



Programa de Bacteriología

Trichoderma spp., Pseudomonas spp., y Bacillus spp.
**COMO AGENTES BIORREMEDIADORES EN SUELOS
CONTAMINADOS CON CADMIO**

David Santiago Cardona Mejía



Universidad[®]
Católica
de Manizales

REGISTRADA MINEUCACIÓN

Obra de Iglesia
de la Congregación



Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

Trichoderma spp., *Pseudomonas* spp., y *Bacillus* spp. COMO AGENTES
BIORREMEDIADORES EN SUELOS CONTAMINADOS CON CADMIO.

MONOGRAFÍA DE GRADO PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE BACTERIÓLOGO.

Tutora:

MSc. ELIANA MENDOZA MENDOZA

ORCID: 0009-0009-0022-2061

Autor:

DAVID SANTIAGO CARDONA MEJÍA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD

PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA

MANIZALES

2024

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

Nota de aceptación:

Firma del jurado

PÁGINA DE AGRADECIMIENTOS

Primero que nada, agradecer a Dios por permitirme haber culminado mi carrera, a mis padres por tan grande esfuerzo, a mis compañeros, profesores y en especial a mi tutora de trabajo de grado, Eliana Mendoza por su paciencia, asesoría y conocimiento.

PÁGINA DEDICATORIA

Este triunfo va dedicado especialmente a mis padres, por su constante apoyo incondicional a lo largo de los años de mi vida.

1 TABLA DE CONTENIDO

1	TABLA DE CONTENIDO.....	6
2	PRÓLOGO.....	9
3	RESUMEN	11
4	ABSTRACT.....	13
5	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
6	INTRODUCCIÓN	18
7	OBJETIVOS	19
7.1	Objetivo General	19
7.2	Objetivos Específicos.....	19
8	METODOLOGÍA	20
8.1	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	21
8.2	INFORMACIÓN SECUNDARIA.....	21
9	MARCO CONCEPTUAL	22
	CAPÍTULO 1	22
9.1	CADMIO Y SUS IMPLICACIONES EN LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE... 22	
	CAPÍTULO 2	30
9.2	USO DE MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACIÓN: GENERALIDADES Y MECANISMOS	30
9.2.1	Técnicas de biorremediación ex situ.....	30
9.2.2	Técnicas de Biorremediación In Situ	32
9.3	Mecanismos usados por los microorganismos para procesos de biorremediación	34
	CAPÍTULO 3	36
9.4	<i>Trichoderma</i> spp Y SUS APLICACIONES EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN	36
9.4.1	Generalidades.....	36
9.4.2	Taxonomía	37
9.4.3	Aplicaciones en procesos de biorremediación usando <i>Trichoderma</i> spp.	40
	CAPÍTULO 4	45

9.5	<i>Pseudomonas</i> spp Y SUS APLICACIONES EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN	45
9.5.1	Generalidades.....	45
9.5.2	Taxonomía	46
9.5.3	Aplicaciones en procesos de biorremediación usando <i>Pseudomonas</i> spp.....	48
	CAPÍTULO 5	51
9.6	<i>Bacillus</i> spp. Y APLICACIONES EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN	51
9.6.1	Generalidades.....	51
	CAPÍTULO 6	60
9.7	EVALUACIÓN DE CONSORCIOS MICROBIANOS EN LOS PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN DE CADMIO (Cd)	60
10	RESULTADOS OBTENIDOS	67
10.1	Análisis de resultados.....	67
10.1.1	Análisis de búsqueda en la base datos de Scopus para el género microbiano <i>Trichoderma</i> spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.....	69
10.1.2	Análisis de búsqueda en la base datos de Scopus para el género microbiano <i>Bacillus</i> spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.....	73
10.1.3	Análisis de búsqueda en la base datos de Scopus para el género microbiano: <i>Pseudomonas</i> spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.....	77
10.1.4	Análisis de búsqueda en el software Rstudio para el género microbiano <i>Trichoderma</i> spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.....	81
10.1.5	Análisis de búsqueda en el software Rstudio para el género microbiano <i>Bacillus</i> spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.....	84
10.1.6	Análisis de búsqueda en el software Rstudio para el género microbiano <i>Pseudomonas</i> spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.....	88
10.1.7	Análisis de búsqueda en la base datos de Scopus y en el software Rstudio para los consorcios microbianos, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.	91
10.2	Opinión sobre los artículos seleccionados	95
11	CONCLUSIONES	98
12	RECOMENDACIONES	104
13	GRÁFICOS y FIGURAS	106
14	TABLAS	108
15	BASES BIBLIOGRÁFICAS	109

2 PRÓLOGO

Dentro de las habilidades y virtudes inherentes del bacteriólogo(a), destaca su capacidad en el ámbito de la investigación, precisamente, los medios por los cuales se puede hacer una investigación es la realización de una monografía, cuya finalidad es hacer un trabajo científico escrito, que resulta como consecuencia de la investigación bibliográfica, estudiando de forma exhaustiva un tema claramente delimitado, y que su fruto es transmitir un resultado producto de dicha investigación.

El programa de Bacteriología de la Universidad Católica de Manizales nos permite desarrollar competencias que apunten a un perfil con una formación socio-humanística, científica y tecnológica, así mismo da las herramientas que ayudan a intervenir las relaciones entre el ecosistema, el hombre y la influencia de los microorganismos en su desarrollo y naturaleza, teniendo en cuenta la toma y procesamiento de muestras provenientes del mismo hombre, de los animales, de las plantas, de las industrias y/o del medio ambiente; Siendo coherentes con nuestra vocación profesional y siendo la biotecnología una de nuestras áreas de estudio debemos entender que en Colombia está apenas en auge, ya que se han adelantado iniciativas referentes a incentivar estos conocimientos y que de una u otra manera esto traiga beneficios también para la “bioeconomía”, lastimosamente estos esfuerzos no han sido suficientes para posicionar la biotecnología como prioridad nacional, bien sea por el desinterés del mismo o porque el gobierno no está culturizado del tema y lo bien que le vendría al país, ya que somos ricos en recursos tanto renovables como no.

A la fecha, en Colombia se sigue trabajando en estrategias y planes piloto de implementación de diferentes propuestas que incluyen la biotecnología como su base científica, en el documento publicado por Colciencias denominado: “Convocatoria Nacional para el reconocimiento y medición de grupos de investigación, desarrollo tecnológico o de innovación y para el reconocimiento de investigadores del SNC Tel – 2016”, se encontró un aproximado de 4900 grupos de investigación que están registrados en todas las áreas del conocimiento relacionadas a la biotecnología.

La biorremediación es una técnica para limpiar suelos contaminados de una manera muy práctica y efectiva, ya que se usan microorganismos que viven en el suelo y subsuelo, teniendo en cuenta que este está constituido por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua y aire. Uno de los problemas que aqueja el mundo es la rapidez con la que se están agotando y/o desperdiciando los recursos naturales, además de la contaminación generada como el derramamiento de crudo, que es una noticia muy común en nuestro país, consecuencia del conflicto armado y de la negligencia de algunas empresas nacionales e internacionales con labores en el territorio colombiano, por ende es de vital importancia empezar a implementar estrategias biotecnológicas que incluyan la biorremediación como alternativa y solución a distintos focos de contaminación como lo pueden ser los metales pesados, dando un valor agregado a los procesos que estos conllevan.

3 RESUMEN

El presente trabajo recopila, analiza, evalúa de manera documental la capacidad de 3 géneros de microbianos, (*Trichoderma* spp, *Pseudomonas* spp, *Bacillus* spp) así como sus especies más significativas para la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados, específicamente el cadmio (Cd), ya que es considerado según la literatura como uno de los compuestos más tóxicos en el ambiente, debido a que estos poseen efectos nocivos a nivel de todo lo que compone la cadena trófica. La documentación científica se analizó a través del software Rstudio para windows Version: 2023.12.1+402 y las herramientas que ofrece la base de datos Scopus, además del uso de otros recursos bibliográficos de libre acceso como Scielo, Science direct, informes oficiales de organizaciones gubernamentales, entre otros. Se empleó la inteligencia artificial (IA) denominada “Rayyan” con la finalidad de filtrar los artículos que se usarían para el desarrollo del documento, además de eliminar los que no coincidían en la misma.

Se incluyeron un aproximado de 1240 documentos científicos arrojados en las búsquedas de Scopus, que fueron filtrados independientemente en cada una de las ecuaciones realizadas, de los cuales se seleccionaron todos (1240) los documentos para cada análisis y gráfica en específico; los documentos de acceso libre consultados se usaron para nutrir el marco teórico compuesto por antecedentes, definiciones y fundamentos preestablecidos del presente trabajo. La mayor parte de la documentación se enfocó en resaltar el uso de cada uno de los microorganismos en suelos contaminados con cadmio, enfatizando en su capacidad biorremediadora. *Trichoderma* spp, *Bacillus* spp y *Pseudomonas* spp presentan habilidades importantes para la descontaminación, usados tanto individualmente como en consorcio. Sin embargo, diversos autores mencionan ineficacia en algunas matrices analizadas, esto debido propiamente a las características físicas, químicas y biológicas del suelo, además de la fisiología de las cepas usadas. En general, la mayoría

de los artículos cuentan con un rango de publicación entre 2019 y 2023 con una ubicación geográfica centrada en Asia (china, india) Norte América (Estados Unidos) y una pequeña cantidad en Europa, además de estudios del continente de América Latina.

El comparativo entre Scopus y Rstudio/bibliometrix permitió realizar un análisis paralelo de la información arrojada, así como la eficacia para arrojar datos estadísticos de la base de datos y el Software, lo que nos permitió concluir que Rstudio tenía ciertas falencias al momento de analizar todos los artículos, sin embargo, no hubo discrepancias en la información suministrada por ninguna de las dos herramientas, ya que la información era coherente y se relacionaba entre sí.

PALABRAS CLAVE: Biorremediación, Cadmio, Bacillus spp, *Trichoderma* spp, Pseudomonas spp. revisión, artículos.

4 ABSTRACT

This paper collects, analyzes and evaluates the capacity of 3 microbial genera (*Trichoderma* spp, *Pseudomonas* spp, *Bacillus* spp) as well as their most significant species for the bioremediation of soils contaminated with heavy metals, specifically cadmium (Cd), since it is considered according to the literature as one of the most toxic compounds in the environment, due to the fact that these have harmful effects at the level of everything that makes up the food chain (The scientific documentation was analysed using the Rstudio software for windows Version: 2023.12.1+402 and the tools provided by the Scopus database, in addition to the use of other open access bibliographic resources such as Scielo, Science direct, official reports of governmental organizations, among others. An artificial intelligence (AI) called “Rayyan” was used to filter the articles that would be used for the bulk of the document, as well as to remove those that did not match.

Approximately 1240 scientific papers were included in the Scopus searches, which were filtered independently in each of the equations performed, from which all papers (1240) were selected for each specific analysis and graph; the open access documents consulted were used to nourish the theoretical framework composed of antecedents, definitions and pre-established foundations of the present work. Most of the documentation focused on highlighting the use of each microorganism in cadmium-contaminated soils, emphasizing its bioremediation capacity. *Trichoderma* spp, *Bacillus* spp and *Pseudomonas* spp present important abilities for decontamination, used both individually and in consortium. However, several authors mention inefficiency in some matrices analyzed, due to the physical, chemical and biological characteristics of the soil, in addition to the physiology of the strains used. In general, most articles have a publication range between 2019

and 2023 with a geographic location centered on Asia (China, India), North America (United States) and a small number on Europe, in addition to studies from the Latin American continent.

The comparison between Scopus and Rstudio/bibliometrix allowed us to perform a parallel analysis of the information provided, as well as the efficiency to produce statistical data from the database and the Software, which allowed us to conclude that Rstudio had some shortcomings at the time of analyzing all the articles, however, there were no discrepancies in the information provided by either of the two tools, since the information was coherent and related to each other.

KEYWORDS: Bioremediation, Cadmium, *Bacillus* spp, *Trichoderma* spp, *Pseudomonas* spp.
review, articles.

5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La contaminación por metales pesados en el mundo en general es un problema que va en aumento debido a la actividad antrópica, específicamente actividades relacionadas con la minería, la agricultura y diferentes actividades industriales. La contaminación por metales pesados y metaloides en recursos hídricos, suelos y aire plantea una de las más graves problemáticas que comprometen el ecosistema, la seguridad alimentaria y además de eso la salud pública a nivel global y nacional. Dentro de los metales pesados destaca el cadmio, que se encuentra tanto en el ambiente como en los alimentos, además de que la exposición limita la vida útil del suelo y contamina la red trófica. Los efectos como bien se menciona al medio ambiente son bastantes graves y hablando puntualmente, cambia la alcalinidad del suelo, esto depende casi que netamente de la concentración que esté presente, la alta concentración de diferentes metales pesados causa alteraciones en las plantas y su morfología, lo que hace que sean afectados los cultivos disminuyendo su productividad, si la contaminación es excesiva, puede llegar a producir desertificación. (Reyes Yc *et al.*, 2016)

A nivel de los ríos y lagos, afecta principalmente la fauna; el problema de la contaminación por parte de los metales pesados al ecosistema es que su efecto es sigiloso y silencioso, y cuando el daño se hace evidente ante el ojo humano, normalmente el daño es irreversible. Actualmente se han tomado medidas para mitigar este daño, pero en países industrializados ha sido difícil este tipo de implementación por parte de los gobiernos y las mismas industrias (Romero, 2009).

Cada año se producen entre 7.000 y 10.000 millones de toneladas de residuos en todo el mundo, de los cuales entre 300 y 500 millones son residuos peligrosos, es decir, tóxicos, inflamables, explosivos, corrosivos o con riesgo biológico. (National Geographic, 2022)

Tan solo en los Estados Unidos, la principal fuente de exposición al cadmio para personas que no fuman es la alimentación, ya que las hojas de hortalizas tales como la lechuga o la espinaca, papas, cereales, cacahuets, entre otros contienen niveles altos de cadmio, aproximadamente 0.05 -- 0.12 mg/cadmio/kg. (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016).

El cultivo de cacao se enfrenta a numerosos problemas y retos, entre ellos la presencia de Cadmio en el suelo, América latina aporta hoy en día aproximadamente el 15% de la producción mundial de cacao, y Colombia es uno de los principales productores que produce ciertas especies de cacao con diferentes calidades especiales. El cadmio (Cd), se acumula en los granos de cacao en elevadas concentraciones y ciertas dosis pueden ser mortales para la salud animal y humana, los niveles de cadmio en los granos dependen de algunos factores, que pueden ser químicas, físicas, o biológicas del suelo, la contaminación por uso de fertilizantes o agroquímicos, el agua de riego, la capacidad de la planta para asimilar las cantidades existentes de cadmio; esta problemática ha sido estudiada por numerosos investigadores e instituciones de países tanto productores como consumidores en el caso de Colombia encontramos a FEDECACAO (Fondo Nacional del Cacao) y AGROSAVIA (entidad de Ciencia, Tecnología e Innovación, que contribuye al cambio técnico para mejorar la productividad y competitividad de la agricultura). Actualmente Fedecacao trabaja para la mitigación del cadmio con los países latinoamericanos que se destacan por ser productores, Colombia, Ecuador, Perú y Trinidad y Tobago (países LAC), a través de un enfoque regional

coordinado, teniendo previsto un proyecto que dure aproximadamente 2 años, con la finalidad de definir lineamientos y orientaciones frente a las nuevas medidas comerciales y ajustes que establecen límites de cadmio en grano y producto terminado. (Fedecacao, 2023)

En diversidad de estudios los autores mencionan diferentes mecanismos para la mitigación del cadmio en el medio ambiente ya que como bien se viene mencionando es un metal altamente contaminante y persistente, difícil de remediar; una de las metodologías más utilizadas son las enmiendas orgánicas, que básicamente son cualquier material orgánico, incluido el compost, abonos, animales, desechos orgánicos, biofertilizantes, residuos de cultivos o agentes que condicionan el suelo de manera sintética, que se incorporan al suelo o se aplican para recuperar los nutrientes del suelo, Asimismo, dichas enmiendas pueden usarse como sumideros para reducir la biodisponibilidad del metal en suelos y sedimentos contaminados a través de su efecto sobre la adsorción, intercambio iónico, precipitación reducción y su volatilización de dicho metal; también se ha hablado de la fitorremediación como una gran alternativa para suplir las necesidades del ecosistema en cuanto a contaminantes relacionados a metales pesados, entre otros. (Beltrán-Pineda, 2016)

6 INTRODUCCIÓN

La presente monografía aborda la temática del uso de los géneros microbianos *Trichoderma* spp, *Pseudomonas* spp y *Bacillus* spp en procesos de biorremediación de suelos contaminados con Cadmio. Esta elección se fundamenta en la importancia de abordar la contaminación por Cadmio en el ecosistema y en la capacidad de estos microorganismos para mitigar dicho impacto.

La contaminación del suelo con Cadmio es una problemática ambiental de creciente preocupación, por la toxicidad de este metal pesado y sus efectos adversos en la salud humana y el ecosistema. En este contexto, la utilización de microorganismos, como *Trichoderma* spp, *Pseudomonas* spp y *Bacillus* spp, se ha destacado como una estrategia prometedora para la biorremediación de suelos contaminados. El propósito de esta monografía es realizar una revisión del estado del arte en el uso de los microorganismos mencionados anteriormente en la biorremediación de suelos afectados por Cadmio. Se sitúa como una investigación que combina elementos de compilación y análisis de experiencias, con el objetivo de proporcionar una visión integral de las investigaciones existentes en este campo. La estructura de la monografía se divide en 6 capítulos específicos, comenzando con una contextualización de la problemática ambiental y de salud que genera el Cadmio, la importancia de la biorremediación y los mecanismos que utilizan los microorganismos para dicho proceso. Los siguientes capítulos abordan la revisión sistemática de la literatura científica, el análisis de la influencia de los microorganismos y la documentación de la información recopilada en las bases de datos. Finalmente, se presenta las conclusiones generales y sugiere recomendaciones con un enfoque perspectivo para las investigaciones futuras en la biorremediación del Cadmio mediante el uso de microorganismos.

7 OBJETIVOS

7.1 Objetivo General

Realizar una revisión del estado del arte del uso de los géneros microbianos *Trichoderma* spp, *Pseudomonas* spp y *Bacillus* spp en procesos de biorremediación de suelos contaminados con Cadmio.

7.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión sistemática de la información científica disponible relacionada con la acción biorremediadora de *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp y *Pseudomonas* spp en suelos contaminados con Cadmio.
- Analizar la información encontrada sobre la influencia de la aplicación de *Trichoderma* spp., *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp. tanto individual como colectivamente (consorcio) en suelos contaminados con Cd y su posible uso como biorremediador.
- Documentar la información encontrada en las bases de datos.

8 METODOLOGÍA

La presente monografía plantea una revisión sistemática, referente al uso de microorganismos como *Trichoderma* spp, *Pseudomonas* spp y *Bacillus* spp. en procesos de biorremediación de Cadmio. Dicha investigación se fundamenta principalmente para obtener conocimientos profundos y recientes sobre la problemática; se realizó un análisis en bases de datos de la UCM – Biblioteca Josefina Núñez Gómez, específicamente en la base de datos de SCOPUS, en los recursos de acceso libre, como de acceso restringido, las búsquedas fueron realizadas en los meses de octubre de 2022 a junio - julio de 2023; en diferentes bases de datos como Science direct, Scielo, documentos gubernamentales y organizacionales, además del uso de una inteligencia artificial (IA) denominada “Rayyan” (2016) 5:210, DOI: 10.1186/s13643-016-0384-4. como método de selección de la información científica empleada en la investigación. Los filtros utilizados fueron artículos de 5 o máximo 7 años de antigüedad. Para la revisión sistemática y posterior análisis, un periodo de 2019 a 2023; las ecuaciones para dichas búsquedas fueron:

Ecuación #1: “Bioremediation” “cadmium” “*Bacillus*” 2020 to 2023

Ecuación #2: “Bioremediation” “cadmium” “*Trichoderma*” Pubyear 2019 to 2023.

Ecuación #3: “Bioremediation” “cadmium” “*Pseudomonas*” Pubyear 2019 to 2023,

Ecuación #4: “Bioremediation” “cadmium” “consortium” Pubyear 2019 to 2023.

En la suma de las búsquedas se obtuvo un número de 1240 documentos de carácter científico (exactamente en la fecha de búsqueda) adicional a esto, se añadieron a la revisión los documentos de libre acceso que fueron filtrados por “Rayyan” para la selección del marco teórico del documento; el uso del Software Rstudio para windows Version: 2023.12.1+402 proporcionó datos

bibliométricos, como datos demográficos, estadísticos, conceptuales entre otros, que permitieron hacer un análisis y también un comparativo entre lo que nos puede brindar una base de datos a un software bibliométrico, y con los cuales se realizaron las conclusiones de las búsquedas, además de las ya proporcionadas por la base de datos.

8.1 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método es tipo descriptivo ya que no se construye ninguna situación ni se plantea ningún ensayo de campo o laboratorio, sino que se observan situaciones ya planteadas; se recolecta información y se observa el comportamiento de diferentes variables sin realizar modificación de los datos.

8.2 INFORMACIÓN SECUNDARIA

La información obtenida de distintas fuentes y el uso del software Rstudio Version: 2023.12.1+402 funcionó para soportar los análisis realizados, así como los datos, las cifras entre otros resultados relevantes, las principales fuentes fueron obtenidas de revistas científicas como Scielo, Sciencedirect, Pubmed, scopus trabajos de grado, entre otros estas fueron la mejor fuente de cifras y datos actualizados.

9 MARCO CONCEPTUAL

CAPÍTULO 1

9.1 CADMIO Y SUS IMPLICACIONES EN LA SALUD Y EL MEDIO AMBIENTE

La acumulación de varios metales pesados en el ambiente natural son una preocupación para la salud de todos los organismos vivos; ésta se puede generar por los efluentes industriales que transportan metales pesados, lodos tóxicos y diversos solventes; los metales pesados de este tipo de desechos o actividades relacionadas al desarrollo industrial que ingresan a los ecosistemas causen riesgos para la salud de los animales, las plantas, los humanos y los biotopos acuáticos. (Balasubramanian, T. Soy. J. Chem *et al.* 2012)

Desafortunadamente diferentes situaciones derivadas del estrés medioambiental están dejando problemas respecto a la degradación del suelo tales como salinización, erosión, contaminación, pérdida de materia orgánica y su biodiversidad, la contaminación de metales pesados es uno de los problemas de mayor gravedad ya que tienen una gran magnitud, debido a su toxicidad, persistencia, y bioacumulación a través de la cadena alimenticia, que se relaciona directamente a la salud del ser humano (Nadeem Sarwar *et al.* 2017)

Existen gran variedad de metales pesados, tales como, mercurio (Hg), cobre (Cu), cromo (Cr), zinc (Zn), cadmio (Cd), arsénico (As) y plomo (Pb), estos son mutagénicos, tóxicos para las células y su replicación, por lo que inducen a cambios cancerígenos tanto en el ser humano como en otros organismos, además de la contaminación en el suelo, aquellos desechos que caen en aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas que contienen metales pesados pueden afectar críticamente las aguas subterráneas, (Chellaiah *et al.* 2018)

Los metales pesados usualmente son liberados por actividades antropogénicas como la minería, fundición, galvanoplastia y procesos químicos, entre esos metales pesados, son representativos el Cd y otro tipo de metales pesados que incluso en bajas concentraciones pueden traer daños irreversibles para las plantas, animales y humanos, estos daños incluyen el mal desarrollo de la planta y su reproducción, reduce la respiración mitocondrial, la modulación del ciclo celular o apoptosis, y trae riesgos carcinogénicos o enfermedades cardiovasculares, por ello es de vital importancia aliviar estos efectos de dichos metales para mantener la salubridad alimentaria y la vida del medio ambiente. (Beltrán-Pineda, 2016)

El cadmio, fue descubierto en Alemania en 1817 por Friedrich Stromeyer como una impureza del carbonato de Zinc, desde aquel descubrimiento rara vez se usó, hasta hace aproximadamente 40 años que se le encontraron aplicaciones en el sector metalúrgico por lo general, el cadmio no se encuentra en el ambiente como un metal puro, se encuentra de una manera más abundante en la naturaleza en forma de óxidos complejos, sulfuros y carbonatos en el Zinc, plomo y menas de cobre. Existe un cadmio “suave” y de un color blanco plateado, este es relativamente barato, ya que es un subproducto del procesamiento de metales que cuestan mucho más, como el zinc y el cobre. El Cadmio tiene diversas aplicaciones, como en galvanoplastia, la galvanostegia y la galvanización, así como el uso que tiene en los plásticos, algunos pigmentos para crear tintes, y cerámica, además de eso podemos encontrarlo en baterías de níquel y cadmio, son importantes para el ser humano por su gran resistencia a la corrosión, a propiedades electroquímicas y a otras características que suelen ser muy provechosas. Podemos encontrarlo naturalmente presente en diversas concentraciones en la roca de fosfato extraída para ser usada como fertilizante en agronomía, estos también son expulsados por los volcanes a través de la fusión de diversos metales pesados, también se genera a partir de la quema de combustibles fósiles y de biomasa; este metal

ingresa al medio ambiente a través de diversas fuentes naturales y también antropogénicas. (Institut für Seltene Erden und strategische Metalle, 2019)

La producción de dicho metal ha aumentado drásticamente en los últimos años, ya que se pasó de 2004 a producir unas 18,800 toneladas, mientras que 3 años después, en el 2007 se llegó hasta 19,900 toneladas. Se puede calcular que cada año se libera al medio ambiente entre 28,000 y 32,000 toneladas de cadmio, de las cuales en una mayor proporción provienen de la erosión de rocas que llegan a los ríos, posteriormente a los océanos. Por actividades relacionadas a la minería y el uso de combustibles fósiles se liberan entre 5,000 y 15,000 toneladas. Ahora bien, un dato importante que cabe mencionar es que los metales no pueden ser reciclados, por lo que es consecuente con la contaminación ambiental que provoca; el cadmio que se encuentra en pequeñas partículas o adheridas a ellas pueden ingresar al aire y viajar Km antes de regresar a la tierra convertido como polvo, lluvia o nieve, no se descompone pero puede tomar diferentes formas, según varios estudios, la concentración de cadmio en el aire de áreas rurales varía de 0.3 a 6 ng/m³, en áreas urbanas de 3 a 16 ng/m³ y en áreas industriales de 20 a 139 ng/m³. El tiempo de permanencia del cadmio en los suelos es de 250 años, aproximadamente, y gran cantidad de este no se transforma, llega en mayor proporción a los terrenos agrícolas por fertilizantes fosfatados, deposición aérea y por aplicación de abono de estiércol. (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 1999)

El Cd puede encontrarse como partículas o vapores en procesos de alta temperatura, en la atmósfera encontramos que este metal se puede transportar a grandes distancias que posteriormente se depositarán sobre la superficie del suelo o las aguas. El Cd ingresa a las capas del suelo a través de una serie de vías, incluidas la lixiviación o descomposición de partes

específicas de las plantas, el uso de desechos, la aplicación de fertilizantes, pesticidas entre otros. (Kabata-Pendias y Pendias, 2001).

El Cd puede encontrarse como ion hidratado asociado a materiales tanto inorgánicos como orgánicos, estos compuestos que sean solubles van a ser transportados en el agua, mientras que los que son insolubles, se depositarán como sedimento, se han informado grandes cantidades de Cd en las fuentes de agua cercanas a la industria que emiten este tipo de metal, según estudios llevados a cabo y registrados en la literatura, el riego con agua que contenía cloruro de sodio (NaCl) aumentaba la concentración de Cd en las tuberías de escape por encima de los estándares del agua potable, de esta forma se concluye que el agua incrementa la movilidad del metal. (KN Rodríguez Villanueva, 2022)

El cadmio (Cd) es altamente tóxico para cualquier ser vivo incluso en concentraciones bajas, el Cd entra al cuerpo de humanos y animales a través de la alimentación y se bioacumula, causando patologías graves; este metal pesado no cumple ni es necesario para ningún tipo de función biológica, pero sí la afecta, ya que inhibe la transformación mediada por el ADN en los microorganismos, sus funciones morfológicas, celulares y enzimáticas se ven afectadas ya que estos también afectan la relación simbiótica con las plantas; en ese mismo sentido, la bioacumulación de Cd en la mayoría de las plantas altera funciones bioquímicas, cambios estructurales y procesos fisiológicos, donde se afecta la absorción de minerales, funciones fotosintéticas, existe la interferencia enzimática que afecta el metabolismo de los carbohidratos, reduciendo entonces la producción de distintos cultivos. (Abdullah Al-Dhabi *et al.* 2019)

Puede acumularse en diferentes sitios morfológicos de la planta, y en la fauna edáfica o animales a través del consumo de agua contaminada proveniente de la red trófica (Isaura, 2011 Citado por Carlos Daniel Zafra, Jean Pierre Flores Tique, 2020).

Este puede alterar la absorción de minerales por las plantas a través de sus efectos sobre la disponibilidad de minerales del suelo o bien sea por la reducción de la cantidad de microorganismos existentes en el suelo. El cadmio siempre ha sido de gran importancia e interés de estudio debido a que se encuentra en particular abundancia en fertilizantes, estos al ser añadidos al suelo teniendo una alta concentración de Cd puede ocasionar importantes incrementos en la absorción en los cultivos en los que se encuentre (Grant *et al.*, 1999 Citado por Čásová *et al.*, 2009). El cadmio ingresa al tejido vegetal molecularmente mediante los sistemas de raíces donde absorben gran cantidad del metal, posteriormente ingresan a los brotes pasando de las raíces, así como a las hojas y finalmente al fruto o semillas de la misma; según la literatura otra de las vías más comunes de ingreso es desde la atmósfera por donde viaja el cadmio a través de la transferencia foliar (Hou *et al.*, 2020 Citado por Li *et al.*, 2022), al ingresar el Cd a la planta ésta y su sistema inmune induce mecanismos de defensa, lo cual a nivel bioquímico afecta su metabolismo y la actividad enzimática relacionada al ciclo de krebs, estos efectos tóxicos se manifiestan debido al estrés oxidativo, aumentando la peroxidación lipídica, además de la producción de especies reactivas de oxígeno y peróxido de hidrógeno en las raíces y las hojas (Zaborowska, Wyszowska, & Kucharski, 2015).

Se infiere que el mayor riesgo de contraer alguna enfermedad relacionada al Cd es por contaminación en el suelo, ya que es probable que este se acumule en la superficie de la corteza por actividades relacionadas al ser humano; sin embargo, niveles muy altos de Cd pueden deberse también a su origen litogénico (Kabata-Pendias, 2010). Éste se puede mover a través del suelo, pero dependerá de algunos factores como el pH, el potencial redox, el intercambio catiónico, y además de eso óxidos e hidróxidos, también de la cantidad de materia orgánica que allí se encuentre (Bolan *et al.*, 2014 Citado por en Mayra Eleonora *et al.*, 2016), donde puede unirse

fuertemente quedando inmóvil en el suelo, siendo absorbido por las plantas. El pH del suelo es considerado el factor más importante que controla la absorción total y relativa del Cd. la solubilidad del Cd y otros metales pesados se relacionan en cuanto a funcionalidad del pH afectado por la cantidad y tipo de materia orgánica. (Fao, 2019)

Las manifestaciones clínicas de la exposición del cadmio pueden clasificarse de acuerdo al tiempo y modo de dicha exposición, estas pueden ser en agudas o crónicas, y también se clasifican de acuerdo a inhalación o ingestión, las intoxicaciones que afectan a la población en general suelen ser alimentarias, estas dependen netamente de su dosis, duración en el organismo y el tipo de exposición, la presencia de otras sustancias, así como el diario vivir de la persona, por ende serán variables y serán efectos nocivos como los de cualquier otra sustancia tóxica que ingresa a nuestro cuerpo. (Pérez *et al.* 2012).

Los principales lugares de almacenamiento del cadmio se encuentran en el hígado y riñones, sin embargo, los efectos tóxicos graves no aparecen inmediatamente, ya que la excreción es lenta con una media de vida extensa en el organismo del ser humano, este también puede acumularse en los tejidos de la piel a medida que vamos envejeciendo, un indicio típico de que existe exposición crónica al cadmio es porque la función renal se ve deteriorada. (Luevano and Damodaran, 2014, Pan *et al.*, 2010 Citado por Kateryna Tarhonska *et al.*, 2022)

Los pulmones también se consideran órganos importantes en la exposición al polvo de cadmio, se ha asociado dicha exposición a patologías como neumonía o neumonitis química asociada a disnea, tos, expectoraciones, disfunción respiratoria entre otros, las concentraciones de cadmio de más de 9 mg/m³ de aire durante un periodo determinado de tiempo pueden ocasionar edemas pulmonares tardíos de carácter mortal. La ingestión de aproximadamente 15 mg de cd puede causar trastornos que conllevan a las náuseas y vómitos como respuesta del sistema inmune, en dosis más elevadas

pueden causar efectos mortales para un adulto, otros síntomas graves son la diarrea, el dolor abdominal, entre otros. Se prevé que el Cd en suelos de cultivo europeos disminuya en un promedio de 15% en los próximos 100 años.

Coherentemente, los microorganismos del suelo constituyen una alternativa amigable para minimizar la absorción de Cd desde el suelo, microorganismos como hongos, bacterias y levaduras que habitan el subsuelo pueden absorber dichos metales pesados ya que los utilizan como fuente de nutrientes y energía, evitando que cualquier organismo vivo pueda intoxicarse; se han investigado varias técnicas de remediación de suelos en experimentos de campo y ambientes que han sido controlados, como por ejemplo, lavado de suelos, fitorremediación, excavación y electroremediación, entre otros; las técnicas anteriormente mencionadas utilizan mecanismos de contención, extracción, eliminación e inmovilización para los efectos de contaminación a través de procesos físicos, químicos, biológicos, así mismo eléctricos y térmicos, pero la mayoría de estos procedimientos tienen consecuencias en el medio ambiente, ya que puede aumentar la movilidad de los metales pesados, además de modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo. Consecuentemente con esto, la biorremediación llega como una alternativa para eliminar y/o cooperar estos procedimientos de remediación de dichos contaminantes en el suelo, con organismos que pueden trabajar simplificada o conjuntamente, por ende, la biorremediación estimula el crecimiento de determinados microbios que usan los contaminantes como fuente de alimento y energía, algunos contaminantes que se tratan con biorremediación son el petróleo y algunos derivados de los mismos, solventes y plaguicidas. (John N. Huaraca *et al.*, 2020 Citado por Pancorbo Arias *et al.*, 2020)

Los microorganismos se han convertido en una alternativa para desarrollar los procesos de biorremediación de metales pesados, por ello es importante conocer la participación de

Trichoderma spp., *Pseudomonas* spp., y *Bacillus* spp. desde las generalidades hasta los mecanismos que utilizan para dichos procesos.

CAPÍTULO 2

9.2 USO DE MICROORGANISMOS EN LA BIORREMEDIACIÓN: GENERALIDADES Y MECANISMOS

La biorremediación se refiere en términos generales a cualquier proceso en el que se emplea un sistema biológico (típicamente bacterias, microalgas, hongos en micorremediación y plantas en fitorremediación), vivo o muerto, para eliminar contaminantes ambientales del aire, el agua, el suelo, los gases de combustión, los efluentes industriales, etc., en entornos naturales o artificiales. La capacidad natural de los organismos para absorber, acumular y degradar contaminantes comunes y emergentes ha atraído el uso de recursos biológicos en el tratamiento del ambiente contaminado. En comparación con los métodos de tratamiento físico químicos convencionales, la biorremediación puede ofrecer ventajas considerables, ya que pretende ser sostenible, ecológica, barata y escalable. (Keni cota, 2019)

9.2.1 Técnicas de biorremediación ex situ

Estas técnicas implican excavar contaminantes de sitios contaminados y transportarlos a otro lugar para su tratamiento. Las técnicas de bior-remediación ex situ se consideran generalmente en función del costo de tratamiento, la profundidad de la contaminación, el tipo de contaminante, el grado de contaminación, la ubicación geográfica y la geología del sitio contaminado. También se han establecido criterios de rendimiento que determinan la elección de técnicas de biorremediación ex situ (VINAS, 2002. Citado por Roland Mauricio Suarez, 2013).

9.2.1.1 Biopila

La biorremediación mediada por biopilas implica la acumulación sobre el suelo de suelos contaminados excavados, seguida de la enmienda con nutrientes y, a veces, de la aireación para mejorar la biorremediación, aumentando básicamente las actividades microbianas. Los componentes de esta técnica incluyen aireación, sistemas de riego, nutrientes y recolección de lixiviados, y una cama de tratamiento. La aplicación de esta técnica ex situ se considera cada vez más debido a sus características constructivas, incluida la rentabilidad, que permite una biodegradación efectiva siempre que los nutrientes, la temperatura y la aireación estén adecuadamente controlados. La biopila puede utilizarse para remediar sitios contaminados, limitando la volatilización de contaminantes de bajo peso molecular (LMW) y tratando eficazmente entornos extremadamente contaminados como las regiones muy frías (Roland Mauricio Suarez, 2013).

9.2.1.2 Hileras

Como técnica de biorremediación ex situ, las hileras dependen de la vuelta periódica del suelo contaminado amontonado para mejorar la biorremediación al aumentar las actividades de degradación de bacterias hidrocarbonoclasticas autóctonas y/o transitorias presentes en el suelo contaminado. El giro periódico del suelo contaminado, junto con la adición de agua, aumenta la aireación, la distribución uniforme de contaminantes, nutrientes y actividades de degradación microbiana, acelerando así la tasa de biorremediación. (Stephany Arocha, 2022)

9.2.1.3 Biorreactor

El biorreactor es un recipiente en el que las materias primas se convierten en productos específicos a través de una serie de reacciones biológicas. Tiene diferentes modos de operación, como lote, alimentado por lotes, secuenciado por lotes, continuo y multietapa. La elección del modo de operación depende en su mayoría de la economía del mercado y del gasto de capital. Los biorreactores ofrecen un control excelente de los parámetros del bioproceso y pueden tratar suelos o agua contaminados con compuestos orgánicos volátiles (COVs). Su diseño flexible permite una degradación biológica máxima y pérdidas abióticas mínimas. La capacidad para controlar y manipular parámetros del proceso en un biorreactor hace que las reacciones biológicas puedan mejorarse para reducir eficazmente el tiempo de biorremediación. (Mishra, 2001. Citado por Roland Mauricio Suarez, 2013).

9.2.2 Técnicas de Biorremediación In Situ

Las técnicas de biorremediación in situ se centran en tratar sustancias contaminadas en el lugar sin necesidad de excavación, minimizando la perturbación del suelo. La ausencia de procesos de excavación puede hacer que estas técnicas sean potencialmente más económicas en comparación con las técnicas ex situ. Sin embargo, el diseño y la instalación de equipos sofisticados para mejorar las actividades microbianas durante la biorremediación in situ pueden generar costos adicionales.

9.2.2.1 Bioventing

El bioventing implica estimular el flujo de aire controlado entregando oxígeno a la zona insaturada del suelo para aumentar la degradación, mejorando las actividades microbianas. Se ha vuelto popular, especialmente en la restauración de sitios contaminados con productos petrolíferos ligeros. La tasa de inyección de aire es un parámetro crucial, ya que afecta la dispersión uniforme

de contaminantes, y factores como la porosidad del suelo y las condiciones ambientales pueden influir en la eficacia. (Roland Mauricio Suarez, 2013).

9.2.2.2 Biosparging

A diferencia del bioventing, el biosparging inyecta aire en la zona saturada del suelo, promoviendo la biodegradación al inducir el movimiento ascendente de compuestos orgánicos volátiles hacia la zona no saturada. La permeabilidad del suelo y la biodegradabilidad del contaminante son factores determinantes en la efectividad de esta técnica. Se ha utilizado ampliamente en la descontaminación de acuíferos contaminados con productos derivados del petróleo. (EPA, united states enviromental protection agency, 2017)

9.2.2.3 Fitoextracción:

La fitoextracción emplea plantas para extraer o degradar contaminantes. Mecanismos como la acumulación, degradación y volatilización se activan dependiendo del tipo de contaminante (elemental u orgánico). La selección de plantas es crucial y debe considerar factores como la toxicidad del contaminante, la adaptabilidad de la planta y el tiempo necesario para lograr la limpieza deseada. Estas técnicas ofrecen ventajas como una menor perturbación del suelo en comparación con los métodos ex situ. Sin embargo, los resultados en ensayos de campo pueden variar debido a factores ambientales y las características específicas del suelo. Combinar técnicas, como bioventing y biotrickling filter, puede abordar desafíos específicos, reduciendo los tiempos de tratamiento prolongados asociados con el bioventing solamente. La biorremediación exitosa

implica optimizar las capacidades de las plantas nativas mediante la bioaumentación o la biestimulación. La elección de técnicas dependerá de la naturaleza del sitio y los contaminantes involucrados, destacando la importancia de un enfoque adaptativo y multifacético para abordar la complejidad de la contaminación ambiental. (Roland Mauricio Suarez, 2013).

9.3 Mecanismos usados por los microorganismos para procesos de biorremediación

Los microorganismos pueden lograr adaptarse y resistir a metales pesados en ambientes altamente contaminados. Las sustancias poliméricas extracelulares presentes en la pared celular de la biomasa pueden unirse a metales pesados mediante mecanismos como el intercambio de protones o la micro-precipitación de metales. Las superficies de la biomasa tienen una carga negativa debido a la presencia de grupos carboxilo, amino, fosforilo y sulfuro como sitios potenciales de intercambio iónico y sumideros de metales. El proceso de biorremediación se lleva a cabo a través de varios mecanismos, como el proceso redox, la adsorción, la complejación, el intercambio iónico, la precipitación y la atracción electrostática. (Martínez–Prado *et al*, 2011)

Los microorganismos desempeñan un papel crucial en la movilización e inmovilización de metales a través de reacciones redox, lo cual puede afectar significativamente los procesos de biorremediación. Metales pesados como Fe, As, Cr y Hg exhiben ciclos de oxidación y reducción. La biorremediación se destaca al transformar un elemento de su forma estacionaria e insoluble en sedimentos a una fase móvil y soluble. Sin embargo, la movilización conlleva riesgos, ya que los iones de metales tóxicos pueden redistribuirse desde su fase sólida en sedimentos hacia la fase líquida, aumentando su biodisponibilidad y su posible ingreso a los sistemas metabólicos microbianos.

Los microorganismos desempeñan un papel esencial en la inmovilización de metales, sirviendo como sumideros para estos a través de diversos mecanismos, ya sea ex situ o in situ. Estos mecanismos incluyen la biosorción, bioacumulación, bioconversión y precipitación intra/extracelular, como la formación de oxalatos de Zn, Cu, Co, Cd, Ni. Estos procesos facilitan la eliminación efectiva de un elemento de su fase acuosa, ya sea en aguas subterráneas o aguas residuales. Ejemplos específicos ilustran cómo la actividad microbiana puede inmovilizar metales. Por ejemplo, la oxidación bacteriana de As (III) a As(V) conduce a su retención por sedimentos. Microorganismos como *Methanothermobacter thermautotrophicus* se emplean para reducir Cr (VI) a Cr (III), inmovilizándolo en forma de hidróxido/óxido. Informes también destacan la capacidad de bacterias como *Bacillus cereus* y *Shewanella sp.* para reducir e inmovilizar Cr (VI). Las estructuras celulares, como la pared celular y la membrana plasmática, actúan como barreras reguladoras, controlando la entrada de iones metálicos en las células. En resumen, la comprensión de estos procesos microbianos en la movilización e inmovilización de metales es esencial para mejorar las estrategias de biorremediación de manera efectiva. (Meena Kapahi and Sarita Sachdeva, 2019)

CAPÍTULO 3

9.4 *Trichoderma* spp Y SUS APLICACIONES EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN

9.4.1 Generalidades

El género *Trichoderma* spp. Suele ser saprofito y de crecimiento veloz, consta de más de 200 especies definidas molecularmente (Atanasova *et al.*, 2013). Las especies están distribuidas geográficamente por todas las latitudes y se presentan naturalmente en distintos ecosistemas, especialmente en aquellos con contenidos de materia orgánica o desechos vegetales en descomposición, mundialmente son conocidos por su amplio uso como controladores biológicos, debido a que son capaces de degradar diferentes compuestos que pueden llegar a ser contaminantes del medio ambiente, es un hongo multifuncional, capaz de comportarse como un anaerobio facultativo, estos atributos le permiten tener una mayor “plasticidad” ecológica ya que tal capacidad adaptativa a diversas condiciones ambientales y sustratos le confiere al género la posibilidad de usarse en la biotecnología (Martínez,*et al.* 2015). En el año 1794, Persoon describió el género *Trichoderma* por primera vez, y aun en la actualidad se sigue estudiando y actualizando sobre el tema.

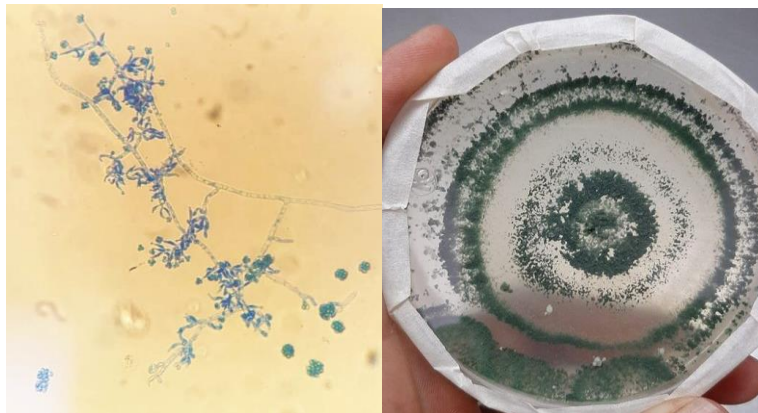


Figura 1 Hongo *Trichoderma* spp. visto al microscopio (a) y cultivo en agar papa dextrosa (b) Fuente: Autor.

9.4.2 Taxonomía

Reino	Fungi
Sub-reino	Dikarya
Phylum	Ascomycota
Sub-Phylum	Pezizomycotina
Clase	Sordariomycetes
Sub-clase	Hypocreomycetidae
Orden	Hypocreales
Familia	Hypocreaceae
Género	<i>Trichoderma</i>

Tabla #1 Fuente: NCBI: 2024

Trichoderma spp. Se clasifica como un hongo anamórfico, el estado teleomorfo se ha visto en pocas especies. En este sentido se han identificado: *Hypocrea lixii* Chaverri en el estado teleomorfo de *Trichoderma harzianum* Rifai, *Hypocrea atroviridis* Dodd como el teleomorfo de *Trichoderma atroviride* P.karst (Bissett) e *Hypocrea virens* KullnigGradinger en el teleomorfo de *Trichoderma virens*, especies utilizadas ampliamente como agentes de control biológico (Miller, Giddens & Foster Citado por en Martínez, B *et al.*, 2015).

El ciclo de vida de *Trichoderma* spp. inicia cuando el hongo se ramifica con una hifa que mide entre 6 a 11 μm de diametro, el momento de la esporulación asexual ocurre cuando gran número de las esporas de 4 a 6 μm se liberan al entorno, la formación de clamidosporas es intercalada e individualmente, sin embargo, a veces 2 o más clamidosporas pueden mezclarse y fusionarse.

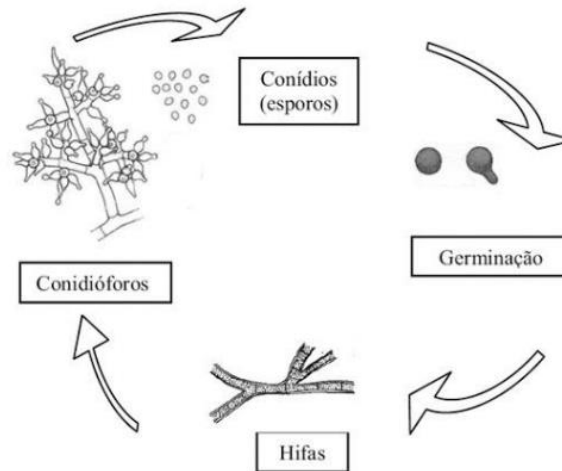


Figura 2 Ciclo de vida asexual de *Trichoderma* spp. Fuente: Machado *et al*, (2012).

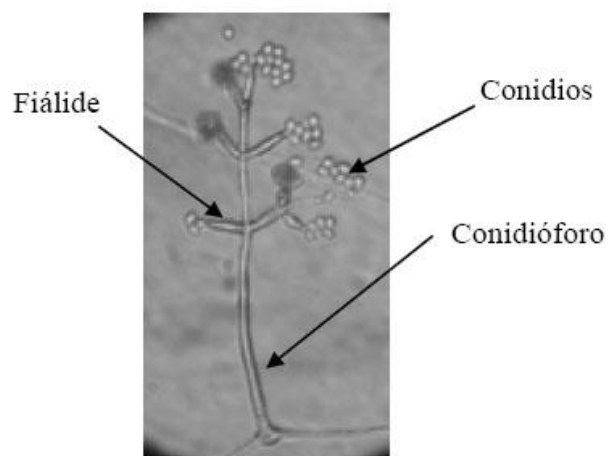


Figura 3 Conidios y conidióforos de *Trichoderma* spp. (40x) Fuente: Danay Infante *et al*, (2009)

Martínez *et al.* (2015), señala que las colonias de los aislamientos de *Trichoderma* spp. son de crecimiento rápido, color blanquecino y además de ello en el inicio de la colonización del sustrato o del medio de cultivo inician de color blanco, posteriormente se tornan verde oscuro con abundante esporulación.

En agar papa dextrosa (PDA), el hongo no presenta micelio aéreo y su pigmentación es variable de un color verde oscuro a verde claro, puede tornarse de color amarillento dependiendo de la especie, durante su desarrollo y crecimiento produce hifas de 5 - 10 micras de ancho que conforman el micelio septado, paredes compuestas por quitina y glucano, sus conidióforos tienen forma cilíndrica, produce conidios asexuales unicelulares de color verde o hialino, lisos con paredes ásperas entre otras características relevantes. Pueden producir clamidosporas, las cuales se caracterizan porque son estructuras que el hongo usa para su supervivencia, sus estructuras de esporulación son los conidios, que son mucho más pequeños que las clamidosporas ya que tienen una gran cantidad de lípidos que sirven como reserva para el metabolismo del hongo. (Rodríguez Villanueva, & Kasandra Nataly, 2022)



Figura 4 *Trichoderma* spp sembrado en agar PDA fuente: Autor.

Trichoderma spp. Se encuentra entre los hongos que se han aplicado en diferentes actividades humanas como la agricultura, la biorremediación, el manejo de desechos y la biotecnología. La literatura sugiere que las cepas de *Trichoderma* spp. tolerantes a los metales podrían desempeñar un papel importante en la bioacumulación de metales pesados (Nongmaithem *et al.* 2016). *Trichoderma* spp. demuestra un gran potencial de biorremediación para cadmio, y otros metales pesados, además es considerado medioambientalmente sostenible. El comportamiento de los microhábitats de las especies de *Trichoderma* tras la exposición a compuestos metálicos puede cambiar según el tipo de metal y la cepa de *Trichoderma*. (López Errasquin y Vazquez 2003; Nongmaithem *et al.* 2016; Sahu *et al.* 2012; Ting y Choong, 2009)

9.4.3 Aplicaciones en procesos de biorremediación usando *Trichoderma* spp.

El género *Trichoderma*, es predominante en diferentes ecosistemas, y en una amplia gama de zonas climáticas, consta de más de 200 especies que se han definido molecularmente (Atanasova

et al., 2013). Algunas especies de *Trichoderma* toleran y desintoxican los metales pesados, por lo tanto, desempeñan un papel importante en la tecnología ecológica de eliminación de dichos metales (Ting y Choong, 2009). El comportamiento de los microhábitats de las especies pertenecientes a *Trichoderma* tras la exposición a compuestos metálicos puede variar dependiendo del tipo de metal y la cepa-especie de *Trichoderma*. Por ejemplo, *Trichoderma asperellum* TS141 y *Trichoderma harzianum* TS103 se han estudiado para determinar su capacidad de crecer en presencia de tres metales pesados, cadmio, plomo y níquel, en dicho estudio se midió el nivel de resistencia en medios líquidos la exposición y posterior resistencia a diferentes concentraciones de dichos metales pesados, este análisis se determinó variando dichas concentraciones de tres iones de metales pesados en una solución acuosa, teniendo en cuenta variables como efectos del pH y temperatura sobre la capacidad de absorción de los metales pesados por los microorganismos aislados, Los resultados mostraron que ambos hongos pudieron sobrevivir a la concentración máxima de 200 mg/L de metales pesados y eliminarlos. Para el Cd, la eficiencia de eliminación más alta con un 82% la registró *T. harzianum* con 200 mg/L de Cd en solución acuosa. En gran medida, la absorción de este metal pesado dependía mayoritariamente del pH, de modo que el valor óptimo de la absorción de Cd era de 9 para *T. asperellum* y 4 para *T. harzianum*. Además, la temperatura óptima fue de 35°C para la absorción de Cd en ambos hongos (S. Hoseinzadeh *et al*, 2017)

En otro estudio, donde se querían observar nuevos agentes de biorremediación de cadmio se realizó un estudio *in vitro* del efecto de 3 diferentes concentraciones de Cd (25 ppm, 100 ppm y 250 ppm), según el ritmo de crecimiento usado como parámetro de tolerancia, mostraban una sensibilidad de *Trichoderma* spp ante la presencia del cadmio, el ensayo se realizó mediante el uso de dichas concentraciones en cajas de petri con agar PDA, que mostraba que el ritmo de

crecimiento se reducía ante su presencia, los resultados fueron satisfactorios, ya que mostraron que fueron sensibles a la presencia de Cd y capaces de removerlo, las cepas que tuvieron esta remoción significativa fueron *T. brevicompactum*, *T. harzianum* y *T. spirale* (Torres *et al.*, 2017)

La presencia de cadmio reduce la tolerancia de *Trichoderma* spp, disminuyendo de manera significativa a medida que aumenta la concentración del metal, alcanzando hasta un 61% a 250 ppm. Según Hoseinzadeh *et al.* (2017), citado por José Cayotopa Torres *et al.* (2021), *Trichoderma* exhibe sensibilidad frente al cadmio, si bien puede soportar concentraciones más elevadas, con dos especies capaces de sobrevivir a 200 mg/L de Cd. Este hecho sugiere que *Trichoderma* puede actuar como un agente capaz de tolerar el estrés causado por el cadmio en el suelo, lo cual puede influir en la absorción del metal por distintos tipos de cultivos (Mohsenzadeh & Shahrokhi, 2014).

La investigación sobre la tolerancia de *Trichoderma* a diversas concentraciones de cadmio se llevó a cabo en pruebas in vitro, evidenciando que cepas mutantes de *Trichoderma* tienen la capacidad de resistir el estrés inducido por metales pesados (Kredics *et al.*, 2001a, 2001b). En otro estudio, se observó una disminución en la concentración de cadmio, un incremento significativo en la biomasa vegetal y un aumento en la clorofila en plantas de arroz tratadas con *Trichoderma* sp. cepa MT-4 (Nongmaithem *et al.*, 2017). Estos resultados subrayan el potencial de *Trichoderma* para promover el crecimiento de plantas en suelos contaminados con cadmio, destacando su papel en la mejora de la fitoextracción y en la reducción de los impactos negativos de este metal pesado en los cultivos.

En un estudio realizado, los autores observaron los efectos significativos de las diferentes concentraciones de Cd sobre la tolerancia por diferentes especies de *Trichoderma*, el estudio consistió en observar el crecimiento según la ausencia y la presencia de Cd, siendo especies diferentes pertenecientes al género *Trichoderma*. (Torres *et al.*, 2021)

En el contexto de la investigación sobre el crecimiento de diversas cepas de *Trichoderma*, se categorizaron en tres grupos según su velocidad de desarrollo. El primer conjunto, caracterizado por su rápido crecimiento, comprendía cepas como *Trichoderma harzianum* M1P, *Trichoderma koningiopsis* M3B y *Trichoderma sp* M52BR. El segundo grupo, de crecimiento intermedio, estaba compuesto por cepas como *Trichoderma harzianum* M17MC, *Trichoderma koningiopsis* M33L, *Trichoderma virens* M40H y *Trichoderma spirale* cepas M19T, M25AM y M55SM. En el tercer grupo se ubicaron cepas de crecimiento lento, como *Trichoderma brevicompactum* M43D. Además, se evaluó la resistencia al cadmio en estas cepas, revelando que, con una concentración de 25 ppm de cadmio, las especies más tolerantes fueron *T. harzianum* M17MC, *T. spirale* M19T y *T. koningiopsis* M33L. Con 100 ppm de cadmio, se observaron tres subgrupos: el primero con cepas altamente tolerantes, como *T. harzianum* M1P, *T. koningiopsis* M3B, *T. harzianum* M17MC, *T. spirale* M25AM, *T. koningiopsis* M33L y *Trichoderma sp.* M52BR; el segundo con tolerancia media, representado por *T. virens* M40H y las cepas de *T. spirale* M19T y M55SM; y finalmente, el tercer subgrupo con baja tolerancia, identificado por *T. brevicompactum* M43D (Cayotopa, 2021). Este análisis subraya la variabilidad en el crecimiento y la resistencia al cadmio entre las distintas cepas de *Trichoderma*, proporcionando datos valiosos para entender su comportamiento en diversos entornos ambientales.

Trichoderma harzianum M1P Y *Trichoderma koningiopsis* M3B fueron los que tuvieron alta tolerancia a Cd con un ritmo de crecimiento de 2.54 cm, en cuanto a la tolerancia media fueron *Trichoderma harzianum* M17MC, *Trichoderma koningiopsis* M33L y *Trichoderma spp.* M52BR con un ritmo de crecimiento entre 2,39 cm y 2,33 cm; y de tolerancia baja *Trichoderma. virens* M40H, *Trichoderma spirale* cepas M19T, M25AM y M55SM con un ritmo de crecimiento entre

2,25 cm y 2,03 cm; sin embargo, observamos tolerancia muy baja de *Trichoderma brevicompactum* M43D (Torres *et al*, 2021).

Trichoderma asperellum puede ser usada como un absorbente biológico de la polución por cadmio, ya que autores como Mohsenzadeh & Shahrokhi (2014) y Hoseinzadeh *et al*. (2017) reportaron que *Trichoderma asperellum* logró absorber Cd hasta 76,17%.

Trichoderma asperellum puede regular la acumulación de Cd dentro de las raíces de las plantas para evitar que el Cd se transporte a la sección aérea de la planta, a diferencia de los oligoelementos esenciales como Cu y Zn, el transporte del metal tóxico Cd en el xilema no está completamente determinado por el flujo de agua provocado por la tensión de la transpiración de la planta, por ende la distribución de Cd se reduce, en un estudio el contenido de Cd disminuyó la sección aérea y aumentó en la sección subterránea con la inoculación con *Trichoderma asperellum*. La colonización de *Trichoderma. asperellum* aumentó la acumulación de Cd y promovió la transferencia de Cd del brote a la raíz. En resumidas cuentas, la inoculación con *Trichoderma asperellum* podría suprimir el transporte de cd de la raíz al brote, que es el mecanismo clave para que en este caso las plantulas de maiz mejoren la tolerancia en respuesta al estrés que les genera la exposición al cadmio, estos mecanismos pueden deberse al secuestro de Cd en el micelio del hongo, y esto ayuda reducir la captación de cd. (Katarzyna Bandurska *et al* 2021.)

CAPÍTULO 4

9.5 *Pseudomonas* spp Y SUS APLICACIONES EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN

9.5.1 Generalidades

Pseudomonas es el nombre propio que se le ha dado al género de bacilos aerobios Gram negativos pertenecientes a la familia Pseudomonadaceae, se caracterizan por no ser fermentadores de la glucosa, catalasa positivos y con flagelos polares, no son formadores de esporas (O.F. Muller, 1773 Citado por Alfredo Pinzón-Junca, 2019). Su actividad enzimática convierte al género de las *Pseudomonas* spp en un grupo de microorganismos de interés, ya que suelen ser responsables de la degradación aeróbica de muchos compuestos en diferentes tipos de nichos ecológicos (Nava-Pérez *et al.*, citado por Pérez, Coto, Echemendía y Ávila, 2015). En 1996 se diferenciaron 2 grupos intergenéricos basados en secuencias de gen 16S rRNA al grupo denominado *P. aeruginosa* y el otro grupo *P. fluorescens* cada uno con especies provenientes de diferentes linajes (Slabbinck y Baets, 2010).

Este género microbiano es utilizado como bio-absorbente de Ni y bioacumulante de Pb (Lopez *et al.*, 2000 y Al-Aoukaty *et al.*, 1991 citados por Ferreira 2016 según villa nueva. 2022) *P. fluorescens* es una de las especies más interesantes de este género, ya que es considerada por muchos como un microorganismo promotor del crecimiento de las plantas, además de ser uno de los mejores agentes de control biológico (Rodríguez Villanueva, & Kasandra Nataly, 2022)

9.5.2 Taxonomía

Reino	Bacteria
Phylum	Proteobacteria
Clase	Gammaproteobacteria
Orden	Pseudomonadales
Familia	Pseudomonadaceae
Género	<i>Pseudomonas</i>

Tabla # 2 Fuente: NCBI: 2024

Shigeki Fujitani, MD *et al*, (2017) *Pseudomonas* spp tienen requisitos nutricionales mínimos, muchos son capaces de usar una amplia variedad de fuentes ambientales para la nutrición; *P. aeruginosa* a menudo solo necesita acetato y amoníaco como fuente de carbono y nitrógeno, respectivamente. Además, puede crecer de forma anaeróbica, y no realiza fermentación, sino que obtiene energía a partir de la oxidación de azúcares. El requerimiento nutricional flexible permite su crecimiento en ambientes marginales. Son organismos difíciles de erradicar de áreas que se contaminan; las especies de *Pseudomonas* spp. al igual que casi todas las bacterias, se reproducen de forma asexual por fisión binaria.

Pseudomonas spp. es un género en forma de bastoncillos de aproximadamente 0,5 a 0,8 µm por 1,5 a 3,0 µm, que tiene movilidad a través de de sus flagelos polares, a veces pueden estar presentes

más de dos flagelos, no desarrollan esporas (Compant *et al.*, 2005 citado por José-Alonso *et al.*, 2020), generalmente por sus características genéticas y su gran capacidad metabólica pueden adaptarse y colonizar diferentes tipos de suelos. Una característica relevante de las *Pseudomonas* spp. es que juegan un papel importante en en los suelos como “supresores de enfermedades” (Weller *et al.*, 2002 citado por José-Alonso *et al.*, 2020); son las responsables de mantener un equilibrio en los nutrientes del suelo (Mendes *et al.*, 2011 citado por José-Alonso *et al.*, 2020), generando un efecto indirecto al promover el desarrollo de la planta (Glick, 2012; Santoyo *et al.*, 2016 citado por José-Alonso *et al.*, 2020). ya que, sintetiza compuestos antibacterianos y fungicidas, realiza competencia por nutrientes, producción de sideróforos y la inducción de resistencia sistémica (Siddiqui y Shaukat, 2003; Alves *et al.*, 2004; José-Alonso Álvarez *et. al.*, 2020).

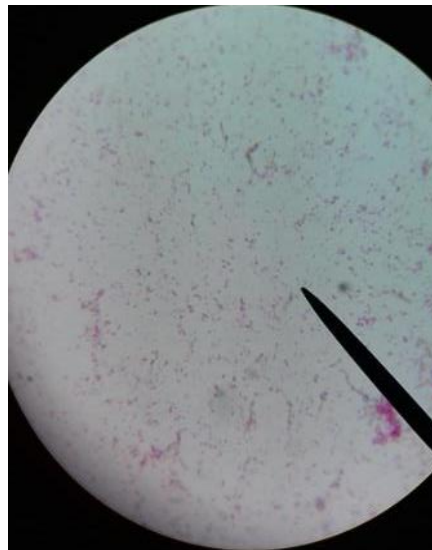


Figura 5 Bacteria *Pseudomonas* spp. Vista al microscopio en 100x, recuperado de un sustrato liofilizado como cepa ATCC en la tecno academia, Manizales

Fuente: Autor.

9.5.3 Aplicaciones en procesos de biorremediación usando *Pseudomonas* spp.

Las bacterias Gram negativas son capaces de resistir y acumular Cd de los sitios contaminados, en la literatura se informa por ejemplo que *P. aeruginosa* es altamente eficiente para la recuperación de Cd en diferentes entornos contaminados, ya que esta tiene el potencial de adsorción de Cd, también que las cepas del género *Pseudomonas* tiene el potencial de eliminar el Cd debido a su metabolismo y buena eficacia de biosorción; utilizan diferentes estrategias al estrés ocasionado por la presencia de los metales pesados, salida activa de metales, secuestro de iones metálicos, la acumulación de Cd y desintoxicación enzimática. (Lujan, 2019)

Se ha descrito que cepas bacterianas como *Pseudomonas putida*, *Pseudomonas aeruginosa* reducen el contenido de cromo de los efluentes de la industria textil y *Pseudomonas syringae* ha demostrado gran viabilidad en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio (Sneh Lata *et al.* 2019).

Lidija Izrael-Živković *et al.* 2018, evaluaron a una cepa de *Pseudomonas aeruginosa* San ai mediante la concentración mínima inhibitoria, para lo cual utilizaron el medio denominado agar Luria Bertani “LB” suplementado con diferentes concentraciones de cadmio que oscilaban entre 0,5 y 10 mM, con lo cual se evidenció que *Pseudomonas aeruginosa* San ai resiste una alta concentración de hasta 7,2 mM de Cd, la cepa exhibe 2 tipos de mecanismos que son el estrés y la respuesta de defensa, estrategias desarrolladas tanto intracelular como extracelularmente, unión extracelular de cadmio al exopolisacárido liberado en el medio de cultivo, la unión del cadmio a

la superficie celular, la producción de metaloproteínas, que son proteínas de desnitrificación, que le permiten la adaptación metabólica a una mayor concentración de cadmio dentro de la célula.

El uso de *Pseudomonas* en aguas contaminadas con cadmio ha tenido también un gran impacto en cuanto a los procesos de biorremediación del mismo, en dicho documento mencionan sus capacidades, las muestras se aislaron de los afluentes de los desechos residuales y ya en la fase de laboratorio para encontrar microorganismos resistentes a dichos metales pesados se inocularon 150 µg/L de Cd a placa de agar Luria Bertani (LB) (g/L) (peptona 10,0, extracto de levadura 5,0, cloruro de sodio 5,0, dextrosa anhidra 10,0 y agar 30,0 y pH 7,0) posteriormente se incubaron por una semana a 37°C durante una semana, cada 24h se observó la morfología de las colonias y el número de colonias que se formaban en el agar, después de esto se incubaron durante una semana a 37 °C. Cada 24 h se observó la morfología de la colonia y el número de colonias bacterianas formadas. Después de la observación preliminar, las muestras que mostraban aislamientos degradantes de Cd se diluyeron en seriados mediante el método estándar o actualmente reconocido, se incorporaron ciertas cantidades de cd en las placas de control y se verifico continuamente el crecimiento de las bacterias, posteriormente se purificaron dichas colonias que eran tolerantes a los metales pesados y que se desarrollaban con mucha facilidad (Paredes *et al.* 2021 Citado por en KIP Paliz, 2021)

Para analizar la concentración inhibitoria mínima, de bacterias resistentes a cd, las cepas seleccionadas se cultivaron en medio de agar LB con Cd incorporando con un nivel de dosis de 50 µg/mL–2200 µg/mL, Inicialmente, la concentración de Cd era de 50 µg/mL y la cepa que crecía en la concentración final de Cd (2200 µg/mL) se probó más y la dosis de CIM fue la concentración en la que las cepas bacterianas no lograron crecer más allá del nivel de Cd que es visible en la

placa de Petri. El MIC se calculó mediante el método de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), (Parma, Italia, 2012.)

La cepa denominada “Al-dhabi-126 proveniente de *Pseudomona* spp. especie modificada, demostró una actividad degradativa de Cd 3,5 veces mayor que todas las demás cepas que se evaluaron en dicho estudio, los resultados en la figura indicaron que los microorganismos aislados seleccionados pueden absorber Cd del medio, uniendo la membrana externa con metales, también, la capa mucosa de la pared celular bacteriana interactúa fácilmente con los metales pesados por adsorción o absorción, además de esto el grupo funcional de la pared celular de las bacterias está en su mayoría cargada negativamente, y los metales están cargados positivamente, lo que da como resultado la interacción con las células microbianas a través de membranas celulares microbianas, incluidas *Pseudomonas* tienen la capacidad significativa de degradar metales pesados por los mecanismos anteriormente mencionados. (Naif Abdullah Al-Dhabi, 2019)

El estudio demostró que las cepas, entre ellas las “Al-dhabi-122-126” son las cepas con mayor desempeño, y con la habilidad de absorber metales pesados del medio, específicamente la 126, que suele ser más eficiente que las demás cepas en cuanto a la absorción de Cd,

CAPÍTULO 5

9.6 *Bacillus* spp. Y APLICACIONES EN PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN

9.6.1 Generalidades

Entre las características morfológicas más relevantes del género *Bacillus* spp destaca su desarrollo aerobio o en ocasiones, anaerobio facultativo, Gram positivas, en el microscopio se puede observar su morfología bacilar, su movilidad es flagelar y su tamaño varía entre 0.5 a 10 micras (μm). (María Fernanda Villarreal *et al.*, 2018)

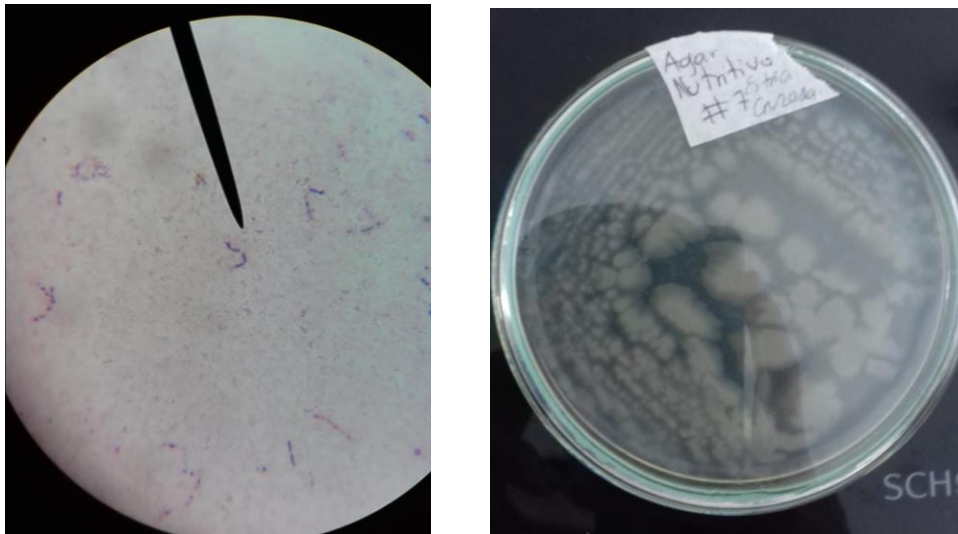


Figura 6 Bacteria *Bacillus subtilis* (Cepa ATCC) a. vista al microscopio en 100x. b. Crecimiento en Agar Nutritivo Fuente: Autor.

Bacillus spp. crece de una manera exponencial mediante fisión binaria, cuando se encuentra en condiciones favorables para su crecimiento. Como estrategia de supervivencia en presencia de un estrés medioambiental, ocasionado por una gran cantidad poblacional, la escasez de nutrientes,

factores externos como salinidad, cambios de temperatura y pH, entre otros, la célula vegetativa inicia la formación de la endospora (Delgado *et al.*, 2018).

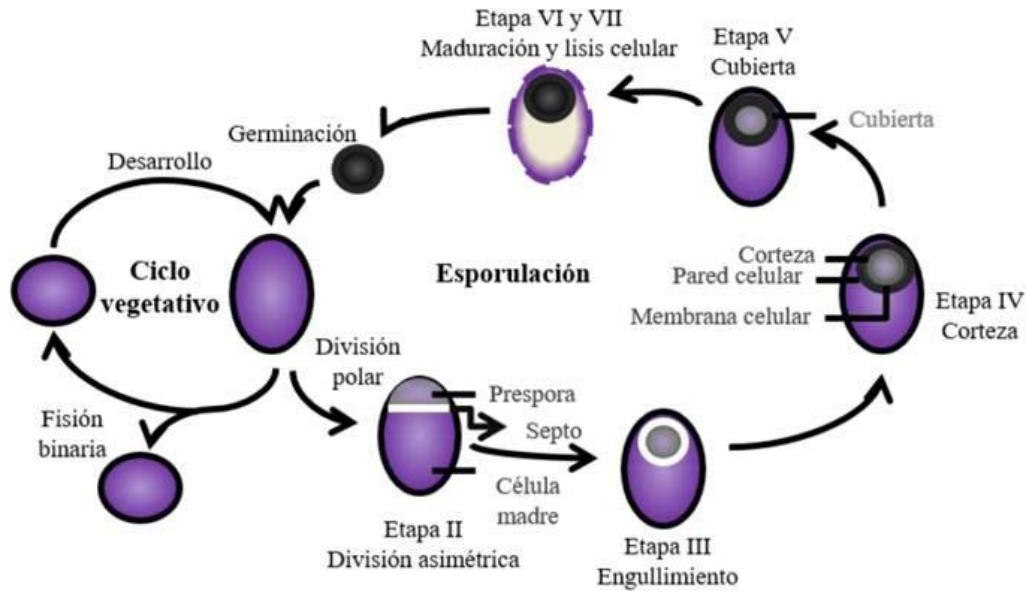


Figura 7 Ciclo de reproducción del género *Bacillus* spp. Fuente: Errigton, 2003.)

9.6.2 Taxonomía

Reino	Bacteria
Phylum	Bacillota
Clase	Bacilli
Orden	Bacilliales
Familia	Bacillaceae
Género	<i>Bacillus</i>

Tabla # 3 Fuente: NCBI: 2024

Bacillus spp es utilizado en el sector industrial para la producción de diversas enzimas, como la amilasa, proteasa, celulasa y pectinasa, así como en varios nutrientes suplementarios como vitaminas y carotenoides; así mismo dicho microorganismo es investigado por su papel en la mitigación de metales pesados en ambientes contaminados mediante la tecnica de biosorción, bioacumulacion entre otros, debido a que dicho género bacteriano suele estar presente en suelos por sus propiedades metabólicamente versátiles y sus buenas cualidades biosorción (Alotaibi *et al.*, 2021).

El género *Bacillus* spp está presente en diferentes zonas, específicamente hablando en la rizosfera de diferentes tipos de cultivos debido a su capacidad de formación de esporas que le da un plus en cuanto a su capacidad de supervivencia en la rizósfera vegetal (Calvo y Zúñiga, 2010). El género

Bacillus spp. ha sido ampliamente estudiado por sus capacidades de biosorción y mecanismos moleculares que permiten que este sobreviva, así como la capacidad para eliminar y desintoxicar metales pesados. (Villarreal-Delgado · 2018)

El uso positivo de *Bacillus* spp ha llamado la atención en diversos campos de aplicación acerca de sus características, su investigación ha permitido la utilización de dichas características en beneficio del hombre; estos microorganismos se replican muy rápidamente y tienden a sobrevivir en diferentes condiciones ambientales por sus dichas características anteriormente mencionadas. Muchas especies de *Bacillus*, como lo son *Bacillus subtilis*, *Bacillus coagulans*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus licheniformis*, y *Bacillus cereus* se utilizan globalmente para distintas aplicaciones, siendo consecuentes con esto, muchos de dichos hallazgos de estudios han indicado la seguridad de por ejemplo *Bacillus Subtilis* para el uso probiótico, debido a la demostración de efectos antimicrobianos y anticancerosos. (Villarreal-Delgado · 2018)

Es importante conocer las generalidades de los microorganismos, sin embargo, también es necesario conocer cómo actúan in vitro / in vivo en relación a su funcionalidad en los suelos contaminados con metales pesados, específicamente, el cadmio.

7.5.3 Aplicaciones en procesos de biorremediación usando *Bacillus* spp.

El presente estudio se centró en la evaluación de los valores óptimos de factores necesarios para el desarrollo y análisis de la biorremediación con la cepa *Bacillus subtilis*, cuyo enfoque es el de la eliminación de metales pesados como el plomo, cadmio y zinc en diferentes suelos contaminados, Para el aislamiento de la cepa, se recolectó una muestra del suelo forestal

contaminado, la cual fue desplazada de manera aséptica al laboratorio. Allí, se aisló la cepa *Bacillus subtilis*, que posteriormente a esto se cultivó mediante análisis microbiológico y se inoculó en un agar de enriquecimiento (agar nutritivo). La determinación de los valores óptimos de factores como temperatura, pH y frecuencia de agitación se llevó a cabo en el día 7 de su desarrollo, estos valores se evaluaron para identificar la capacidad biorremediadora del microorganismo. Los resultados revelaron que *Bacillus subtilis* mostró cierta eficacia al remover el 59,64% de cadmio a los 35 días de su inoculación, mostrando que este microorganismo es apto para remediar o disminuir la contaminación por cadmio a baja concentración. (Atikpo, 2021)

En el presente estudio, se llevaron a cabo diversos aislamientos y selecciones de cepas con el objetivo de evaluar su habilidad para crecer en presencia de cadmio. Un total de 20 cepas fueron puestas a análisis en función de su capacidad de desarrollo en la presencia de este metal, así como a su capacidad para reducir la contaminación asociada. Aquellas cepas identificadas con los números 1, 2, 4 y 18 demostraron reducciones del 74%, 72%, 73% y 74% en los valores de DBO, respectivamente. Los porcentajes de reducción de DQO para estas cepas fueron del 78%, 76%, 77% y 79%.

Resultados similares se observaron en los valores de TDS y TSS, con reducciones significativas en el TDS (45%, 43%, 49% y 52% de TDS y 69%, 72%, 68% y 69% de SST respectivamente). Asimismo, la concentración de cadmio experimentó notables disminuciones, alcanzando porcentajes del 69%, 72%, 70% y 70%, respectivamente.

Destacan dos cepas específicas, ECd004 y SCd005, por su capacidad para tolerar concentraciones elevadas de cadmio, resistiendo hasta 1000 ppm y 1500 ppm respectivamente. Estas cepas fueron escogidas para investigaciones posteriores, respaldando la conclusión de que

las muestras son eficaces para la biorremediación de contaminantes tóxicos en el medio ambiente (Sneh Lata *et al.*, 2021).

En relación con la eficiencia de biosorción de cadmio de *Bacillus spp.* ECd004, se registraron valores de 0,5, 0,9, 1,20 y 1,65 mg/l después de 2, 4, 6 y 8 días respectivamente. La cantidad de cadmio encontrada después de la incubación fue de 0,4, 0,75, 0,92 y 1,21 mg/l para los mismos períodos. Además, se absorbió 0,12, 0,2, 0,37 y 0,44 mg/l de cadmio en la superficie bacteriana después de 2, 4, 6 y 8 días respectivamente. (Sneh Lata *et al* 2021)

En este estudio, se sometió a *Bacillus spp.* a diversos ensayos para evaluar su resistencia al cadmio, que posteriormente se concluiría que logra una resistencia del 87% a este metal, así como un porcentaje similar en cuanto a su capacidad de biosorción. El análisis de microfotografías electrónicas reveló un aumento en las células bacterianas debido a la absorción de cadmio. Además, se evaluaron las cepas en relación con su capacidad de remediación, analizando diversos factores como la tasa de germinación y los parámetros de crecimiento de plántulas, evidenciando que el desarrollo de estas podría estar relacionado con la remediación del cadmio. Las cepas mostraron efectos beneficiosos al reducir de manera significativa la concentración de cd, y su aplicación presenta beneficios tanto desde un punto de vista ecológico como económico para la remediación de suelos, contribuyendo a la sostenibilidad agrícola. Se sugiere así mismo, que futuros estudios centrados en aspectos moleculares podrían proporcionar información valiosa para la recuperación de áreas contaminadas con cadmio (Sneh Lata *et al.*, 2021).

Diferentes especies pertenecientes al género *Bacillus*, como por ejemplo *Bacillus subtilis* (Gayathramma *et al.*, 2013 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019), *Bacillus. cereus* (Arivalagan *et al.*, 2014 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019), *Bacillus safensis* (Priyalaxmi *et al.*, 2014 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019), *Bacillus licheniformis* (Shameer, 2016 citado por Pragya Goyal *et al.*

2019) y *Bacillus thuringiensis* (Kumar *et al.*, 2016 citado por Pragma Goyal *et al.* 2019) han sido estudiadas a lo largo del tiempo en la literatura científica en suelos y aguas contaminadas con metales pesados, dicha biorremediación depende netamente de muchos factores intrínsecos como extrínsecos, uno de ellos y es la concentración inicial del cadmio en el foco de contaminación, diversos estudios han indicado que la cepa *Bacillus subtilis* tiene un gran potencial máximo de reducción de cadmio a 200 µg/ml, pero no más allá de esta concentración. (Gayathamma *et al.*, 2013 citado por Pragma Goyal *et al.* 2019).

Esto se debe al efecto de saturación de los sitios de unión del metal y también debido al aumento de la toxicidad del cadmio por encima de este nivel (Pan *et al.*, 2009 citado por Pragma Goyal *et al.* 2019). Los mismos estudios han avalado que existe una marcada reducción del potencial de biorremediación de *Bacillus subtilis* para el cadmio a una concentración mayor a 250 µg/ml.

Estos resultados fueron corroborados en un estudio de Priyalaxmi *et al.*, (2014) cuyo estudio fue específicamente en *Bacillus Safensis*, aislado de sedimentos de manglares Pragma Goyal *et al.* 2019 el pH, es otro factor que juega un papel fundamental en la biorremediación de dichos metales pesados, los cambios en el pH circundante afecta la carga superficial de pared celular al influir en los grupos funcionales cargados negativamente y su disociación (Özdemir *et al.*, 2013 citado Pragma Goyal *et al.* 2019), *Bacillus cereus* fue aislado de un suelo cercano a una industria de galvanoplastia, este fue cultivado en presencia de cadmio *in vitro* a un pH de 2, este mostró una absorción insignificante de cadmio (Vimala y Das, 2009 citado por Pragma Goyal *et al.* 2019). debido a la baja ionización de los grupos funcionales allí presentes (Al-Garni, 2007; Bulgariu y Bulgariu, 2012; Özdemir *et al.*, 2013 citado por Pragma Goyal *et al.* 2019). Además de esto la elevada concentración de Hidrógenos a pH ácidos compite por los sitios de unión disponible, lo que causa una protonación de la pared celular (Yan y Viraraghavan, 2003 citado por Pragma Goyal

et al. 2019) igualmente a pH que son moderadamente ácidos, las cargas negativas de la pared celular y la concentración de dichos protones disminuye, conduciendo a una mayor reducción de cadmio (Rathinam *et al.*, 2010 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019)

La biosorción es un proceso energético, por ende, la temperatura también desempeña un papel importante en la eficiencia de la eliminación de metales pesados (Congeevaram *et al.*, 2007; Kao *et al.*, 2009; Masoudzadeh *et al.*, 2011 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019). este parámetro puede variar dependiendo de los cambios que sucedan en el medio, afectando la pared celular y a sus partes funcionales, cambiando la estabilidad de la conformación de la pared celular y el estado de ionización de los grupos funcionales, Arivalagan *et al* 2021 cultivaron *Bacillus cereus* a una temperatura de 25°, 35° y 45° C respectivamente, la máxima eliminación de cadmio se registró a 35°C (72%) que en comparación a la temperatura ambiente registrada normalmente en la ciudad de manizales en un día caluroso (25°C) hubo una disminución del 4%; también aumenta la velocidad de difusión, disminuyendo la viscosidad del medio, lo que aumenta la eficacia de la eliminación del cadmio (Arivalagan *et al.*, 2014 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019). aumentando la temperatura la adsorción del cadmio disminuyó, podría inferirse que la destrucción de los sitios de unión del cadmio en la pared celular por la ruptura de esos enlaces interfirió en su síntesis (Meena *et al.*, 2005; Dursun, 2006; Sari y Tuzen, 2008; Sulaymon *et al.*, 2013 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019).

Dentro del género bacteriano *Bacillus*, se encuentran varias especies notables, como *Bacillus clausii* y *Bacillus coagulans*, que sobresalen por sus propiedades en consorcio, su potencial probiótico y su capacidad para la biorremediación de metales pesados (Belapurkar *et al.*, 2016). En un experimento donde ratones wistar machos fueron alimentados con una dieta simbiótica que incluía microorganismos probióticos (*Bacillus coagulans* y *L. plantarum* CNR 273), junto con un

prebiótico (inulina), se observó una mejora en las enzimas hepáticas de estos roedores después de la exposición al cadmio. Varios parámetros bioquímicos, como el aspartato aminotransferasa (AST), la alanina aminotransferasa (ALT), la bilirrubina y el nitrógeno ureico en sangre (BUN), creatinina (CREA) y otros parámetros relacionados con la química sanguínea que podrían aumentar debido a la exposición al cadmio, experimentaron disminuciones significativas. Además, se observó una reducción en la acumulación de cadmio en el hígado y los riñones cuando se administró dicha dieta simbiótica (Jafarpour *et al.*, 2017 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019). Resultados similares fueron informados en una investigación anterior (Majlesi *et al.*, 2016 citado por Pragya Goyal *et al.* 2019).

CAPÍTULO 6

9.7 EVALUACIÓN DE CONSORCIOS MICROBIANOS EN LOS PROCESOS DE BIORREMEDIACIÓN DE CADMIO (Cd)

La búsqueda de soluciones innovadoras para la remediación de suelos contaminados se ha convertido en una necesidad esencial para el ser humano. Entre los planes emergentes, la atención se ha centrado en los consorcios microbianos o cultivos mixtos, una conglomeración de microorganismos con el potencial de convertir la realidad de suelos afectados por la presencia tóxica de cadmio. por ende, es importante entender el mundo de la biorremediación, ya que la capacidad sinérgica entre diversas cepas microbianas se erige como un instrumento poderoso para restaurar la vida de los suelos medioambientalmente alterados.

En el marco de la presente revisión, se ha investigado a profundidad acerca de muchos estudios que llevan a cabo diversos experimentos relacionados a la biorremediación de suelos contaminados con cadmio usando consorcios microbianos, Uno de ellos investigaba con el objetivo de aislar cepas microbianas provenientes de la fuente termal Taptapanielo en Odisha, India, con miras a aplicar biorremediación en presencia de metales pesados como lo eran cadmio y plomo. Las cepas *Stenotrophomonas maltophilia* (SS1), *Aeromonas veronii* (SS2) y *Bacillus barbaricus* (SS3) demostraron una destacada adaptación en la prueba de tolerancia a metales, bajo distintas concentraciones de los metales anteriormente descritos. Por consiguiente, se escogieron para llevar a cabo estudios suplementarios sobre la interacción microbiana con metales y su optimización. Los resultados obtenidos del proceso de biorremediación muestran que el consorcio de aislamientos termofílicos asimiló metales pesados de manera más eficiente en comparación con los aislamientos tratados de manera individual. Se encontró entonces que el consorcio mixto ha evidenciado ser

más eficiente en la remediación de metales que cualquier cepa individual. Se emplearon las técnicas de superficie de respuesta basadas en CCD (Diseño Compuesto Central) y QP (Polinomio de Quinto Orden) para modelar y optimizar cómo cuatro factores del proceso afectan la captación de cadmio y plomo en aguas residuales mediante el uso de un consorcio microbiano. dichos factores incluyen la concentración inicial de iones, el tiempo de contacto, la concentración microbiana y el pH. y se realizaron diversas ecuaciones matemáticas para evaluar la absorción de ambos metales. (Sudip Kumar Sen *et al* 2014)

En otro estudio, la acumulación de cadmio en las plantas de cacao, especialmente para los pequeños productores amazónicos, ha creado zozobra. Para abordar esta contaminación, se propone una innovación sostenible mediante el uso de bacterias remediadoras de cadmio. En este estudio, se analizaron 138 aislamientos de la rizosfera del cacao. Tres bacterias mostraron hipertolerancia, identificadas como miembros de los géneros *Bacillus* (S1C2, R1C2) y *Pseudomonas* (V3C3), fueron escogidas basándose en su caracterización fenotípica y tolerancia in vitro al cadmio. Estas bacterias demostraron la capacidad de desarrollarse con normalidad y reducir el contenido de cadmio en condiciones in vitro. Sin embargo, solo las cepas S1C2 y R1C2 evidenciaron la acumulación intracelular de Cd²⁺, indicando la variabilidad de los mecanismos de desintoxicación bacteriana. Después de esto, se analizó la capacidad de biorremediación de estas bacterias para *Theobroma cacao* CCN51. Sorprendentemente, se encontraron niveles detectables de Cd²⁺ aumentados en el control no suplementado con cadmio, insinuando una fuente adicional de cadmio en la maceta. A pesar de su eficacia en la reducción de cadmio in vitro, estas bacterias demostraron resultados altamente variables en la acumulación del mismo metal en los tallos de cacao. Mientras que S1C2 y R1C2 demostraron una reducción considerable del contenido de Cd en los tallos, la cepa V3C3 no tuvo ningún efecto o variación. Estos hallazgos resaltan la

complejidad de las interacciones planta-bacteria y enaltecen la importancia de las pruebas in vivo para la selección de bacterias PGPR (Promotoras del Crecimiento Vegetal) que sean viables. En resumen, los resultados sugieren el potencial de alivio del cadmio y las perspectivas prometedoras de cepas nativas de *Bacillus* asociadas al cacao amazónico. (Marielita Arce-Inga *et al.* 2022)

En aplicaciones prácticas de biorremediación, los microorganismos en cultivos microbianos han mostrado más ventajas, se informó que los consorcios microbianos o los cultivos mixtos de microorganismos se pueden enriquecer para degradar aquellos compuestos químicos de productos que fallan en los ensayos de biodegradabilidad, por ende, esto implica que los microorganismos pueden procesar subproductos en consorcio, los microorganismos usados de manera individual no exhiben suficientes propiedades o funciones para la eliminación de dichos contaminantes. Los consorcios microbianos podrían ahorrar el uso de productos químicos para el ajuste del pH en comparación con el cultivo puro, porque algunas cepas pueden optimizar las condiciones para otras cepas primarias. incluso el compostaje, el principal proceso de estabilización de residuos sólidos agrícolas y residuos sólidos municipales a través de la degradación de compuestos biodegradables por parte de las comunidades microbianas, se ha estado adoptando como una de las tecnologías más rentables para la biorremediación del suelo, en resumen, esto implica la aplicación de cultivos mixtos, es fiable para la eliminación de contaminantes orgánicos o de los mismos metales pesados. (Xue Li *et al.*, 2022)

La biorremediación, que utiliza organismos vivos, principalmente microorganismos (bacterias, hongos y microalgas) o sus procesos para degradar o detoxificar contaminantes ambientales, es un método rentable y ambientalmente seguro para descontaminar suelos y aguas contaminados. está emergiendo como una alternativa a las costosas tecnologías de remediación fisicoquímica, aunque los cultivos puros tradicionales han logrado cierto éxito en la biorremediación, se sabe que los

compuestos en mezclas interactúan con los sistemas biológicos de maneras que pueden alterar en gran medida la toxicidad de los compuestos individuales, lo que reduce significativamente los efectos de los cultivos puros, el uso de los cultivos mixtos de microorganismos en lugar de dichos cultivos puros ha incrementado dramáticamente debido a su conocido metabolismo sinergia que mejora la eficiencia de los hidrocarburos y otras degradaciones químicas. El Cd es uno de los metales pesados que actúa como sustrato y puede ser inmovilizado o transformado por estos organismos (Casteblanco, 2018). Zhenh *et al.* (2008) citados por Beltrán y Gómez (2016) dice que la capacidad de remoción que tienen los metales pesados por microorganismos como bacterias y hongos es mucho mayor a la reportada con mecanismos físicos, químicos o fisicoquímicos convencionales, además de que cada cepa puede ser selectiva teniendo en cuenta la capacidad metabólica de cada familia y especie que posea propiedades metabólicas en cuanto a la biorremediación y en cuanto al tipo de metal de estudio. Según AGRORUM (2020), las bacterias realizan el secuestro del Cd dejándolo disponible, porque este se liga a la estructura de los microorganismos, se documenta entonces que gracias a algunas de ellas las formas solubles del Cd fueron transformadas en no asimilables por las plantas, en un ensayo de biosorción de Cd por cepas fúngicas de la cepa *Trichoderma* que fue hecha por Guerra *et al.* (2014) se obtuvo que éstas tuvieron una captación de hasta 96% del metal presente en la biomasa fúngica. Esta absorción se da gracias a la capacidad de la membrana plasmática de absorber metales pesados mediante transporte pasivo, Según la Udec (2017) una de las formas en las que las bacterias ayudan a la inmovilización de dichos metales pesados es que queden unidas a las partículas de arcilla a través de puentes de cationes, principalmente los divalentes como el Cd, Cu, Mg a través de flujo de metales por la membrana celular, de esta manera se impide el traslado de estos metales a otra parte, bien sea de la planta o del suelo, por lo que interpretamos que las bacterias utilizan una variedad

de mecanismos, ya sea intracelulares o extracelulares, bien sea para resistir o acoplarse y desintoxicar los metales nocivos

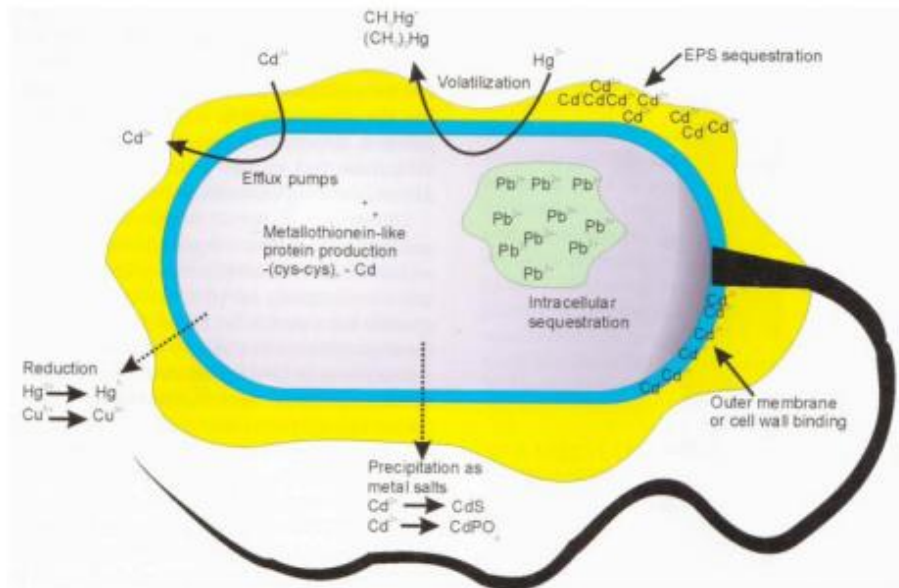


Figura 8 mecanismos de resistencia bacteriana intra y extracelular para metales pesados, para el Cd incluye bombas de flujo, precipitación como sales metálicas y secuestro por parte de la sustancia polimérica extracelular:

FUENTE: Rodríguez Villanueva (s.f)

Con respecto al Cd, este genera un flujo hacia afuera de la célula bacteriana, para un estudio realizado con *Bacillus subtilis*, no hay diferencias significativas en la captura de Cd en dos estadios fisiológicos diferentes, esto dependerá de qué microorganismo sea y sus características fenotípicas, además, como bien se mencionó anteriormente, la mejor captura de metales pesados se da en valores neutros de pH (6,0 a 7,0) y 6 horas son suficientes para obtener los máximos valores de la

captura del Cd (Pérez *et al.*, 2020). Oren *et al.* 1992, menciona que las bacterias que son moderadamente halófilas o tolerantes a la salinidad son una buena opción para la biorremediación en ambientes salinos, es el caso de *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas* spp, que demostraron una disminución en la toxicidad por Cd, para Nies y silves (1989) la resistencia de cd en las bacterias se da por la salida del metal, que se ve facilitada por las ATPasas del tipo p, los transportadores CBA y transportadores quimi osmóticos que facilitan la difusión de cationes

Según Guerra *et al.* (2014), el género perteneciente a *Trichoderma* muestra un alto porcentaje, (aproximadamente 96,06%) de biosorción de Cd. la unión de los metales a la superficie celular de los microorganismos se da a través de interacciones electrostáticas, fuerzas de van der waals, unión covalente, interacciones redox, precipitación extracelular o las combinaciones de estos, los grupos de la pared celular de las bacterias cargados negativamente (carboxilo, hidroxilo, fosfato y amino) absorben los iones metálicos los cuales serán retenidos. (Blanco, 2000 y Wase y Forster, 1997 citados por Rajendran, Muthukrishnan y Gunasekaran, 2003 citados por Rodriguez Villa nueva 2022).

La literatura científica menciona que existen algunos microorganismos que pueden bioacumular, es decir, a través de de un sistema de transporte que es conducido por la membrana, sintetizar el Cd presente en el entorno celular, con gasto de energía a través de la ATPasa. dicho metal será secuestrado en el citoplasma por proteínas ricas en grupos sulfhidrilos o también almacenado dentro de la vacuola. en el caso de los hongos (Lovley, 2000 citado por Marrero, Díaz y Coto, 2009 citados por Rodriguez Villa nueva 2022).

Estudios realizados muestran que en bacterias Gram positivas, como lo es *Bacillus subtilis* que los principales sitios de unión de cationes para las paredes celulares son los grupos carboxilo de peptidoglicano, mientras que, en las Gram negativas, por ejemplo, *Pseudomonas fluorescens*, son

los grupos fosfato, y en hongos la quitina (Korshunova *et al.*, 1999 citados por Wu *et al.*, 2010 citados por Rodríguez Villa nueva 2022). Ahora bien, podemos mencionar que los microorganismos no degradan los metales, sino transforman de un estado de oxidación o complejo orgánico a otro; cuando se altera el estado de oxidación de uno de estos metales pesados, este puede volverse más soluble en agua y ser eliminado por lixiviación, inherentemente menos tóxico, lo que generará que precipite y se vuelva más biodisponible o removido del sitio contaminado (Garbisu y Alkorta, 1997 citados por Garbisu y Alkorta, 2003 citados por Rodríguez Villa nueva 2022).

10 RESULTADOS OBTENIDOS

10.1 Análisis de resultados

Esta revisión sistemática y análisis bibliométrico facilitó una recopilación de información sobre la biorremediación de suelos contaminados con cadmio usando 3 diferentes microorganismos, la gran mayoría de los estudios encontrados proporcionaron resultados que son obtenidos mediante el análisis *in vitro* de las cepas en el suelo contaminado, hubo estudios que mostraron sesgo ya que habían datos irrelevantes (los artículos no tenían información reciente o no cumplían con el título inicial del presente trabajo); por otro lado, un gran número de estudios si responden a las preguntas que eran objetivo de la revisión. Debido a esto, los artículos que no proporcionaron la información adecuada fueron excluidos; los resultados brindaron datos que son útiles para conocer qué especie y que género son más efectivos para remediar dicho metal pesado, así como las concentraciones a las que son expuestas y las condiciones adversas en las que se deben desarrollar, posteriormente tener una visión global de ello, tras la realización de una metodología minuciosa con los artículos seleccionados fueron incorporados en la investigación.

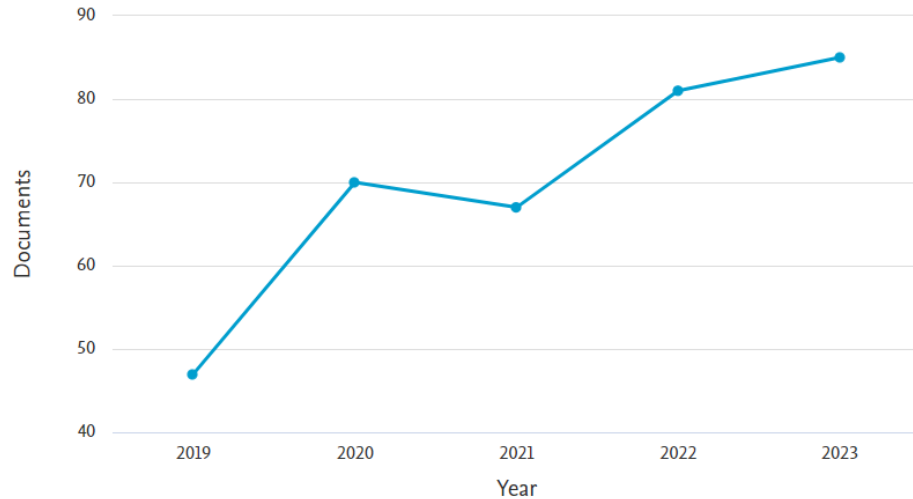
Luego de una lectura intensiva de los artículos incluidos, la evidencia mostró la existencia de información sobre las especies más utilizadas de cada género en la biorremediación de cadmio, no se encontraron estudios nacionales relevantes que pudiesen haber sido incluidos, la información usada de carácter nacional para dar un enfoque geográfico localizado se realizó mediante una búsqueda independiente en plataformas como google académico, allí se encontraron artículos que se referían a la problemática en general y tenían iniciativas para su remediación, específicamente Agrosavia y Fedecacao (2023) organizaciones territoriales que buscan la mitigación en cultivos de cacao por la presencia de cadmio, teniendo en cuenta que América Latina aporta actualmente cerca

del 15% de la producción mundial de cacao (Bravo *et al.* 2023); En cuanto se refiere a generalidades geográficamente hablando, autores como Huang Y, Yang L Sen, S.K Raut, S. Chattaraj, (2017 - 2019) S. Das Mohapatra, P.K. provenientes en su gran mayoría de China e India relatan en sus artículos la benevolencia de cepas nativas o modificadas genéticamente en la remediación del Cadmio en el ambiente, la tolerancia de desarrollarse en dichas condiciones adversas y las posibilidades de aprovechamiento de los microorganismos para procesos de biorremediación..

En general, los géneros microbianos *Trichoderma* spp, *Pseudomonas* spp, *Bacillus* spp estudiados en la presente monografía tienen un potencial para la biorremediación de suelos contaminados con cadmio, están presentes en la mayoría de los ecosistemas, sus requerimientos nutricionales son básicos y se desarrollan con facilidad en medios nutritivos y/o enriquecidos, existen diversos medios de cultivo selectivos para diversas especies, como por ejemplo: medios cromogénicos para la diferenciación de *Pseudomonas* spp como lo puede ser King A agar / King B agar, un agar selectivo denominado “*Bacillus cereus* Selectivo Agar” (según Mossel) para la detección de *Bacillus cereus*, con el hongo *Trichoderma* es más sencillo su aislamiento, se desarrolla óptimamente en sustratos orgánicos con altos niveles de humedad, un contenido bajo de minerales entre otras biomoléculas que son esenciales para casi cualquier tipo de organismo vivo. En la revisión sistemática se observaron distintas metodologías que se han llevado a cabo para la remediación de dicho metal pesado como la fitorremediación, biorremediación, el uso de enzimas, entre otros. Sin embargo, la eficiencia de este proceso varía de acuerdo a diversos factores bióticos y abióticos, en especial en ambientes con altas concentraciones del metal pesado, Ahora bien, estos fueron los resultados de la revisión bibliográfica y el análisis bibliométrico

10.1.1 Análisis de búsqueda en la base datos de Scopus para el género microbiano *Trichoderma* spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.

Figura 9 Documentos por año para *Trichoderma* spp. (2019-2023) Fuente:

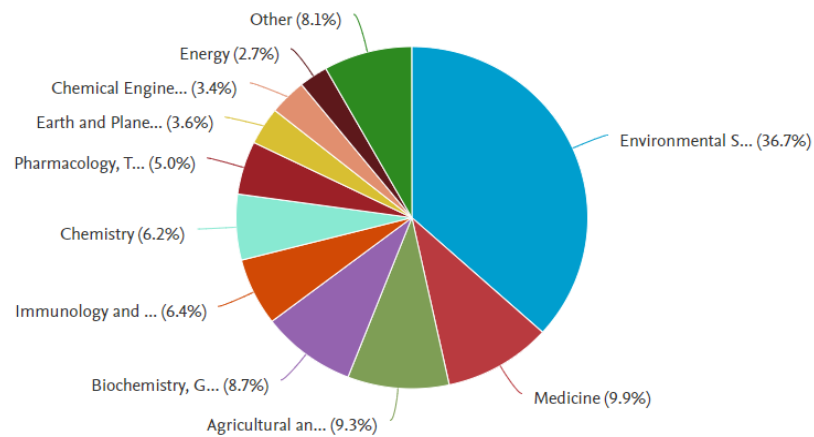


Scopus

Periodo 2019-2023

La cantidad de documentación científica en 2019 fue de 48, lo que indica un modesto proceso de publicación de la investigación científica sobre biorremediación de suelos contaminados con cadmio utilizando *Trichoderma* spp. El año 2020 experimentó un aumento significativo a 81 documentos, sugiriendo un creciente interés o avances en esta área de investigación. Aunque hubo una ligera disminución en 2021 (65 documentos), la cifra sigue siendo considerablemente más alta que la de 2019, indicando un mantenimiento del interés en el tema. En 2022, la cantidad de documentos se mantuvo estable en 66, lo que podría sugerir una consolidación en la investigación, con la comunidad científica manteniendo un nivel constante de actividad. El año 2023 muestra otro aumento, llegando a 76 documentos, lo que podría indicar un crecimiento continuo o renovado interés en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio mediante *Trichoderma* spp.

Figura 10 Documentos por área de investigación para *Trichoderma* spp, Fuente: *Scopus*



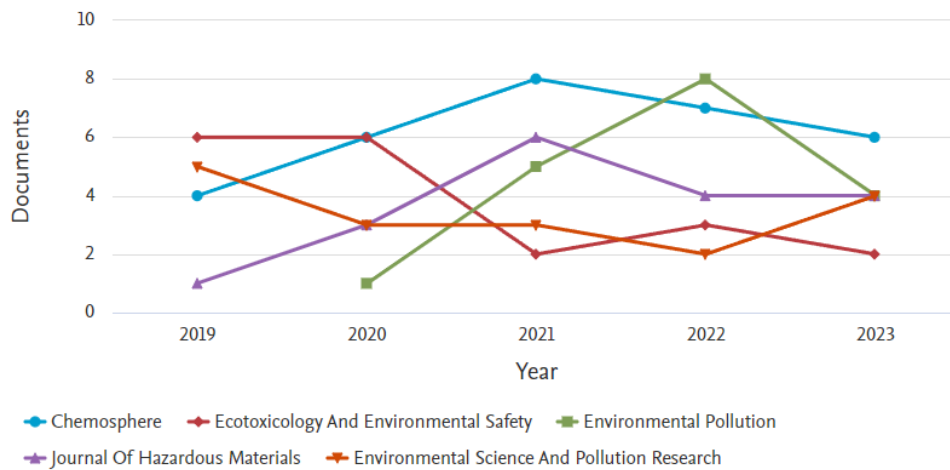
Periodo 2019-2023

La Ciencia del Medio Ambiente destaca como la principal área de investigación con un considerable número de 248 documentos. Esto refleja un fuerte interés en la biorremediación de cadmio desde una perspectiva ambiental, probablemente centrado en la mitigación de impactos ambientales y la gestión de suelos contaminados. La presencia significativa de 67 documentos en la categoría de Medicina indica la importancia de los procesos de biorremediación de cadmio, teniendo en cuenta los impactos que puede generar este metal pesado en la salud humana, esto puede incluir investigaciones sobre los efectos en la salud de la exposición al cadmio y posibles soluciones médicas o preventivas. Con 63 documentos, Agricultura y Ciencias Biológicas muestran un enfoque en la aplicación práctica de *Trichoderma* spp. en la agricultura y la mejora

de la calidad del suelo. Esto podría incluir investigaciones sobre la influencia de la biorremediación en los cultivos, la salud del suelo y la producción agrícola sostenible.

En resumen, la distribución de documentos por área de investigación destaca la multidisciplinariedad de la investigación en biorremediación de cadmio con *Trichoderma* spp., abarcando desde aspectos ambientales hasta enfoques médicos y biológicos. La variedad de áreas sugiere un enfoque holístico en la comprensión y aplicación de *Trichoderma* spp. en la remediación de suelos contaminados con cadmio.

Figura 11 Documentos por revista para *Trichoderma* Spp. Fuente: scopus



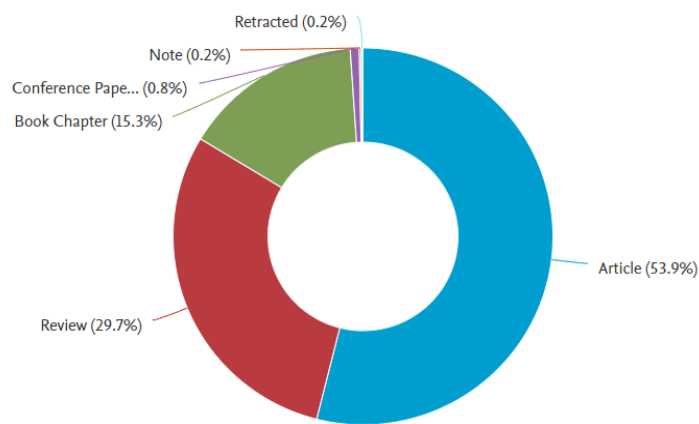
Periodo 2019-2023

Chemosphere: Esta revista lidera en términos de cantidad de documentos, con 31 artículos. Es conocida por publicar investigaciones multidisciplinarias sobre temas medioambientales, y la alta cantidad de documentos sugiere que es una revista destacada para la investigación en biorremediación con *Trichoderma* spp y cadmio. En general, estos datos sugieren que hay un

interés significativo en la comunidad científica por la biorremediación de suelos contaminados con cadmio utilizando *Trichoderma* spp. Además, la distribución relativamente equitativa entre las revistas sugiere que la investigación en este campo es abordada desde diferentes perspectivas, incluyendo la ecotoxicología y la seguridad ambiental que es una revista multidisciplinaria que se enfoca en comprender la exposición y los efectos de la contaminación ambiental en los organismos, incluida la salud humana, también la gestión de materiales peligrosos. Además, es importante mencionar que la existencia de otras revistas con menor cantidad de artículos indica que hay diversas fuentes de información, aunque no tan prominentes como las mencionadas anteriormente.

Figura 12 Tipos de documentación científica para *Trichoderma* Spp. Fuente:

scopus

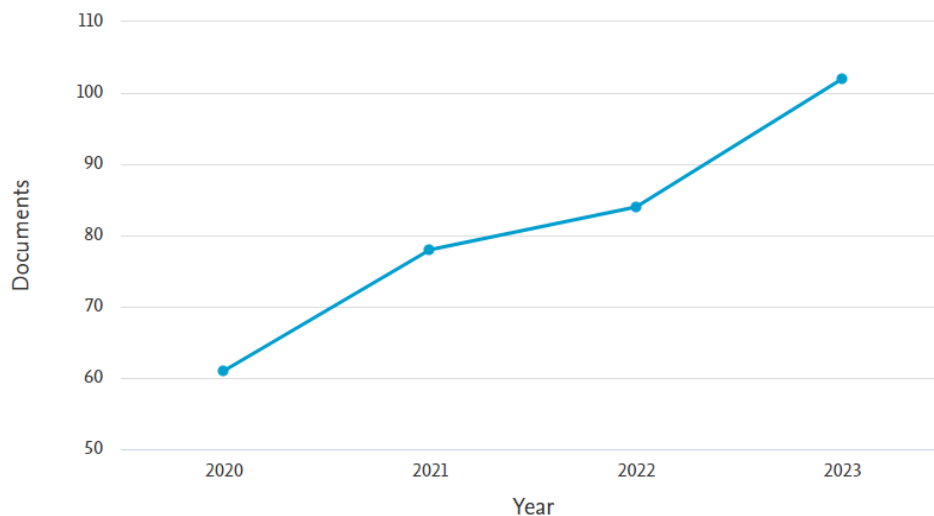


Periodo 2019-2023

En general, la distribución indica una diversidad de tipos de documentación científica, con un énfasis en la producción original (artículos) y la síntesis del conocimiento existente (revisiones). La baja proporción de capítulos de libros sugiere que, aunque son parte importante de la producción científica, representan una fracción más pequeña en comparación con los artículos y revisiones. La presencia mínima de retracciones es positiva, ya que indica una cierta calidad y rigor en la investigación publicada.

10.1.2 Análisis de búsqueda en la base datos de Scopus para el género microbiano *Bacillus spp.*, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.

Figura 13 Documentos por año para *Bacillus spp.* (2020-2023) Fuente: Scopus

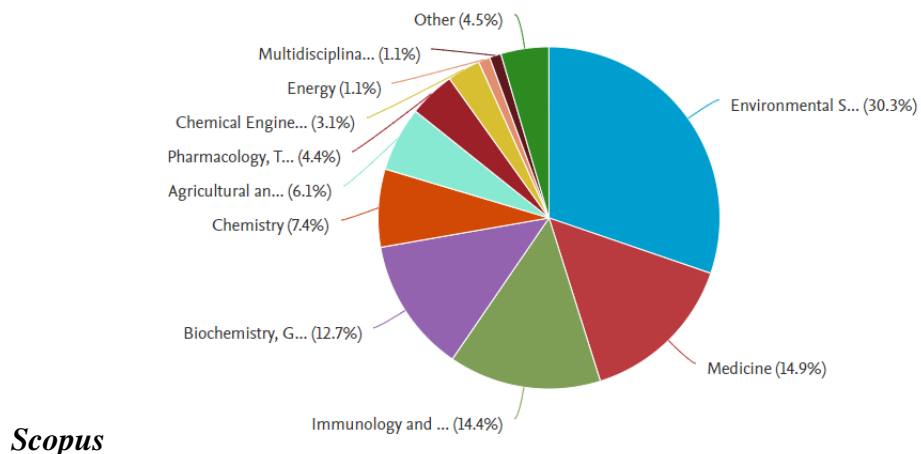


Periodo 2020-2023

La tendencia general es de un crecimiento sostenido en el número de publicaciones científicas a lo largo de los años. Comenzando en 2020 con 61 documentos, se observa un aumento progresivo en 2021 (78 documentos), 2022 (84 documentos) y finalmente, en 2023, con un pico de 102 documentos. Este patrón indica un crecimiento constante en la actividad de investigación y publicación durante este periodo en relación a la búsqueda referente a *Bacillus spp.* en procesos

de biorremediación de cadmio. En resumen, la gráfica muestra un crecimiento consistente en la producción de artículos científicos de 2020 a 2023, con un aumento significativo en 2023. Este análisis temporal proporciona insights valiosos sobre la dinámica de la investigación en la temática específica durante este periodo.

Figura 14 Documentos por área de investigación para *Bacillus* Spp. Fuente:

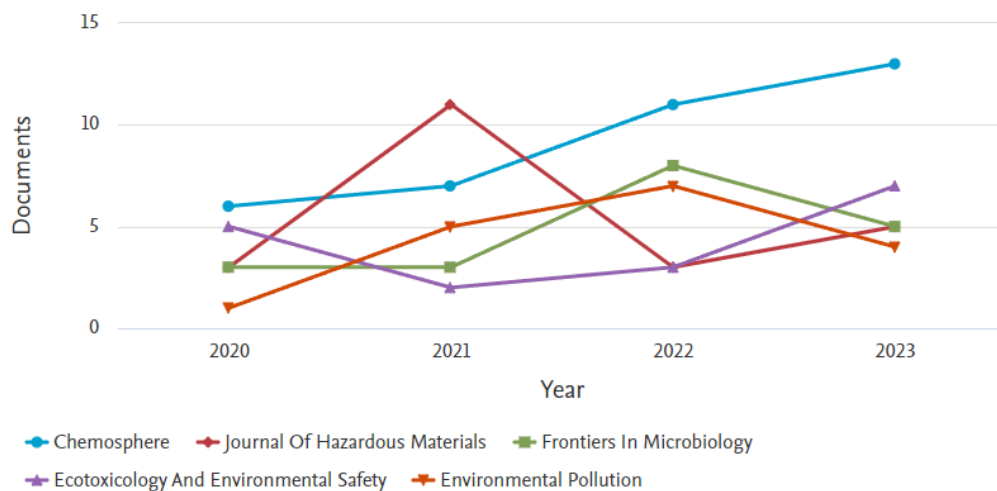


Periodo 2020-2023

El análisis revela que la investigación sobre *Bacillus* spp en suelos contaminados con cadmio está más concentrada en la ciencia del medio ambiente, seguida de cerca por medicina, inmunología y microbiología, bioquímica, genética y biología molecular. Esto refleja un enfoque integral que abarca distintas disciplinas científicas. Existe una menor relevancia en Química, Agricultura y Ciencias Biológicas: Aunque estas áreas tienen una menor cantidad de artículos en comparación con las mencionadas anteriormente, siguen contribuyendo al conocimiento general. Esto indica

que la investigación abarca diversas disciplinas, pero con un enfoque principal en ciencia del medio ambiente y campos médicos.

Figura 15 Documentos por revista para *Bacillus spp.* (2020-2023) Fuente: *scopus*

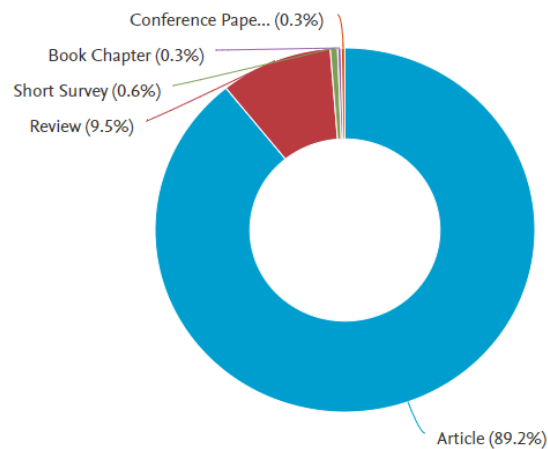


Periodo 2020-2023

En resumen, el análisis muestra una distribución destacada de documentos en revistas como Chemosphere, que es conocida por publicar investigaciones multidisciplinarias sobre temas medioambientales, Journal of Hazardous Materials, es un foro internacional que promueve la investigación de clase mundial mediante la publicación de artículos en las áreas de Ciencias e

Ingeniería Ambientales, *Frontiers in Microbiologia*, el diario de microbiología que promueve la comprensión del papel que desempeñan los microbios para abordar los desafíos globales y *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Esto sugiere que la investigación sobre la biorremediación con *Bacillus* spp en suelos contaminados con cadmio es prominente en revistas que abordan aspectos ambientales, microbiológicos y de seguridad.

Figura 16 Tipos de documentación científica para *Bacillus* spp. Fuente: *scopus*

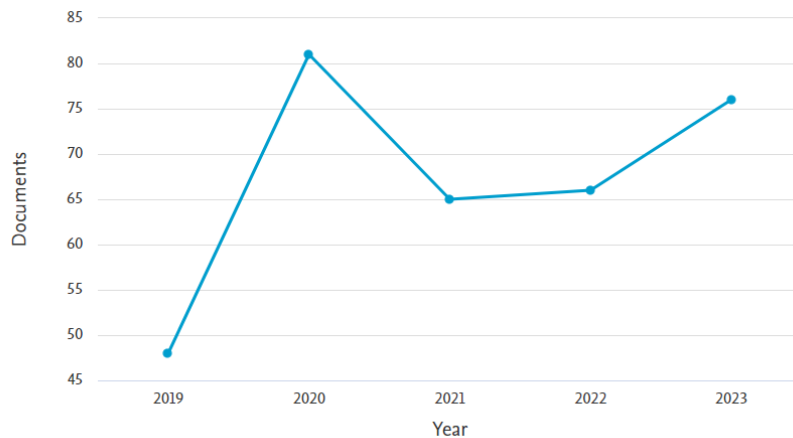


Periodo 2020-2023

En resumen, existe gran diversidad en los tipos de documentación científica, con un énfasis considerable en artículos de investigación, artículos de revisión y formas más breves de síntesis como short surveys, indica una aproximación integral a la generación de conocimientos en la temática. La inclusión de capítulos de libro y papers conference también sugiere una participación en formatos de comunicación académica más amplios y diversas plataformas de difusión científica.

10.1.3 Análisis de búsqueda en la base datos de Scopus para el género microbiano: *Pseudomonas* spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.

Figura 17 Documentos por año para *Pseudomonas* spp. (2019-2023) Fuente: *Scopus*

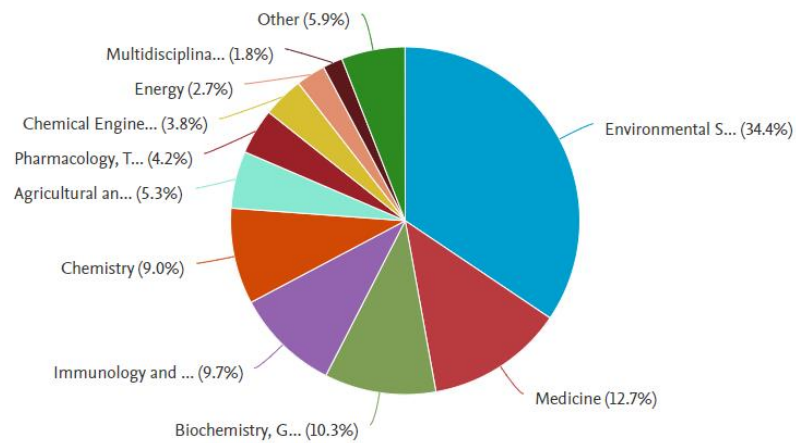


Periodo 2019-2023

Al observar la cantidad de documentación científica publicada a lo largo de los años, referente al uso de *Pseudomonas* spp frente al proceso de biorremediación de cadmio se aprecia cierta variabilidad en la producción. En 2019, se publicaron 48 documentos, seguidos de un aumento en 2020 a 81, disminuyendo en 2021 a 65, y luego aumentando nuevamente en 2022 y 2023 a 66 y 76 documentos, respectivamente. El año 2020 destaca como el año con la mayor cantidad de artículos publicados (81). Este pico puede estar influenciado por eventos específicos como lo pudo ser la pandemia de covid-19, avances significativos en la investigación o un aumento general en la actividad científica en ese período. A pesar de las fluctuaciones, la tendencia general muestra un aumento en la producción de artículos de 2019 a 2023. Esto sugiere un crecimiento continuo

en la investigación relacionada con la biorremediación de suelos contaminados con cadmio utilizando *Pseudomonas* spp.

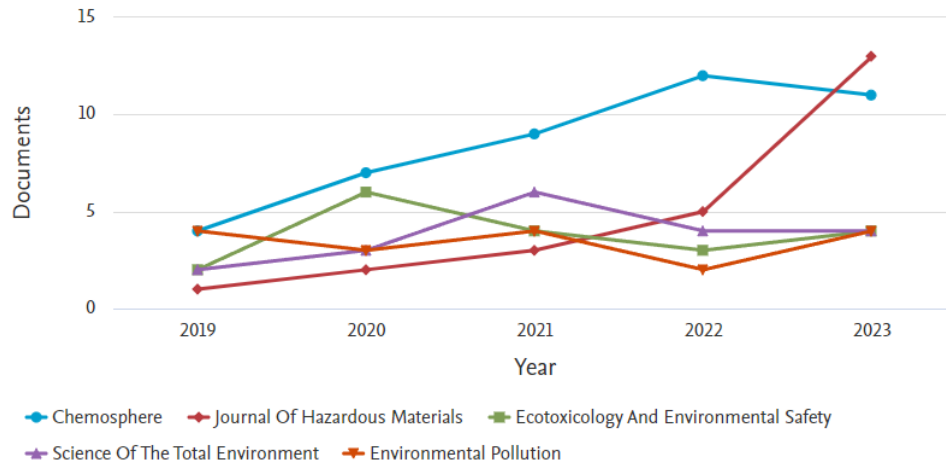
Figura 18 Documentos por área de investigación para *Pseudomona* Spp. Fuente: *Scopus*



Periodo 2019-2023

La investigación sobre el uso de *Pseudomonas* spp en suelos contaminados con cadmio abarca diversas áreas, con un énfasis significativo en ciencia del medio ambiente, medicina, bioquímica/genética y biología molecular, inmunología y microbiología, estos resultados reflejan una aproximación multidisciplinaria a la biorremediación de suelos contaminados con cadmio utilizando *Pseudomonas* spp. La prominencia en ciencia del medio ambiente sugiere un fuerte enfoque en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio desde una perspectiva ambiental, en medicina indica un interés en la aplicación médica o de salud humana relacionada con la exposición al cadmio.

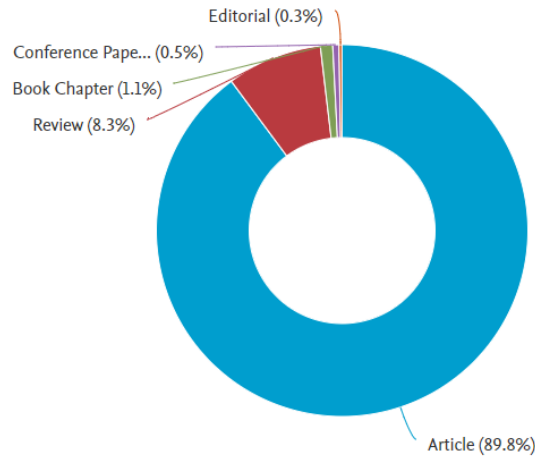
Figura 19 Documentos por revista para *Pseudomona Spp.* (2019-2023) Fuente: *scopus*



Periodo 2019-2023

El análisis muestra que Chemosphere, (conocida por publicar investigaciones multidisciplinarias sobre temas medioambientales) Journal of Hazardous Materials, (foro internacional que promueve la investigación de clase mundial mediante la publicación de artículos en las áreas de Ciencias e Ingeniería Ambientales) Ecotoxicology and Environmental Safety (revista multidisciplinaria que se enfoca en comprender la exposición y los efectos de la contaminación ambiental en los organismos) ,y Science of the Total Environment son revistas destacadas en la publicación de documentos sobre la biorremediación en suelos contaminados con cadmio utilizando *Pseudomonas spp.* Este patrón sugiere que estas revistas son fuentes importantes para la difusión de investigaciones en este campo específico.

Figura 20 Tipos de documentación científica para *Pseudomonas Spp.* Fuente: *scopus*

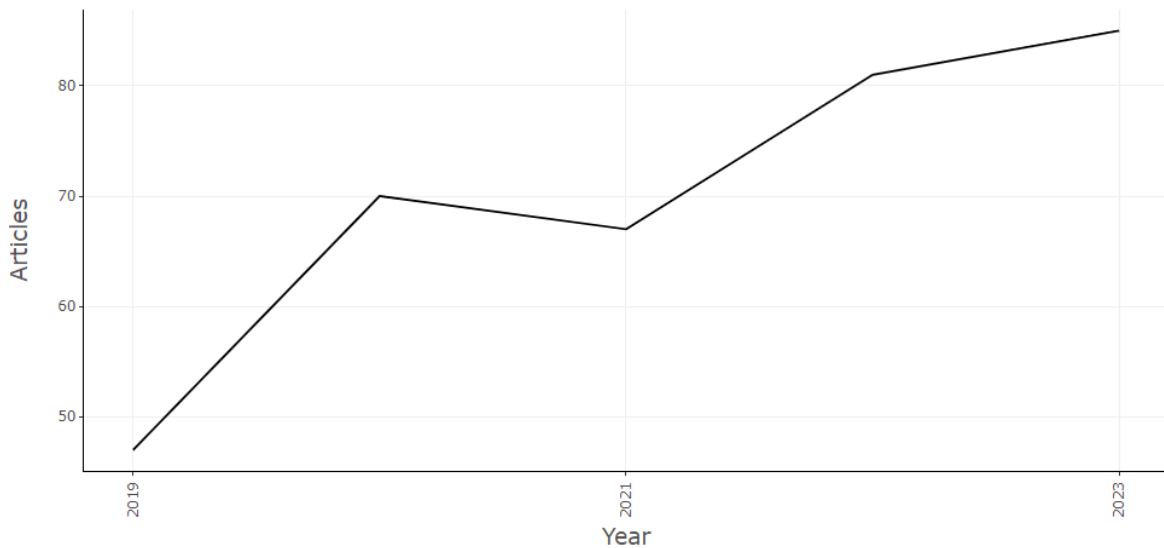


La distribución de la presente gráfica destaca una preeminencia significativa de artículos científicos, lo que indica un enfoque principal en la generación de nuevo conocimiento. La presencia reducida de capítulos de libros y artículos de conferencia sugiere una menor relevancia relativa en comparación con los artículos y revisiones. La inclusión de revisiones sigue siendo importante para la síntesis del conocimiento existente. La proporción mínima de editoriales indica que estos escritos introductorios no son una parte central de la producción científica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el uso del software RStudio para Windows Versión: 2023.12.1+402, el cual se incorporó con el propósito de analizar y comparar los datos proporcionados por el software y la base de datos Scopus, llevando a cabo así un análisis comparativo para la presente monografía y revisión sistemática. Es importante destacar que, si bien la herramienta RStudio no alcanza una eficiencia del 100%, ya que omite algunos datos y documentación científica al no analizarlos en su totalidad, ha demostrado ser una herramienta sumamente útil para la realización de análisis bibliométricos en general.

10.1.4 Análisis de búsqueda en el software Rstudio para el género microbiano *Trichoderma* spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.

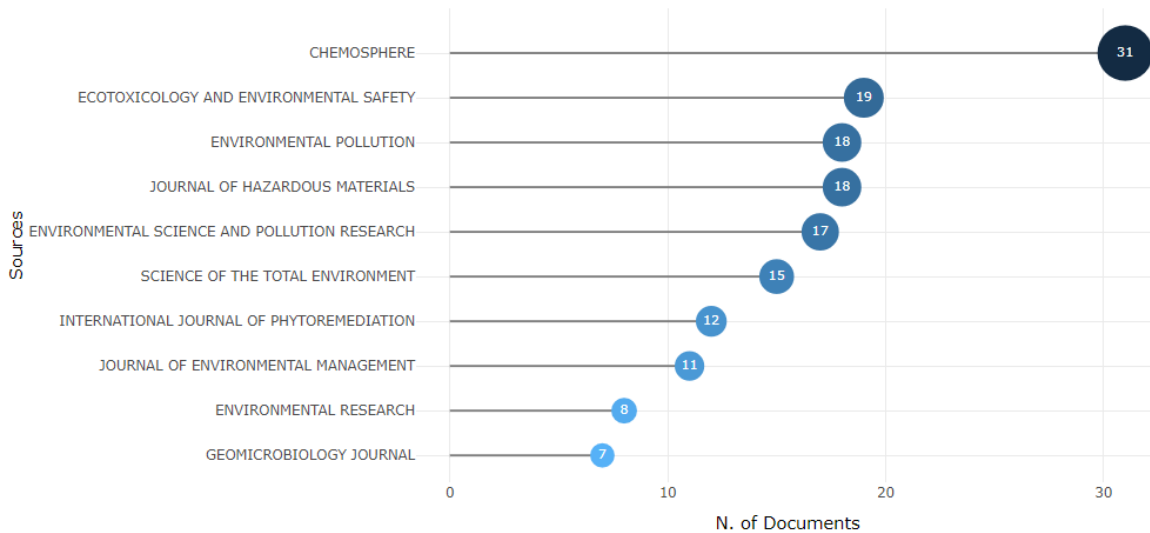
Figura 21 Documentos por año para *Trichoderma* spp (2019-2023) Fuente: *Rstudio*.



Periodo (2019-2023)

La [figura 9](#) y la presente figura, ofrecen análisis similares, destacando un crecimiento inicial, una ligera disminución, estabilidad y un posible aumento renovado en la cantidad de documentos a lo largo del periodo de los años analizados. Las diferencias radican principalmente en la expresión de los números específicos y las interpretaciones asociadas a cada año, además de la discrepancia entre la base de datos y el software “Rstudio” que no puede analizar la totalidad de artículos.

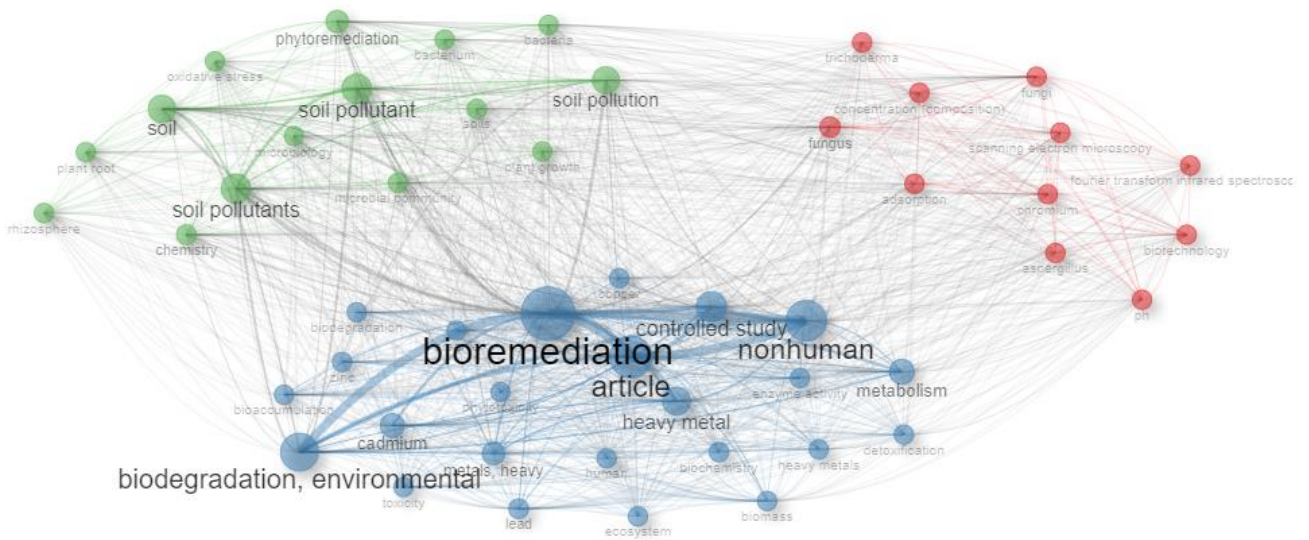
Figura 22 Documentos por revista para *Trichoderma* spp. (2019-2023) Fuente: *Rstudio*.



Periodo (2019-2023)

Ambas gráficas ([figura 11](#)) Scopus y la presente Rstudio, brindan información comparable sobre la distribución de documentos en revistas relacionadas con la biorremediación de suelos contaminados con cadmio utilizando *Trichoderma* spp. Las diferencias radican principalmente en la numeración específica y las expresiones utilizadas para describir las revistas. En general, ambas gráficas apuntan a una jerarquía en la contribución de diferentes revistas a la investigación en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio mediada por *Trichoderma* spp., evidenciando que algunas revistas tienen un mayor número de documentos publicados.

Figura 23 Red de Co-ocurrencia para *Trichoderma* spp. Fuente: Rstudio.



Periodo 2020-2023

La distribución de la gráfica denominada red de co-ocurrencia se distribuye en 3 colores: Color Azul: “Biorremediación”: Destaca como un tema central en la red, conectado con términos clave como “Biodegradación” “Environmental”, “article” y “study”.: Indican una fuerte asociación entre la investigación (article) y estudios (study) relacionados con la biorremediación. "Non Human": este término podría sugerir la participación de organismos no humanos en el contexto de la biorremediación o que no es producido por humanos. Otras Palabras (Posiblemente con menor relevancia): "Heavy Metal", "Cadmium": Indican conexiones con procesos de degradación ambiental, metales pesados y cadmio, señalando áreas específicas de interés en la remediación de suelos contaminados con cadmio

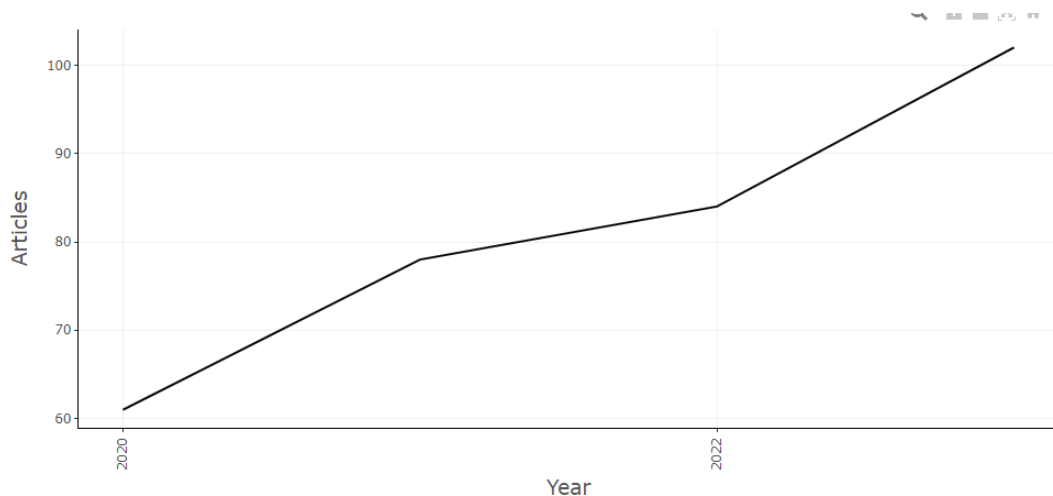
Color Verde: "Soil", "Soil Pollution", "Soil Pollutant": Muestra una clara relación entre la biorremediación y la problemática del suelo, destacando la preocupación por la contaminación del mismo.

Color Rojo: "Trichoderma", "Fungus": Presentes en una red separada, sugiriendo la importancia de organismos biológicos, como *Trichoderma* spp. y otro género de hongos, indicando enfoques biotecnológicos en la biorremediación.

La red destaca la biorremediación como tema principal, con conexiones sólidas a través de la investigación, estudios, contaminación del suelo y la participación de organismos biológicos, respaldando enfoques específicos como la degradación ambiental y la gestión de metales pesados.

10.1.5 Análisis de búsqueda en el software Rstudio para el género microbiano *Bacillus* spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.

Figura 24 Documentos por año para *Bacillus* spp. (2020-2023) Fuente: Rstudio.

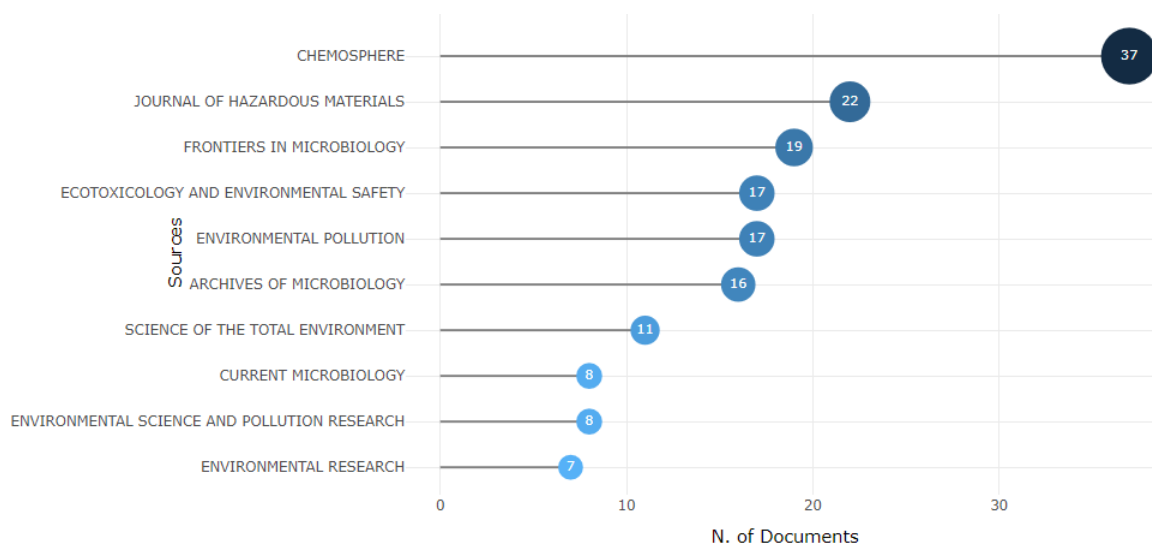


Periodo 2020-2023

La consistencia entre los resultados obtenidos a través del análisis bibliométrico en Rstudio y la base de datos Scopus es notable ([figura 13](#)) Ambos conjuntos de datos proporcionan información prácticamente idéntica en términos de la tendencia de crecimiento en la producción de

publicaciones científicas relacionadas con la biorremediación de cadmio utilizando *Bacillus* spp. a lo largo de los años. Se puede apreciar un crecimiento sostenido confirmado, un aumento significativo en 2023 y una coherencia en las tendencias temporales; esta convergencia en los hallazgos entre el Software Rstudio y la base de datos Scopus refuerza la validez y fiabilidad de la información obtenida, proporcionando una perspectiva sólida sobre la evolución de la investigación en la biorremediación de cadmio con *Bacillus* spp. durante los años examinados.

Figura 25 Documentos por revista para *Bacillus* Spp. Fuente: *Rstudio*.

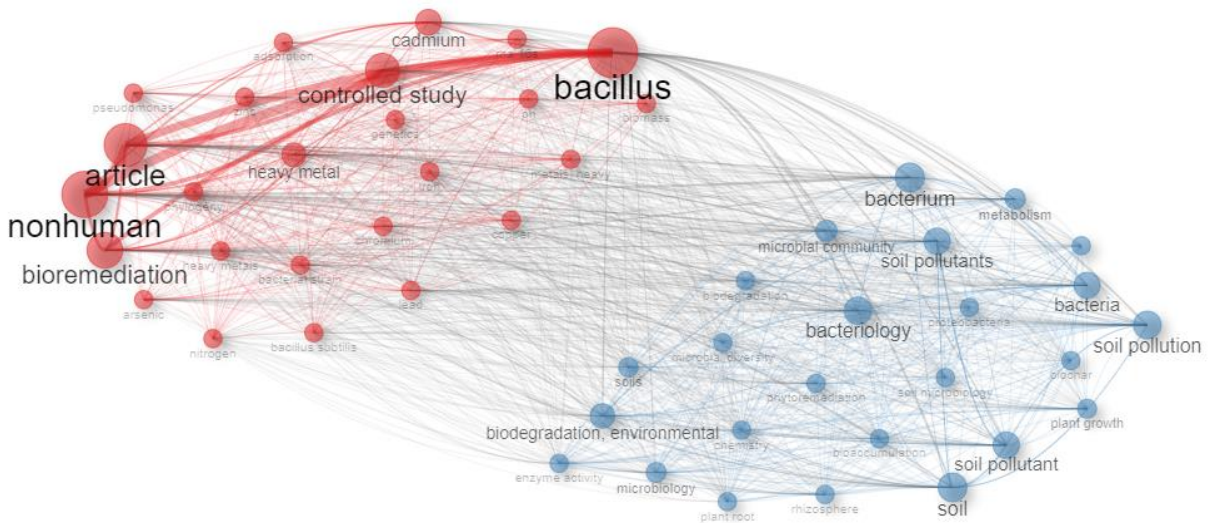


Periodo 2020-2023

Ambas gráficas, la de Scopus ([figura 15](#)) y la presente brindan información comparable sobre la distribución de documentos en revistas relacionadas con la biorremediación de suelos contaminados con cadmio utilizando *Bacillus* spp. Las diferencias radican principalmente en los números específicos y las expresiones utilizadas para describir las revistas. En general, ambas gráficas apuntan a una jerarquía en la contribución de diferentes revistas a la investigación en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio mediada por *Bacillus* spp., evidenciando que

algunas revistas tienen un mayor número de documentos publicados como lo son chemosphere, journal of hazardous materials y frontiers in microbiology.

Figura 26 Red de Co-ocurrencia para *Bacillus* spp. Fuente: Rstudio.



Periodo 2020-2023

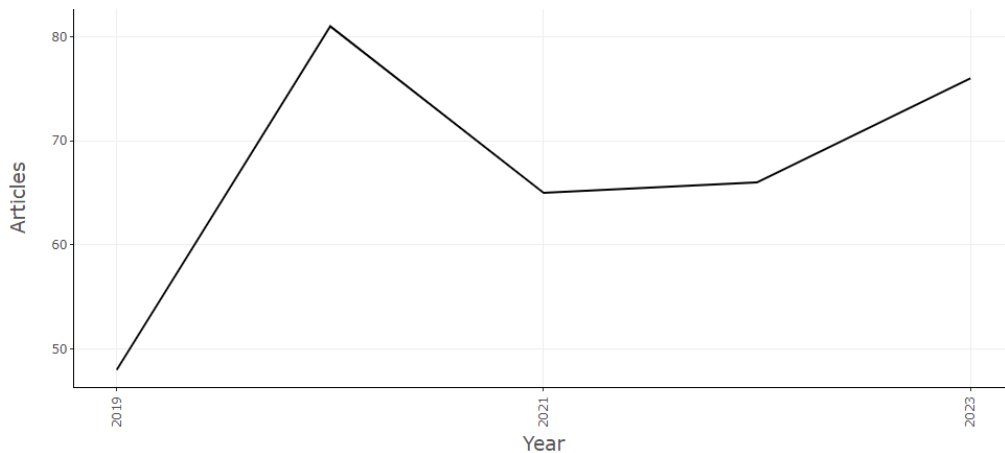
La red destaca la centralidad de *Bacillus* spp. y sus relaciones clave con la biorremediación, investigación y la presencia de cadmio. Por otro lado, los términos en azul pueden representar aspectos más generales, ofreciendo un contexto amplio sobre bacteriología y suelo.

Tenemos entonces que “*Bacillus*”: Destaca como el término central y más grande en la red, indicando su importancia. Se asocia directamente con otros conceptos clave. “Bioremediation”: Sugiere una fuerte conexión con la biorremediación, señalando el papel activo de *Bacillus* spp. en procesos de remediación ambiental. article: Indica una relación estrecha con investigaciones y la producción de artículos científicos en el contexto de *Bacillus* y bioremediación. Nonhuman: Sugiere la posible participación de organismos no humanos en la investigación, ampliando el

alcance de la aplicación de *Bacillus* spp. cadmium: Se relaciona directamente con la presencia de cadmio, destacando la implicación de Bacillus en la remediación de este metal pesado.

10.1.6 Análisis de búsqueda en el software Rstudio para el género microbiano *Pseudomonas* spp, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.

Figura 27 Documentos por año para *Pseudomonas* spp. (2019-2023) Fuente: Rstudio.



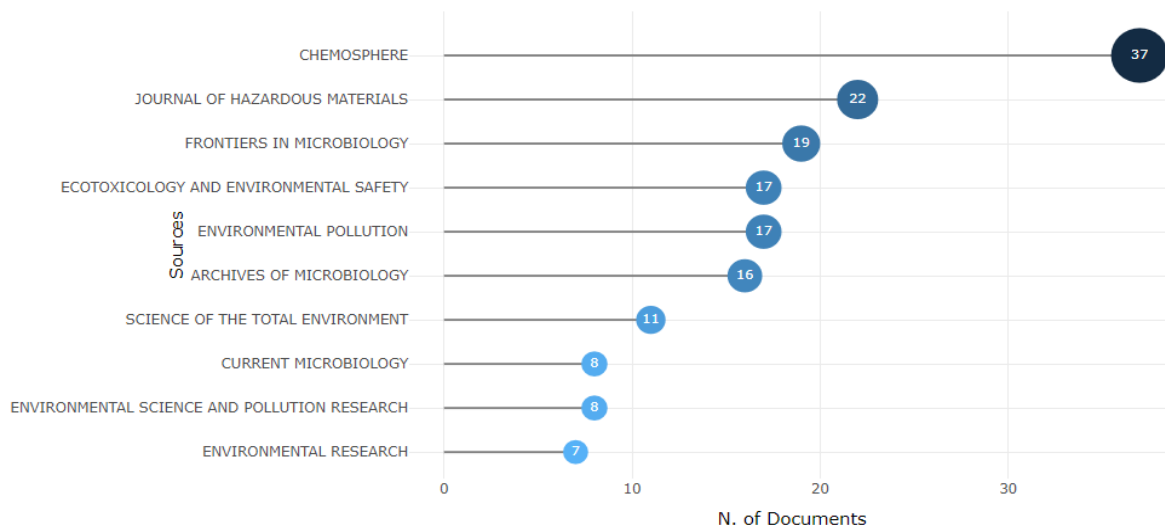
Periodo 2019-2023

En el análisis realizado mediante Rstudio y en comparativo Scopus ([figura 17](#)) podemos observar que ambos conjuntos de datos proporcionan una variabilidad en la producción de documentación científica sobre el empleo de *Pseudomonas* spp. en la biorremediación de cadmio a lo largo de varios años. Se observa una fluctuación en el número de documentos publicados, con un aumento notable en 2020, posiblemente vinculado a eventos como la pandemia de COVID-19, avances destacados en la investigación, o un incremento general en la actividad científica.

A pesar de las fluctuaciones anuales, la tendencia general indica un aumento sostenido en la producción de artículos desde 2019 hasta 2023. Este patrón sugiere un interés continuo y un crecimiento constante en la investigación relacionada con la biorremediación de suelos

contaminados con cadmio mediante *Pseudomonas* spp. La variabilidad anual podría deberse a diversos factores, pero la dirección general respalda la relevancia continua de *Pseudomonas* spp en la biorremediación de cadmio.

Figura 28 Documentos por revista para *Pseudomonas* spp. Fuente: Rstudio.

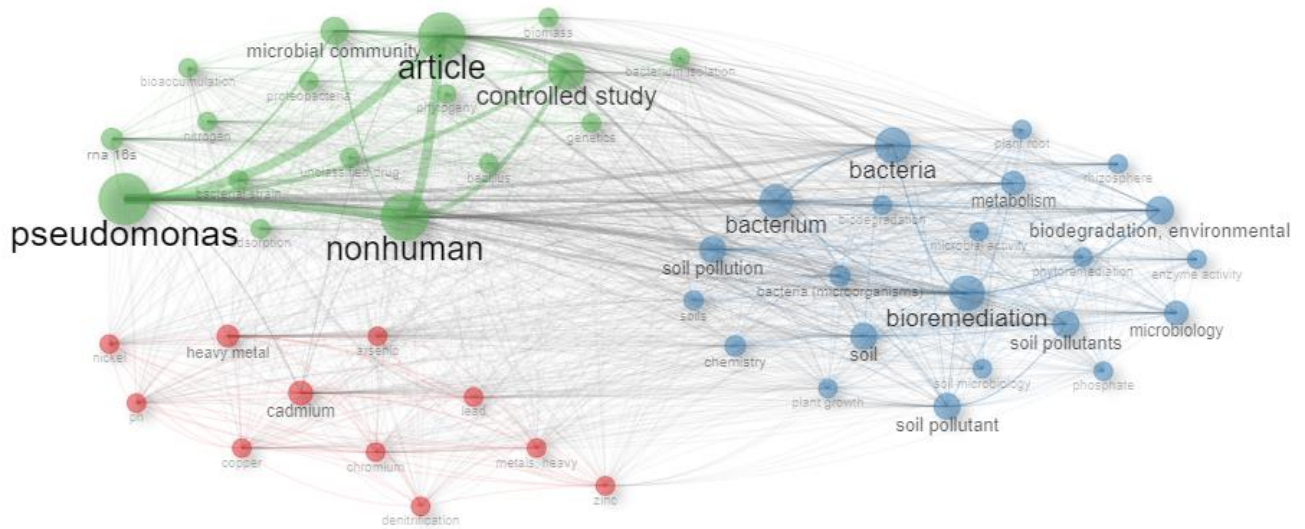


El análisis revela que, aunque el número de documentos no es directamente comparable con el análisis previo ([figura 19](#)), que se basó en otra fuente (Scopus), se observa una notable similitud en la tendencia de destacar las mismas revistas como referentes en el ámbito de la investigación medioambiental.

Chemosphere, conocida por su enfoque multidisciplinario en temas medioambientales, Journal of Hazardous Materials, un foro internacional que impulsa la investigación de alta calidad en Ciencias e Ingeniería Ambientales, Ecotoxicology and Environmental Safety, una revista multidisciplinaria centrada en comprender la exposición y los efectos de la contaminación ambiental, y Science of the Total Environment, todas estas revistas emergen como fuentes fundamentales en ambos análisis. Esta consistencia resalta la importancia y la relevancia continua de estas publicaciones en

la difusión de investigaciones relacionadas con la biorremediación en suelos contaminados con cadmio mediante el uso de *Pseudomonas* spp., consolidando así su posición como referente en este campo específico.

Figura 29 Red de Co-ocurrencia para *Pseudomonas* spp. Fuente: Rstudio.



“*Pseudomonas*”: Sobresale como el término central y de mayor tamaño, indicando su importancia en la red. “Nonhuman, Article, Controlled, Study, Microbial Community”: Aparecen como términos relevantes, posiblemente indicando un enfoque en estudios controlados y la interacción de *Pseudomonas* con comunidades microbianas en entornos no humanos. Los términos de menor relevancia pero que siguen siendo importantes y que se encuentran en la red de color azul denominados “Bacteria, Bioremediation, Bacterium, Soil, Soil Pollution, Microbiology”: sugieren conexiones relevantes con la biorremediación, la microbiología del suelo y la presencia de bacterias. y finalmente términos que podrain parecer irrelevantes pero que también fueron usados

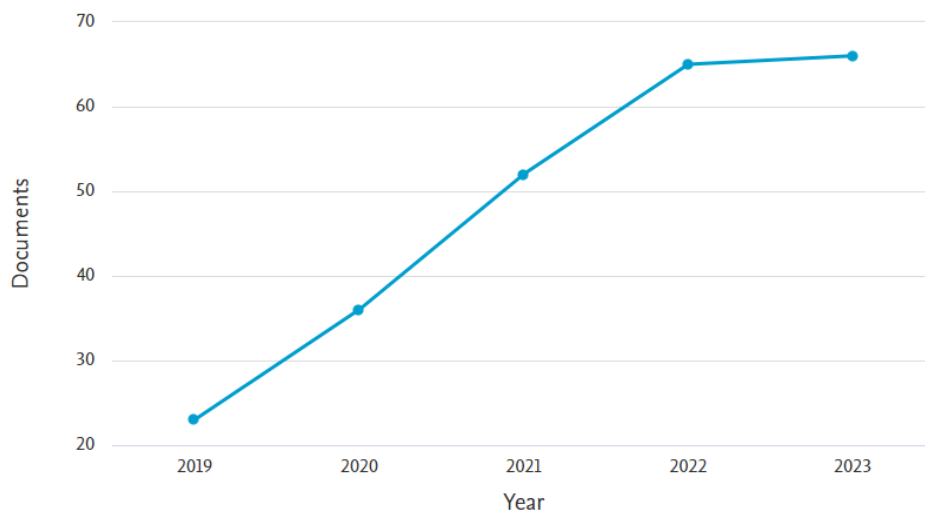
por el software para crear la red, aparecen de color rojo “Heavy Metal, Cadmium, Arsenic, Nickel, pH, Zinc” aparecen en un tamaño más pequeño, pero indican elementos clave como metales pesados y condiciones del suelo que podrían ser cruciales en la biorremediación con *Pseudomonas* spp.

La red de co-ocurrencia destaca la centralidad de *Pseudomonas*, resaltando su conexión con aspectos específicos como estudios controlados, comunidades microbianas y la presencia de metales pesados en la biorremediación de suelos contaminados. La distribución de colores refleja la relevancia y asociación de los términos en la red.

10.1.7 Análisis de búsqueda en la base datos de Scopus y en el software Rstudio para los consorcios microbianos, asociados a procesos de biorremediación de cadmio.

Figura 30 Documentos por año para consorcios microbianos. (2019-2023)

fuelle: scopus:

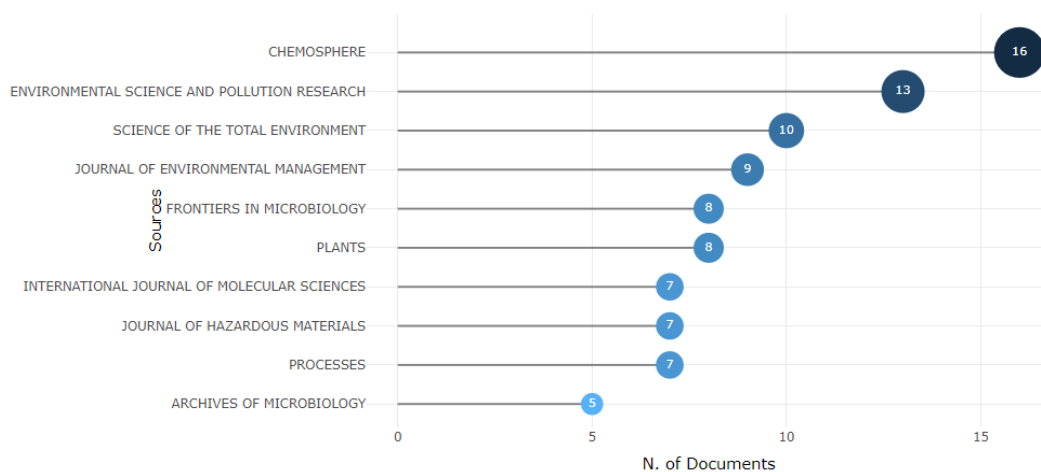


El análisis de la gráfica que representa la documentación científica por año sobre consorcios microbianos asociados a la biorremediación de suelos contaminados con cadmio revela una tendencia de crecimiento constante a lo largo de los años estudiados.

Se observa un aumento constante en el número de documentos publicados de 2019 a 2023. Este patrón indica un crecimiento sostenido en la producción de conocimiento científico en este campo específico. El salto de 2019 a 2020 muestra un incremento significativo del número de documentos publicados, casi duplicándose de 19 a 36. Este aumento puede deberse a un mayor interés, financiamiento, o avances en la investigación durante ese período, aunque los años siguientes (2021, 2022 y 2023) muestran un crecimiento más moderado en comparación con la transición de 2019 a 2020, sigue presente la tendencia positiva de incremento. La estabilidad en el número de documentos publicados en 2022 y 2023 sugiere una consolidación de la investigación en consorcios microbianos para la biorremediación de suelos contaminados con cadmio.

Figura 31 Documentos por revista para consorcios microbianos (2020-2023)

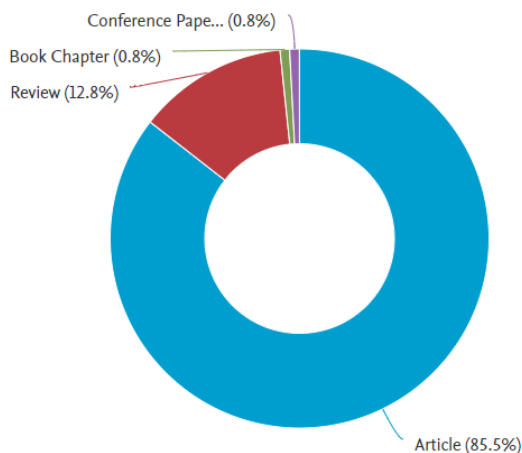
Fuente: Rstudio



La gráfica de las revistas más relevantes en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio mediante consorcios microbianos destaca a "Chemosphere" con 16 artículos, seguida por "Environmental Science and Pollution Research" con 13 y "Science of the Total Environment" con 10. Aunque la gráfica no muestra todos los documentos, sugiere una contribución exponencial de estas revistas. La presencia de otras revistas menos relevantes indica diversidad en las fuentes de publicación y enfoques de investigación. En resumen, estas revistas lideran la difusión de conocimientos en este campo.

Figura 32 Tipos de documentación científica para consorcios microbianos.

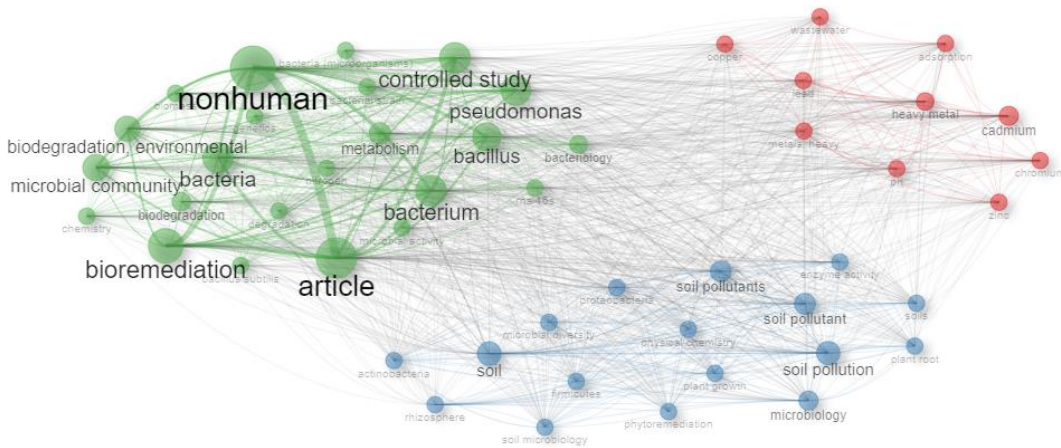
Fuente: *scopus*



La gráfica sobre tipos de documentos relacionados con la biorremediación de suelos contaminados con cadmio mediante consorcios microbianos revela que los artículos son predominantes, representando el 85.5% de la producción documental. Las revisiones constituyen un 12.8%, mientras que los capítulos de libros y los conference papers contribuyen cada uno con un 0.8%.

Esta distribución destaca un fuerte énfasis en la investigación detallada y específica a través de artículos, complementada por revisiones críticas del conocimiento existente. La presencia de otros formatos indica diversidad en los enfoques y aplicaciones prácticas.

Figura 33 Red de Co-ocurrencia para Consorcios microbianos asociados a la biorremediación de suelos contaminados con cadmio Fuente: Rstudio.



La gráfica de red de co-ocurrencia proporcionada por Rstudio revela la complejidad y las interconexiones en la investigación de biorremediación de suelos contaminados con cadmio mediante consorcios microbianos. Destacan tres conjuntos de términos:

Conjunto Verde (Términos Centrales): Términos Relevantes: Bioremediation, Article, Bacillus, Pseudomonas, Controlled Study, Bacteria, Bacterium, Metabolism. Estos términos forman el núcleo central de la investigación, indicando una conexión sustancial entre la biorremediación, los estudios controlados y los microorganismos como Bacillus y Pseudomonas. La presencia de

"Metabolism" sugiere un enfoque en los procesos metabólicos en la biorremediación. Conjunto Azul (Contexto Ambiental y Microbiología del Suelo): Soil Pollution, Soil Pollutant, Soil, Soil Microbiology. Aunque de menor tamaño, estos términos azules conectados al conjunto verde indican que la investigación sobre biorremediación considera aspectos relacionados con la contaminación del suelo y la microbiología del suelo. Conjunto Rojo (Factores Ambientales): Términos Menos Centrales: Heavy Metal, Cadmium, pH, Zinc. Interpretación: Este conjunto en rojo, aunque menos prominente, señala la presencia de factores ambientales como metales pesados y el pH del suelo en la investigación de biorremediación. En conjunto, la gráfica refleja la complejidad de la investigación, donde los términos clave están interconectados, indicando una comprensión integral de la biorremediación. La presencia de conjuntos azules y rojos revela que la investigación considera tanto el contexto ambiental como factores específicos del suelo. Este análisis profundo destaca la multidimensionalidad de la investigación en biorremediación de suelos contaminados con cadmio y consorcios microbianos.

10.2 Opinión sobre los artículos seleccionados

Sabiendo que la mayoría de especies usadas en la biorremediación de suelos contaminados son muy variadas, los resultados que se obtuvieron después de la revisión bibliográfica llegan a esa misma conclusión, los autores mencionan en la gran variedad de artículos la benevolencia de las cepas en estudio y los diferentes focos en donde hay exposición de dicho metal pesado, estos resultados expuestos muestran que microorganismos como el género *Bacillus* spp., grupo bacteriano que muestra gran relevancia en diferentes áreas como la, agricultura e industria puede ser muy efectivo para la mitigación del cadmio en el ecosistema. Además, de ser efectivo para diferentes problemas de contaminación.

Esta información es de interés, ya que nos brinda datos valiosos para futuras intervenciones en los diferentes campos de acción donde se puede desarrollar el trabajo de campo enfocado a procesos de biorremediación, llama la atención el hecho de que la presencia de diferentes factores puede influir tanto positiva como negativamente en la eficacia de la biorremediación mediada por los microorganismos. Los países que más han estudiado las temáticas relacionadas son China, India y Estados Unidos, han aislado, identificado y modificado genéticamente especies de *Trichoderma* spp., *Bacillus* spp. y *Pseudomonas* spp. y han realizado diferentes estudios *in situ*, estos datos aportan la existencia de la diversidad en la caracterización biológica de las cepas usadas por los diferentes autores. Es importante mencionar que la concentración de cadmio presente en el suelo es un factor determinante en la capacidad biorremediadora de los microorganismos, haciendo notar que las características químicas, físicas y biológicas del suelo influyen drásticamente en todo el proceso. De acuerdo a la conclusión observadas de los diferentes autores en los análisis de los procesos de investigación se sugiere tener en cuenta la fisiología de los microorganismos para procesos de biorremediación sobre cadmio, debido a que ese comportamiento biorremediador puede cambiar en función de la disponibilidad de nutrientes, pH, sustratos, condiciones ambientales, conductividad eléctrica, entre otros, debido a que esto afecta directamente el desarrollo exponencial de los microorganismos y puede verse afectado finalmente el proceso de la biorremediación del suelo.

Los resultados de la presente revisión responden de manera concisa a los objetivos planteados al inicio de la monografía centrados en realizar una revisión sistemática de la información científica, analizar la información encontrada y finalmente, documentar, ya que se proporcionó el material bibliográfico suficiente que se analizó de manera rigurosa, y que, la calidad de la información obtenida fue evaluada mediante una lectura crítica que determinó su validez; dicha información

se sintetizó para la realización del trabajo y se obtuvieron resultados que nos han permitido extraer conclusiones, que permiten inferir la posibilidad de adaptar esta temática a un trabajo de investigación en laboratorio y posiblemente llegar hasta un trabajo de campo con el fin de realizar una investigación aplicada en procesos de biorremediación de cadmio. Teniendo en cuenta, la necesidad a nivel nacional relacionada a la cacaocultura, generada por las altas concentraciones de cadmio que están asociadas a este cultivo agrícola; esto nos brindaría un panorama mucho más amplio y generalizado, ayudando a los futuros profesionales e investigadores sobre el tema, facilitando dicho proceso, para ello pienso que se debería fortalecer la biotecnología no solo en nuestro ámbito universitario, sino también a nivel nacional, que nos permita entender mucho mejor las temáticas relacionadas a la biorremediación de metales pesados.

11 CONCLUSIONES

Para el capítulo 1, la acumulación de metales pesados, como el cadmio en el ambiente, representa una amenaza seria para la salud de los ecosistemas y los seres vivos, incluyendo a los humanos. La exposición al cadmio, liberado principalmente por actividades antropogénicas, puede tener efectos tóxicos dañinos, incluyendo riesgos para la salud humana. El cadmio, debido a su aumento en la producción industrial, plantea preocupaciones sobre la contaminación ambiental y sus impactos negativos. La capacidad de bioacumulación del cadmio en los tejidos de organismos presenta amenazas a largo plazo. La biorremediación, mediante el uso de microorganismos, como *Trichoderma* spp., *Pseudomonas* spp., y *Bacillus* spp., emerge como una estrategia prometedora para mitigar los efectos de la contaminación por cadmio en el suelo y restaurar la salud ambiental, comprender y abordar los riesgos asociados con la acumulación de cadmio es crucial para preservar el ecosistema y la salud humana. La adopción de prácticas antropogénicas sostenibles y medidas de remediación eficaces son esenciales para abordar este desafío global.

Para el capítulo 2, la biorremediación, que emplea organismos vivos o sus derivados para eliminar contaminantes del medio ambiente, destaca por su sostenibilidad y eficiencia económica en comparación con métodos convencionales. Las técnicas tanto ex situ como in situ, como biopilas, hileras, biorreactores, bioventing, biosparging y fitoextracción, ofrecen enfoques efectivos para abordar la contaminación.

Los microorganismos desempeñan un papel clave en la biorremediación al utilizar diversos mecanismos, como adsorción, complejación, precipitación, intercambio iónico y atracción electrostática. Su capacidad para movilizar e inmovilizar metales pesados mediante procesos redox, bioacumulación, biosorción y precipitación intra/extracelular contribuye significativamente

a la eficacia de la biorremediación, comprender los mecanismos microbianos en la biorremediación es esencial para mejorar las estrategias de tratamiento y avanzar hacia enfoques más efectivos y sostenibles para combatir la contaminación ambiental.

Para el capítulo 3, se concluye que, el género *Trichoderma* spp., se destaca como un género microbiano clave, importante en procesos de biorremediación, especialmente en la mitigación de metales pesados como el cadmio. Con más de 200 especies molecularmente definidas, *Trichoderma* spp. ha sido investigado en diversas áreas, desde su función como controlador biológico en la agricultura hasta su participación en la biorremediación.

La taxonomía detallada clasifica a *Trichoderma* spp. como un hongo anamórfico. Su ciclo de vida abarca la ramificación, esporulación asexual y la formación de clamidosporas, varias cepas de *Trichoderma* spp. exhiben distintas velocidades de crecimiento y tolerancia al cadmio, resaltando su diversidad y capacidad de adaptación. En cuanto a sus aplicaciones en biorremediación, *Trichoderma* spp. ha demostrado gran resistencia y capacidad para eliminar metales pesados, especialmente el cadmio, en diversos estudios in vitro. Su habilidad para absorber metales pesados del suelo y fomentar el crecimiento de plantas en ambientes contaminados destaca su potencial para mejorar la calidad del suelo y mitigar los efectos adversos de la contaminación.

Los estudios indican la variabilidad en la tolerancia y el crecimiento de diferentes cepas de *Trichoderma* frente al cadmio, proporcionando información valiosa para comprender su comportamiento en entornos contaminados. En general, *Trichoderma* spp. presenta perspectivas prometedoras en la biorremediación de metales pesados, ofreciendo enfoques amigables con el medio ambiente para abordar la contaminación ambiental.

En el capítulo 4, el género *Pseudomonas* spp. se destaca como un conjunto de bacilos aerobios Gram negativos con propiedades de interés en los procesos de biorremediación, reconocidas por su capacidad enzimática y flexibilidad nutricional, *Pseudomonas* spp. son conocidas por su contribución a la degradación aeróbica de diversos compuestos en distintos ambientes ecológicos.

Desde una perspectiva taxonómica, *Pseudomonas* spp. pertenece al reino Bacteria, phylum Proteobacteria, clase Gammaproteobacteria, orden Pseudomonadales, familia Pseudomonadaceae, y género *Pseudomonas*. Su forma de bastoncillo y movilidad mediante flagelos polares, junto con su versatilidad metabólica, les permite adaptarse a diversos suelos y cumplir funciones cruciales en la promoción del crecimiento de plantas y la supresión de enfermedades en los suelos.

Con respecto a sus aplicaciones en procesos de biorremediación, *Pseudomonas* spp., en especial *Pseudomonas aeruginosa*, a pesar de ser catalogada como una cepa potencialmente nociva y de importancia en salud pública, ha demostrado eficacia en la recuperación y adsorción de metales pesados como el cadmio. Su resistencia y capacidad de acumulación destacan en diferentes entornos contaminados. Además, cepas particulares, como *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas syringae*, han mostrado eficiencia en la reducción del contenido de cromo en efluentes de la industria textil y en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio.

La investigación sobre cepas específicas, como *Pseudomonas aeruginosa* San ai, revela su habilidad para resistir concentraciones elevadas de cadmio y utilizar mecanismos de defensa tanto intracelulares como extracelulares. La biorremediación de aguas contaminadas con cadmio también ha evidenciado el impacto positivo de cepas seleccionadas de *Pseudomonas*, con la capacidad de absorber metales pesados del medio. En resumen, *Pseudomonas* spp. emerge como un candidato prometedor en la biorremediación de metales pesados, especialmente el cadmio, ofreciendo estrategias efectivas y sostenibles para mitigar la contaminación ambiental. Su

versatilidad metabólica, resistencia a condiciones adversas y capacidad de colonizar diferentes tipos de sustratos respaldan su potencial aplicación en procesos de remediación ambiental.

En el capítulo 5, el género *Bacillus* spp., se presenta como un microorganismo adaptable y valioso en los procesos de biorremediación, especialmente en la eliminación de metales pesados como el cadmio. Sus características distintivas, como su forma bacilar, capacidad para desarrollarse en condiciones aeróbicas o facultativamente anaeróbicas, y la formación de esporas en condiciones de estrés ambiental, destacan su versatilidad.

Desde un punto de vista taxonómico, *Bacillus* spp. pertenece al reino Bacteria, phylum Bacillota, clase Bacilli, orden Bacilliales, familia Bacillaceae, y género *Bacillus*. Su presencia común en la rizosfera de diversos cultivos subraya su habilidad para adaptarse y sobrevivir en entornos desafiantes.

La aplicación industrial de *Bacillus* spp. para la producción de enzimas y nutrientes, junto con su participación en la mitigación de metales pesados mediante técnicas como la biosorción y la bioacumulación, destaca su relevancia en contextos medioambientales. Este género bacteriano ha sido objeto de investigaciones detalladas, resaltando especies como *Bacillus subtilis*, *Bacillus coagulans*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus licheniformis*, y *Bacillus cereus*, que poseen propiedades probióticas y capacidades de biorremediación.

Estudios específicos sobre cepas particulares, como *Bacillus subtilis*, demuestran su eficacia en la reducción de la contaminación por cadmio en suelos. La resistencia de cepas como ECd004 y SCd005 a concentraciones elevadas de cadmio, junto con su habilidad de biosorción, respalda su idoneidad para la biorremediación. Además, se resalta la importancia de factores como el pH y la temperatura en la eficacia de *Bacillus* spp. en la eliminación de cadmio.

El género *Bacillus* no solo proporciona soluciones prácticas para la biorremediación de metales pesados, sino que también ofrece beneficios probióticos y saludables, como se observó en investigaciones con ratones alimentados con simbióticos que contenían *Bacillus coagulans*. Estos descubrimientos sugieren un potencial prometedor de *Bacillus* spp. tanto para mejorar la salud como para abordar la contaminación ambiental. En síntesis, dicho microorganismo se erige como un elemento crucial en la búsqueda de estrategias sostenibles y eficaces para abordar la contaminación por cadmio y otros metales pesados, fusionando su versatilidad metabólica con sus propiedades probióticas en un enfoque integral de biorremediación.

En un breve resumen, el capítulo 6 aborda la relevancia de los consorcios microbianos en los procesos de biorremediación del cadmio en suelos afectados. Se destaca la urgencia de encontrar enfoques innovadores para combatir la contaminación por cadmio, y se evidencia que los consorcios microbianos juegan un papel esencial en este contexto. Los estudios revisados destacan la eficacia de estos consorcios, especialmente al compararlos con cepas individuales, al mostrar una capacidad sinérgica y adaptabilidad a diversas condiciones.

Se hace énfasis en la complejidad de las interacciones entre plantas y bacterias, así como en la variabilidad en la acumulación de cadmio en las plantas, resaltando la importancia de llevar a cabo pruebas in vivo para seleccionar bacterias promotoras del crecimiento vegetal viables. Además, se subraya la ventaja de utilizar consorcios microbianos en aplicaciones prácticas de biorremediación, donde demuestran ser más eficientes y rentables en comparación con los cultivos puros.

En el contexto de la biorremediación, que utiliza organismos vivos, especialmente microorganismos, para degradar o detoxificar contaminantes ambientales, se resalta la eficacia y

seguridad ambiental de los consorcios microbianos como una alternativa valiosa a las tecnologías costosas de remediación fisicoquímica. En resumen, el capítulo enfatiza el papel fundamental de los consorcios microbianos en la búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles para la biorremediación del cadmio en entornos contaminados.

En última instancia, la información recopilada contribuye a comprender el potencial de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio, brindando alternativas para mitigar los efectos adversos que puede ocasionar la acumulación en el medio ambiente de dicho metal, con el fin de generar alternativas de tratamiento y preservar la sostenibilidad del medio ambiente.

12 RECOMENDACIONES

Como recomendaciones del presente trabajo, se sugiere;

1. Enfatizar la Aplicabilidad de Microorganismos, señalar la relevancia de los géneros microbianos *Trichoderma spp*, *Bacillus spp* y *Pseudomonas spp* en la biorremediación del cadmio, así como destacar su potencial debido a la presencia en diversos ecosistemas, su capacidad para desarrollarse en medios nutritivos y su tolerancia a condiciones desfavorables.
2. Validación de la Revisión Sistemática: Subrayar el valor de la revisión sistemática, así como en análisis bibliométrico utilizando bases de datos confiables como Scopus y el software Rstudio, enfatizando en la rigurosidad y especificidad en la búsqueda de documentación científica.
3. Exploración de Iniciativas locales: Examinar e informar sobre iniciativas locales, por ejemplo, como las de Agrosavia y Fedecacao en Colombia, que puedan evidenciar prácticas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados usando microorganismos.
4. Considerar Investigaciones aplicadas: llevar a cabo prácticas o ensayos, aplicando la información del presente trabajo en investigaciones futuras, sugiriendo el uso de *Trichoderma spp*, *Bacillus spp* y *Pseudomonas spp* en procesos de biorremediación de cadmio, dándole un enfoque a la problemática nacional relacionada a las plantaciones de cacao, usando los microorganismos de manera individual o en consorcio.
5. Fomentar la biotecnología a nivel local: Plantear la necesidad de desarrollar investigaciones aplicadas a nivel nacional, impulsando la aplicación de la biotecnología microbiana en los procesos de biorremediación de los metales pesado, incentivando así, la colaboración entre entes

investigadores nacionales e internacionales, vinculando el sector académico con el sector productivo.

6. Perspectivas futuras y sostenibilidad: La exploración de alternativas relacionadas a nuevas metodologías podrían surgir como avances en el conocimiento de la biorremediación de metales pesados, además de resaltar la importancia de preservar la sostenibilidad del medio ambiente usando otros mecanismos de tratamiento para mitigar los efectos adversos de la acumulación de cadmio.

Estas recomendaciones enfatizan la aplicación práctica de los resultados de la revisión sistemática y buscan orientar futuras investigaciones hacia el desarrollo de soluciones efectivas y sostenibles en la biorremediación de suelos contaminados con cadmio.

13 GRÁFICOS y FIGURAS

Figura 1	Hongo <i>Trichoderma</i> spp. visto al microscopio (a) y cultivo en agar papa dextrosa (b) Fuente: Autor.	37
Figura 2	Ciclo de vida asexual de <i>Trichoderma</i> spp. Fuente: Machado <i>et al</i> , (2012).	38
Figura 3	Conidios y conidióforos de <i>Trichoderma</i> spp. (40x) Fuente: Danay Infante <i>et al</i> , (2009) 39	
Figura 4	<i>Trichoderma</i> spp sembrado en agar PDA fuente: Autor.	40
Figura 5	Bacteria <i>Pseudomonas</i> spp. Vista al microscopio en 100x, recuperado de un sustrato liofilizado como cepa ATCC en la tecno academia, Manizales Fuente: Autor.	48
Figura 6	Bacteria <i>Bacillus subtilis</i> (Cepa ATCC) a. vista al microscopio en 100x. b. Crecimiento en Agar Nutritivo Fuente: Autor.	51
Figura 7	Ciclo de reproducción del género <i>Bacillus</i> spp. Fuente: Errigton, 2003.)	53
Figura 8	mecanismos de resistencia bacteriana intra y extracelular para metales pesados, para el Cd incluye bombas de flujo, precipitación como sales metálicas y secuestro por parte de la sustancia polimérica extracelular: FUENTE: field (s.f)	64
Figura 9	Documentos por año para <i>Trichoderma</i> spp. (2019-2023) Fuente: Scopus	69
Figura 10	Documentos por área de investigación para <i>Trichoderma</i> spp, Fuente: Scopus.	70
Figura 11	Documentos por revista para <i>Trichoderma</i> Spp. Fuente: scopus.	71
Figura 12	Tipos de documentación científica para <i>Trichoderma</i> Spp. Fuente: scopus	72
Figura 13	Documentos por año para <i>Bacillus</i> spp. (2020-2023) Fuente: Scopus	73
Figura 14	Documentos por área de investigación para <i>Bacillus</i> Spp. Fuente: Scopus	74
Figura 15	Documentos por revista para <i>Bacillus</i> spp. (2020-2023) Fuente: scopus	75
Figura 16	Tipos de documentación científica para <i>Bacillus</i> spp. Fuente: scopus	76
Figura 17	Documentos por año para <i>Pseudomonas</i> spp. (2019-2023) Fuente: Scopus	77
Figura 18	Documentos por área de investigación para <i>Pseudomona</i> Spp. Fuente: Scopus	78
Figura 19	Documentos por revista para <i>Pseudomona</i> Spp. (2019-2023) Fuente: scopus.	79
Figura 20	Tipos de documentación científica para <i>Pseudomonas</i> Spp. Fuente: scopus	80
Figura 21	Documentos por año para <i>Trichoderma</i> spp (2019-2023) Fuente: Rstudio.	81
Figura 22	Documentos por revista para <i>Trichoderma</i> spp. (2019-2023) Fuente: Rstudio.	82
Figura 23	Red de Co-ocurrencia para <i>Trichoderma</i> spp. Fuente: Rstudio.	83
Figura 24	Documentos por año para <i>Bacillus</i> spp. (2020-2023) Fuente: Rstudio.	84
Figura 25	Documentos por revista para <i>Bacillus</i> Spp. Fuente: Rstudio.	85
Figura 26	Red de Co-ocurrencia para <i>Bacillus</i> spp. Fuente: Rstudio.	86

Figura 27	Documentos por año para <i>Pseudomonas</i> spp. (2019-2023) Fuente: Rstudio.	88
Figura 28	Documentos por revista para <i>Pseudomonas</i> spp. Fuente: Rstudio.....	89
Figura 29	Red de Co-ocurrencia para <i>Pseudomonas</i> spp. Fuente: Rstudio.....	90
Figura 30	Documentos por año para consorcios microbianos. (2019-2023) fuente: scopus:	91
Figura 31	Documentos por revista para consorcios microbianos (2020-2023) Fuente: Rstudio	92
Figura 32	Tipos de documentación científica para consorcios microbianos. Fuente: <i>scopus</i> ...	93
Figura 33	Red de Co-ocurrencia para Consorcios microbianos asociados a la biorremediación de suelos contaminados con cadmio Fuente: Rstudio.	94

14 TABLAS

Tabla #1 Fuente: NCBI: 2024	37
Tabla # 2 Fuente: NCBI: 2024	46
Tabla # 3 Fuente: NCBI: 2024	53

15 BASES BIBLIOGRÁFICAS

(S/f). Recuperado el 18 de febrero de 2024, de <http://file:///C:/Users/HP/Downloads/2015-Texto%20del%20art%C3%ADculo-13008-4-10-20180717.pdf> TÉCNICAS DE REMEDIACIÓN DE METALES PESADOS CON POTENCIAL APLICACIÓN EN EL CULTIVO DE CACAO

(S/f-b). Edu.pe. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de <http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/5802/TESIS-%20CONTRERAS%2C%20CUBA%2C%20ROJAS-%20FIARN-2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y> EFICIENCIA DEL COMPOSTAJE Y VERMICOMPOSTAJE EN LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON CADMIO Y PLOMO POR PASIVOS AMBIENTALES MINEROS DE HUAMANTANGA

(S/f-h). Fao.org. Recuperado el 21 de febrero de 2024, de https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FMeetings%252FCX-735-13%252FWDs%252Fcf13_06s.pdf 2012;17(3):199-205.
<https://www.redalyc.org/pdf/473/47324564010.pdf>

Abalos Rodríguez, A., Rodríguez Gámez, O., Pérez Silva, R. M., Nápoles Álvarez, J., Cabrera Gómez, J. G., Laffont Schwob, I., Portuondo, I. P., Vilasó Cadre, J. E., Pérez Macías, R., Bahín Deroncelé, L., & Milenes Santos, L. (2022). Evaluación del empleo de microorganismos en la remoción de compuestos orgánicos persistentes y metales pesados. *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, 12(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2304-01062022000100007

Abhilash, P. C., Dubey, R. K., Tripathi, V., Gupta, V. K., & Singh, H. B. (2016). Plant growth-promoting microorganisms for environmental sustainability. *Trends in Biotechnology*, 34(11), 847–850. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2016.05.005>

Adriana MARTÍNEZ-PRADO *et al.*, 2011 BIORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO CON HIDROCARBUROS EMPLEANDO LODOS RESIDUALES COMO FUENTE ALTERNA DE NUTRIENTES
https://www.researchgate.net/publication/262592246_Biorremediacion_de_suelo_contaminado_con_hidrocarburos_empleando_lodos_residuales_como_fuente_alterna_de_nutrientes

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades [Resumen de Salud Pública Cadmio. \(s/f\). Cdc.gov.](#) Recuperado el 20 de febrero de 2024, de https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.pdf

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2016 [Resumen de Salud Pública: Cadmio \(Cadmium\). \(2021, enero 26\). Cdc.gov.](#) https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html

- Al-Dhabi, N. A., Esmail, G. A., Mohammed Ghilan, A.-K., & Valan Arasu, M. (2019). Optimizing the management of cadmium bioremediation capacity of metal-resistant *Pseudomonas* sp. Strain Al-Dhabi-126 isolated from the Industrial City of Saudi Arabian environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4788. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234788>
- Alonso Álvarez-García, J., Santoyo, G., & Rocha-Granados, M. (2020). *Pseudomonas fluorescens*: Mecanismos y aplicaciones en la agricultura sustentable. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. <https://doi.org/10.33154/rlrn.2020.01.01>
- Alotaibi, B. S., Khan, M., & Shamim, S. (2021). Unraveling the underlying heavy metal detoxification mechanisms of *Bacillus* species. *Microorganisms*, 9(8), 1628. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081628>
- Apare, C., & Lizet, C. (2019). Tratamiento de las aguas contaminadas por Cadmio y Plomo utilizando microorganismos (*Bacillus* sp y *Pseudomonas* sp) en un biorreactor, Río Chili Arequipa – 2019. Universidad César Vallejo <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/70761>.
- Arce-Inga, M., González-Pérez, A. R., Hernandez-Diaz, E., Chuquibala-Checan, B., Chavez-Jalk, A., Llanos-Gomez, K. J., Leiva-Espinoza, S. T., Oliva-Cruz, S. M., & Cumpa-Velasquez, L. M. (2022). Bioremediation Potential of Native *Bacillus* sp. Strains as a Sustainable Strategy for Cadmium Accumulation of *Theobroma cacao* in Amazonas Region. *Microorganisms*, 10(11), 2108. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10112108>
- Asunción Rodríguez, K. T., & Rondo Lopez, Y. L. (2021). Efectividad de las técnicas de biorremediación en suelos contaminados con metales pesados usando microorganismos. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/81191>.
- Atanasova, irina, Walter M (2013) *Two Hundred Trichoderma Species Recognized on the Basis of Molecular Phylogeny*
https://www.researchgate.net/publication/258728975_Two_Hundred_Trichoderma_Species_Recognized_on_the_Basis_of_Molecular_Phylogeny
- Atikpo, E., & Ezugwu, M. O. (2017). Preferential removal of lead, cadmium and zinc from contaminated agricultural soil by *Bacillus Subtilis*. *Journal of the Nigerian Association of Mathematical Physics*, 41, 339–346. <https://www.ajol.info/index.php/jonamp/article/view/206968>
- Avance Final-Trabajo de Investigación de Microbiología Ambiental Denis. (s/f). Scribd. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de <https://es.scribd.com/document/599029520/Avance-Final-trabajo-de-Investigacion-de-Microbiologia-Ambiental-Denis>
- Awasthi, A. K., Pandey, A. K., & Khan, J. (2017). Biosorption an innovative tool for bioremediation of metal-contaminated municipal solid waste leachate: optimization and mechanisms exploration. *International Journal of Environmental Science and Technology: IJEST*, 14(4), 729–742. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1173-2>
- Azad, S., Farjana, M., Mazumder, B., Mamun, M., & Haque, A. (2020). Molecular identification of a *Bacillus cereus* strain from Murrah buffalo milk showed in vitro bioremediation properties on

selective heavy metals. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research*, 7(1), 62. <https://doi.org/10.5455/javar.2020.g394>

Bando Barzola, R. V., & Cusi Velasque, E. (2022). Evaluación de Plomo y Cadmio en agua de consumo humano proveniente del reservorio del centro poblado 09 de octubre distrito Sayán-Huaura, diciembre 2021. Universidad Privada de Huancayo Franklin Roosevelt.

Bandurska, K., Krupa, P., Berdowska, A., Jatulewicz, I., & Zawierucha, I. (2021). Mycoremediation of Soil Contaminated with Cadmium and Lead by *Trichoderma* sp. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 28(2), 277–286. <https://doi.org/10.2478/eces-2021-0020>

Bazrafshan, E., Zarei, A. A., & Mostafapour, F. K. (2016). Biosorption of cadmium from aqueous solutions by *Trichoderma* fungus: kinetic, thermodynamic, and equilibrium study. *Desalination and Water Treatment*, 57(31), 14598–14608. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1065764>

Beatriz Elena Guerra 1, Adriana Ximena Sandoval Meza 2, Luigi Sebastián Manrique González 3, Sandra Patricia Barrera Rangel 4 (2014) ENSAYOS PRELIMINARES IN VITRO DE BIOSORCIÓN DE CADMIO POR CEPAS FÚNGICAS NATIVAS DE SUELOS CONTAMINADOS
file:///C:/Users/57305/Downloads/smigracion,+256-Texto+del+art%C3%ADculo-1221-1-10-20150324.pdf

Beltrán, S., & Roland Mauricio, (2013). Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos. <https://repository.unilivre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/TRABAJO%20FINAL%20cd.pdf>

Beltrán-Pineda, M. E., & Gómez-Rodríguez, A. M. (2016). Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 12(2), 172–197. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2027>

Bibliometrix / Rstudio versión 2023.12.1+402 recuperado de: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>

Bioaccumulation and biosorption efficacy of *Trichoderma* isolates SP2F1 in removing Copper (Cu II) from aqueous solutions Adeline S. Y. Ting (2009) https://www.researchgate.net/publication/225574802_Bioaccumulation_and_biosorption_efficacy_of_Trichoderma_isolates_SP2F1_in_removing_Copper_Cu_II_from_aqueous_solutions

Bram Slabbinck1, Bernard De Baets1, Peter Dawyndt2 y Paul De Vos3 (2010) Análisis de *Pseudomonas* Fitopatógenas Usando Métodos Inteligentes de Aprendizaje: Un Enfoque General Sobre Taxonomía y Análisis de Ácidos Grasos Dentro del Género *Pseudomonas*, https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092010000100001

C. Reyes1, Inés Vergara2, Omar E. Torres1 Mercedes Díaz2, Edgar E ... & González, E.E. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>

Calderón, J. T., & Ipn, E. (s/f). EFECTO DEL ANTIMONIO Y CADMIO EN EL ORGANISMO HUMANO. *Revistaelectronica-ipn.org*. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de http://revistaelectronica-ipn.org/ResourcesFiles/Contenido/25/CIENCIA_25_000981.pdf

- Carlos Daniel Zafra Sánchez, Jean Pierre Flores Tique, 2020 Ingeniería Ambiental, E. P. (s/f). UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN. Edu.pe. Recuperado el 20 de febrero de 2024, de https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3742/Carlos_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Čásová Jindřich Černý Czech University of Life Sciences Prague irina Száková Czech University of Life Sciences Prague (2009) Cadmium balance in soils under different fertilization managements including sewage sludge application https://www.researchgate.net/publication/289028492_Cadmium_balance_in_soils_under_different_fertilization_managements_including_sewage_sludge_application
- Castillo Aldave (2018). Determinación de parámetros óptimas en la biorremediación de efluente cianurado de minerales auríferos, utilizando Pseudomonas alcalófilas <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/4003>.
- Cayotopa-Torres, J., Arévalo-López, L., Pichis-García, R., Olivera-Cayotopa, D., Rimachi-Valle, M., & Márquez-Dávila, K. (2021). New cadmium bioremediation agents: Trichoderma species native to the rhizosphere of cacao trees. *Scientia agropecuaria*, 24(2), 155–160. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.017>
- Cayotopa-Torres, José, Arévalo-López, Luis, Pichis-García, Roger, Olivera-Cayotopa, Delmar, Rimachi-Valle, Marilyn, Márquez-Dávila, Kadir (2021). New cadmium bioremediation agents: Trichoderma species native to the rhizosphere of cacao trees https://www.lareferencia.info/vufind/Record/PE_22008972b872c87cc8e34f9620d0720b
- Cevallos Paguay, Tanya Carolina García Díaz, Jonathan Darío, (2018) Evaluación de la biodegradación de suelos contaminados con hidrocarburos utilizando Aspergillus niger, Pleurotus ostreatus y Pseudomonas aeruginosa <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15681>
- Chalco, I., & Jofrey, E. (2022). Revisión sistemática de la biorremediación del cadmio, plomo, arsénico y mercurio en suelos contaminados por la minería artesanal. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/92135>
- Chellaiah, E. R. (2018). Cadmium (heavy metals) bioremediation by Pseudomonas aeruginosa: a minireview. *Applied Water Science*, 8(6). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0796-5>
- Dabir, A., Heidari, P., Ghorbani, H., & Ebrahimi, A. (2019). Cadmium and lead removal by new bacterial isolates from coal and aluminum mines. *International Journal of Environmental Science and Technology: IJEST*, 16(12), 8297–8304. <https://doi.org/10.1007/s13762-019-02303-9>
- Daniel Ángel Luján-Roca (2019) Uso de Pseudomonas aeruginosa en biorremediación (revisión) https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Lujan-Roca/publication/335871095_Uso_de_Pseudomonas_aeruginosa_en_biorremediacion_revision_on/links/5d817304458515fca1711506/UsodePseudomonas-aeruginosa-en-biorremediacion-revision.pdf
- De Los Ríos Silva, C. (2021). Biorremediación bacteriana del cadmio en suelos agrícolas productores de “cacao” (Theobroma cacao L.) de la cooperativa agraria industrial Naranjillo, Tingo María,

Huánuco. Universidad Ricardo Palma.
<https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4535>

- Dell'Anno, F., Rastelli, E., Buschi, E., Barone, G., Beolchini, F., & Dell'Anno, A. (2022). Fungi can be more effective than bacteria for the bioremediation of marine sediments highly contaminated with heavy metals. *Microorganisms*, 10(5), 993. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10050993>
- Fedecacao. (2023, febrero 13). Inicia proyecto para la mitigación del cadmio en cacao en Colombia. Sitefedecacao. <https://www.fedecacao.com.co/post/inicia-proyecto-para-la-mitigaci%C3%B3n-del-cadmio-en-cacao-en-colombia>
- Fiestas Castro, C. N. E., & Vásquez Villalobos, W. A. (2020). Revisión sistemática: Biorremediación de suelos salinos contaminados con petróleo por el consorcio bacteriano de *Pseudomona* por la técnica de bioaumentación. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60270>
- Gonzales, I., & Luis, J. (2021). Aplicación de biosurfactantes producido por *Bacillus* en la remediación de suelos contaminados con metales pesados: revisión sistemática. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/77530>.
- Goyal P, Belapurkar P, Kar A. A Review on In Vitro and In Vivo Bioremediation Potential of Environmental and Probiotic Species of *Bacillus* and Other Probiotic Microorganisms for two Heavy Metals, Cadmium and Nickel. *Biosci Biotech Res Asia* 2019;16(1). <https://www.biotech-asia.org/vol16no1/a-review-on-in-vitro-and-in-vivo-bioremediation-potential-of-environmental-and-probiotic-species-of-bacillus-and-other-probiotic-microorganisms-for-two-heavy-metals-cadmium-and-nickel/>
- He, M., Tian, Z., Liu, Q., & Guo, Y. (2021). *Trichoderma asperellum* promotes cadmium accumulation within maize seedlings. *Biotechnology, Biotechnological Equipment*, 35(1), 1546–1559. <https://doi.org/10.1080/13102818.2021.1997155>
- Heidari, P., & Panico, A. (2020). Sorption mechanism and optimization study for the bioremediation of Pb (II) and Cd (II) contamination by two novel isolated strains Q3 and Q5 of *Bacillus* sp. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 4059. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114059>
- Henagamage, A. P., Peries, C. M., & Seneviratne, G. (2022). Fungal-bacterial biofilm mediated heavy metal rhizo-remediation. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 38(5). <https://doi.org/10.1007/s11274-022-03267-8>
- Herliana, O., Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia, Soesanto, L., Mawadah, E., Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia, & Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia. (2018). Phytobioremediation of cadmium-contaminated soil using combination of *Ipomoea reptans* Poir and *Trichoderma* sp. and its effect on spinach growth and yield. *Journal of degraded and mining lands management*, 06(01), 1519–1526. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2018.061.1519>
- Hernández-Caricio, Carmelo .Ramírez, Verónica Martínez, Javier Quintero-Hernández, Verónica Baez, Antonino Munive, José-Antonio Nora, Rosas-Murrieta (2022) Los metales pesados en

la historia de la humanidad, los efectos de la contaminación por metales pesados y los procesos biotecnológicos para su eliminación: el caso de *Bacillus* como bioherramienta para la recuperación de suelos <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/16410> (2022)

Hernández-Melchor, D. J., Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2019). Trichoderma: IMPORTANCIA AGRÍCOLA, BIOTECNOLÓGICA, Y SISTEMAS DE FERMENTACIÓN PARA PRODUCIR BIOMASA Y ENZIMAS DE INTERÉS INDUSTRIAL. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences: Ex Agro-Ciencia*, 35(ahead), 0–0. <https://doi.org/10.4067/s0719-38902019005000205>

Hongos filamentosos potencialmente tolerantes al cadmio aislados de suelos cultivados con *Theobroma cacao*. (s/f). Biodiversidad.Co. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=udes_hongoscadmio

Hoseinzadeh, S., Shahabivand, S., & Aliloo, A. A. (2017). Toxic metals accumulation in *Trichoderma asperellum* and *T. harzianum*. *Microbiology*, 86(6), 728–736. <https://doi.org/10.1134/s0026261717060066>

Hoseinzadeh, S., Shahabivand, S., & Aliloo, A. A. (2017). Toxic metals accumulation in *Trichoderma asperellum* and *T. harzianum*. *Microbiology*, 86(6), 728–736. <https://doi.org/10.1134/s0026261717060066>

Huang, H., Jia, Q., Jing, W., Dahms, H.-U., & Wang, L. (2020). Screening strains for microbial biosorption technology of cadmium. *Chemosphere*, 251(126428), 126428. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126428>

Huanuco Evangelista, L. K., & Temoche Cortez, K. L. (2020). Revisión sistemática sobre los métodos de biorremediación de suelos contaminados por metales pesados como Níquel, Zinc y Mercurio. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/57772>

Hussain, D. F., & Mutlag, N. H. (2021). Assessment the ability of *Trichoderma harzianum* Fungi in Bioremediation of some of Heavy Metals in Waste Water. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 790(1), 012087. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/790/1/01208>

Imam, S. S. A. (2016). Comparative study of heavy metal bioremediation in soil by *Bacillus subtilis* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Indian journal of science and technology*, 9(1), 1–7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i47/106911>

Institut für Seltene Erden und strategische Metalle Precio, Historia, Ocurrencia, Extracción y Uso del Cadmio. (2019, mayo 14). e.V; Institut für seltene Erden und Metalle. <https://es.institut-seltene-erden.de/seltene-erden-und-metalle/strategische-metalle-2/kadmium/>

Izrael-Živković, L., Beškoski, V., Rikalović, M., Kazazić, S., Shapiro, N., Woyke, T., Gojgić-Cvijović, G., Vrvic, M. M., Maksimović, N., & Karadžić, I. (2019). High-quality draft genome sequence of *Pseudomonas aeruginosa* san ai, an environmental isolate resistant to heavy

metals. *Extremophiles: Life under Extreme Conditions*, 23(4), 399–405.
<https://doi.org/10.1007/s00792-019-01092-w>

Jara Javier, H. J., & Labán Pérez, T. E. (2019). Eficiencia entre la biotransformación utilizando *Bacillus subtilis* y la fitoacumulación utilizando girasol (*Helianthus annuus*) en suelos contaminados por cadmio (Cd), Comas, 2019. Universidad César Vallejo.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/34023>.

Jebril, N. M. T. (2020). In vitro bioremediation: A development process of cadmium and mercury removal by environmental biotechnologies of UV-mutated *Escherichia coli* K12 and *Bacillus subtilis* 168. *Baghdad Science Journal*, 17(1(Suppl.)), 0244.
[https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.1\(suppl.\).0244](https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.1(suppl.).0244)

Jiménez Llacsahuanga, M. (2017). Biorremediación con Inóculos de *Pleurotus ostreatus* para recuperar suelos contaminados con metales pesados en La Florida Cajamarca, 2016. Universidad César Vallejo.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/10889>

Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2001) *Trace Elements in Soils and Plants*. 3rd Edition, CRC Press, Boca Raton, 403 p. - References - Scientific Research Publishing. (s/f). Scirp.org. Recuperado el 20 de febrero de 2024, de <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=1544363>

[Kapahi, M., & Sachdeva, S. \(2019\). Bioremediation options for heavy metal pollution. *Journal of Health & Pollution*, 9\(24\). https://doi.org/10.5696/2156-9614-9.24.191203](https://doi.org/10.5696/2156-9614-9.24.191203)

[Keni, C.-R., A., N.-G. J., & Marcos, D.-R. \(s/f\). BIORREMEDIACIÓN: ACTUALIDAD DE CONCEPTOS Y APLICACIONES. Redalyc.org. Recuperado el 21 de febrero de 2024, de https://www.redalyc.org/pdf/6729/672971082005.pdf](https://www.redalyc.org/pdf/6729/672971082005.pdf)

Khan, A., Gupta, A., Singh, P., Mishra, A. K., Ranjan, R. K., & Srivastava, A. (2020). Siderophore-assisted cadmium hyperaccumulation in *Bacillus subtilis*. *International Microbiology: The Official Journal of the Spanish Society for Microbiology*, 23(2), 277–286.
<https://doi.org/10.1007/s10123-019-00101-4>

Khilji, S. A., Aqeel, M., Maqsood, M. F., Khalid, N., Tufail, A., Sajid, Z. A., Al-Surhane, A. A., Hashem, M., Alamri, S., Al-Mutairi, K. A., & Noman, A. (2021). *Hemarthria compressa*—*Aspergillus niger*—*Trichoderma pseudokoningii* mediated trilateral perspective for bioremediation and detoxification of industrial paper sludge. *Sustainability*, 13(21), 12266.
<https://doi.org/10.3390/su132112266>

KIP Paliz · (2021) Capacidad degradadora de *Pseudomonas Aeruginosa* frente a metales pesados presentes en muestras de sedimentos del río Chibungu, recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8016910.pdf>

KN Rodríguez Villanueva · 2022., “biorremediación Mediante *Trichoderma*, & de Cadmio En Espárrago”, P. F. y. B. S. P. R. C. (s/f). UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA. Edu.pe. Recuperado el 20 de febrero de 2024, de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/5337/rodriguez-villanueva-kassandra-nataly.pdf?isAllowed=y&sequence=1>

- Kumar, V., & Dwivedi, S. K. (2019). Hexavalent chromium stress response, reduction capability and bioremediation potential of *Trichoderma* sp. isolated from electroplating wastewater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 185(109734), 109734. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109734>
- Kumari, W. M. N. H., Thiruchittampalam, S., Weerasinghe, M. S. S., Chandrasekharan, N. V., & Wijayarathna, C. D. (2021). Characterization of a *Bacillus megaterium* strain with metal bioremediation potential and in silico discovery of novel cadmium binding motifs in the regulator, CadC. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(6), 2573–2586. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11193-2>.
- Li, J., Liu, Y.-R., Zhang, L.-M., & He, J.-Z. (2019). Sorption mechanism and distribution of cadmium by different microbial species. *Journal of Environmental Management*, 237, 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.057>
- Li, X., Li, Y., Zhu, X., Gui, X., Ma, C., Peng, W., Li, Y., Zhang, Y., Huang, W., Hua, D., Jia, S., & Wu, M. (2022). Evaluation of the cadmium phytoextraction potential of tobacco (*Nicotiana tabacum*) and rhizosphere micro-characteristics under different cadmium levels. *Chemosphere*, 286(131714), 131714. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131714>
- Li, Xue, Feng, C., Lei, M., Luo, K., Wang, L., Liu, R., Li, Y., & Hu, Y. (2022). Bioremediation of organic/heavy metal contaminants by mixed cultures of microorganisms: A review. *Open Chemistry*, 20(1), 793–807. <https://doi.org/10.1515/chem-2022-0198>
- Liu, J., Xu, R., Lu, Z., Yu, G., & Xu, Z. (2020). *Pseudomonas aeruginosa*. Definitions. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16483-5_4840
- M. Teja a, D. Muni Kumar b, P. Bindiya a and G. Sudhakar c (2022). Microbial Profiling, Bioremediation of Cadmium and Dye Decolourization Competence of Marine Bacterial Isolates [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Muni-Dokka/publication/358719928_Microbial_Profiling_Bioremediation_of_Cadmium_and_Dye_Decolourization_Competence_of_Marine_Bacterial_Isolates/links/628c74e8a60b817ec3d099a6/Microbial-Profiling-Bioremediation-of-Cadmium-and-Dye-Decolourization-Competence-of-Marine-Bacterial-Isolates.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Muni-Dokka/publication/358719928_Microbial_Profiling_Bioremediation_of_Cadmium_and_Dye_Decolourization_Competence_of_Marine_Bacterial_Isolates/links/628c74e8a60b817ec3d099a6/Microbial-Profiling-Bioremediation-of-Cadmium-and-Dye-Decolourization-Competence-of-Marine-Bacterial-Isolates.pdf)
- Ma, H., Wei, M., Wang, Z., Hou, S., Li, X., & Xu, H. (2020). Bioremediation of cadmium polluted soil using a novel cadmium immobilizing plant growth promotion strain *Bacillus* sp. TZ5 loaded on biochar. *Journal of Hazardous Materials*, 388(122065), 122065. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122065>
- Maldaner, J., Steffen, G. P. K., Missio, E. L., Saldanha, C. W., de Morais, R. M., & Nicoloso, F. T. (2021). Tolerance of *Trichoderma* isolates to increasing concentrations of heavy metals. *The International Journal of Environmental Studies*, 78(2), 185–197. <https://doi.org/10.1080/00207233.2020.1778290>

- Mandragutti, T., Dokka, M. K., Panchagnula, B., & Godi, S. (2021). Molecular characterization of marine bacterial isolates of Visakhapatnam coast—efficacy in dye decolorization and bioremediation of cadmium. *Journal, Genetic Engineering & Biotechnology*, 19(1), 87. <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00189-0>
- Margaret L.C. De Guzman, 2Kristina Samantha G. Arcega, 2Jan-Mari Norbertine R. Cabigao, 1Glenn L. Sia Su (2016) Isolation and Identification of Heavy Metal-Tolerant Bacteria from an Industrial Site as a Possible Source for Bioremediation of Cadmium, Lead, and Nickel chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkhttps://www.researchgate.net/profile/Glenn-Sia-Su/publication/296247333_Isolation_and_identification_of_heavy_metal_tolerant_bacteria_from_an_industrial_site_as_a_possible_source_for_bioremediation_of_cadmium_lead_and_nickel/links/56d3d89908ae059e37612ed9/Isolation-and-identification-of-heavy-metal-tolerant-bacteria-from-an-industrial-site-as-a-possible-source-for-bioremediation-of-cadmium-lead-and-nickel.pdf
- María Fernanda Villarreal-Delgado, Eber Daniel Villa-Rodríguez, Luis Alberto Cira-Chávez 2017 El género *Bacillus* como agente de control biológico y sus implicaciones en la bioseguridad agrícola <https://www.redalyc.org/journal/612/61258143006/>
- Martínez, B., Infante, D., & Peteira, B. (2015) (s/f). Taxonomía polifásica y variabilidad en el género *Trichoderma*. *Sld.cu*. Recuperado el 21 de febrero de 2024, de <http://scielo.sld.cu/pdf/rpv/v30s1/rpv004s15.pdf>
- Mayra Eleonora Beltrán-Pineda1 Alida Marcela Gómez-Rodríguez2 (2016) BIORREMEDIACIÓN DE METALES PESADOS CADMIO (Cd), CROMO (Cr) Y MERCURIO (Hg) MECANISMOS BIOQUÍMICOS E INGENIERÍA GENÉTICA: UNA REVISIÓN <https://revistas.unimilitar.edu.co/index.php/rfcb/article/download/2027/1835/6473>
- Maza, P., & Milagros, P. (2019). Reducción de mercurio en suelos contaminados del campamento de la mina Santa Bárbara usando *Pseudomona putida* en Huancavelica. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/40583>
- Mishra, S., Lin, Z., Pang, S., Zhang, Y., Bhatt, P., & Chen, S. (2021). Biosurfactant is a powerful tool for the bioremediation of heavy metals from contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 418(126253), 126253. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126253>
- Mohd. Kashif Kidwai, Anju Malik, Sanju Bala Dhull, Pawan Kumar Rose, Vinod Kumar Garg (2022). 1st Edition Bioremediation Potential of *Trichoderma* species for Metal(loid)s <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003229940-8/bioremediation-potential-trichoderma-species-metal-loid-mohd-kashif-kidwai-anju-malik-sanju-bala-dhull-pawan-kumar-rose-vinod-kumar-garg>
- Mohsenzadeh, F., & Shahrokhi, F. (2014). Biological removing of Cadmium from contaminated media by fungal biomass of *Trichoderma* species. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/2052-336x-12-102>
- Muñoz, Z., & Margoth, D. (2020). Estudio del contenido en cadmio de cacao (*Theobroma cacao* L) ecuatoriano y su incidencia en el consumo humano. Universidad de Córdoba.

- National Geographic*. (2022, abril 3). Los países del mundo que acumulan más residuos peligrosos. National geographic. https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/paises-mundo-que-acumulan-mas-residuos-peligrosos_18100
- National Geographic*. (2022, abril 3). Los países del mundo que acumulan más residuos peligrosos. National geographic. https://www.nationalgeographic.com.es/mundo-ng/paises-mundo-que-acumulan-mas-residuos-peligrosos_18100
- Nokman, W., Benluvankar, V., Maria Packiam, S., & Vincent, S. (2019). Screening and molecular identification of heavy metal resistant *Pseudomonas putida* S4 in tannery effluent wastewater. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 18(101052), 101052. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.10105>
- Nongmaithem, N., Roy, A., & Bhattacharya, P. M. (2016). Screening of *Trichoderma* isolates for their potential of biosorption of nickel and cadmium. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(2), 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.01.008>
- Núñez Bustamante, E., & Tarrillo Diaz, M. L. (2022). Análisis de los métodos más eficientes para la recuperación de suelos contaminados con relaves mineros producto de la actividad minera. Universidad Privada del Norte. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/30726>
- Oa, D. E. H. (s/f). Universidad de Carabobo Venezuela. Redalyc.org. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de <https://www.redalyc.org/journal/707/70758484010/70758484010.pdf>
- Oa, D. E. H. (s/f). Universidad de Carabobo Venezuela. Redalyc.org. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de <https://www.redalyc.org/journal/707/70758484010/70758484010.pdf>
- Pancorbo Arias, Suzan Alina, Ruiz Sandoval (2020). (s/f-a). FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA. Edu.pe. Recuperado el 21 de febrero de 2024, de https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/63390/Pancorbo_ASA-Ruiz_SGM-SD.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Paredes-Páliz, Karina Inés; Santillán-Quiroga, Luis Miguel; Viteri-Uscátegui, María Rafaela (2021). Capacidad degradadora de *pseudomonas aeruginosa* frente a metales pesados presentes en muestras de sedimentos del río Chibunga <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8016910>
- Pérez-García PE, AzconaCruz MI. (2012) Los efectos del cadmio en la salud. *Rev Esp Méd Quir*
- PHerliana, O., Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia, Soesanto, L., Mawadah, E., Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia, & Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia. (2018). Phytobioremediation of cadmium-contaminated soil using combination of *Ipomoea reptans* Poir and *Trichoderma* sp. and its effect on spinach growth and yield. *Journal of degraded and mining lands management*, 06(01), 1519–1526. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2018.061.1519>
- Pisfil, S., & Simone, I. (2020). *Pseudomonas putida* Y *Penicillium* Sp. para la biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. Universidad César Vallejo. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/55512>

- Poria, V., Jhilita, P., Rana, A., Khokhar, J., & Singh, S. (2022). Pressmud: a sustainable source of value-added products. *Environmental Technology Reviews*, 11(1), 187–201. <https://doi.org/10.1080/21622515.2022.2144767>
- Poveda, J. (2022). *Trichoderma Role in Anthropogenic Pollutions Mycoremediation: Pesticides and Heavy Metals*. En *Fungal Biology* (pp. 465–497). Springer International Publishing.
- Priya, A. K., Gnanasekaran, L., Dutta, K., Rajendran, S., Balakrishnan, D., & Soto-Moscoso, M. (2022). Biosorption of heavy metals by microorganisms: Evaluation of different underlying mechanisms. *Chemosphere*, 307(135957), 135957. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135957>
- Priyalaxmi, R., Murugan, A., Raja, P., & Raj, K. D. (s/f). Bioremediation of cadmium by *Bacillus safensis* (JX126862), a marine bacterium isolated from mangrove sediments. *Ijemas.com*. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de <https://www.ijemas.com/vol-3-12/Rajesh%20Priyalaxmi,%20et%20al.pdf>
- Pseudomonas* Alfredo Pinzón-Junca (2019) recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/amc/v44n1/0120-2448-amc-44-01-52.pdf>
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://doi.org/10.19053/1900771x.v16.n2.2016.5447>
- Romero Ledezma, Karla Pamela (2009) contaminación por metales pesados *Revista Científica Ciencia Médica*, vol. 12, núm. 1, 2009, pp. 45-46 Universidad Mayor de San Simón Cochabamba, Bolivia <https://www.redalyc.org/pdf/4260/426041218013.pdf>
- Sahu, A., Mandal, A., Thakur, J., Manna, M. C., & Rao, A. S. (2012). Exploring bioaccumulation efficacy of *Trichoderma viride*: An alternative bioremediation of cadmium and lead. *National Academy Science Letters*. National Academy of Sciences, India, 35(4), 299–302. <https://doi.org/10.1007/s40009-012-0056-4>
- Sanaz Khashei, zahra Etemadifar, Hamid reza (2019) Multifunctional Biofertilizer from *Pseudomonas Putida* PT: A Potential Approach for Simultaneous Improving Maize Growth and Bioremediation of Cadmium-polluted Soils https://bjm.ui.ac.ir/article_23770.html?lang=en
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehim, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>
- SCOPUS (S/f-j). Elsevier.com, de https://id.elsevier.com/as/authorization.oauth2?platSite=SC%2Fscopus&ui_locales=en-US&scope=openid+profile+email+els_auth_info+els_analytics_info+urn%3Acom%3Aelsevier%3Aidp%3Apolicy%3Aproduct%3Aindv_identity&els_policy=idp_policy_indv_identity_plus&response_type=code&redirect_uri=https%3A%2F%2Fwww.scopus.com%2Fauthredirect.uri%3FtxGid%3Db177099d013466eea3ecc27f05facb18&state=forceLogin%7CtxId%3

D035EB2C3F133ED31F0F2C22907BFCEC9.i-
05c633c5b9fbc1549%3A4&authType=SINGLE_SIGN_IN&prompt=login&client_id=SCOP
US&isValidNewDocSearchRedirection=false

- Shahid, M., Javed, M. T., Tanwir, K., Akram, M. S., Tazeen, S. K., Saleem, M. H., Masood, S., Mujtaba, S., & Chaudhary, H. J. (2020). Plant growth-promoting *Bacillus* sp. strain SDA-4 confers Cd tolerance by physio-biochemical improvements, better nutrient acquisition and diminished Cd uptake in *Spinacia oleracea* L. *Physiology and Molecular Biology of Plants: An International Journal of Functional Plant Biology*, 26(12), 2417–2433. <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00900-4>
- Shameer Syed, N.V.K.V. Prasad Tollamadugu (2019) pages 209-222 Chapter 16 - Role of Plant Growth-Promoting Microorganisms as a Tool for Environmental Sustainability <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128163283000167>
- Sharma, B., & Shukla, P. (2021). Lead bioaccumulation mediated by *Bacillus cereus* BPS-9 from an industrial waste contaminated site encoding heavy metal resistant genes and their transporters. *Journal of Hazardous Materials*, 401(123285), 123285. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.12328>
- Shen, Z., Li, Y., & Liu, Y. (2018). Highly sensitive and selective detection of Hg²⁺ and Ag⁺ ions using fluorescent and colorimetric probes based on the aggregation of gold nanoparticles. *RSC Advances*, 8(16), 8750-8755. <https://doi.org/10.1039/C8RA00371H>
- Sneh lata, Tulika Mishra (2019) CADMIUM BIOREMEDIATION: A REVIEW chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/Sneh-Lata-15/publication/339712646_CADMIUM_BIOREMEDIATION_A_REVIEW/links/5e60be4a4585152ce80925bd/CADMIUM-BIOREMEDIATION-A-REVIEW.pdf (2019)
- Soto Lavayen, Kevin Josue, (2021) Estudio sobre la capacidad de biorremediación de bacterias *Pseudomonas*. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/6528> .
- Sreedevi, P. R., Suresh, K., & Jiang, G. (2022). Bacterial bioremediation of heavy metals in wastewater: A review of processes and applications. *Journal of Water Process Engineering*, 48(102884), 102884. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102884>
- Sriramulu, D. (2019). *Pseudomonas aeruginosa: An armory within*. BoD – Books on Demand. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=tHH8DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA85&dq=bioremediation+of+heavy+metals+by+pseudomonas&ots=2nRjHjZMEK&sig=ZxvW8mf4rmHvcarYtofAAAtZupD0#v=onepage&q=bioremediation%20of%20heavy%20metals%20by%20pseudomonas&f=false>
- Sunilkumar, C.-R., Stephen-Victor, E., Naripogu, K. B., Samanth Kumar, J., Nuthan, B. R., Marulasiddaswamy, K. M., Kini, K. R., & Geetha, N. (2021). Differential multi-cellularity is required for the adaptation for *Bacillus licheniformis* to withstand heavy metals toxicity. *Indian Journal of Microbiology*, 61(4), 524–529. <https://doi.org/10.1007/s12088-021-00958-y>

- T Balasubramanian Heavy metal contamination and risk assessment in the marine environment of Arabian Sea, along the southwest coast of India American Journal of Chemistry, 2012 https://www.academia.edu/download/44998105/Heavy_Metal_Contamination_and_Risk_Asses2016_0422-24208-jplelc.pdf
- Taghavi Ghasemkheili, F., Ekelund, F., Johansen, J. L., Pirdashti, H., Ghadirnezhad Shiade, S. R., Fathi, A., & Kjølner, R. (2022). Ameliorative effects of *Trichoderma harzianum* and rhizosphere soil microbes on cadmium biosorption of barley (*Hordeum vulgare* L.) in Cd-polluted soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 527–539. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00666-y>
- Tarhonska, K., Lesicka, M., Janasik, B., Roszak, J., Reszka, E., Braun, M., Kołacińska-Wow, A., & Jabłońska, E. (2022). Cadmium and breast cancer – Current state and research gaps in the underlying mechanisms. *Toxicology Letters*, 361, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2022.03.003>
- Tripathi, P., Singh, P. C., Mishra, A., Chauhan, P. S., Dwivedi, S., Bais, R. T., & Tripathi, R. D. (2013). *Trichoderma*: a potential bioremediator for environmental clean up. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 15(4), 541–550. <https://doi.org/10.1007/s10098-012-0553-7>
- Vega-Jara, L. (s/f). (2021). APLICACIÓN DE MÉTODOS FÍSICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS EN SUELOS CONTAMINADOS CON CADMIO Y PLOMO. Edu.pe. Recuperado el 18 de febrero de 2024, de <https://www.unheval.edu.pe/portal/wp-content/uploads/2021/03/libro-Vega-Jara-L.-2021.pdf>
- Verma, S., & Kuila, A. (2019). Bioremediation of heavy metals by microbial process. *Environmental Technology & Innovation*, 14(100369), 100369. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100369>
- Villanueva, R., & Nataly, K. (2022). Biorremediación mediante *Trichoderma* spp., *Pseudomonas fluorescens* y *Bacillus subtilis* para reducir concentraciones de Cadmio en Espárrago. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5337>
- Virender Singh, P K Chauhan, Rohini Kanta (2014) ISOLATION AND CHARACTERIZATION OF PSEUDOMONAS RESISTANT TO HEAVY METALS CONTAMINANTS chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.researchgate.net/profile/TejpalDhewa/publication/259752634_Isolation_and_characterization_of_Pseudomonas_resistant_to_heavy_metal_s_contaminants/links/0046352d9377f74856000000/Isolation-and-characterization-of-Pseudomonas-resistant-to-heavy-metals-contaminants.pdf
- Wang, C., Liu, Z., Huang, Y., Zhang, Y., Wang, X., & Hu, Z. (2019). Cadmium-resistant rhizobacterium *Bacillus cereus* M4 promotes the growth and reduces cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 72(103265), 103265. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2019.103265>
- Yaghoubian, Y., Siadat, S. A., Moradi Telavat, M. R., Pirdashti, H., & Yaghoubian, I. (2019). Bio-removal of cadmium from aqueous solutions by filamentous fungi: *Trichoderma* spp. and

Piriformospora indica. Environmental Science and Pollution Research International, 26(8), 7863–7872. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04255-6>

Yu, X., Zhao, J., Liu, X., Sun, L., Tian, J., & Wu, N. (2021). Cadmium pollution impact on the bacterial community structure of arable soil and the isolation of the cadmium resistant bacteria. Frontiers in microbiology, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.698834>

Zaborowska, Wyszowska, & Kucharski, (2015) The possibilities of restoring the enzymatic balance of soil contaminated with cadmium <https://www.researchgate.net/publication/305296630> The possibilities of restoring the enzymatic balance of soil contaminated with cadmium

Zafra Sánchez, C. D., & Flores Tique, J. P. (2020). Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de Rhizopus sp. y Rhodobacter sphaeroides: Revisión. Universidad Peruana Unión. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/3742>

Zhang, X., Li, X., Yang, H., & Cui, Z. (2018). Biochemical mechanism of phytoremediation process of lead and cadmium pollution with Mucor circinelloides and Trichoderma asperellum. Ecotoxicology and Environmental Safety, 157, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.047>



Universidad[®]
Católica
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

Universidad Católica de Manizales
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia
PBX (6)8 93 30 50 - www.ucm.edu.co