



***REVISIÓN DOCUMENTAL SOBRE USO DE MICROORGANISMOS CON
CAPACIDAD DE BIORRECUPERACIÓN DE SUELOS EN CULTIVOS DE
CACAO EN COLOMBIA.***

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ D.C., SEPTIEMBRE 2021**



***REVISIÓN DOCUMENTAL SOBRE USO DE MICROORGANISMOS CON
CAPACIDAD DE BIORRECUPERACIÓN DE SUELOS EN CULTIVOS DE
CACAO EN COLOMBIA.***

Elaborado por:

ASTRID CAROLINA RUIZ GRIJALBA

Asesora interna:

LIGIA CONSUELO SANCHEZ LEAL M.Sc.

**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD
PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA Y LABORATORIO CLÍNICO
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ D.C., SEPTIEMBRE 2021**

DEDICATORIA

Las maravillas de un creador omnipotente se hacen visibles en la majestuosidad de su obra en la creación, desde los animales, las flores y los cielos, testificando día a día la abundante gracia y misericordia de un Dios sabio, bueno y generoso con una humanidad que pasa desapercibida ante la autoría del hacedor de todas estas cosas, a él le dedico este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios primeramente por darme la oportunidad de realizar la carrera de mis sueños desde que tenía 11 años, agradezco a mi tío Robert Grijalba el benefactor que financió toda mi carrera desde su comienzo hasta el fin, a mis padres Elio Ruiz y Nubia Grijalba por apoyarme en esta meta con los recursos con los que disponían, a mis amigas de la universidad que me acompañaron en toda esta trayectoria dándome su apoyo y ánimo en todo momento, y por último a mi asesora Ligia Consuelo la cual por cuestiones de Dios se me cruzó en el camino, sin pensar que sería la que me ayudaría a culminar esta etapa con su paciencia y amor por la docencia.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVOS	12
3. ANTECEDENTES	13
4. MARCO REFERENCIAL	20
4.1. Cultivo de cacao en Colombia	20
4.1.1. Morfología de <i>Theobroma cacao</i> L.	20
4.1.2. Producción de <i>Theobroma cacao</i> L.	21
4.2. Biorrecuperación con microorganismos	21
4.2.1. Tipos de biorremediación	21
4.2.2. Microorganismos biorremediadores de metales pesados en cultivos de cacao	23
4.2.3. Microorganismos biorrecuperadores de suelos con agroquímicos aplicables a cultivos de <i>Theobroma Cacao</i> L.	28
5. DISEÑO METODOLÓGICO	34
5.1. Universo, población, muestra	34
5.2. Tipo de investigación, variables	35
5.3. Técnicas y procedimientos	35
5.3.1. Revisión de la información existente,	35
5.3.2. Selección del material bibliográfico de acuerdo a la temática a tratar	35
5.3.3. Estructuración coherente del documento	36
6. RESULTADOS	36
FASE 1. Búsqueda y revisión de la información.	36
FASE 2. Selección del material bibliográfico	37
FASE 3. Organización lógica del documento	38
7. DISCUSIÓN	48

8. CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Flor, fruto y semilla de <i>Theobroma cacao</i> L. (27).....	20
Figura 2. Hectáreas destinadas para el cultivo de <i>Theobroma cacao</i> L. a nivel mundial (26).....	21
Figura 3. Producción de cacao por departamento a nivel nacional (26).....	21
Figura 4. Presentación de los procesos bioprecipitación y biovolatilización en bacterias (43).....	23
Figura 5. <i>Aspergillus</i> sp. (50).....	24
Figura 6. <i>Trichoderma</i> sp. (51).....	24
Figura 7. <i>Glomus macrocarpum</i> (53).....	25
Figura 8. <i>Glomus intraradices</i> (19).....	25
Figura 9. Almacenamiento de metales pesados por HMA (54).....	26
Figura 10. Tolerancia de metales pesados a nivel celular por hongos (57).....	27
Figura 11. Degradación de organofosforados por diversos microorganismos (72).....	31
Figura 12. Selección de la información para el desarrollo del documento.....	36
Figura 13. Principales temáticas a tratar en la revisión documental.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Taxonomía de <i>Theobroma Cacao</i> L.....	20
Tabla 2. Microorganismos mencionados como alternativas para Biodegradar compuestos organofosforados.....	30
Tabla 3. Participación de bacterias Gram-negativas en la degradación de BPCs (Bifenilos policlorados).....	33
Tabla 4. Material de documento seleccionado.....	38



**UNIVERSIDAD COLEGIO MAYOR DE CUNDINAMARCA FACULTAD DE
CIENCIAS DE LA SALUD PROGRAMA DE BACTERIOLOGÍA.**

***REVISIÓN DOCUMENTAL SOBRE USO DE MICROORGANISMOS CON
CAPACIDAD DE BIORRECUPERACIÓN DE SUELOS EN CULTIVOS DE
CACAO EN COLOMBIA.***

RESUMEN

Colombia es reconocido a nivel mundial como un país productor de cacao (*Theobroma cacao* L), en especial el cacao híbrido o trinitario recomendado por Fedecacao. Los departamentos más involucrados en su producción son Santander en primer lugar, Antioquia, Arauca, Nariño y Cundinamarca, para consumo interno en la producción de chocolate y productos cosméticos a base de cacao. Como producto de exportación, la Unión Europea (UE) ha fijado unos estándares para la aprobación y entrada de este fruto, que Colombia debe cumplir. Desafortunadamente, aún muchos cultivos son tratados con agroquímicos lo que conlleva a que contaminantes como los metales pesados sean fácilmente absorbidos por la planta de cacao, específicamente con residualidad en el fruto. Existe un buen número de investigaciones que describen nuevos métodos para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados, promoviendo el uso de microorganismos que los solubilizan o degradan, como parte de su metabolismo por diversas vías bioquímicas, en donde se halla mayor mención de

los hongos y bacterias como principales partícipes de estas funciones. El objetivo de este trabajo fue hacer una revisión documental, que proporcione información sobre la biorrecuperación de suelos con altas concentraciones de metales pesados y agroquímicos utilizados en el manejo de cultivos de cacao, haciendo uso de las diferentes bases de datos proporcionadas por la web, concluyendo que la respuesta adaptativa de muchos microorganismos autóctonos en suelos contaminados puede representar una solución en la biorremediación de suelos.

PALABRAS CLAVES: Microorganismos, agroquímicos, metales pesados, biorrecuperación, suelo, *Theobroma cacao* L.

Estudiante: Astrid Carolina Ruiz Grijalba

Docente: Ligia Consuelo Sánchez Leal

Institución: Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Septiembre 2021

1. INTRODUCCIÓN

Los agroquímicos han sido utilizados por muchos años en diferentes cultivos y el cacao no es la excepción, aún más, cuando la producción depende de frenar el ataque por microorganismos fitopatógenos e insectos plaga que invaden estas plantaciones, razón por la cual, estos suelos son tratados con todo tipo de agroquímicos (1). Con la aparición de la revolución verde y la normatividad de protección de los suelos, se vienen utilizando estrategias limpias que incluyen, entre otros, el uso de microorganismos con potencial enzimático que transforman sustancias dañinas y a la vez sirven de fertilizante natural a los suelos (2).

En Colombia, uno de los cultivos importantes a nivel de exportación es el cacao y las exigencias son muy altas; es el caso de la Unión Europea (UE), quienes tienen establecidos unos valores permitidos de ciertos contaminantes, como es el caso de metales como el cadmio. Desafortunadamente, hay reportes de zonas en Arauca y Nariño en donde los cultivos presentan niveles de este metal pesado por encima de lo establecido por la UE (3). El cadmio puede encontrarse naturalmente en el suelo resultante de la meteorización, también como residuo de pesticidas, por el riego con aguas contaminadas o vertimiento de residuos industriales. Los cultivos como el cacao son más susceptibles a extraer y acumular este metal pesado, transportándose hasta los frutos, lo cual genera una problemática en la exportación de este producto a nivel mundial (4).

El uso indiscriminado de agroquímicos pone en riesgo la calidad del suelo y del cultivo debido a las consecuencias que genera. Generalmente, el agricultor con el fin de optimizar el control de plagas, enfermedades y aumentar la producción, utiliza gran cantidad de agroquímicos, desconociendo la microbiota nativa del suelo y su aprovechamiento. Esto lleva a una acumulación de elementos que se

convierten en un problema de contaminación ambiental, alterando el equilibrio del suelo y disminuyendo la actividad agrícola del sector (5)(6). Es posible que haya algunos agricultores que no realicen demasiado uso de sustancias químicas y que estén comenzando la actividad agrícola con una variedad de cultivos. En este caso, es la oportunidad para informar a agricultores nuevos sobre las diferentes metodologías para hacer del suelo un recurso sostenible, con opciones saludables que además benefician el cultivo y de esta manera disminuir de manera parcial o total el uso de componentes químicos, optando por nuevas alternativas como el uso de microorganismos que coadyuvan al crecimiento de la planta, aprovechan las propiedades del suelo y no causan contaminación en el medio (7).

Debido a la importancia del cultivo de cacao en el país, se espera con esta investigación identificar las medidas de biorrecuperación de suelos en cultivos de Cacao, teniendo en cuenta que se han descrito varias técnicas para minimizar el impacto de contaminantes en suelos como la biorrecuperación, biorremediación, bioestimulación entre otras, aprovechando las capacidades metabólicas de los microorganismos frente a contaminantes del medio ambiente, específicamente con capacidades para el tratamiento de aguas y suelos contaminados, haciendo que la actividad transformadora de ciertos componentes sean importantes en los procesos de biorrecuperación (8).

De esta manera, se busca que la información recopilada sea de utilidad para que se realice una transferencia de tecnología donde el agricultor comprenda estos conocimientos y promueva una nueva conciencia del uso de microorganismos biorremediadores y benéficos para mejorar la producción de los cultivadores de cacao en Colombia. Esta investigación revisó 86 documentos, tesis, proyectos de grado en repositorio, artículos de investigación, artículos de revisión, actas, manuales, capítulos de libros y documentos técnicos en páginas web.

2. OBJETIVOS

GENERAL

Realizar una revisión documental sobre microorganismos con capacidad de biorrecuperación de suelos en cultivos de cacao en Colombia.

ESPECÍFICOS

- Recopilar información sobre microorganismos con capacidad biorrecuperadora en suelos con cultivos de cacao.
- Organizar la información relacionada con la capacidad de biorrecuperación de suelos en cultivos de cacao en Colombia.
- Analizar la información para establecer cuáles son los microorganismos que más se utilizan en biorrecuperación de suelos en cultivos de cacao en Colombia.

3. ANTECEDENTES

Abad- Guarnizo et al. (2017), describieron en su investigación el aislamiento de microorganismos nativos de suelos agrícolas con uso intensivo de agroquímicos, en donde describen que una gran variedad de bacterias Gram-positivas fueron encontradas en la degradación activa de herbicidas y plaguicidas. De estas bacterias, se describieron *bacillus*, *cocos* y *micrococos*, que a comparación de los hongos tuvieron mayor capacidad inmovilizadora de los contaminantes. Dentro de los hongos se hallaron partícipes los géneros *Penicillium*, *Mucor*, *Scytalidium*, *Aspergillus*, *Neosartorya*, *Eurotiomycetes*, *Talaromyces* y *Fusarium* (9).

Pachay (2017), describe en su estudio la capacidad que tiene la microalga *Chlorella* sp. sobre la reducción de cadmio a una concentración de 5 ppm, removiendo el 91.50% de este metal, un dato similar aparece en una menor concentración de cadmio de por lo menos 3 ppm con una remoción de 90.21%, estos datos son significativos ya que este microorganismo ha sido objeto de estudio en la reducción de metales pesados en áreas agrícolas, alimentarias y ambientales, pues la pared celular de *Chlorella* sp. puede bioacumular y químicamente absorber gracias a su metabolismo, transportando iones a través de su citoplasma (10).

Tuesta-Pinedo (2017), realizó un estudio en el cual buscaba mejorar la fertilización orgánica e inorgánica con el uso de *Trichoderma* sp. y hongos micorrízicos arbusculares (HMA), para así evaluar cómo reaccionan los cultivos de cacao ante este tratamiento, de esta forma mitigar el uso de agroquímicos y fortalecer los cultivos ante enfermedades y plagas. Se inocularon en plantas de cacao de aproximadamente 6 años, diferentes tratamientos, en los que se combinaban fertilizantes orgánicos e inorgánicos, junto con los hongos ya mencionados,

obteniendo como resultado que los HMA en conjunto con fertilizantes inorgánicos proporcionaban un mejor rendimiento en los cultivos de cacao (1).

Hipólito-Romero et al. (2017), en su investigación realizada en cultivos de cacao bajo el modelo de sistemas agroforestales, inocularon antes y post-siembra consorcios bacterianos, para los cuales usaron cepas bacterianas estandarizadas de las especies *Azospirillum brasilense*, *Chromobacterium violaceum* y *Acinetobacter calcoaceticus* en plantaciones de cacao, teniendo en cuenta su captación de nitrógeno y fósforo, respectivamente. Concluyeron que la biofertilización a partir de consorcios bacterianos edáficos es una propuesta sostenible, comparada a la fertilización química la cual conlleva muchas problemáticas en el ambiente por la acumulación de compuestos nitrogenados, dentro los cuales algunos son tóxicos, encontrando que estos consorcios bacterianos pueden degradar elementos derivados como el benzonitrilo y bromoxynil (11).

Ayubb et al. (2017), describieron en su estudio el aislamiento microbiológico de bacterias endófitas provenientes de plantas de arroz y bacterias pertenecientes a la rizosfera en el departamento de Antioquia, esto con el fin de identificar qué microorganismos son capaces de inmovilizar cadmio en diferentes concentraciones y promover a su vez el crecimiento vegetal. Se aislaron 70 bacterias endófitas de arrozales y 93 bacterias de la rizosfera, de las cuales, 4 bacterias endófitas y 8 rizosféricas producían sideróforos, lo que significa mayor captación de hierro disminuyendo el desarrollo de fitopatógenos. Al final identificaron las especies *Burkholderia cepacia* y *Pseudomonas fluorescens*, como las bacterias endófitas y rizosféricas capaces de crecer en altas concentraciones de cadmio y plomo, promoviendo a su vez el crecimiento vegetal (12).

Mitra et al. (2018), en India, realizaron el aislamiento microbiano de suelos rizosféricos en zonas arroceras cercanas a una industria metalúrgica. Estos microorganismos fueron posteriormente inoculados con metales pesados a diferentes concentraciones desde cadmio, plomo, mercurio, entre otros, en agares y medios líquidos. Se esperaron 7 días y a los que crecieron se les observó la actividad enzimática deaminasa ACC. Para su identificación se realizaron pruebas bioquímicas, microscópicas, espectrofotométricas y moleculares, arrojando que se trataba de la cepa S8 que presentó mejor actividad fue la especie *Klebsiella michiganensis* por su capacidad de solubilizar el fósforo, fijar el nitrógeno y producir enzimas deaminasas, que le confirieron resistencia a una variedad de metales pesados dentro de los cuales destacó el cadmio, reduciendo la absorción vegetal y disminuyendo su fitotoxicidad (13).

Álvarez et al. (2018), hicieron aislamientos de tres especies vegetales con el propósito de obtener microorganismos benéficos para el suelo y así formar consorcios microbianos que ofrecieran al suelo de cultivos de fresa una mejora en el aprovechamiento de nutrientes y a su vez impulsar el crecimiento de las plantas. Se observó en su estudio que estos microorganismos aislados favorecen el crecimiento de hojas en un 2.5%, y, en cuanto al tamaño del fruto, este tenía un diámetro mayor comparado a un testigo sin el inóculo microbiano, los resultados sugieren que el aislamiento de microorganismos en especies vegetales puede representar en una ventaja en la biorrecuperación de suelos (14).

Bravo et al. (2018), investigaron bacterias del suelo tolerantes al cadmio en cultivos de cacao del noroeste de Colombia, tomaron las concentraciones de cadmio en Boyacá, Santander y Arauca ($3 \cdot 74$, $2 \cdot 76$ y $1 \cdot 16$ mg kg⁻¹) respectivamente, reportando que entre las 129 bacterias tolerantes al cadmio

cultivables, *Enterobacter* sp. inmovilizó más cadmio con una tasa de inmovilización de $0 \cdot 220 \text{ mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (15).

Urrutia (2019), describió la tolerancia que tiene el hongo *Pleurotus ostreatus*, comúnmente denominado “hongo ostra” al plomo. Aisló en medios PDA con diferentes concentraciones de plomo inoculadas desde 50, 150, 250, 350, 450 hasta 550 ppm, siendo este microorganismo tolerante a una concentración de 400 ppm a nueve días de su aislamiento. No se encontró una diferencia significativa en la velocidad de crecimiento de la cepa control con las contaminadas con Pb, lo que sugiere al final de su estudio, el potencial biorremediador de este hongo en suelos frente a la presencia de plomo. (16).

Guartatanga, et al. (2019), mencionaron dos métodos de biorremediación que utilizaron en su investigación para la reducción de metales pesados (cobre y plomo), la bioacumulación y bioestimulación, en donde influye el tipo de suelo y los microorganismos nativos. La reducción de plomo en 81 días fue de aproximadamente 245 - 300 mg/kg y para el cobre de 134 - 200 mg/kg, destacándose la actividad de *Rhizopus* sp. como microorganismo reductor mediante la adición de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio en proporciones de 10-30-10 (17).

Rosas-Patiño et al. (2019), reportaron en su estudio, que en la Amazonía, región originaria del cacao (*Theobroma cacao* L.), la contaminación por aluminio disminuye la calidad del suelo por la acidez que este produce, afectando directamente los cultivos de cacao, pues este se encuentra de forma natural en los suelos de esta zona geográfica y provoca una disminución en la fertilidad del suelo. Como consecuencia lleva a la baja producción de cacao en el sector. Adicionalmente, establecen que el aluminio afecta la retención de nutrientes por

parte de las plantas, específicamente con elementos como nitrógeno (N), potasio (k) y fósforo (P) principalmente (18).

Nieves et al. (2019), en su estudio realizado en zonas de San Vicente de Chucurí y el Carmen (Departamento de Santander-Colombia), y de suelos mineros de la región de California (Departamento de Santander- Colombia), aislaron microorganismos que pueden reducir potencialmente las concentraciones de cadmio, entre estos aislamientos, se encontraron *Penicillium* sp. (88,93 % de una concentración de cadmio de 72,21 ppm), *Trichoderma* (96,06 % de una concentración de cadmio de 78,0 ppm) y *Aspergillus* (98,63 % de una concentración de cadmio de 80,09 ppm), Una de las ventajas de estos géneros es su accesibilidad pues se encuentran en el ambiente, lo cual hace fácil su mantenimiento pues no son tan exigentes nutricionalmente y comparándose con otras técnicas de biorremediación los costos son más bajos (2).

Villalobos-Rodas (2019), encontraron que la especie *Glomus* sp. tiene la capacidad de solubilizar el fósforo presente en suelo, facilitando su transporte a plantas de *Theobroma Cacao* L. Según se describe en este estudio, la colonización de este hongo en las raíces de cultivos de cacao fue de un 100 %, situación que evita la acumulación de fósforo en el suelo por fertilizantes sintéticos (19).

Sandoval-Pineda et al. (2020), presentaron en su estudio, cómo altas concentraciones de cadmio en suelos pertenecientes a cultivos de cacao disminuyen la biodiversidad de microorganismos, la riqueza de nutrientes, entre otros factores, resaltando que el estrés generado en el ambiente afectaba a hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA), partícipes en la simbiosis con plantas de cacao. Sin embargo, se encontraron especies de hongos

tolerantes al estrés generado por el contaminante, entre ellos *Rhizoglofus* sp. y *Claroideoglofus etunicatum*, lo cual es prometedor para los cultivos de cacao, pues permitirían la transformación de este contaminante y a su vez ayudarían a la tolerancia de la planta al cadmio (4).

Hernandez-Angel et al. (2020), realizó una identificación de microorganismos originarios de suelos del departamento de Antioquia para evaluar su capacidad biorremediadora frente a los clorpirifos, agroquímicos usados para el control de plagas y enfermedades agrícolas. Los coliformes y *Pseudomonas*, demostraron degradar efectivamente los clorpirifos mediante técnicas de bioestimulación y bioaumentación, siendo estas dos últimas técnicas las óptimas para emplear en zonas frías (20).

Camacho et al. (2020), describieron en su experimento, cómo microorganismos autóctonos pueden ser utilizados como biofertilizantes en cultivos, aumentando la biodiversidad del suelo y mejorando el aprovechamiento de nutrientes, pues en su estudio, los suelos inoculados con estos macroorganismos presentaron un crecimiento considerable en el cultivo sembrado, con aumento en el número de hojas y el largor del tallo, durante un intervalo de 14 días postinóculo. Adicionalmente, que para hacer un correcto aislamiento de especies nativas se debe tener en cuenta aquellas áreas con abundante materia orgánica y variedad vegetal (21).

Segovia et al. (2020), desarrollaron un análisis del uso de Biol (abono orgánico líquido) en suelos agrícolas, donde comparaban sus efectos fertilizantes junto con los de fertilizantes químicos, las características de este abono es la descomposición bacteriana de residuos orgánicos, transformándolos a nutrientes solubles para las plantas, esto ayuda a estimular su crecimiento, además de

conferir protección frente a enfermedades y plagas, también colabora en procesos de nitrificación del suelo. El resultado de su aplicación en pastizales naturales demuestra que comparado con fertilizantes químicos este producto aumenta 50% el volumen y calidad de la planta (22).

Cota-Álvarez (2021), describe en su investigación la gran capacidad de degradar compuestos organofosforados en suelos por un consorcio de microorganismos conformado por *Brevibacterium frigoritolerans*, *Bacillus aerophilus* y *Pseudomonas fulva*, alcanzando a degradar en un 97.65 y 98.3% a una concentración de 100, 200 y 300 mg/kg de este contaminante, no solo mediante una actividad sinérgica entre estos mismos microorganismos, sino formando una relación simbiótica con la flora microbiana nativa del aquel suelo (23).

Acosta et al (2021), describieron que los géneros *Paracoccus* sp. y *Burkholderia* sp, eran potencialmente seleccionables para la recuperación de suelos tratados con azufre, cuya consecuencia era la salinidad de los suelos y la erosión de los mismos, por lo que pusieron a prueba la actividad metabólica de microorganismos aislados de aquellos suelos, identificando estos dos géneros partícipes de la oxidación del azufre. Aunque la ruta metabólica por la cual hacen este proceso aún no está muy bien definida, parecen ser microorganismos prometedores para tratamientos futuros en suelos con esta problemática (24).

Senol et al. (2021), mediante la biosorción demostraron la capacidad reductora de iones de plomo, por el uso de biomasa fúngica o “micorsorción” de hongos del género *Rhizopus* sp., pues a temperaturas de 25 °C con un pH de 4.0 presentan resultados prometedores en la reducción de este metal. (25).

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Cultivo de cacao en Colombia

Tabla 1. Taxonomía de *Theobroma Cacao L.* (26)

Familia	<i>Malvaceae</i>
Subfamilia	<i>Sterculioideae</i>
Especies (Más de 22 especies)	Representativas: <i>Theobroma grandiflorum</i> <i>Theobroma cacao L.</i> : <i>T. Cacao ssp. cacao</i> <i>T. Cacao ssp. sphaerocarpum</i> <i>Theobroma bicolor</i>

4.1.1. Morfología de *Theobroma cacao L.*

Planta: Árbol de 12- 20m de altura, para cultivos se mantiene entre los 4-8 m.

Flores: Pentámeras, hermafroditas, actinomorfas con 10-20 mm de diámetro.

Fruto: Baya grande de 10 - 20 cm de largo, de colores púrpura o amarillo.

Semillas: Café-rojizas, ovaladas, miden 20-30 mm de largo, 12-16 mm de ancho (27).



Figura 1. Flor, fruto y semilla de *Theobroma cacao L.* (27).

4.1.2. Producción de *Theobroma cacao L*

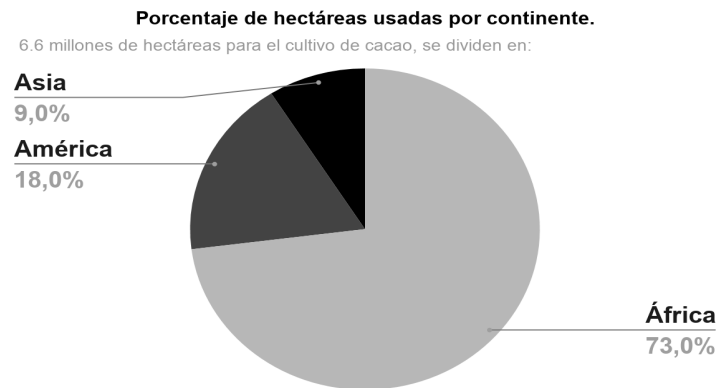


Figura 2. Hectáreas destinadas para el cultivo de *Theobroma cacao L.* a nivel mundial (26).

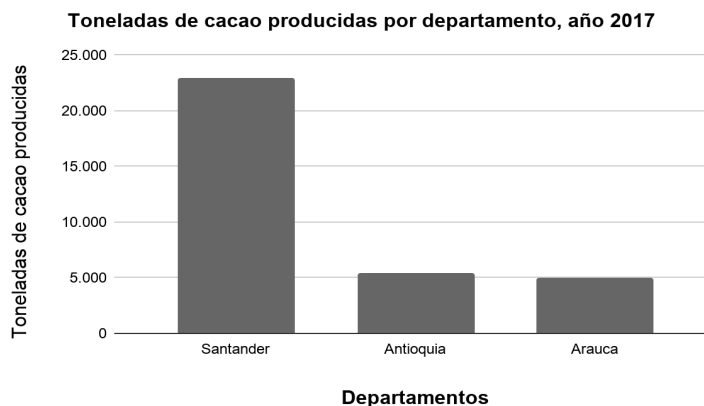


Figura 3. Producción de cacao por departamento a nivel nacional (26).

4.2. Biorrecuperación con microorganismos

4.2.1. Tipos de biorremediación

- **Biosorción:** Mediante las atracciones electrostáticas, los microorganismos pueden atraer elementos de forma pasiva gracias a sus componentes celulares. Los hongos y las bacterias están conformados de cargas negativas por la

composición de sus paredes celulares, ya que estas tienen grupos carboxilos, fosforilos y amino, lo cual permite la biosorción de compuestos con cargas positivas, facilitando su acceso a la célula y participando de su metabolismo (28)(29)(30).

- **Bioacumulación:** Este proceso es dado por microorganismos capaces de añadir en su interior sustancias que están en el medio sin volver a expulsarlas, ya sea, por medio de su respiración y/o alimentación, logrando alcanzar altas concentraciones de una sustancia a nivel intracelular a comparación del medio en donde se encontraban (31)(32).
- **Biotransformación:** Es el proceso en el que intervienen microorganismos con su metabolismo, tomando sustancias xenobióticas e incorporándolas en sus ciclos vitales, lo cual genera un producto de desecho en una forma diferente a la inicial (33)(34).
- **Biolixiviación:** La movilización de protones acidifica el medio ya sea por la competencia de protón y metal, lo cual produce un complejo metal-anión, que a su vez genera la liberación de cationes del metal. Por otra parte, la liberación de ácidos orgánicos y sideróforos como resultado del metabolismo heterotrófico, puede ocasionar la lixiviación de un metal. Entre las bacterias más descritas se encuentran; *Thiobacillus thiooxidans*, *T. ferrooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans* (35)(36)(37).

Otros métodos mencionados por la literatura son la bioestimulación y bioaumentación, lo cuales promueven la degradación y aumento de biomasa por parte de los microorganismos mediante la provisión de nutrientes y la conformación de consorcios microbianos (38).

4.2.2. Microorganismos biorremediadores de metales pesados en cultivos de cacao.

Según describe la literatura el principal contaminante en los cultivos de *Theobroma Cacao L.* es el cadmio (Cd) (39), seguido del plomo (40) , los cuales son metales pesados, que en ciertas concentraciones pueden ser peligrosos para el ser humano, por tanto algunas entidades internacionales como la Unión Europea, establecieron unos valores permisibles de cadmio en productos derivados del cacao (39). También se ha descrito que el uso de fertilizantes fosforados aumenta la captación de estos metales pesados por parte del suelo, facilitando su transporte hacia las semillas de los cultivos (41)(42).

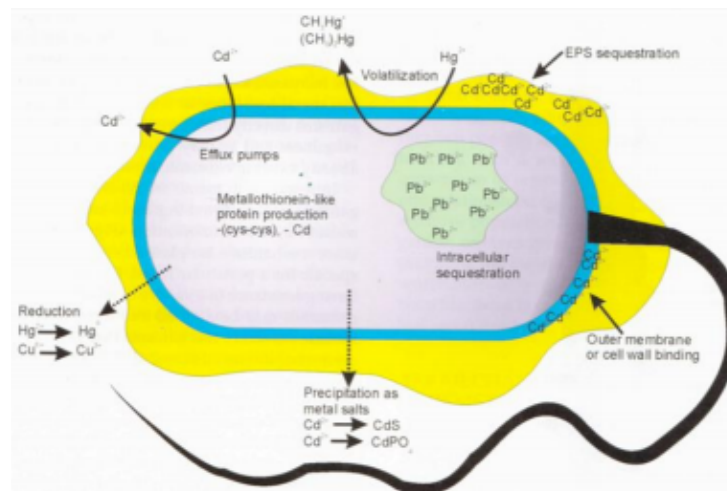


Figura 4. Presentación de los procesos bioprecipitación y biovolatilización en bacterias (43).

- **Cadmio y plomo:** Son metales pesados que se pueden encontrar naturalmente en el ambiente, también por actividades mineras, son reconocidos por sus diversos efectos sobre la salud humana entre estos alteraciones en el metabolismo del calcio, problemas a nivel renal, fallas endocrinas, tumores respiratorios, entre otros, el problema con estos metales es su fácil absorción por las plantas, sobre todo por aquellas de género *Theobroma Cacao L.* lo cual convierte al cadmio y plomo como potenciales contaminantes que pueden poner

en riesgo la salud humana (44)(45)(46)

➤ **Reducción de Cadmio en cultivos de *Theobroma Cacao* L.**

Para el cadmio (Cd) se han descrito microorganismos que pueden asimilar mejor este metal a diferencia de otros, dentro de los cuales están: *Trichoderma viride*, *Cunninghamella echinulata*, *Vibrio harveyi*, *Rhodobium marinum*, *Rhodobacter sphaeroides*, *Fusarium oxysporum*, *Enterobacter cloacae*, *Rhizopus stolonifer*, *Staphylococcus* y *Pseudomonas aeruginosa* (44). En la literatura se han descrito un sin fin de microorganismos que hacen parte de la biorremediación de metales pesados, pero se debe tener en cuenta que para cada metal pesado hay microorganismos afines, con una capacidad única de asimilar en su metabolismo un metal en específico (47)(48). Los géneros *Aspergillus* y *Trichoderma*, también han sido de especial interés para la biosorción de cadmio debido a su alta capacidad de captación, donde especies nativas pueden llegar retener este metal en su biomasa (49).

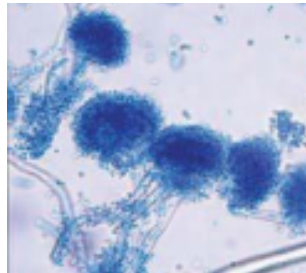


Figura 5. *Aspergillus* sp. (50)

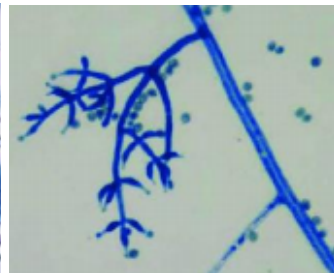


Figura 6. *Trichoderma* sp. (51)

➤ **Microorganismos reductores de Cadmio en suelos.**

Hongos:

Los hongos formadores de micorrizas arbusculares (**HFMA**) presentan relaciones simbióticas con gran variedad vegetal, por lo cual en cultivos de cacao pueden conferir protección frente la acumulación de cadmio en zonas altas de la planta, previniendo la translocación de este metal pesado en áreas como las hojas o el

fruto. Uno de los mecanismos que utilizan los HFMA es la producción de una glicoproteína denominada glomalina, esta facilita la formación de enlaces con moléculas de alta toxicidad permitiendo su acumulación por parte del HFMA, de esta forma la disponibilidad de cadmio en suelo será menor para la planta, otro mecanismo que poseen los hongos micorrízicos es a nivel de transportadores de metales de la raíz, disminuyendo la expresión de estos. Las especies de HFMA como son *Glomus macrocarpum*, *Rhizoglomus intraradices*, *Glomus intraradices* y *Glomus mosseae* están involucradas en la captación de sustancias xenobióticas, de forma que, por la extensión micelar que poseen pueden alcanzar una mayor cobertura de suelo lo que constituye un aumento en la absorción de metales pesados (52)(53).



Figura 7. *Glomus macrocarpum* (53) **Figura 8.** *Glomus intraradices* (19)

Rhizopus sp. al igual que las dos anteriores especies fúngicas mencionadas, puede reducir al menos 1 % de concentración de cadmio total presente en un suelo, ya que produce la misma glicoproteína (glomalina), que asociada a sus características morfológicas, desde arbuscúlos e hifas con la producción de vesículas, puede ser un potencial inmovilizador de este metal, una de sus ventajas es su poca exigencia nutricional, esto permite que este hongo crezca en cualquier hábitat y sea fácilmente reproducible, tolerando ambientes tóxicos con altas concentraciones de cadmio, hierro, plomo, arsénico y cobre (54).

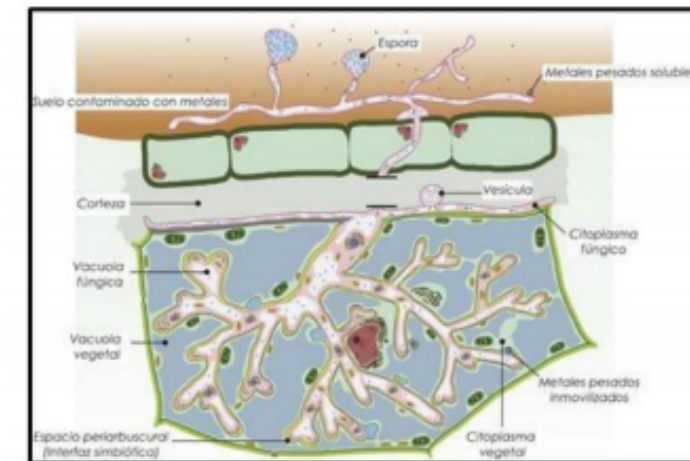


Figura 9. Almacenamiento de metales pesados por HMA (54).

Como respuesta al medio que los rodea los hongos han desarrollado con el tiempo una respuesta adaptativa a nivel genético y/o fisiológico para crecer en ambientes hostiles, en este caso medios donde la presencia de metales pesados afecte o altere su crecimiento, los hongos respondieron con el desarrollo de compuestos en su envoltura hifal con polisacáridos (B1-3 y B1-6 glucanos), estructura que permite atraer los iones metálicos y retenerlos, lo cual ha contribuido en procesos de biorremediación con hongos. Por otra parte, la pared celular fúngica ofrece diversos sitios activos para quelar iones metálicos como la quitina y el quitosano (**Figura 10**) (55). Se encontró que especies fúngicas como *Aspergillus terreus*, *Aspergillus flavus*, *Cladosporium cladosporioides*, *Fusarium oxysporum*, *Gliocladium roseum*, *Mucor rouxii*, *Helminthosporium* sp. y *Apophysomyces* sp., poseen la capacidad de eliminar el cadmio (Cd); Se deben tener en cuenta varios factores, no solo los nutricionales sino otros como la temperatura, la humedad y el pH, este último tomando más relevancia pues se ha encontrado que dependiendo del pH en que se encuentre el hongo asimismo será su capacidad para poder quelar el ión metálico del contaminante de interés, ya que un cambio en los hidrogeniones puede alterar los enlaces moleculares de la pared celular y así mismo estimular o disminuir su unión a estos iones. (56).

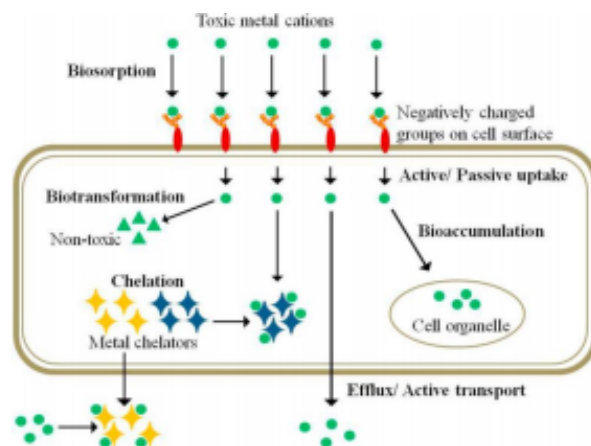


Figura 10. Tolerancia de metales pesados a nivel celular por hongos (57).

Rhizophagus irregularis es un hongo formador de micorrizas arbusculares (HFMA), y puesto en contacto en plantas de *Theobroma cacao* L. en condiciones de invernadero, es capaz de remover cadmio a nivel de suelo, al igual que otros HFMA disminuye la adsorción del metal por parte de la planta (58).

Rhodobacter sphaeroides, en cuanto a la biorremediación en suelos con Cd, participa de su inmovilización mediante procesos como adsorción, precipitación y transformando este metal pesado cuando está en concentraciones considerables en suelos (59).

Bacterias:

Streptomyces sp. a una concentración de cadmio de 100 ppm en suelo *Streptomyces* sp. puede evitar la absorción de este por la planta *Theobroma cacao* L en un 39,67% (60). En el caso de *Bacillus cereus* la participación de los grupos amino e hidroxilo ubicados en su pared celular son los que entran en la biosorción de Cd, aunque todavía no hay estudios concluyentes sobre el mecanismo de resistencia de esta bacteria ante el cadmio (61)(62). *Burkholderia ambifaria* produce fosfatasa ácida y participa en la formación de hidroxiapatita, lo

cual contribuye en la capacidad de la bacteria para eliminar cadmio en mayor cantidad, esto es importante ya que, muchas bacterias reductoras de Cd llegan a un punto donde el nivel de toxicidad del metal no les permite seguir su actividad, estas bacterias a cambio, pueden participar en la degradación de cadmio en altas concentraciones por su gran tolerancia al metal y así biorremediar cultivos con suelos contaminados por cadmio (63). Las bacterias Grampositivas están compuestas en su pared celular por peptidoglicano que facilita la remoción de cadmio, ya que ésta es muy gruesa, que asociado a grupos funcionales tales como el carboxilo, ácidos teicoicos y teicurónicos ricos en grupos fosfatos, confieren carga negativa a la célula, para que a nivel extracelular pueda unirse a los iones metálicos, también están otros sitios activos como los grupos amino, sulfuro e hidroxilo que permiten la unión de metales como el cadmio a la célula (64). Las siguientes especies bacterianas como *Pseudomonas aeruginosa* y *Streptomyces sp.* como unas de las más eficientes en la eliminación de cadmio en procesos de biosorción y biacumulación, Las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR) también juegan un rol importante en la biorremediación de Cd, pues además de retener el metal, producen aminociclopropano-1-carboxilato desaminasa sustancia que alivia el estrés de la planta por la presencia de contaminantes mejorando su aprovechamiento de recursos (65) (66).

4.2.3. Microorganismos biorrecuperadores de suelos con agroquímicos aplicables a cultivos de *Theobroma Cacao L.*

En suelos poco fértiles del departamento de Santander, son mayores las demandas nutricionales del suelo para obtener el desarrollo esperado de los cultivos de cacao, para suplir esta necesidad se usan fertilizantes químicos, muchos de estos son agregados al suelo sin tener en cuenta la dosificación adecuada. Para evitar la acumulación de estos componentes que pueden

contaminar y posteriormente generar un daño en el suelo, se ha descrito en la literatura el uso de microorganismos como las bacterias diazótroficas, capaces de fijar el nitrógeno, volviéndolo soluble para las plantas y disminuyendo la concentración de fertilizantes químicos a base de nitrógeno en el suelo (67). Estas bacterias facilitan el aprovechamiento de este macronutriente (N), gracias a la formación de humus, lo cual permite la concentración de la humedad y se disminuye la pérdida de nutrientes como; Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg), entre las bacterias encontradas en los suelos de cultivos de *Theobroma Cacao L.* en los departamentos de Santander y Santander del norte, están los géneros *Azospirillum sp.* y *Burkholderia sp.* las cuales abundan en la zona rizósfera. y los géneros *Herbaspirillum sp.* y *Gluconacetobacter sp.* pero en menor medida ya que son microorganismos endófitos (68)(69)(70).

➤ **Degradación de compuestos organofosforados**

Los plaguicidas inhibidores de colinesterasa son los más utilizados en Colombia para el control de plagas en diversos cultivos, dentro de los cuales entran los organofosforados y carbamatos (71). Los organofosforados más comunes en la biodegradación microbiana son los clorpirifos, malatión, fenamifos, diazinón, diclorvos, paratión, metil paratión, etoprofos, dimetoato, fosfato de tributilo, fenitrotión, profenofos, forato, metamidofos, triazofos, cadusafos y tetraclorvinfos, en el caso de los **clorpirifos** se encuentra una gran variedad de microorganismos capaces de transformar este compuesto, dentro de estos están; *Bacillus pumilus*, *Streptomyces sp.*, *Serratia marcescens*, *Alcaligenes sp.*, *Penicillium sp.* y *Pseudomonas putida*. Dentro de estas especies mencionadas algunas poseen la capacidad de degradar altas concentraciones de clorpirifos como el caso de *B. pumilus*, que según un estudio degradó 900 mg/L de este compuesto en 14 días, también *Streptomyces chattanoogensis* posee una alta capacidad de biodegradar al menos 50 mg/L en 24 horas (72)(73).

Tabla 2. Microorganismos mencionados como alternativas para biodegradar compuestos organofosforados.

Microorganismos biorremediadores de compuestos organofosforados	
Bacterias	Hongos
<ul style="list-style-type: none"> - <i>Lactobacillus sp.</i> - <i>L. bulgaricus</i> - <i>L. paracasei</i> - <i>L. plantarum</i> - <i>Serratia liquefaciens</i> - <i>Serratia plymuthica</i> - <i>Pseudomonas putida</i> - <i>Pseudomonas radiora.</i> - <i>Pseudomonas aeruginosa</i> - <i>Streptomyces sp</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Hypholoma fasciculare</i> - <i>Coriolus versicolor</i> - <i>Penicillium sp.</i> - <i>Trichoderma sp.</i> - <i>Aspergillus terreus</i> - <i>Verticillium sp.</i>

En la degradación de los compuestos organofosforados se ha identificado una enzima en común en todos los microorganismos que participan en su biodegradación, la cual es la fosfatasa alcalina, esta es una fosfomonoesterasa que hidroliza los enlaces O-P, eliminando así grupos fosfato, liberando el fósforo (P) como fuente y etanol como fuente de carbono, lo cual hace que la bioquímica de degradación de los organofosforados resulte un tanto idéntica entre microorganismos que poseen dicha enzima, pues el primer paso de degradación consiste en la hidrólisis de triésteres de ácido fosfórico, sin embargo se ha descrito que para la degradación del malatión los microorganismos utilizan la enzima carboxilesterasa, que hidroliza ésteres carboxílicos (72)(74).

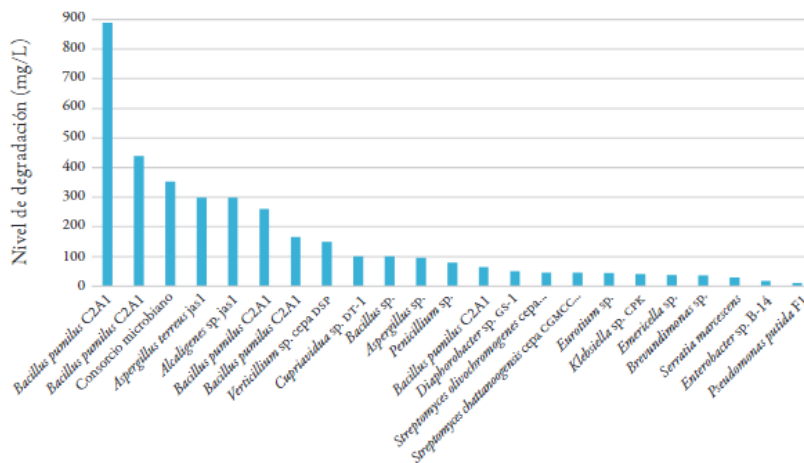


Figura 11. Degradación de organofosforados por diversos microorganismos (72).

En cuanto al paratión, *Serratia marcescens* demostró ser una alternativa para biorremediar este compuesto, en diferentes tipo de suelo en especial el tipo arenoso, para la hidrólisis de este compuesto entra la enzima fosfotriesterasa la cual forma p-nitrofenol, siendo esta última la primera vía de las tres que se han descrito para la degradación del paratión, la segunda es la reducción del grupo nitro en condiciones de poco oxígeno, para luego hidrolizar y así producir p aminofenol, y la tercera mediante la conversión del paratión antes de ser hidrolizado su enlace fosfotriéster (72)(75).

➤ Degradación de compuestos organoclorados

Los agroquímicos de origen organoclorado son compuestos químicos orgánicos que están constituidos por átomos de hidrógeno (H) que en su mayoría se sustituyen por átomos de cloro (Cl), estos se encuentran en el ambiente por el uso de productos derivados de estos para el control de plagas (76). Los pesticidas organoclorados afectan la microbiota natural de los suelos, por lo que inhiben el crecimiento microbiano, esto resulta problemático a la hora de biorremediar, de igual forma estos medios hostiles han estimulado el desarrollo de resistencia

microbiana, pues para su adaptación, los microorganismos en esta clase de ambientes secretan enzimas que les permitan asimilar estos compuestos, haciéndolos parte de su metabolismo o disminuyendo su efecto tóxico (77)(78)(79). La estabilidad en el ambiente, la lenta degradación y acumulación en los tejidos grasos han hecho que los pesticidas organoclorados sean clasificados como Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP).

La acción microbiana que se aplica sobre los clorofenoles hace que estos sean hidroxilados, metoxilados o polimerizados. La mineralización es utilizada por bacterias para la degradación de los clorofenoles, este proceso puede ser aerobio o por otra vía denominada la halogenación reductiva, el problema de esta vía es que no completa la mineralización de los clorofenoles lo cual puede ser contraproducente en la biorremediación de estos compuestos, pues pueden transformarse en productos más tóxicos o que se acumulan en el ambiente (80). Las bacterias Gram-negativas poseen mayor tolerancia al pentaclorofenol (PCF) a comparación con las Gram-positivas, tal es el caso de las especies *Shinogobium sp.* y *Novoshingomonas sp.* por lo que les confiere mayor capacidad de biodegradación. Las bacterias Gram-negativas pueden además participar en la degradación de bifenilos policlorados (BPC) como se describe en la **tabla 3**. Por otra parte, los géneros *Pseudomonas sp.* y *Sphingomonas sp.* pueden degradar el PCF por la vía aeróbica, además las bacterias Gram negativas en común pueden degradar PCF y otros fenoles con bastantes átomos de cloro, mediante la declorinación oxigenolítica produciendo tetracloro-p-hidroxi benzoquinona, gracias a la enzima PCP-monooxigenasa. La bacteria *Delftia acidovorans* secreta la enzima oxigenasa la cual le es útil para la degradación de compuestos halogenados y herbicidas del grupo n-clorofenoxi-propiónico, en cuanto a las bacterias Gram-positivas, *Mycobacterium chlorophenicum*, *M. fortuitum* y *Streptomyces rochei* degradan las hidroquinonas, mediante la oxidación de mono

o diclorofenoles a clorocatecoles (80) (81).

En general los basidiomicetos secretan enzimas ligninolíticas, como lignina peroxidasa (LiP) (Actúa extrayendo electrones sencillos de anillos aromáticos de lignina, liberando un radical catiónico y provocando así el rompimiento de los anillos), manganeso peroxidasa (MnP), versátil peroxidasa, glioxal oxidasa, ariloxidasa y lacasa, estas oxidasas participan en la degradación de compuestos organoclorados según describen diferentes estudios (82). *Inonotus dryophilus*, *Perenniporia medulla-panis*, *Trametes versicolor*, *Phellinus badius*, *Ganoderma oregonens*, *Pleurotus ostreatus* y *Lentinula edodes* son otros basidiomicetos capaces de degradar PCP. Además de los basidiomicetes, otros hongos también se han planteado para la degradación de PCP, una de las ventajas de estos hongos descritos, es que crecen más rápido, lo que puede ser un ahorro en cuanto a costos, entre estos están; los zigomycetos (*Rhizopus sp.* y *Mucor sp.* presentan actividad fenoloxidasa), los ascomycetos, y los mucorales (80).

Tabla 3. Participación de bacterias Gram-negativas en la degradación de BPCs (Bifenilos policlorados).

Gram negativas, aerobias estrictas	Enzima que producen	Compuesto organoclorado o degradado	Producto de degradación	Consortios microbianos	Resultado final
<i>Pseudomonas sp.</i> <i>Vibrio sp.</i> <i>Aeromonas sp.</i> <i>Micrococcus sp.</i> <i>Acinetobacter sp.</i> <i>Bacillus sp.</i> <i>Streptomyces sp.</i>	2,3-dioxigenasa	Bifenilos mono-, di-, tri y tetraclorados	clorobenzoato	Degradan el clorobenzoato	Dióxido de carbono (CO ₂)

➤ Degradación de compuestos carbamatos

Los plaguicidas N-metilcarbamatos, son bastante usados para el control de insectos, ácaros, nemátodos, hongos y malezas en diferentes cultivos. Son

compuestos orgánicos provenientes del ácido carbámico, su modo de acción es mediante la inhibición de acetilcolinesterasa, lo cual induce parálisis y producción de espasmos en insectos y mamíferos. Entre las bacterias Gram-negativas capaces de degradar los N-metilcarbamatos están: *Rhizobium sp.*, *Sphingomonas sp.*, *Novosphingobium sp.*, *Paracoccus sp.*, *Sphingobium sp.*, *Pseudomonas sp.* y *Burkholderia sp.*. Por otra parte, *Mucor ramanianus* y *Aspergillus niger* son hongos que pueden transformar estos compuestos orgánicos junto con algunas levaduras, como *Pichia anomala* que hace del carbofuran su única fuente de carbono y/o nitrógeno (83).

Existen dos vías descritas para la degradación de N-metilcarbamatos en bacterias, una vía oxidativa y otra hidrolítica, siendo mejor esta última, ya que la primera vía produce compuestos más tóxicos que el compuesto original. En la hidrólisis del enlace carbamato, comienza con el rompimiento del enlace éster o el enlace amida, la ruptura de ambos enlaces produce el mismo componente, este es carbofuran 7-fenol, el cual es menos tóxico que el carbofuran y metilamina, sirviendo como fuente de carbono y nitrógeno para bacterias que hidrolizan carbofuran en suelos tratados anteriormente (84)(85).

Sphingomonas sp. es capaz de degradar el anillo aromático del carbofuran, el carbaril, gentisato, ácido protocatecuico y metilamina como única fuente de carbono y de energía (86).

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. Universo, población, muestra

Universo: Revisión bibliográfica de microorganismos con capacidad biorecuperadora en cultivos de cacao.

Población: Fuentes documentales relacionadas sobre los cultivos de cacao en Colombia y el uso de microorganismos biorecuperadores

Muestra: Fuentes documentales relacionadas sobre los microorganismos biorecuperadores y sus principales características para biorrecuperar cultivos de cacao en Colombia.

5.2. Tipo de investigación, variables

Tipo de investigación: Cualitativa de tipo documental

Variables: No aplica

5.3. Técnicas y procedimientos.

5.3.1. Revisión de la información existente.

Se tuvo en cuenta para la resolución del problema la documentación existente sobre microorganismos biorecuperadores descritos previamente, principalmente aquellos que han sido descritos en conjunto con los cultivos de cacao en Colombia, para ello se tuvieron presentes publicaciones de investigaciones, artículos científicos, páginas web (Internet), libros, actas informativas y bases de datos, que proporcionen información sobre el tema.

5.3.2. Selección del material bibliográfico de acuerdo a la temática a tratar.

Se consideró principalmente documentación referente al suelo donde se realizan cultivos de cacao con sus principales características y problemáticas en Colombia para seguir después con la información descrita sobre microorganismos biorecuperadores de suelos con cultivos de cacao, sus principales acciones y características.

5.3.3. Estructuración coherente del documento

En este punto, se organizó de manera descriptiva durante el desarrollo del documento los siguientes temas como las propiedades del suelo y las características del cultivo de cacao, los microorganismos biorecuperadores descritos en la literatura e información sobre biorrecuperación en cultivos de cacao en Colombia.

6. RESULTADOS

FASE 1. Búsqueda y revisión de la información

Se revisaron 86 documentos, en diferentes bases de datos como Springer, Scopus, Science direct, proquest, Pubmed, SciELO, google académico, los repositorios institucionales de diversas universidades nacionales e internacionales y páginas web, obteniendo información de artículos de revistas científicas, libros, manuales de agricultura, actas, simposios y tesis.

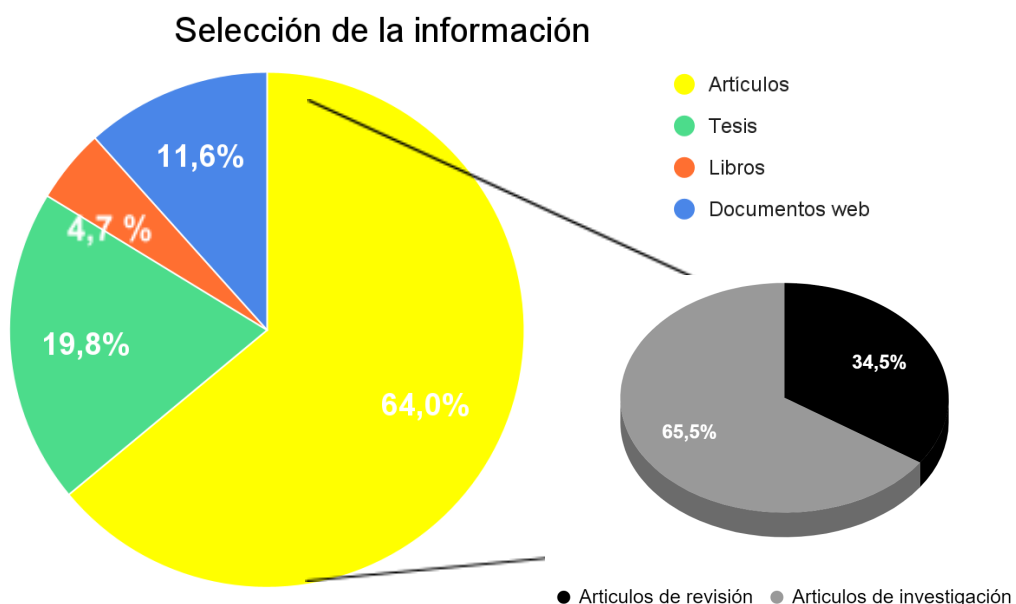


Figura 12. Selección de la información para el desarrollo del documento

FASE 2. Selección del material bibliográfico.

En esta fase se seleccionaron principalmente documentos sobre temas relacionados con el cultivo de cacao en Colombia y se consultaron otros temas que se podrían aplicar para la biorrecuperación de suelos de estos cultivos, como tipos de biorremediación y los diversos microorganismos biotransformadores de contaminantes problema en la producción de *Theobroma cacao* L.

Hallazgos de Resultados:

En los temas revisados durante la recopilación de información, tuvo mayor relevancia la búsqueda de microorganismos reductores de metales pesados (38,8%), dentro de los cuales se encontró mayor documentación de los hongos reductores de metales pesados (52,4%) como *Trichoderma viride*, *Aspergillus sp.*, *Fusarium sp.*, *Rhodobacter sphaeroides* y *Penicillium chrysogenum*. Otro tema relevante fueron los microorganismos biorrecuperadores de agroquímicos (24,7%) como *Bacillus pumilus*, *Streptomyces sp.*, *Serratia Marcescens*, *Penicillium sp.*, *Pseudomonas putida*, *Shinogobium sp.*, *Novoshingomonas sp.* y *Sphingomonas sp.*, seguido de los principales contaminantes de suelos en cultivos de cacao (21,2%). Por otra parte, el tema de menor importancia fue el de cultivos de cacao en Colombia con un 2,4% de documentación mencionada.

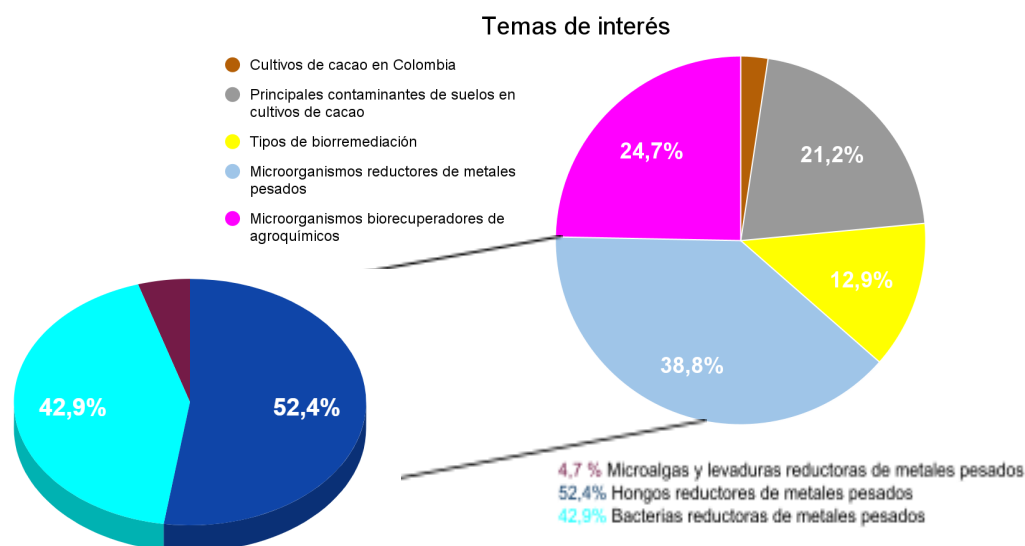


Figura 13. Principales temáticas para tratar en la revisión documental

FASE 3. Organización lógica del documento

En la siguiente tabla se presenta en orden cronológico y por tema de interés, los documentos seleccionados.

Tabla 4. Material de documento seleccionado.

TEMA: Cultivos de cacao en Colombia

TÍTULO	AUTORES	AÑO
Hoja botánica: Cacao	Dostert Nicolas Roque José Cano Asunción La Torre María Weigend Maximilian	2012
Guía ambiental para el cultivo del cacao. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Federación Nacional de Cacaoteros, Fondo Nacional del Cacao	Rojas Fernando Sacristán Javier.	2013

TEMA: Principales contaminantes de suelos en cultivos de cacao

TÍTULO	AUTORES	AÑO
Abonos orgánicos y fertilizantes químicos... ¿Son compatibles con la agricultura?	Cubero Diógenes Vieira Marcos	1999
Impacto de los biofertilizantes en la agricultura	Grageda Oscar Díaz Arturo Peña Juan Vera José	2012
Presencia de metales pesados en cultivos de cacao orgánico	Huauya Miguel Mansilla Luis Florida Nelino Neira Gilmer	2012

Evaluación del potencial biofertilizante de bacterias diazótrofias aisladas de suelos con cultivo de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.)	Argüello Adriana Moreno Laura	2014
Reconocimiento de la problemática del uso de plaguicidas en comunidades agrícolas de la región del Sumapaz.	Avila María Cifuentes Alejandro Sánchez Clara	2016
Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión.	Beltrán Mayra Gómez Alida	2016
Cuantificación de bacterias diazotrofas aisladas de suelos cacaoteros (<i>Theobroma cacao</i> L.), por la técnica de Número Más Probable (NMP).	Argüello Adriana Madiedo Niccolay Moreno Laura	2016
Optimización de la fertilización orgánica e inorgánica del cacao (<i>Theobroma Cacao</i> L.) con la inclusión de <i>Trichoderma</i> endófito y Micorrizas arbusculares.	Tuesta Ángel Trigozo Erick Cayotopa Jaime Arévalo Enrique Arévalo Cesar Zúñiga Luis Leon Betsabé	2017
Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño	Charrupi Natali Martínez Diana	2017
Fungos simbióticos e endofíticos como biocontroles de fitopatógenos de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.).	Villamizar Raquel Ortiz Oscar Escobar Jhon	2017
Implementación de buenas prácticas agrícolas en cultivos de cacao <i>Theobroma cacao</i> L. como estrategia para prevenir la presencia de cadmio en la cadena cacaotera	Piedrahita Carlos Gallego Juan Tamayo Carlos Herrera José	2018
Heavy metals remediation with potential application in cocoa cultivation.	Castebianco Javier	2018
Efecto encalado en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) en la Amazonia colombiana	Rosas Gelber Puentes Yina Menjivar Juan	2019

Characterization of phosphate solubilizing bacteria isolated from heavy metal contaminated soils and their potential for lead immobilization.	Teng Zedong Shao Wen Zhang Keyao Huo Yaoqiang Li Min	2019
Enhanced Pb immobilization via the combination of biochar and phosphate solubilizing bacteria	Chen Haoming Zhang Jiawen Tang Lingyi Su Mu Tian Da Zhang Lin Li Zhen Hu Shuijin	2019
High cadmium concentration resulted in low arbuscular mycorrhizal fungi community diversity associated to cocoa (<i>Theobroma cacao</i> L.).	Sandoval Jhon Pérez Urley Rodriguez Alia Torres Esperanza	2020
Perspective on Cadmium and Lead in Cocoa and Chocolate.	Abt Eileen Robin Lauren	2020
Análisis molecular de hongos antagonistas aislados de plantaciones de cacao (<i>Theobroma cacao</i>) de Norte de Santander.	López German	2021

TEMA: Tipos de biorremediación

TÍTULO	AUTORES	AÑO
Biotransformación de metales pesados presentes en lodos ribereños de los ríos Bogotá y Tunjuelo	Soto Catherine Gutiérrez Sonia Rey Alexandra González Edwin	2010
Review of remediation techniques for arsenic (As) contamination: A novel approach utilizing bio-organisms	Rahman Shahedur Kim Ki Saha Subbroto Swaraz A. Paul Dipak	2014
Microorganisms role in the bioremediation of contaminated soils with heavy metals.	Covarrubias Sergio García José Peña Juan	2015

Biolixiviación de calcopirita por sulfobacillus acidophilus.	Salinas Andrea	2016
Biosorption of hexavalent chromium by microorganisms.	Vendruscolo Franciello da Rocha Glalber Antoniosi Nelson	2017
Remediation and Management of Polluted Sites	Saha Jayanta Selladurai Rajendiran Coumar Vassanda Dotaniya M. Kundu Samaresh Patra Ashok	2017
Metal biorecovery and bioremediation: Whether or not thermophilic are better than mesophilic microorganisms.	Castro C. Urbieta M. Plaza J. Donati E.	2019
Biorremediación usando el hongo aspergillus niger en el tratamiento de aguas residuales.	Villaveces Carlos	2019
Biolixiviación indicativa del sulfato de cobre por crecimiento microbiano ante el drenaje minero.	Eyzaguirre Paola Castillo Daladier	2019
Mechanisms of biological recovery of rare-earth elements from industrial and electronic wastes: A review	Dev Subhabrata Sachan Ankur Dehghani Fahimeh Ghosh Tathagata Briggs Brandon Aggarwal Srijan	2020
Química.es	https://www.quimica.es/enciclopedia/Bioacumulación.html	2021

TEMA: Microorganismos reductores de metales pesados

TÍTULO	AUTORES	AÑO
Fungal biodiversity: Distribution, conservation and prospecting of fungi from India.	Manoharachary C. Sridhar K. Reena Singh Alok Adholeya Suryanarayanan T. S. Seema Rawat Johri B. N.	2005

Bioremediación de Metales Pesados	Field Jim	2008
Capacidad de captura de cadmio y cinc por bacterias, microalgas y levaduras	Carballo María Martínez A. Salgado I. Maldener I. Álvarez M. Boza A.	2012
Ensayos preliminares in vitro de biosorción de cadmio cepas fúngicas nativas de suelos contaminados.	Guerra Beatriz Sandoval Adriana Manrique Luigi Barrera Sandra	2014
Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión	Beltrán Mayra Gómez Alida	2016
Evaluación de la capacidad de remoción de cadmio in vitro utilizando la microalga chlorella sp. y su potencial para la biorremediación de sitios naturales contaminados	Pachay Vicente	2017
Resistencia a cadmio (Cd) de bacterias endófitas y bacterias rizosféricas aisladas a partir de Oriza sativa en Colombia.	Ayubb Nataly Cerra Armando Chamorro Leonardo Pérez Alexander	2017
Efecto de la inoculación de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) sobre un sistema suelo-planta de cacao en suelos contaminados con cadmio en etapa de vivero	Molina Diana Rodriguez Alia	2017
Efecto de la inoculación de cepas de actinomicetos en la acumulación de cadmio en plantas de Theobroma cacao L.	Revoredo Hurtado Jasmin	Andrea 2017
Microorganismos cultivables asociados a cadmio (Cd) presentes en los suelos cacaoteros de los municipios de Yacopí y Nilo, como estrategia de biorremediación	Cáceres J.	2017
Characterization of Cd-resistant Klebsiella michiganensis MCC3089 and its potential for rice seedling growth promotion under Cd stress.	Mitra Soumik Pramanik Krishnendu Ghosh Pallab Soren Tithi Sarkar Anumita Dey Ramendra Pandey Sanjeev Maiti Tushar Kanti	2018

Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia	Bravo D. Pardo S. Benavides J. Rengifo G. Braissant O. Leon C.	2018
Bioremediation of cadmium and zinc-contaminated soil using <i>Rhodobacter sphaeroides</i> .	Peng Weihua Li Xiaomin Song Jingxiang Jiang Wei Liu Yingying Fan Wenhong	2018
Tolerancia de <i>pleurotus ostreatus</i> a diferentes concentraciones de plomo.	Urrutia Beatriz	2019
Recuperación de suelo contaminado con cobre y plomo mediante métodos biológicos al interior del campamento Guarumales	Guartantang Eduardo Siguencia Klever	2019
Efecto en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) en la Amazonia colombiana	Rosas Gelber Puentes Yina Menjivar Juan	2019
Nota técnica: biorremediación, enemigo del cadmio.	Nieves Yeimy. Parra Norbis. Villanueva Samuel. Henríquez Magaly.	2019
Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) as a strategy to reduce the absorption of cadmium in cocoa (<i>Theobroma cacao</i>) plants.	Pérez Urley Gómez Margarita Serralde Diana Peñaranda Andrea Wilches Wilmar Ramírez Luciano Rengifo Gersain	2019
Efecto de la biofertilización en plántulas de <i>Theobroma Cacao</i> L. Con Micorrizas Arbusculares nativas del Área De Conservación Municipal "Bosque de Huamantanga" De La Provincia de Jaén	Villalobos Selydineiza	2019
Aislamiento e identificación de hongos remedidores de suelos contaminados con Cadmio en el botadero Cancharani de la ciudad de Puno.	Cruz Weliam	2019

Cadmium-resistant rhizobacterium <i>Bacillus cereus</i> M4 promotes the growth and reduces cadmium accumulation in rice (<i>Oryza sativa</i> L.).	Wang Changrong Liu Zhongqi Huang Yongchun Zhang Yeni Wang Xiaohan Hu Zhouyue	2019
High cadmium concentration resulted in low arbuscular mycorrhizal fungi community diversity associated to cocoa (<i>Theobroma cacao</i> L.).	Sandoval Jhon Pérez Urley Rodríguez Alia Torres Esperanza	2020
Heavy metals content in soils and cocoa tissues in Magdalena department Colombia: emphasis in cadmium	Aguirre Sonia Piraneque Nelson Vásquez José Aguirre Sonia Piraneque Nelson Vásquez José	2020
Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de <i>Rhizopus</i> sp. y <i>Rhodobacter sphaeroid</i>	Sánchez Daniel Flores Jean Pierre	2020
Immobilization of cadmium by <i>Burkholderia</i> sp. QY14 through modified microbially induced phosphate precipitation.	Zeng Guoquan Qiao Suyu Wang Xitong Sheng Mingping Wei Mingyang Chen Qun Xu Heng Xu Fei	2020
Optimization the removal of lead ions by fungi: Explanation of the mycosorption mechanism.	Senol Zeynep Gül Ülküye Gurbanov Rafiq Simsek Selcuk	2021
Cadmium stress in paddy fields: Effects of soil conditions and remediation strategies.	Hussain Babar Ashraf Muhammad Shafeeq-ur-Rahman Abbas Aqleem Li Jumei Farooq Muhammad	2021
Atlas de Identificación micológica	Internet : https://atlasdemicologia.wordpress.com/2016/06/22/aspergillus-spp/	2021

Trichoderma spp Ppt	Internet : https://pdfslide.net/documents/trichoderma-spp-ppt.html	2021
Development of prediction models for adsorption properties of chitin and chitosan for micropollutants.	Cho Chul Lim Che Cho Bo Mun Se Choi Jong Zhao Yufeng Kim Sok Yun Yeoung	2021
Metal-Fungus interaction: Review on cellular processes underlying heavy metal detoxification and synthesis of metal nanoparticles.	Priyadarshini Eepsita Priyadarshini Sushree Cousins Brian Pradhan Nilotpala	2021
Brazilian Journal of Biology Assessment of cadmium tolerance and biosorptive potential of Bacillus Cereus GCFSD01 isolated from cadmium contaminated soil.	Muzammil S. Siddique M. Mureed F. Andleeb R. Jabeen F. Waseem M. Zafar S. Rehman H. Ali T. Ashraf A.	2021
Bio-remediation approaches for alleviation of cadmium contamination in natural resources.	Kumar Amit Subrahmanyam Gangavarapu Mondal Raju Cabral-Pinto M. Shabnam Aftab Jigyasu Dharmendra Malyan Sandeep Fagodiya Ram Khan Shakeel Yu Zhi	2021

TEMA: Microorganismos biorrecuperadores de agroquímicos

TÍTULO	AUTOR	AÑO
Actividad de fosfatasas ácida y alcalina en suelo cultivado con plátano en tres sistemas de manejo.	Yoshioka Isabel Prager Marina Bolaños Martha	2006
Microorganismos, enzimas, plásmidos y genes involucrados en la degradación de plaguicidas N metilcarbamatos.	Castellanos José Rache Leidy	2013
Rutas de degradación del plaguicida n-metil carbamato carbaril Routes of degradation of the pesticide carbaryl n methylcarbamate.	Castellanos José López Jaqueline	2015
Aislamiento de bacterias degradadoras de pesticidas organofosforados encontrados en suelos y en leche bovina.	Marín Luis Jaramillo Beatriz	2015
La Biodegradación De Pesticidas Organoclorados En Un Suelo Contaminado Proveniente De Una Antigua Zona Algodonera.	Gómez Martha	2015
Impacto de la biología molecular y las nuevas tecnologías en el conocimiento de la función celular y sus aplicaciones	Fierro Francisco	2016
Selección de Basidiomicetes nativos con capacidad de degradar xenobióticos usando el endosulfán como modelo.	Rivero Anisleidy Niell Silvina Heinzen Horacio Cesio María Cerdeiras María Soubes Matilde	2016
Biodegradación de carbofuran y carbaril por Sphingomonas Sp.	Castellanos José Galvis Jaqueline Carreño Alejandra	2016
Caracterización, identificación y evaluación de microorganismos autóctonos biorremediadores de suelos contaminados por agroquímicos en la provincia de Loja.	Abad Yuri	2017
Effect of mixed edaphic bacterial inoculants in the early development of improved cocoa cultivars (<i>Theobroma cacao</i> L.) in a traditional agroforestry system of Oaxaca, Mexico.	Hipólito E. Carcaño M. Ramos J. Vázquez E. López L. Ricaño J.	2017

Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: Revisión sistemática	Hernández Gina Álvarez Natalia Ríos Leonardo	2017
Buenas prácticas agrícolas como alternativa de producción limpia en el proceso productivo de cítricos y mango en el municipio de Viotá, Cundinamarca.	Gómez Ivonne Vianchá Zulma	2017
Stimulated degradation of soils contaminated with organochlorine pesticides.	Kopytko María Correa Sandra Gómez Martha	2017
Biorremediación de compuestos organofosforados. En:Revisión y panorama nacional de la biorremediación microbiana.	Gómez Fajardo	2018
Identificación de microorganismos biorremediadores de suelos agrícolas del norte de Antioquia para degradación de clorpirifos.	Hernandez Marta Lopez Ena Jaramillo María Posada Anlly	2018
Impact of agrochemicals on soil health. En: Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation.	Mandal Asit Sarkar Binoy Mandal Sanchita Vithanage Meththika Patra Ashok Manna Madhab	2020
Overhauling the assessment of agrochemical-driven interferences with microbial communities for improved global ecosystem integrity.	Wang Mengcen Cernava Tomislav	2020
Diseño de metagenómica funcional de consorcios microbianos tolerantes a glifosato, carbofuran, permetrina y clorpirifos	Cota América	2021
Caracterización de microorganismos oxidantes del azufre y su potencial para la recuperación de suelo sódico con la aplicación de azufre	Tantaleán Lisbeth Milagros Piscoya Mariel Deborah	2021
Ingeniería genética aplicada en biorremediación	Gómez Sofía	2021
Insights into the microbial degradation and biochemical mechanisms of carbamates.	Mishra Sandhya Pang Shimei Zhang Wenping Lin Ziqiu Bhatt Pankaj Chen Shaohua	2021

7. DISCUSIÓN

Los cultivos de cacao en Colombia tienen una gran importancia en el sector económico, ya que hacen parte de los productos de exportación más cotizados a nivel mundial. Teniendo en cuenta la variedad que presenta este fruto, el cacao trinitario es el más apetecido por su sabor y textura, según mencionan Rojas F. y Sacristán E.J., siendo el continente africano su principal productor a nivel mundial, a pesar de ser originario de América, el cual está en segundo lugar y por último Asia. En Colombia, los principales departamentos productores son; Santander, Antioquia y Arauca, seguidos de: Cundinamarca, Nariño, Huila y Boyacá, así indica la Federación Nacional de Cacaoteros (FEDECACAO) (26). Continentes como el europeo han determinado valores de referencia para el control de calidad de este fruto, es de esta forma que Colombia aún presenta falencias en su exportación por departamentos productores que no cumplen con estos requisitos, afirmado por Charrupi N y Martínez D. quienes mencionan al cadmio, como el principal contaminante de los cultivos de cacao junto a Sandoval JF. et al., además refieren la susceptibilidad de las raíces de *Theobroma cacao* L. de transportar iones de Cd hacia las zonas altas de la planta, incluso llegando hasta el fruto y así causando un riesgo para la salud humana. Unas de las razones en la acumulación de cadmio en suelos con cultivos de cacao, es la implementación de agroquímicos que están estrechamente relacionados en el incremento de la concentración de metales pesados de acuerdo a los autores anteriormente mencionados (3)(4). Los agroquímicos como herbicidas, plaguicidas, fertilizantes; fungicidas y bactericidas, pueden presentar un riesgo latente en el medio ambiente, si bien son necesarios para el mantenimiento de cultivos, su uso inadecuado puede representar un problema de contaminación, debido a su acumulación en suelo, repercutiendo a largo plazo en el deterioro del mismo: pérdida de materia orgánica, disminución en la microbiota de la rizosfera y toxicidad, según lo afirmado por Tuesta ÁL et al.,

Diógenes C, Marcos VJ. y Grageda OA et al. (1)(5)(6). Es por esto que la implementación de nuevas tecnologías en el cuidado de cultivos, que promuevan una disminución en el uso de agroquímicos, ha resultado en una solución aceptable por los agricultores en la actualidad, como refieren Camacho et al., es así que, la promoción de microorganismos capaces de controlar fitopatógenos y estimular el crecimiento en cultivos, entre otros beneficios, representan una nueva alternativa sustentable con el medio ambiente (21).

Las propiedades de los microorganismos en lo referente a la agricultura, ha sido objeto de estudio en los últimos 30 años, descubriendo que muchos de estos mediante la producción de enzimas, características morfológicas y estructurales, pueden resultar hábiles en la solución de problemas, como la acumulación de elementos xenobióticos en el suelo; el control de fitopatógenos, la fertilización de cultivos, entre otras soluciones, según concuerdan Covarrubias SA. et al. y Castro C. et al. Por ende, el uso de hongos, bacterias, virus y parásitos para la degradación e inmovilización de compuestos tóxicos en el medio ambiente es reconocido como biorremediación de acuerdo con Covarrubias SA. et al., quienes aportan que dentro de este campo hay diversos procesos, en el que los microorganismos de acuerdo a su metabolismo participan de una forma u otra en la degradación de dichos compuestos. Dentro de estos procesos se mencionan: la biosorción, bioprecipitación, biolixiviación, bioacumulación, biotransformación, biovolatilización, bioaumentación y bioestimulación (28)(29).

Los cultivos de cacao en Colombia tienen contaminantes que afectan la calidad del suelo y de esta forma la producción del fruto. Entre estos, se encuentran metales pesados como el cadmio y el plomo, pues su toxicidad ha sido reportada por Beltrán ME. et al, y Teng Z. et al. los cuales mencionan los efectos nocivos que producen en el organismo humano, desde intoxicación a nivel digestivo, falla

multiorgánica y hasta cáncer. Ahora bien el cacao es un fruto que se implementa para la producción de chocolate (principalmente), es por ello que la presencia de estos metales en suelos donde se cultivan provoca preocupación, de modo que, la biorremediación en suelos con Cd en cultivos de cacao tiene una gran relevancia, como lo menciona Nieves et al. pues en departamentos productores de cacao como Santander, se pueden encontrar especies microbianas como *Aspergillus sp.*, *Trichoderma sp.*, y *Penicillium sp.*, capaces de mitigar este problema (2)(44)(46).

En cuanto a la capacidad de biorrecuperar suelos con cadmio por parte de microorganismos, se considera que es posible, debido a las adaptaciones ambientales que hongos y bacterias han debido desarrollar como respuesta a la hostilidad del ambiente que les rodea, como afirman Muzammil S. et al. (61). Por tanto, en el caso de bacterias Gram positivas que se han adaptado a medios hostiles, presentan en su pared grupos carboxilo e hidroxilo, además de ácidos teicoicos y teicuronicos que les confieren carga negativa, esto les permite atraer iones metálicos de plomo (Pb) y cadmio (Cd), como también sitios activos constituidos por grupos amino, hidroxilo y sulfuro, según lo descrito por Carballo M., et al., quienes agregan una serie de proteínas presentes en bacterias bioacumuladoras de Cd, como la metalotioneína y fitoquelatina, bacterias que se encuentran dentro de estas características con capacidad de bioabsorber son; *Bacillus cereus*, como reportan Wang C. et al, en sus investigaciones y *Streptomyces sp.* mencionada por Revoredo AG., Hurtado J. (60)(62)(64). Para las bacterias Gram negativas, *Burkholderia ambifaria* es relevante en la degradación de Cd, debido a su gran resistencia a altas concentraciones de este metal; que a diferencia de otros microorganismos reductores no tolerantes a ciertas cantidades de Cd, (*Burkholderia ambifaria*) demuestra total actividad metabólica en ambientes altamente tóxicos, concordando con lo mencionado por Zeng G. et al, estos añaden que la producción de fosfatasa ácida por parte de la bacteria le confiere tal

tolerancia (63).

En cuanto a los hongos biorremediadores de suelos con cadmio, se ha reconocido una gran variedad, básicamente debido a la estructura de la pared celular que contiene polisacáridos de tipo B1-3 y B1-glucanos, quitina y quitosano. Estos compuestos le confieren atracción entre iones metálicos, lo que facilita su absorción, de acuerdo a Cho CW. et al. y Cruz W. Además de dichas propiedades características de los hongos, se puede optimizar la absorción de cadmio de parte de estos microorganismos, si se tiene en cuenta factores nutricionales y de crecimiento como pH, temperatura y humedad (55)(56). *Trichoderma viride*, *Aspergillus* sp., *Fusarium* sp., *Rhodobacter sphaeroides* y *Penicillium chrysogenum* participan en la biosorción de cadmio, de acuerdo con Guerra BE. et al., Teng Z. et al., Daniel C., y Priyadarshini E. et al.,. Peng W. et al., consideran que *Rhodobacter sphaeroides* puede bioacumular gracias a la producción de sulfuros, biotransformar en su pared celular y bioprecipitar el cadmio (49)(44)(54)(57)(56). Mientras que, Pérez UA., et al., Manoharachary C., et al. y Molina J., resaltan la importancia de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HFMA), pues estos a diferencia de otros hongos poseen la proteína glomalina, que promueve la biosorción de cadmio, mediante enlaces electrostáticos que atraen los iones Cd, que a su vez son acumulados por la célula; esto previene altas concentraciones de cadmio en cultivos de cacao, ya que los HFMA se unen a la raíz de la planta formando una barrera, donde los iones de Cd no se transporten a las zonas aéreas de los árboles, disminuyendo el riesgo de su acumulación en fruto y hojas. Entre los que más se reportan están *Rhizopus* sp., *Glomus macrocarpum*, *Rhizogloium intraradices* y *Rhizophagus irregularis* en Cundinamarca (Colombia) (52)(53) (58).

Otros contaminantes de alto impacto en los cultivos de cacao son los agroquímicos que contienen compuestos organofosforados, organoclorados y carbamatos; los plaguicidas organofosforados comúnmente usados en cultivos

colombianos producen residuos tóxicos que tienden a acumularse en el suelo. Gómez IA. et al., identifican otros derivados de organofosforados como los clorpirifos, malatión, fenamifos, entre otros.

Con relación a la degradación de estos compuestos, Hernández GM. et al., identificaron en Colombia microorganismos en suelos agrícolas como *Bacillus pumilus*, *Streptomyces* sp., *Serratia Marcescens*, *Penicillium* sp. y *Pseudomonas putida*, capaces de degradar clorpirifos, como residuos de pesticidas. En este mismo sentido, el estudio en Chile realizado por Marín LF., et al., sostiene que los microorganismos son capaces de producir enzimas en común en todos los degradadores de organofosforados: la fosfatasa alcalina y la fosfotriesterasa, que permiten romper los enlaces de fósforo, degradando de esta manera estos compuestos (72)(73). En cuanto a los compuestos organoclorados, su impacto en el ambiente los convierte en contaminantes orgánicos persistentes (COPs), pues, son de degradación lenta y pueden propagarse fácilmente en el ambiente. Algunos microorganismos que pueden degradar este tipo de componentes son bacterias Gram negativas, las cuales son identificadas en el trabajo de Gómez S., como *Shinogobium* sp., *Novoshingomonas* sp., *Sphingomonas* sp. y *Pseudomonas* sp., la característica es que todas estas tienen en común la producción de la enzima PCP-monooxigenasa. Por otra parte, Castellanos J. et al. describen en su investigación que las bacterias Gram positivas, *Mycobacterium chlorophenolicum* y *Streptomyces rochei* también degradan este tipo de compuestos (80)(81)(86).

Es evidente que los cultivos de cacao en Colombia son importantes para la economía, de modo que las Buenas Prácticas de manejo se deben tener presentes a la hora de su producción. Es claro que no es posible prescindir del uso de agroquímicos, razón por la cual es necesario buscar alternativas amigables con el ambiente. El aporte que hace esta revisión documental es valioso en el

sentido que no hay una solución única y por lo tanto se deben revisar las herramientas que proporcionan las diferentes investigaciones sobre la capacidad de los microorganismos, principalmente hongos y bacterias, cuyo metabolismo puede degradar, inmovilizar y/o acumular sustancias xenobióticas y metales pesados. Adicionalmente, se sabe que una exploración de la microbiota nativa de suelos contaminados puede ser una excelente alternativa, pues muchos de estos microorganismos se han adaptado con el tiempo para sobrevivir en esos ambientes contaminados lo que significa que pueden tomarlos como fuentes para su crecimiento y desarrollo, no solamente los carbonos sino todo tipo de compuestos que puedan significarle algún aporte nutricional, lo que representa una solución inmediata en muchos casos. Por otra parte, aún faltan más documentos e investigaciones sobre microorganismos biorremediadores de agroquímicos a nivel nacional, de igual modo la información existente revela el creciente interés a nivel mundial por la biorremediación de compuestos tóxicos y metales pesados, esto indica que la biotecnología aplicada en la biorremediación de suelos hasta ahora está comenzando.

8. CONCLUSIONES

- La información recopilada, demuestra que existe una gran variedad de microorganismos capaces de recuperar suelos contaminados por metales pesados, en cultivos de *Theobroma cacao* L. El tipo de microorganismos más citados en la literatura fueron los hongos, seguido de las bacterias, que además de controlar las concentraciones de metales como el cadmio, proporcionaban beneficios a las plantas, mediante la estimulación del crecimiento y el control de algunas enfermedades.

- No existe mucha información a nivel de biorrecuperación de suelos en cultivos de cacao en Colombia, si bien se encontraron los contaminantes que afectan los suelos de estos cultivos, hubo carencia de investigaciones sobre este tema, el cual no ha sido prácticamente explorado, por lo tanto esta revisión abre las puertas para que a futuro se realicen investigaciones teniendo en cuenta la importancia del cultivo a nivel externo y para su exportación.
- En la biorremediación de compuestos organofosforados, organoclorados y carbamatos, agroquímicos de uso agrícola en cultivos de cacao, se encuentra que, las bacterias Gram negativas y los hongos, son los principales microorganismos que participan en la degradación de estos compuestos.
- Por último, la biorremediación surge como una respuesta adaptativa de los microorganismos, pues estos al sentirse amenazados por el medio que los rodea, pueden llegar a producir enzimas, proteínas e incluso adaptarse morfológicamente, para sobrevivir y adecuarse con lo proporcionado por su ambiente. Este hecho ha brindado una ayuda al hombre, pues ha resultado como una solución para la biorrecuperación de los recursos naturales que estabilizan el medio ambiente.

REFERENCIAS

1. Tuesta-Pinedo ÁL., Trigozo-Bartra E., Cayotopa-Torres JJ., Arévalo-Gardini E., Arévalo-Hernández CO., Zúñiga-Cernadez LB., et al. Optimización de la fertilización orgánica e inorgánica del cacao (*Theobroma Cacao* L.) con la inclusión de *Trichoderma* endófito y Micorrizas arbusculares. *Rev Tecnol en*

- Marcha [Internet]. el 21 de abril de 2017 [citado el 2 de noviembre de 2020];30(1):67. Disponible en: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0379-39822017000100067&lng=en&nrm=iso&tlng=es
2. Nieves Y, Parra N, Villanueva S, Henríquez M. Nota técnica: biorremediación, enemigo del cadmio. Rev Ing UC [Internet]. 2019 [citado el 2 de noviembre de 2020];26(1). Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/707/70758484010/html/index.html>
 3. Charrupi N., Martínez D. Estudio ambiental del cadmio y su relación con suelos destinados al cultivo de cacao en los departamentos de Arauca y Nariño [Internet]. Universidad de La Salle; 2017 [citado el 1 de noviembre de 2020]. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/718
 4. Sandoval-Pineda JF., Pérez-Moncada UA., Rodríguez A., Torres-Rojas E. High cadmium concentration resulted in low arbuscular mycorrhizal fungi community diversity associated to cocoa (*Theobroma cacao* L.). Acta Biol Colomb 2020;25(3):333-344
 5. Diógenes C, Marcos VJ. Abonos orgánicos y fertilizantes químicos... ¿Son compatibles con la agricultura? En 1999. p. 61–7. Disponible en: http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_061.pdf
 6. Grageda-Cabrera OA, Díaz-Franco A, Peña-Cabriaes JJ, Vera-Nuñez JA. Impacto de los biofertilizantes en la agricultura. Rev Mex ciencias agrícolas [Internet]. 2012 [citado el 1 de noviembre de 2020];3(6):1261–74. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000600015&lng=es&nrm=iso&tlng=es
 7. Avila M., Cifuentes A., Sánchez C. Reconocimiento de la problemática del uso de plaguicidas en comunidades agrícolas de la región del Sumapaz.[Internet]. Universidad de Cundinamarca. 2016 [citado el 1 de noviembre de 2020]. Disponible en:

[http://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/1005/Reconocimiento de la Problemática del Uso de Plaguicidas en Comunidades Agrícolas de la Región del Sumapaz.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.ucundinamarca.edu.co/bitstream/handle/20.500.12558/1005/Reconocimiento%20de%20la%20Problem%C3%A1tica%20del%20Uso%20de%20Plaguicidas%20en%20Comunidades%20Agr%C3%ADcolas%20de%20la%20Regi%C3%B3n%20del%20Sumapaz.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

8. Beltrán RM. Guía de métodos de biorremediación para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos [Internet]. [Bogotá]: Universidad Libre; 2013 [citado el 1 de noviembre de 2020]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/10607/trabajofinalcd.pdf?sequence=1>
9. Abad-Guarnizo YE. Caracterización, identificación y evaluación de microorganismos autóctonos biorremediadores de suelos contaminados por agroquímicos en la provincia de Loja. Tesis. Maestría en Agroecología y Ambiente. 2017;110.
10. Pachay VL. Evaluación de la capacidad de remoción de cadmio in vitro utilizando la microalga *Chlorella* sp. y su potencial para la biorremediación de sitios naturales contaminados [Internet]. Quito: Universidad de las Américas, 2017; 2017 [citado el 2 de noviembre de 2020]. Disponible en: <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/8068>
11. Hipólito-Romero E, Carcaño-Montiel MG, Ramos-Prado JM, Vázquez-Cabañas EA, López-Reyes L, Ricaño-Rodríguez J. Effect of mixed edaphic bacterial inoculants in the early development of improved cocoa cultivars (*Theobroma cacao* L.) in a traditional agroforestry system of Oaxaca, Mexico. *Rev Argent Microbiol.* 2017;49(4):356–65.
12. Ayubb T N, Cerra G A, Chamorro A L, Pérez C A. Resistencia a cadmio (Cd) de bacterias endófitas y bacterias rizosféricas aisladas a partir de *Oriza sativa* en Colombia. *Rev Colomb Cienc Anim - RECIA.* 2017;9(2):281.
13. Mitra S, Pramanik K, Ghosh PK, Soren T, Sarkar A, Dey RS, et al. Characterization of Cd-resistant *Klebsiella michiganensis* MCC3089 and its potential for rice seedling growth promotion under Cd stress. *Microbiol Res.* el 1 de mayo de

2018;210:12–25.

14. Alvarez M, Tucta F, Quispe E, Meza V. Incidence of the inoculation of beneficial microorganisms in the strawberry (*Fragaria sp.*) crop. *Sci Agropecu* [Internet]. el 28 de marzo de 2018 [citado el 22 de abril de 2021];9(1):33–42. Disponible en: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>
15. Bravo D, Pardo-Díaz S, Benavides-Eraza J, Rengifo-Estrada G, Braissant O, Leon-Moreno C. Cadmium and cadmium-tolerant soil bacteria in cacao crops from northeastern Colombia. *J Appl Microbiol.* el 1 de mayo de 2018;124(5):1175–94
16. Urrutia B. Tolerancia de *pleurotus ostreatus* a diferentes concentraciones de plomo. *Univ en Control del medio ambiente* [Internet]. 2019; Disponible en: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/47870/3560901064595UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
17. Guartatanga E, Siguencia K. Recuperación de suelo contaminado con cobre y plomo mediante métodos biológicos al interior del campamento Guarumales. *Univ Politécnica Sales sede Cuenca* [Internet]. 2019;1–109. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17835/1/UPS-CT008444.pdf>
18. Rosas-Patiño G, Puentes-Páramo YJ, Menjivar-Flores JC. Efecto en el uso eficiente de macronutrientes para cacao (*Theobroma cacao L.*) en la Amazonia colombiana - Dialnet. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* [Internet]. 2019 [citado el 1 de noviembre de 2020];20:17–27. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7015253>
19. Villalobos S. Efecto de la biofertilización en plántulas De *Theobroma Cacao L.* Con Micorrizas Arbusculares nativas del Área De Conservación Municipal “Bosque de Huamantanga” De La Provincia de Jaén – Cajamarca. 2019;1– 91.
20. Hernandez-Angel ML, Lopez EP, Jaramillo Granda MC, Posada Usuga AP. Identificación de microorganismos biorremediadores de suelos agrícolas del norte de Antioquia para degradación del clorpirifos. *Rev Politécnica.* 2020;16(32):96–110

21. Camacho JA, Pineda DCR, Díaz FY, LLacza SMM, Molina MAB. Fertilizing with native efficient microorganisms has a positive effect on the phenology, biomass and production of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Sci Agropecu* [Internet]. el 1 de marzo de 2020 [citado el 22 de abril de 2021];11(1):67–73. Disponible en: <http://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop>
22. Segovia C , Elizabeth E, Chanatasig V, et al. Evaluar la aplicación de microorganismos contenidos en un biol sobre la producción de mezclas forrajeras en una unidad productiva agropecuaria en el cantón Quito sector chillogallo [Internet]. Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC).; 2020 [citado el 22 de abril de 2021]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6742>
23. Cota-Álvarez AJ. Diseño de metagenómica funcional de consorcios microbianos tolerantes a glifosato, carbofuran, permetrina y clorpirifos [Internet]. 2021 [citado el 22 de abril de 2021]. Disponible en: http://www.cienciasinaloa.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/312/1/TESIS_CIIDIR_AJCA_JLAR_IPN20210118.pdf
24. Acosta Piscocoya LM., Bustamante Tantaleán DM., Caracterización de microorganismos oxidantes del azufre y su potencial para la recuperación de suelo sódico con la aplicación de azufre [Internet]. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Repositorio institucional - CONCYTEC. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo; 2021 ene [citado el 22 de abril de 2021]. Disponible en: <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8875>
25. Senol ZM, Gül ÜD, Gurbanov R, Simsek S. Optimization the removal of lead ions by fungi: Explanation of the mycosorption mechanism. *J Environ Chem Eng.* el 1 de abril de 2021;9(2):104760.
26. Rojas F, Sacristán-Sánchez EJ. Guía ambiental para el cultivo del cacao. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Federación Nacional de Cacaoteros, Fondo Nacional del Cacao. 2013. p. 1–123.

27. Doster N, Roque J, Cano A, La Torre MI, Weigend M. Hoja botánica: Cacao [Internet]. Lima; 2012 jun [citado el 2 de noviembre de 2020]. Disponible en: http://www.botconsult.com/downloads/Hoja_Botanica_Cacao_2012.pdf
28. Covarrubias SA, García Berumen JA, Peña Cabriaes JJ. Microorganisms role in the bioremediation of contaminated soils with heavy metals. *Acta Univ.* octubre de 2015;25(NE-3):40–5.
29. Castro C, Urbietta MS, Plaza Cazón J, Donati ER. Metal biorecovery and bioremediation: Whether or not thermophilic are better than mesophilic microorganisms. *Bioresour Technol.* el 1 de mayo de 2019;279:317–26.
30. Vendruscolo F, da Rocha Ferreira GL, Antoniosi Filho NR. Biosorption of hexavalent chromium by microorganisms. *Int Biodeterior Biodegradation.* el 1 de abril de 2017;119:87–95.
31. Villaveces Palacio CD. Biorremediación usando el hongo aspergillus niger en el tratamiento de aguas residuales. 2019;1–23. Disponible en: https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/32776/Villaveces_PalacioCarlosDaniel2019.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y
32. Dev S, Sachan A, Dehghani F, Ghosh T, Briggs BR, Aggarwal S. Mechanisms of biological recovery of rare-earth elements from industrial and electronic wastes: A review. *Chem Eng J.* el 1 de octubre de 2020;397:124596.
33. Química.es [Internet]. 2021 [citado el 21 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Bioacumulación.html>
34. Soto C, Gutiérrez S, Rey-León A, González-Rojas E. Biotransformación de metales pesados presentes en lodos ribereños de los ríos Bogotá y Tunjuelo . NOVA [Internet]. el 2 de diciembre de 2010 [citado el 21 de marzo de 2021]; Disponible en: <https://revistas.unicolmayor.edu.co/index.php/nova/article/view/161/322>
35. Eyzaguirre Liendo P del R, Castillo Cotrina DM. Biolixiviación indicativa del sulfato de cobre por crecimiento microbiano ante el drenaje minero. *Rev Investig*

- Altoandinas [Internet]. el 28 de febrero de 2019 [citado el 10 de agosto de 2021];21(1):49–56. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-2957201900010004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
36. Salinas Bravo A. Biolixiviación de calcopirita por *sulfobacillus acidophilus*. [Santiago de Chile]: Universidad de Chile; 2016.
37. Rahman S, Kim KH, Saha SK, Swaraz AM, Paul DK. Review of remediation techniques for arsenic (As) contamination: A novel approach utilizing bio-organisms. *J Environ Manage*. el 15 de febrero de 2014;134:175–85.
38. Saha JK, Selladurai R, Coumar MV, Dotaniya ML, Kundu S, Patra AK. Remediation and Management of Polluted Sites. 2017 [citado el 10 de agosto de 2021];317–72. Disponible en: https://ezproxy.unicolmayor.edu.co:2425/chapter/10.1007/978-981-10-4274-4_12
39. Piedrahita Escobar CE, Gallego Díaz JD, Tamayo Sánchez CA, Herrera Castañeda JM. Implementación de buenas prácticas agrícolas en cultivos de cacao *Theobroma cacao* L. como estrategia para prevenir la presencia de cadmio en la cadena cacaotera. *Serv Nac Aprendiz [Internet]*. 2018 [citado el 2 de noviembre de 2020];1–38. Disponible en: <https://repositorio.sena.edu.co/handle/11404/5250>
40. Casteblanco JA. Heavy metals remediation with potential application in cocoa cultivation. *Granja*. el 1 de marzo de 2018;27(1):21–35.
41. Abt E, Robin LP. Perspective on Cadmium and Lead in Cocoa and Chocolate. *J Agric Food Chem*. 2020;68(46):13008–15.
42. Huauya-Rojas M ángel, Mansilla-Minaya LG, Florida-Rofner N, Neira-Trujillo GM. Presencia de metales pesados en cultivos de cacao organico. *Acta Agronómica [Internet]*. 2012;61(4): 339–44. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122012000400006&lng=es&nrm=isohttp://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122012000400006&lng=es&nrm=iso

id=S0120-28122012000400006&lang=pt

43. Field J. Bioremediación de Metales Pesados [Internet]. 2008 [citado el 21 de marzo de 2021]. Disponible en: http://binational.pharmacy.arizona.edu/sites/binational.pharmacy.arizona.edu/files/all_files/Biorerem-MP.pdf
44. Beltrán-Pineda ME, Gómez-Rodríguez AM. Biorremediación de metales pesados cadmio (Cd), cromo (Cr) y mercurio (Hg), mecanismos bioquímicos e ingeniería genética: una revisión. *Rev Fac Ciencias Básicas*. 2016;12(2):172–97.
45. Teng Z, Shao W, Zhang K, Huo Y, Li M. Characterization of phosphate solubilizing bacteria isolated from heavy metal contaminated soils and their potential for lead immobilization. *J Environ Manage*. el 1 de febrero de 2019;231:189–97.
46. Chen H, Zhang J, Tang L, Su M, Tian D, Zhang L, et al. Enhanced Pb immobilization via the combination of biochar and phosphate solubilizing bacteria. *Environ Int*. el 1 de junio de 2019;127:395–401.
47. Aguirre-Forero SE, Piraneque-Gambasica NV, Vásquez-Polo JR. Heavy metals content in soils and cocoa tissues in Magdalena department Colombia: emphasis in cadmium. *Entramado* [Internet]. el 3 de junio de 2020 [citado el 10 de agosto de 2021];16(2):298–310. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032020000200298&lng=en&nrm=iso&tlng=en
48. Hussain B, Ashraf MN, Shafeeq-ur-Rahman, Abbas A, Li J, Farooq M. Cadmium stress in paddy fields: Effects of soil conditions and remediation strategies. *Sci Total Environ*. el 1 de febrero de 2021;754:142188.
49. Guerra Sierra BE, Sandoval Meza AX, Manrique González LS, Barrera Rangel SP. Ensayos preliminares in vitro de biosorción de cadmio cepas fúngicas nativas de suelos contaminados. *Innovaciencia Fac Ciencias Exactas, Físicas y Nat* [Internet]. el 18 de agosto de 2014 [citado el 22 de marzo de 2021];2(1):53. Disponible en: <https://revistas.udes.edu.co/innovaciencia/article/view/1851/2018>

50. *Aspergillus* spp. | Atlas de Identificación micológica [Internet]. [citado el 16 de abril de 2021]. Disponible en: <https://atlasdemicologia.wordpress.com/2016/06/22/aspergillus-spp/>
51. *Trichoderma* spp Ppt [Internet]. [citado el 16 de abril de 2021]. Disponible en: <https://pdfslide.net/documents/trichoderma-spp-ppt.html>
52. Pérez-Moncada UA, Gómez MR, Serralde Ordoñez DP, Peñaranda Rolón AM, Wilches Ortiz WA, Ramírez L, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) as a strategy to reduce the absorption of cadmium in cocoa (*Theobroma cacao*) plants. *Terra Latinoam.* el 15 de abril de 2019;37(2):121–30
53. Manoharachary C., Sridhar K., Reena S, Alok A, T. S. Suryanarayanan, Seema R, et al. Fungal biodiversity: Distribution, conservation and prospecting of fungi from India. *Curr Sci* [Internet]. el 10 de julio de 2005 [citado el 22 de marzo de 2021];89(1). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/242085592_Fungal_biodiversity_Distribution_conservation_and_prospecting_of_fungi_from_India
54. Daniel C, Sánchez Z, Flores JP, Asesor T, Gina L, Tito M, et al. Biorremediación de suelo contaminado con cadmio mediante la aplicación de *Rhizopus* sp. y *Rhodobacter sphaeroid* [Internet]. [Lima]: Universidad peruana unión; 2020 [citado el 22 de marzo de 2021]. Disponible en: https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/UPEU/3742/Carlos_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
55. Cho CW, Lim CR, Cho BG, Mun SB, Choi JW, Zhao Y, et al. Development of prediction models for adsorption properties of chitin and chitosan for micropollutants. *Chem Eng J.* el 15 de diciembre de 2021;426:131341.
56. Cruz W. Aislamiento e identificación de hongos remediadores de suelos contaminados con Cadmio en el botadero Cancharani de la ciudad de Puno. *Univ Nac del altiplano.* 2019;1–157
57. Priyadarshini E, Priyadarshini SS, Cousins BG, Pradhan N. Metal-Fungus

interaction: Review on cellular processes underlying heavy metal detoxification and synthesis of metal nanoparticles. Vol. 274, Chemosphere. Elsevier Ltd; 2021. p. 129976.

58. Molina J. Efecto de la inoculación de Hongos Formadores de Micorrizas Arbusculares (HFMA) sobre un sistema suelo-planta de cacao en suelos contaminados con cadmio en etapa de vivero [Internet]. Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá; 2017 feb [citado el 17 de abril de 2021]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62938>
59. Peng W, Li X, Song J, Jiang W, Liu Y, Fan W. Bioremediation of cadmium- and zinc-contaminated soil using *Rhodobacter sphaeroides*. Chemosphere. el 1 de abril de 2018;197:33–41.
60. Revoredo AG, Hurtado J. Efecto de la inoculación de cepas de actinomicetos en la acumulación de cadmio en plantas de *Theobroma cacao* L. En: Paper presented at International Symposium on Cocoa Research, 13-17 November 2017, Lima, Peru. 2017. p. 13–7.
61. Muzammil S, Siddique MH, Mureed F, Andleeb R, Jabeen F, Waseem M, et al. Brazilian Journal of Biology Assessment of cadmium tolerance and biosorptive potential of *Bacillus Cereus* GCFSD01 isolated from cadmium contaminated soil. Braz J Biol [Internet]. 2021 [citado el 17 de abril de 2021];81(2):398–405. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.227200>
62. Wang C, Liu Z, Huang Y, Zhang Y, Wang X, Hu Z. Cadmium-resistant rhizobacterium *Bacillus cereus* M4 promotes the growth and reduces cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). Environ Toxicol Pharmacol. el 1 de noviembre de 2019;72:103265.
63. Zeng G, Qiao S, Wang X, Sheng M, Wei M, Chen Q, et al. Immobilization of cadmium by *Burkholderia* sp. QY14 through modified microbially induced phosphate precipitation. J Hazard Mater. el 15 de junio de 2020;412:125156
64. Carballo M, Martínez A, Salgado I, Maldener I, Álvarez M, Boza A, et al.

- Capacidad de captura de cadmio y cinc por bacterias, microalgas y levaduras / Cadmium and zinc capture capacity by bacteria, microalgae and yeast. *Rev Cuba Ciencias Biológicas*. 2012;1(1):34–43.
65. Kumar A, Subrahmanyam G, Mondal R, Cabral-Pinto MMS, Shabnam AA, Jigyasu DK, et al. Bio-remediation approaches for alleviation of cadmium contamination in natural resources. *Chemosphere*. el 1 de abril de 2021;268:128855.
66. Cáceres J & T. Microorganismos cultivables asociados a cadmio (Cd) presentes en los suelos cacaoteros de los municipios de Yacopí y Nilo, como estrategia de biorremediación. *Simp Int Investig del cacao* [Internet]. 2017 [citado el 22 de marzo de 2021];13(1):100–1. Disponible en: <https://www.mendeley.com/catalogue/207d0a78-a10d-37d5-aa75-1707160656d2/>
67. Argüello-Navarro AZ, Moreno-Rozo LY. Evaluación del potencial biofertilizante de bacterias diazótrofias aisladas de suelos con cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agron*. 2014;63(3).
68. Argüello Navarro AZ, Madiedo Soler N, Moreno Rozo LY. Cuantificación de bacterias diazotrofias aisladas de suelos cacaoteros (*Theobroma cacao* L.), por la técnica de Número Más Probable (NMP). *Rev Colomb Biotecnol*. el 1 de julio de 2016;18(2):4
69. Villamizar-Gallardo RA, Ortíz-Rodríguez OO, Escobar JW. Hongos simbióticos y endofíticos como biocontroles de fitopatógenos de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Summa Phytopathol* [Internet]. el 1 de abril de 2017 [citado el 17 de abril de 2021];43(2):87–93. Disponible en: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-54052017000200087&lng=en&nrm=iso&tlng=en
70. López-Barrera G. Análisis molecular de hongos antagonistas aislados de plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*) de Norte de Santander. *Ing y Compet*. 2021;23(2).
71. Gómez Orejuela IA, Vianchá Sánchez ZH. Buenas prácticas agrícolas como

- alternativa de producción limpia en el proceso productivo de cítricos y mango en el municipio de Viotá, Cundinamarca. Ing Solidari [Internet]. el 1 de mayo de 2017 [citado el 1 de noviembre de 2020];13(22):137–51. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.16925/in.v13i22.1840>
72. Hernández-Ruiz GM, Álvarez-Orozco NA, Ríos-Osorio LA. Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: Revisión sistemática [Internet]. Vol. 18, Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria Corpoica; 2017 [citado el 10 de abril de 2021]. p. 139–59. Disponible en: <http://revista.corpoica.org.co/index.php/revista/article/view/564>
73. Marín L, Jaramillo Colorado BE. Aislamiento de bacterias degradadoras de pesticidas organofosforados encontrados en suelos y en leche bovina. Rev Chil Nutr [Internet]. el 18 de agosto de 2015 [citado el 17 de abril de 2021];42(2):179–85. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-75182015000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es
74. Yoshioka IC, Prager M, Bolaños MM. Actividad de fosfatasas ácida y alcalina en suelo cultivado con plátano en tres sistemas de manejo Actividad de fosfatasas ácida y alcalina en suelo cultivado con plátano en tres sistemas de manejo. Acta Agronómica. 2006;55(2):1–8.
75. Gómez, Fajardo. Biorremediación de compuestos organofosforados. En: Revisión y panorama nacional de la biorremediación microbiana. 2018. p. 67–77.
76. Estévez-Gómez MJ,. La Biodegradación De Pesticidas Organoclorados En Un Suelo Contaminado Proveniente De Una Antigua Zona Algodonera. 2015;11. Disponible en: http://apuntesdeinvestigacion.bucaramanga.upb.edu.co/wpcontent/uploads/2016/04/Articulo-Apuntes-SemillerosUPB_Martha_Estévez-1-1.pdf
77. Kopytko M, Correa-Torres SN, Gómez MJ. Stimulated degradation of soils

- contaminated with organochlorine pesticides. *Rev Investig Agrar y Ambient.* 2017;119–30.
78. Mandal A, Sarkar B, Mandal S, Vithanage M, Patra AK, Manna MC. Impact of agrochemicals on soil health. En: *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation.* Butterworth-Heinemann; 2020. p. 161–87.
79. Wang M, Cernava T. Overhauling the assessment of agrochemical-driven interferences with microbial communities for improved global ecosystem integrity. *Environ Sci Ecotechnology.* el 1 de octubre de 2020;4:100061.
80. Fierro F, Metropolitana-xochimilco UA. Impacto de la biología molecular y las nuevas tecnologías en el conocimiento de la función celular y sus aplicaciones. 2016. 99–106 p.
81. Gómez Fernández S. Ingeniería genética aplicada en biorremediación [Internet]. Universidad de Jaén; 2021 [citado el 11 de agosto de 2021]. Disponible en: <http://tauja.ujaen.es/handle/10953.1/14440>
82. Rivero Machado A, Niell S, Heinzen H, Cesio MV, Cerdeiras MP, Soubes M. Selección de Basidiomicetes nativos con capacidad de degradar xenobióticos usando el endosulfán como modelo. *Latu* [Internet]. 2016 [citado el 11 de agosto de 2021]; Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/6061/606163652006/html/>
83. Castellanos Rozo J, Rache Cardenal LY. Microorganismos, enzimas, plásmidos y genes involucrados en la degradación de plaguicidas N metilcarbamatos. *Rev Int Contam Ambient.* 2013;29(SPEC.ISSUE):105–19.
84. Rozo JC, Arleth J, López G. Rutas de degradación del plaguicida n-metil carbamato carbaril Routes of degradation of the pesticide carbaryl n methylcarbamate. *I3 +.* 2015;2(2):134–47.
85. Mishra S, Pang S, Zhang W, Lin Z, Bhatt P, Chen S. Insights into the microbial degradation and biochemical mechanisms of carbamates. *Chemosphere* [Internet]. 2021;279:130500. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130500>

86. Castellanos-Rozo J, Galvis Lopez J, Carreño Mendivelso A. Biodegradación de carbofuran y carbaril por *Sphingomonas* sp., S8-M3-13. *Agron y Ambient.* 2016;36(1):45–52.