no mayor a 20, además de ello la resolución 227 de 2022 establecen condiciones para el uso industrial del componente vegetal de la planta de *cannabis* (hojas, tallos o granos) y derivados no psicoactivos, por lo que se podría sacar las respectivas licencias acopladas a estas actividades (David *et al.*, n.d.), cabe resaltar que frente al uso potencial de esta planta con fines de remediación es necesario verificar en el país que se pretende utilizar cuál es la legislación vigente. Aunque *cannabis* sigue siendo una planta con muchas restricciones comerciales, este tipo de decretos o normas a nivel

global son datos prometedores para la implantación de estas plantas con fines no narcóticos.

Con relación al genotipo de las plantas de *cannabis*, se observa que hasta el momento no se ha identificado una variedad específica que exhiba un rendimiento superior en términos de capacidad biorremediadora, según los resultados de las investigaciones recopiladas en este estudio. No obstante, es plausible que en investigaciones futuras se logre discernir una cepa con una eficacia biorremediadora más destacada. Ahora bien, los estudios revisados han destacado con claridad las disparidades existentes en cuanto a la capacidad de bioacumulación de metales pesados en las diversas partes de la planta. En este contexto, tanto la raíz como el tallo han demostrado presentar un potencial biorremediador más pronunciado (Ahmad *et al.*, 2023).

Actualmente, no hay un proyecto de ley o norma que prohíba la comercialización de las partes anteriormente mencionadas, como si es el caso del

moño o flor, la cual se usa con fines narcóticos, por tanto, el uso de la raíz y el tallo se debería promover como una alternativa biorremediadora para la contaminación de metales pesados. Sumado a ello, estudios de fitorremediación con cannabis, en los cuales, se evalúa la sostenibilidad de fibras de a partir de suelos contaminados con metales pesados, muestran que el cultivo de esta planta es una buena opción para la producción papel, textiles, materiales de envoltura, cuerdas y cestas (Pandey et al., 2022); la comercialización de estos productos podría constituir una solución para mejorar la situación socioeconómica en áreas afectadas por la contaminación. En este sentido, se propone considerar esta alternativa económica en futuros planes gubernamentales, como un medio de compensación, para las zonas afectadas por el cultivo ilegal de cannabis con fines narcóticos.

Sin embargo, se deben tomar precauciones con la comercialización de productos provenientes de cannabis implementados en la fitorremediación con metales pesados, ya que deben ser seguros en términos de concentración de contaminantes, según lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud y varias agencias gubernamentales, por ejemplo, los valores de control de toxicidad OEKO-TEX, es una etiqueta utilizada mundialmente en la industria textil para garantizar calidad y productos seguros para el cliente, en las cuales las concentraciones totales de Pb y Cd estaban por debajo de los límites de toxicidad (40 mg/kg de Cd y 90 mg/kg de Pb) (Pudełko et al., 2021).

### Metales pesados

El término metal pesado, se refiere a cualquier elemento químico metálico cuyo peso atómico supera  $5 \text{ g cm}^{-3}$  o que en su defecto posea un número atómico mayor a 20. Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales y elementos traza; algunos metales pesados, por ejemplo, cobre (Cu), selenio (Se), zinc (Zn), son esenciales para mantener un correcto metabolismo en los seres vivos y en particular en el cuerpo humano (Yan et al., 2023). Sin embargo, en concentraciones altas pueden ser tóxicos y perjudiciales para la salud. Dentro de las propiedades más relevantes que poseen este tipo de metales se encuentra, su difícil degradación y fácil acumulación, lo que lo convierte en un foco de contaminación grave ya que tiende a bioacumularse en suelos, fuentes hídricas y organismos vivos que sirven de alimento al ser humano (Ferrarini et al., 2021). Por lo anterior, es clara la importancia de implementar estrategias de biorremediación que traten de mitigar el impacto ambiental ocasionado por este tipo de metales, como, por ejemplo, la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados utilizando *Cannabis sativa*. Para la

remediación de suelos contaminados con metales pesados, se mostraron que los niveles y mecanismos de absorción, translocación y acumulación de metales pesados están influenciados por la naturaleza de cada cultivo de *cannabis*, así como por los propios metales, por ejemplo, el cromo (Cr) tiende a acumularse mayoritariamente en la raíz de la planta mediante absorción pasiva y en menor medida en hojas y tallos, el zinc (Zn) tiende a acumularse e inmovilizarse mayoritariamente en las raíces, y el cobre (Cu) se acumula principalmente en las hojas de la planta, además de ello se encontró que la planta *Cannabis sativa* utiliza cuatro enzimas antioxidantes principales, la glutathionedisulfuro reductasa (GSR), la fosfolipasa Da (PLDa), la catalasa (CAT) y la ascorbato peroxidasa (APX), estas enzimas hacen que no haya un desequilibrio en la planta, además de proteger las células contra posibles daños causados por estrés oxidativo cuando la planta crece en presencia de metales pesados (Galić et al., 2019; Picchi et al. 2002).

La contaminación por metales pesados, especialmente en fuentes hídricas y suelos, ha sido mayormente atribuida a la actividad antropogénica. Este fenómeno se evidencia en la alta prevalencia de suelos contaminados con metales pesados en áreas vinculadas a industrias agroquímicas y zonas mineras. Se identifica una presencia destacada de metales pesados, como As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni, Se y Zn, en estos suelos, los cuales poseen propiedades altamente tóxicas y cancerígenas en concentraciones elevadas (Prieto-Méndez et al., 2009).

Al hacer un análisis exhaustivo por los artículos estudiados, se evidenció que efectivamente los metales más estudiados para la remediación de suelos contaminados utilizando *Cannabis sativa* son el Pb, Cd, Cu, Mn y Ni (Figura 4) y, en su defecto, los suelos analizados eran en gran parte provenientes de zonas mineras e industrias químicas, además, una característica particular estos suelos eran de tipo (arcilloso) y pH alcalinos (De Vos et al., 2022) debido a que las plantas al crecer en pH básico tiene mejores rendimientos en biomasa y en el tamaño de la semilla, como se evidencia en los estudios donde se utilizaron las subvariedades Henola y Białobrzskie en la remediación de suelos contaminados con metales pesados (Wielgosz et al., 2022).

En la industria agrícola se usan herbicidas como el glifosato que está compuesto por arsénico; un venenoso contaminante hormonal, también cromo, cobalto, plomo y níquel, compuestos altamente tóxicos para los humanos, la mayoría de estos compuestos también son usados en procesos mineros. En algunos lugares se ha evidenciado contaminación por cadmio, alcanzando niveles del 7.0 %, lo que sobrepasa el nivel aceptable de 37 mg\*kg para el hábitat y la calidad del suelo agrícola,

e incluso llegando a niveles tan alarmantes como 284 mg\*kg (Sun *et al.*, 2023). Además, se han identificado otros metales en concentraciones menores, como As, Cu, Cr, Fe, Ni, Pb y Zn. Este fenómeno no solo amenaza el equilibrio del medio ambiente ecológico, sino que también representa un riesgo para la salud humana, ya que estos metales se transfieren a través de la cadena alimentaria, generando enfermedades como daños en el ADN y otras afecciones. En la investigación, se ha observado la presencia de estos compuestos en diversas plantas e insectos analizados en campos contaminados. Esto sugiere en el futuro, la aplicación de la fitorremediación como técnica accesible, menos invasiva y respetuosa con el medio ambiente, podría ser una solución viable, especialmente en industrias agrícolas donde estos insumos se utilizan con frecuencia en minería y agricultura. Este enfoque no solo protegería el suelo, sino también la flora y fauna, proyectándose como una medida preventiva y sostenible (Mwewa *et al.*, 2023).

Estos suelos recuperados por *Cannabis sativa* tienen un pH ligeramente alcalino. Es por eso, por lo que estos suelos pueden ser usados para sembrar otra variedad de plantas aprovechables como el sorgo y otras variedades y clases de cereales, donde tiene una mayor tolerancia a los alcalinos sobreviviendo a pH de suelos hasta de 10, esto es debido al gen llamado *SbATI* involucrado en la tolerancia alcalina. Además, se ha identificado que este gen *ATI*

también se conserva en otros cultivos de cereales, incluidos arroz, maíz, mijo y trigo (Mwelwa *et al.*, 2023), dando así, una alternativa para cultivos con suelos de pH altos.

#### Acumulación de metales pesados en *Cannabis sativa*

Uno de los parámetros importantes que se implementaron en este estudio para medir la capacidad bioacumuladora de *cannabis* remediando suelos contaminados con metales pesados fueron los factores de bioconcentración (BCF) y translocación (TF); el primero se define como la relación entre la concentración de metales presentes en la raíz de la planta y el suelo contaminado, mientras que el segundo mide la capacidad de la planta para trasladar los metales pesados desde la raíz hasta las hojas de la planta (Chandra *et al.*, 2017).

Se evidenció que para *Cannabis sativa*, los metales que presentaron mayor factor de bioconcentración fueron cobre 4,402 mg/l, plomo 3,466 mg/l, cromo 3,3 mg/l, zinc 2,741 mg/l y cadmio 0,588 mg/l respectivamente, a su vez los metales con mayor factor de translocación fueron cadmio con 1,9 mg/l, zinc 0,60 mg/l, cobre 0,52 mg/l, cromo 0,36 mg/l y plomo 0,29 mg/l, como se mostró en estudios donde se utilizó *cannabis* para remediar suelos contaminados provenientes de industrias encargadas de la fabricación de papel.

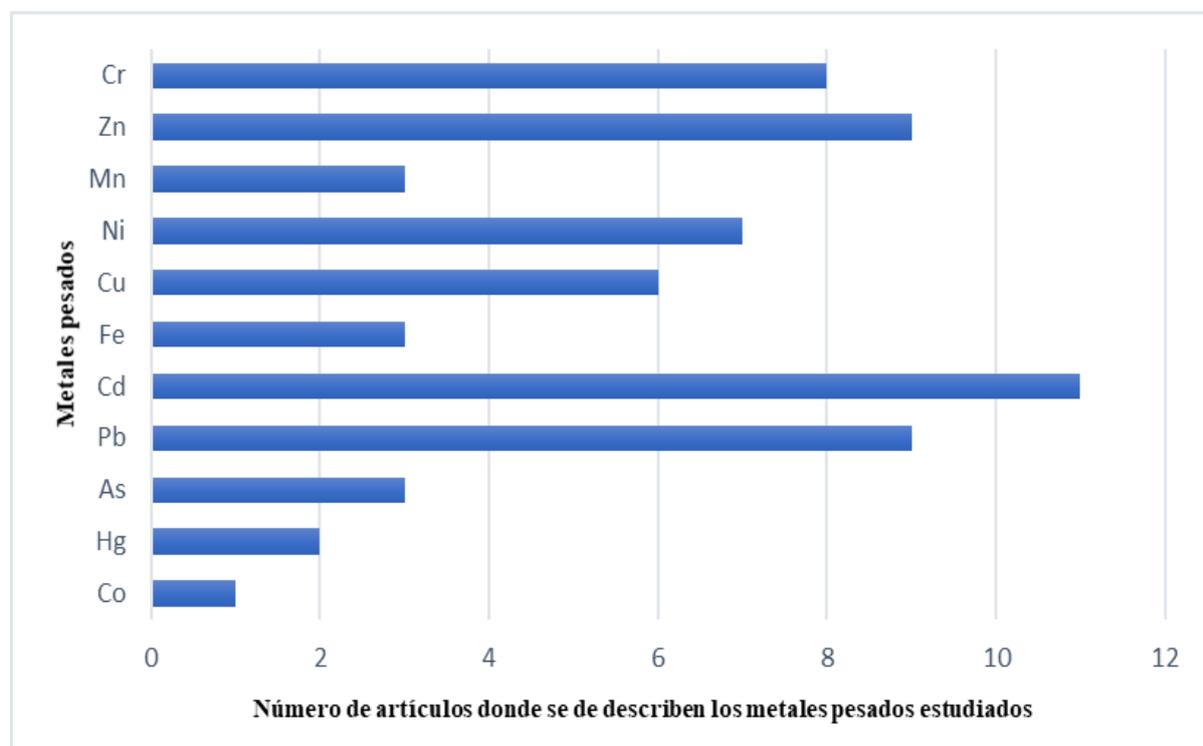


Figura 4. Metales pesados descritos en los diferentes artículos empleados en la revisión sistemática.

En general, los resultados del análisis de la acumulación de metales pesados en *Cannabis sativa* mostraron un patrón variable de acumulación en diferentes partes de las plantas, sumado a ello, la absorción de estos compuestos por la planta depende del tipo de suelo utilizado, la concentración del metal pesado presente en el suelo, así como de las condiciones climáticas donde creció la planta; el análisis de los metales presentes en diferentes partes de las plantas mostró el patrón variable de acumulación, pero a nivel global el orden jerárquico donde más se acumulan los metales son raíz, tallo y hojas.

Al analizar los resultados mostrados en otros estudios vemos que las concentraciones de Pb y Cr en *cannabis* fueron mucho mayor en las raíces en comparación con otras partes de las plantas, bioacumulándose hasta 40-45 mg/kg de Pb y 50 mg/kg de Cr (Grifoni *et al.*, 2021), a su vez el factor de translocación del Cr es inferior al Pb; continuando con los resultados obtenidos en esta revisión, se determinó el contenido de arsénico en todas la morfología de *cannabis*, por ejemplo, en raíces se reportó un rango de 882-2356 mg kg<sup>-1</sup>, seguido de los tallos con un rango de 7,70 a 50,2 mg kg<sup>-1</sup> y hojas, mostrando un rango de 12,3 a 38,2 mg kg<sup>-1</sup>. Los valores concuerdan con lo reportado por Chandra *et al.* (2017) en el que se observó, en especies no hiperacumuladoras de As, un almacenamiento preferentemente de este elemento en las raíces.

Por último, se cuantificó el potencial biorremediador de *cannabis* con la cantidad de biomasa producida en un cultivo, se pudo evidenciar que el rendimiento de los tallos mostró una disminución significativa en el sitio contaminado con metales pesados, en comparación con el sitio de control, que no posea presencia de metales pesados, esto se debe a que la planta al bioacumular los metales pesados afecta un poco su rendimiento en biomasa (Béatrice De Vos *et al.*, 2023)

Los resultados presentados en este estudio son de importancia para la agricultura y la gestión de suelos contaminados con metales pesados, en primer lugar, la utilización de *Cannabis sativa* como una planta fito extractora capaz de acumular metales pesados en sus tejidos plantea la posibilidad de biorremediación de suelos contaminados, sumado a ello, los factores de bioconcentración (BCF) y translocación (TF) proporcionan una métrica precisa para evaluar la eficacia de esta planta en la acumulación y remediación de metales pesados, por lo que los valores de BCF más altos para metales como el Cu, Pb, Cr, Zn y Cd indican su capacidad para acumular y extraer estos contaminantes del suelo (Béatrice De Vos *et al.*, 2023).

Además, la variabilidad en la acumulación de metales pesados en diferentes partes de la planta, con una mayor acumulación en las raíces, tiene importantes implicaciones en la selección de cultivos adecuados y la gestión de residuos; y que esta interpretación sirve para comprender qué partes de la planta utilizadas en la agricultura pueden acumular más metales pesados, lo que les facilita a los agricultores la toma de decisiones sobre el uso de suelos contaminados. La gestión de residuos es esencial para evitar la reintroducción de metales pesados en el entorno y garantizar la seguridad alimentaria (Luyckx *et al.*, 2022).

El impacto en el rendimiento de la planta de *Cannabis sativa* en suelos contaminados es un aspecto crítico para considerar. La disminución significativa en la biomasa de los tallos en suelos contaminados en comparación con los suelos de control destaca la necesidad de equilibrar la biorremediación con la producción agrícola. Esto plantea preguntas sobre la sostenibilidad y la eficacia de la fitoextracción en áreas agrícolas afectadas por la contaminación de metales pesados. La información obtenida es de vital importancia para informar las decisiones en la agricultura y en la gestión de suelos que han sido afectados por esta contaminación. Además, subraya la necesidad de abordar la biorremediación de una manera equitativa y sostenible, teniendo en cuenta su impacto en el rendimiento de los cultivos y la seguridad alimentaria en las áreas afectadas.

### Limitaciones del estudio

Las principales limitaciones que se pueden identificar en este estudio radican en el enfoque de investigación de *cannabis*, si bien es una planta que en los últimos años ha tenido un auge en investigaciones de tipo medicinal, cuando se extrapola al área ambiental los estudios son limitados, lo que conlleva a tener poca bibliografía de referencia, sumado a ello, parte de las investigaciones hechas con *cannabis* como biorremediador de suelos contaminados con metales pesados, son estudios *in vitro* y revisiones sistemáticas. Por otra parte, si bien se pudo demostrar el potencial biorremediador de *cannabis*, la falta de estandarización en los métodos de investigación y la diversidad de contextos pueden dificultar la generalización de los resultados.

### CONCLUSIONES

El estudio sobre el uso del *Cannabis* en procesos de biorremediación revela su destacado potencial como una herramienta efectiva para la absorción y extracción de metales pesados en suelos contaminados. La variedad principal, *Cannabis sativa*, y sus subvariedades, como Henola y Bialobrzeskieskie, se destacan por su capacidad

hiperacumuladora, especialmente en raíces y tallos. Estos resultados abren perspectivas alentadoras para la recuperación de suelos afectados, enfatizando la necesidad de considerar las distintas partes de la planta en estrategias de biorremediación.

La evaluación detallada de factores de bioconcentración y translocación subraya la eficacia de *Cannabis sativa* en la fitoextracción de metales pesados, siendo capaz de acumular significativas cantidades de Cu, Pb, Cr, Zn y Cd. La variabilidad en la acumulación en diferentes partes de la planta, especialmente en las raíces, resalta la complejidad de estos procesos y la importancia de comprender cómo estas variaciones afectan la gestión de cultivos y residuos en el contexto de la biorremediación.

Finalmente, el estudio aborda la urgencia de enfrentar la contaminación por metales pesados, mayormente de origen antropogénico en sectores agrícolas y mineros. La implementación de prácticas de biorremediación, como el uso controlado de *Cannabis sativa*, emerge como una solución prometedora para contrarrestar los impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana. No obstante, se subraya la necesidad de equilibrar la eficacia de la biorremediación con la producción agrícola y de gestionar los residuos de manera responsable para garantizar la sostenibilidad a largo plazo de estas prácticas. En conjunto, este estudio ofrece una visión integral de cómo *cannabis* puede desempeñar un papel crucial en la mitigación de la contaminación por metales pesados en suelos, presentando oportunidades significativas para la restauración ambiental y la gestión sostenible de recursos.

**Funding.** This research was financed and supported with human and technical resources by the Research Group on Health and Sustainability from the University of Antioquia.

**Conflict of interest.** The authors declare that they have no competing interest.

**Compliance with ethical standards.** Not applicable

**Data availability:** Data are available upon reasonable request with the corresponding author ([leonardo.rios@udea.edu.co](mailto:leonardo.rios@udea.edu.co))

**Author Contribution Statement (CRediT).** **M. Cáceres-Cáceres.** Conceptualization, data curation, formal analysis, methodology, validation, visualization, writing – original draft – review and editing. **J. Daza-Burgos.** Conceptualization, data curation, formal analysis, methodology, validation, visualization, writing – original draft – review and editing. **J. Serna-Morales.** Conceptualization, data curation, formal analysis, methodology, validation, visualization, writing – original draft – review and

editing. **L. Ríos-Osorio.** Conceptualization, data curation, formal analysis, methodology, validation, visualization, writing – original draft – review and editing.

## REFERENCIAS

- Alegbeleye, O., Opeolu, B. and Jackson, V., 2017. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: A Critical Review of Environmental Occurrence and Bioremediation. *Environmental Management*, 60, pp. 758-783. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0896-2>
- Ahmad, I., Gul, I., Irum, S., Manzoor, M. and Arshad, M., 2023. Accumulation of heavy metals in wild plants collected from the industrial sites-potential for phytoremediation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(3), 5441-5452. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04340-3>
- Ángeles-López, G., Brindis, F., Cristians-Niizawa, S. and Ventura-Martínez, R., 2014. *Cannabis sativa* L., una planta singular. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 45(4). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57940028004>
- Amendola, G., Bocca, B., Picardo, V., Pelosi, P., Battistini, B., Ruggieri, F., Attard-Barbini, D., De Vita, D., Madia, V.N., Messori, A., Di Santo, R. and Costi, R., 2021. Toxicological aspects of cannabinoid, pesticide and metal levels detected in light *Cannabis* inflorescences grown in Italy. *Food and Chemical Toxicology*, 156, pp. 112447. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2021.112447>
- Azhar, U., Ahmad, H., Shafqat, H., Babar, M., Shahzad-Munir, H., Sagir, M., Arif, M., Hassan, A., Rachmadona, N., Rajendran, S., Mubashir, M. and Khoo, K.S., 2022. Remediation techniques for elimination of heavy metal pollutants from soil: A review. *Environmental Research*, 214, pp. 113918. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.113918>
- Chandra, R., Yadav, S. and Yadav, S., 2017. Phytoextraction potential of heavy metals by native wetland plants growing on chlorolignin containing sludge of pulp and paper industry. *Ecological Engineering*, 98, pp. 134-145.

- <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.017>
- De Vos, B., Souza, M.F., Michels, E. and Meers, E., 2022. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) in a phytoattenuation strategy: Remediation potential of a Cd, Pb and Zn contaminated soil and valorization potential of the fibers for textile production. *Industrial Crops and Products*, 178, pp. 114592. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114592>
- Ferrarini, A., Fracasso, A., Spini, G., Fornasier, F., Taskin, E., Fontanella, M.C., Beone, G.M., Amaducci, S. and Puglisi, E., 2021. Bioaugmented Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils and Sediments by Hemp and Giant Reed. *Frontiers in Microbiology*, 12, pp. 1–20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.645893>
- Galić, M., Perčin, A., Zgorelec, Ž. and Kisić, I., 2019. Evaluation of heavy metals accumulation potential of hemp (*Cannabis sativa* L.). *Journal of Central European Agriculture*, 20(2), pp. 700–711. <https://doi.org/10.5513/JCEA01/20.2.2201>
- Ghule, M.R. and Ramteke, P.K., 2022. Chapter 6 – Soil chemical pollution and remediation. In: M. Naem, T. Aftab, A.A. Ansari, S.S. Gill, A. Mancovei, eds. *Hazardous and Trace Materials in Soil and Plants: Sources, Effects, and Management*. London: Academic Press. pp. 57–71. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91632-5.00025-2>
- Golia, E.E., Bethanis, J., Ntinopoulos, N., Kaffe, G.G., Komnou, A.A. and Vasilou, C., 2023. Investigating the potential of heavy metal accumulation from hemp. The use of industrial hemp (*Cannabis Sativa* L.) for phytoremediation of heavily and moderated polluted soils. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 31, pp. 100961. <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2022.100961>
- Grifoni, M., Rosellini, I., Petruzzelli, G., Pedron, F., Franchi, E. and Barbafieri, M., 2021. Application of sulphate and cytokinin in assisted arsenic phytoextraction by industrial *Cannabis sativa* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(34), pp. 47294–47305. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14074-3>
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A. and Aryal, N., 2022. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, pp. 100203. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2022.100203>
- Luyckx, M., Blanquet, M., Isenborghs, A., Guerriero, G., Bidar, G., Waterlot, C., Douay, F. and Lutts, S., 2022. Impact of Silicon and Heavy Metals on Hemp (*Cannabis sativa* L.) Bast Fibres Properties: An Industrial and Agricultural Perspective. *International Journal of Environmental Research*, 16(82), pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s41742-022-00446-1>
- Mańkowski, J., Kołodziej, J., Pudełko, K. and Kozłowski, R.M., 2020. Bast fibres: the role of hemp (*Cannabis sativa* L.) in remediation of degraded lands. In: R.M. Kozłowski, M. Mackiewicz-Talarczyk, eds. *Handbook of Natural Fibres: Volume 2: Processing and Applications*. London: Woodhead Publishing. pp. 393–417. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818782-1.00011-0>
- Mendarte-Alquisira, C., Alarcón, A., Ferrera-Cerrato, R. and Mendarte-Alquisira, C., 2021. Fitorremediación: alternativa biotecnológica para recuperar suelos contaminados con DDT. Una revisión. *TIP. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 24, pp. 1-15. <https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2021.326>
- Moscariello, C., Matassa, S., Esposito, G. and Papirio, S., 2021. From residue to resource: The multifaceted environmental and bioeconomy potential of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Resources, Conservation and Recycling*, 175, pp. 105864. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2021.105864>
- Mwelwa, S., Chungu, D., Tailoka, F., Beesigamukama, D. and Tanga, C.M., 2023. Data to understand the biotransfer of heavy metals along the soil-plant-edible insect-human food chain in Africa. *Data in Brief*, 49, pp. 109434. <https://doi.org/10.1016/J.DIB.2023.109434>

- Pandey, V.C., Mahajan, P., Saikia, P. and Praveen, A., 2022. Chapter 5 – Sustainability of fiber crop production from polluted land. In: V.C. Pandey, P. Mahajan, P. Saikia, A. Praveen, eds. *Fiber Crop-Based Phytoremediation*. London: Elsevier. pp. 115–156. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823993-3.00006-1>
- Picchi, C., Giorgetti, L., Morelli, E., Landi, M., Rosellini, I., Grifoni, M., Franchi, E., Petruzzelli, G. and Barbaferi, M., 2022. *Cannabis sativa* L. and *Brassica juncea* L. grown on arsenic-contaminated industrial soil: potentiality and limitation for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), pp. 15983–15998. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16673-6>
- Prieto-Méndez, U. and González-Ramírez, C., Román-Gutiérrez, A., Prieto-García, F., 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), pp. 29–44. <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/25>
- Pudełko, K., Kołodziej, J. and Mańkowski, J., 2021. Restoration of minesoil organic matter by cultivation of fiber hemp (*Cannabis sativa* L.) on lignite post-mining areas. *Industrial Crops and Products*, 171, pp. 113921. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113921>
- Small, E., 2015. Evolution and Classification of *Cannabis sativa* (Marijuana, Hemp) in Relation to Human Utilization. *The Botanical Review*, 81(3), pp. 189–294. <https://doi.org/10.1007/S12229-015-9157-3>
- Song, P., Xu, D., Yue, J., Ma, Y., Dong, S. and Feng, J., 2022. Recent advances in soil remediation technology for heavy metal contaminated sites: A critical review. *Science of The Total Environment*, 838, pp. 156417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156417>
- Sun, S., Fan, X., Feng, Y., Wang, X., Gao, H. and Song, F., 2023. Arbuscular mycorrhizal fungi influence the uptake of cadmium in industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Chemosphere*, 330, pp. 138728. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138728>
- Testa, G., Corinzia, S.A., Cosentino, S.L. and Ciaramella, B.R., 2023. Phytoremediation of Cadmium-, Lead-, and Nickel-Polluted Soils by Industrial Hemp. *Agronomy*, 13(4), pp. 995. <https://doi.org/10.3390/agronomy13040995>
- Ullah, R., Hadi, F., Ahmad, S., Jan, A.U. and Rongliang, Q., 2019. Phytoremediation of Lead and Chromium Contaminated Soil Improves with the Endogenous Phenolics and Proline Production in *Parthenium*, *Cannabis*, *Euphorbia*, and *Rumex* Species. *Water, Air, and Soil Pollution*, 230(40), pp. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4089-x>
- Vaverková, M.D., Zloch, J., Adamcová, D., Radziemska, M., Vyhnánek, T., Trojan, V., Winkler, J., Đorđević, B., Elbl, J. and Brtnický, M., 2019. Landfill Leachate Effects on Germination and Seedling Growth of Hemp Cultivars (*Cannabis sativa* L.). *Waste and Biomass Valorization*, 10(2), pp. 369–376. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-0058-z>
- Wielgusz, K., Praczyk, M., Irzykowska, L. and Świerk, D., 2022. Fertilization and soil pH affect seed and biomass yield, plant morphology, and cadmium uptake in hemp (*Cannabis sativa* L.). *Industrial Crops and Products*, 175, pp. 114245. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114245>
- Yan, F., Li, N., Wang, J. And Wu, H., 2023. Ecological footprint model of heavy metal pollution in water environment based on the potential ecological risk index. *Journal of Environmental Management*, 344, pp. 118708. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118708>