

**La bioprospección como alternativa para la disminución de la contaminación ambiental
producida por agroquímicos: aproximación del estado actual en Colombia**

Claudia Patricia Cubides Guerra

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD
Escuela De Ciencias Agrícolas Pecuarias Y Del Medio Ambiente
Programa De Ingeniería Ambiental

2021

**La bioprospección como alternativa para la disminución de la contaminación ambiental
producida por agroquímicos: aproximación del estado actual en Colombia**

Claudia Patricia Cubides Guerra

Trabajo para optar al título de Ingeniera ambiental

Directora

Carolina Gutiérrez Cortes

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela De Ciencias Agrícolas Pecuarias Y Del Medio Ambiente

Programa De Ingeniería Ambiental

2021

Resumen

La bioprospección microbiana es el estudio y clasificación de los microorganismos con un valor para la industria. En Colombia la bioprospección microbiana es un tema en desarrollo donde se registran algunos estudios realizados por grupos de investigación de algunas universidades, sin embargo, aún no se presenta información detallada de la diversidad microbiana y del potencial en sostenibilidad ambiental que la implementación de estos microorganismos tiene en los diferentes campos de desarrollo económico. El objetivo del presente documento fue hacer una revisión y recopilación de la información más relevante sobre los principales beneficios ambientales que tiene la aplicación de microorganismos en los distintos sectores agrícolas, como fertilizadores y biorremediadores para el sector ambiental este tipo de desarrollos representa una oportunidad para realizar acciones en pro del cuidado y recuperación del medio ambiente mediante la prevención, mitigación y recuperación de suelos, agua y aire, a través del uso de microorganismo en procesos de descontaminación y de sostenibilidad ambiental que aseguran la supervivencia de los seres vivos. Así mismo dar a conocer el estado actual de la bioprospección en Colombia por medio de la revisión de algunos estudios de bioprospección microbiana realizados en el país. Finalmente presentar algunas de las técnicas más importantes en la aplicación de microorganismos y sus productos metabólicos con el fin de reducir la contaminación ambiental producto de las malas prácticas agrícolas.

Palabras clave: bioprospección, contaminación ambiental, biorremediación, biofertilización, microorganismos.

Abstract

Microbial bioprospecting is the study and classification of microorganisms with a value for the industry. In Colombia, microbial bioprospecting is a subject in development where some studies carried out by research groups from some universities are recorded, however, detailed information on microbial diversity and the potential for environmental sustainability that the implementation of these microorganisms has not yet been presented. in the different fields of economic development. The objective of this document was to review and compile the most relevant information on the main environmental benefits of the application of microorganisms in the different agricultural sectors, such as fertilizers and bioremediators for the environmental sector, this type of development represents an opportunity to carry out actions in favor of the care and recovery of the environment through the prevention, mitigation and recovery of soils, water and air, through the use of microorganisms in decontamination and environmental sustainability processes that ensure the survival of living beings. Likewise, publicize the current state of bioprospecting in Colombia by reviewing some microbial bioprospecting studies carried out in the country. Finally, present some of the most important techniques in the application of microorganisms and their metabolic products in order to reduce environmental pollution as a result of bad agricultural practices.

Key words: bioprospecting, environmental pollution, bioremediation, biofertilization, microorganisms.

Tabla de contenido

Introducción	9
Problema	11
Generalidades	11
Estado del arte	11
Problema de investigación	13
Hipótesis de investigación.....	15
Objetivos	16
Objetivo General	16
Objetivos específicos.....	16
Justificación	17
Marco referencial	20
Bioprospección.....	20
Técnicas de bioprospección.....	32
Técnicas microbiológicas convencionales	33
Pruebas moleculares.....	35
Técnicas de “screening”	37
Algunas aplicaciones de la bioprospección con efecto positivo en el medio ambiente.....	40
Biorremediación	43
Metales pesados	44
Agroquímicos.....	49
Organoclorados	49
Organofosforados.....	51

Biorremediación en Colombia	54
Biofertilización en Colombia	60
Micorrizas	64
Conclusiones	68
Recomendaciones	70
Referencias bibliográficas.....	71

Lista de tablas

Tabla 1. Principales proyectos de los grupos de investigación reconocidos en bioprospección ..	27
Tabla 2. Ejemplos de los principales tipos de medios de cultivo	34
Tabla 3. Ejemplos de bacterias utilizadas para la remediación de metales pesados.....	47
Tabla 4. Estudios publicados sobre biorremediación en Colombia año 2016-2018.....	55
Tabla 5. Especies de microorganismos utilizadas en biofertilización	66

Lista de figuras

Figura 1. Antecedentes de Colombia en el tema antártico.....	23
Figura 2. Investigaciones en bioprospección desarrolladas en Colombia hasta el 2009	28
Figura 3. Análisis de los resultados de búsqueda de publicaciones sobre bioprospección en el recurso electrónico Scopus	29
Figura 4. Siembras en medios de cultivo en los procesos de bioprospección microbiana	33
Figura 5. Microorganismos vistos en el microscopio	34
Figura 6. Kits para pruebas bioquímicas de bacterias acidolácticas (API CH 50 Biomerieux®) .	35
Figura 7. Amplificación de ADN con la técnica de PCR	36
Figura 8. Ejemplos de tipos de cromatografía	36
Figura 9. Contrato de acceso a recursos genéticos y/o productos derivados	43
Figura 10. Efecto del cadmio sobre el organismo.....	46
Figura 11. Impacto de la utilización de agroquímicos en la producción de alimentos	49
Figura 12. Ejemplos de algunos pesticidas organoclorados utilizados para el control de insectos	50
Figura 13. Ejemplos de algunos pesticidas organofosforados utilizados para el control de insectos	53
Figura 14. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -Tierras cultivables como porcentaje de las tierras agrícolas, 1961-2014.....	62
Figura 15. Micorrizas.....	65
Figura 16. Colonización de raíces por micorrizas arbusculares.	66

Introducción

En las últimas décadas se ha tomado conciencia acerca del agotamiento de los recursos naturales debido a la sobre explotación de los mismos. Para el sector agrícola, el objetivo es lograr altos rendimientos en sus cultivos para garantizar la demanda actual de alimentos sin considerar la sostenibilidad de la producción (Grageda, 2012). Lo anterior ha traído como consecuencia el uso excesivo de fertilizantes, plaguicidas sobre los cultivos y la tierra, que además de afectar la cadena productiva deja grandes problemáticas a nivel ambiental. Por lo tanto, ha surgido la necesidad de desarrollar la agricultura sostenible y contribuir con procesos que protejan el medio ambiente lo que ha enfocado la visión de los investigadores en cómo aprovechar las comunidades microbianas existentes en diferentes ecosistemas y su rol en los ciclos biogeoquímicos en beneficio de la producción de alimentos.

Adicionalmente estos microorganismos serán capaces de intervenir en procesos de remediación de suelos y cultivos convirtiéndose así la bioprospección en una herramienta que permitirá minimizar el uso de sustancias químicas sobre los cultivos contribuyendo con la preservación del medio ambiente (Bannert et al., 2011). En Colombia la bioprospección microbiana ha tenido gran importancia en los sectores ambiental, industrial y medicina veterinaria, desarrollando investigaciones enfocados en el potencial que tienen los microorganismos para ser empleados en procesos aplicados en el ámbito de la ingeniería ambiental para. Los beneficios ambientales del uso de estos microorganismos benéficos se encuentran ligados también cuando son empleados en las actividades agrícolas. Lo anterior es debido a que liberan como producto de su metabolismo moléculas que actúan en la descontaminación de los suelos y participan en la degradación de residuos contaminantes

mejorando la estructura de los suelos y promoviendo la fijación de nitrógeno o solubilizando los fosfatos.

Adicionalmente estos microorganismos pueden proteger los cultivos de plagas patógenos y enfermedades en lo que se conoce como control biológico (Rodríguez, 2014). Por lo tanto, la biorremediación, el control biológico, la bioestimulación y la bionutrición son aplicaciones en la industria agrícola que promueven cultivos más productivos, nutritivos y saludables con menor efecto negativo sobre el ambiente (Carranza, 2017).

Entre todas las aplicaciones que puede tener la bioprospección está la de ofrecer posibles alternativas mediante el uso de biofertilizantes basado en biomasa de microorganismos (bacterias u hongos), aplicados al suelo y la planta con el fin de sustituir parcial o totalmente la fertilización sintética. Estos microorganismos realizan funciones como la descomposición de la materia orgánica, desintoxicación de plaguicidas, estimulación del crecimiento y desarrollo vegetal, suministro de nutrientes tanto a la planta como al suelo, producción de compuestos bioactivos como vitaminas y hormonas, que sirve de protección contra patógenos.

De esta manera su aplicación contribuye a la disminución de agroquímicos que se convierten en contaminantes ambientales presentes en suelo, agua y aire producto de las labores agrícolas (Armenta et al., 2010). Adicionalmente, podría representar la reducción de costos para los productores, aumentando el rendimiento de sus cosechas y la posibilidad de ofrecer al consumidor final productos más sanos y libres de residuos de agroquímicos generando así una agricultura sostenible.

Problema

Generalidades

Estado del arte

Colombia como un país rico y mega diverso en biodiversidad, posee invaluable recursos biológicos y genéticos aún en proceso de exploración. Sin embargo, la actividad de la bioprospección o prospección biológica data del siglo XVI (Beltrán, 2016), cuando los viajes de exploración botánica a América por parte de la corona española buscaban obtener toda la información posible sobre las especies vegetales que se encontraran en el continente americano. Para ello, se dio inicio a las expediciones a cargo de naturalistas que realizarían inventarios de los recursos vegetales encontrados en dichas tierras implementando así la explotación de los recursos naturales (Carranza 2017). En Colombia, la bioprospección toma lugar a partir del Convenio de Diversidad Biológica en 1992, con el que se abre un debate frente al uso de recursos genéticos para el desarrollo sostenible, que involucra la biodiversidad en su sentido material, simbólico e intangible (Niño, 2017).

Este tipo de investigaciones requiere de capacidad científica y tecnológica para la construcción o fortalecimiento de capacidades nacionales en Ciencia, Tecnología e Innovación con fines de mejoramiento de infraestructura específicamente de- laboratorios y equipos destinados a este tipo de investigación, participación en redes de conocimiento, formación del recurso humano, publicaciones nacionales e internacionales, propiedad intelectual, incremento en el uso de tecnologías de punta (Cotes et al., 2012).

La biodiversidad en Colombia representa una oportunidad para el desarrollo sostenible mediante el uso de biotecnología de los recursos biológicos a manera que se generen nuevas investigaciones en bioprospección la cual supone una herramienta de grandes posibilidades de

uso sostenible de los recursos naturales. Específicamente, la bioprospección representa para el sector ambiental una solución a la contaminación producto de las malas prácticas agrícolas.

Problema de investigación

La economía en Colombia se basa en la agricultura y a medida que la población aumenta se hace necesario el incremento de la capacidad de producción de suelos para cultivos con el fin de garantizar la demanda de alimentos que el país necesita. Para esto, se ha hecho necesario el uso de plaguicidas con el fin de lograr cosechas libres de enfermedades y plagas que puedan poner el riesgo los cultivos y por tanto el abastecimiento de alimentos. Adicionalmente, el uso de agroquímicos ha permitido que haya una buena producción en el cultivo y evita a los agricultores pérdidas millonarias que podrían llevarlos a la ruina (Aguirre 2019).

Cabe destacar que el uso indiscriminado de estos agroquímicos genera afectaciones en el suelo como la contaminación de éste, debido a la presencia y permanencia de sustancias químicas y de minerales en elevadas concentraciones que pueden causar efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud del ser humano (FAO 2019). Estas actividades antropogénicas como el uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes, sumado a la mala disposición de los envases, hacen que la actividad agrícola se convierta en un problema ambiental debido a que se presentan residuos, de nitrógeno, fósforo, magnesio y compuesto organoclorados contaminando suelos agua y aire. Lo anterior origina un desequilibrio en la biota por la pérdida de diversidad microbiana, erosión de terrenos, agotamiento de minerales, altos niveles de salinidad y desertización del suelo, obligando a los cultivadores a abandonar estos campos, generando desplazamiento a los centros poblados originando procesos de desruralización en Colombia (García-Gutiérrez, 2012).

Los microorganismos son considerados como parte fundamental y sostenible de la vida del suelo y de los cultivos, gracias a su participación en los ciclos biogeoquímicos como los del carbono y nitrógeno. Éstos a su vez, cumplen con otras funciones vitales en prácticamente todo

el hábitat terrestre, mediante el reciclaje y descomposición de residuos y de moléculas tóxicas. Muchas bacterias, virus y hongos se reconocen como promotores de crecimiento en plantas, a través biocatálisis, en la producción de vitaminas, coenzimas, alcoholes, azúcares, así como en su participación en la disminución de patógenos y control de plagas (García-Gutiérrez, 2012).

Por esto que se considera como otra problemática la afectación directa a las numerosas poblaciones de microorganismos nativos de interés biológico existente en los suelos que resulta como consecuencia del uso de plaguicidas y fertilizantes químicos. Estos microorganismos benéficos como bacterias, hongos y levaduras presentes en la mayoría de los ecosistemas se ven afectados por la exposición a este tipo de sustancias. La retención de plaguicidas y minerales en el suelo tiene como consecuencia la afectación en la capacidad enzimática de los microorganismos sufriendo alteraciones bioquímicas, disminuyendo su actividad como biofertilizantes y su efecto promotor del crecimiento de las plantas y control de plagas (Rivera, Camelo, Estrada & Bonilla, 2010).

Teniendo en cuenta lo anterior, la bioprospección microbiana representa una alternativa eficiente frente a la problemática de contaminación por agroquímicos. Esta actividad es definida como la búsqueda de microorganismos con características deseables que pueden ser empleados en diversas industrias con la intención de otorgarles un valor comercial a través de la elaboración de productos en sectores como cosmética, biotecnología, farmacéutica, medicina, alimentos y agricultura entre otros (Duarte & Velho, 2009). La bioprospección en general resulta esencial para descubrir, cultivar y aprovechar recursos naturales como plantas, animales y microorganismos obteniendo productos de alta calidad o contribuyendo a la solución de problemática ambientales.

Otro factor y quizás de los más importantes es el calentamiento global y el posible desabastecimiento de alimentos, producto de las actividades antrópicas que del ser humano realiza. Pues no es un secreto que debido a la contaminación de los suelos por el uso de agroquímicos se ha generado un desequilibrio en los aspectos físicos (erosión), químicos (déficit de nutrientes, acidez, salinidad, otros) y biológicos del suelo (deficiencia de materia orgánica) y microorganismos, lo cual han reducido la capacidad de producción de los suelos y por ende la reducción de cosechas.

Es por esto que se hace necesario realizar una revisión para identificar el potencial de la bioprospección para el desarrollo y aplicación de biocontroladores de patógenos, biofertilizantes y biorremediadores para contribuir con la sustentabilidad en las actividades agrícolas. Conocer todas estas alternativas que existen para realizar actividades que aporten soluciones a la situación medioambiental que cada vez es más preocupante, podrá garantizar un futuro sostenible con una mejor calidad de vida ya que se podrá controlar la liberación de compuestos contaminantes a cuerpos de agua, suelos y aire.

Hipótesis de investigación

Existe un trabajo de bioprospección desarrollado en el mundo y por diferentes sectores en Colombia que busca el aprovechamiento de la biodiversidad, con el fin de reducir la utilización de sustancias tóxicas en diferentes actividades industriales.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el desarrollo de la bioprospección microbiana aplicada a la Ingeniería Ambiental en torno a la agricultura en Colombia.

Objetivos específicos

Identificar el potencial de la bioprospección para el desarrollo y aplicación de biofungicidas, biofertilizantes y biorremediadores para contribuir con la sustentabilidad ambiental y agrícola, mediante la revisión de literatura indexada local e internacional

Revisar algunas técnicas de bioprospección con aplicaciones en agricultura.

Justificación

La bioprospección microbiana es definida como la búsqueda de microorganismos con características deseables que pueden ser empleados en diversas industrias con la intención de otorgarles un valor comercial a través de la elaboración de productos en sectores como cosmética, biotecnología, farmacéutica, medicina, alimentos y agricultura entre otros (Duarte & Velho, 2009). La bioprospección en general resulta esencial para descubrir, cultivar y aprovechar recursos naturales como plantas, animales y microorganismos obteniendo productos de alta calidad o contribuyendo a la solución de problemática ambientales.

En Colombia el sector agrícola es el renglón más importante de la economía, por lo tanto, cifras como la reducción del 11,2% en 2002 al 9% en 2016 reportadas por el DNP en el 2017 son preocupantes (Villanueva-Mejía, 2018). Además de esta reducción en la producción como resultado de muchos factores locales que afectan a los productores, existe una preocupación adicional frente al uso de agroquímicos para lograr cultivos productivos libres de plagas y enfermedades es bastante alto. Estas prácticas han causado el deterioro de los suelos por contaminación, salinización, exceso de extracción de agua, presencia y acumulación de residuos de agroquímicos y deterioro de la calidad de aire por volatilización de sustancias activas que generan un riesgo para la salud humana (Viglizzo & Frank, 2010). Los agroquímicos provocan la pérdida de biodiversidad microbiana en los suelos, afectando la actividad enzimática de los microorganismos para la metabolización de elementos como C, N, P, así como el control de microorganismos patógenos.

Teniendo en cuenta esta problemática se aborda el tema de bioprospección microbiana como parte fundamental de la solución en el sector agrícola mediante implementación de métodos de producción sostenible, donde se podrán atenuar los efectos negativos de la

agricultura sobre el medio ambiente. Los microorganismos benéficos empleados en la agricultura liberan como producto de su metabolismo moléculas que actúan en la descontaminación de los suelos, degradación de residuos contaminantes mejorando la estructura de los suelos promoviendo la fijación de nitrógeno, solubilizarían de fosfatos además de proteger los cultivos de plagas patógenos y enfermedades (Rodríguez, 2014).

La Bioprospección representa una herramienta que permite la sostenibilidad ambiental y de biodiversidad especialmente de recursos biológicos y genéticos. En Colombia la bioprospección microbiana ha tenido gran importancia en los sectores ambiental, industrial y veterinaria, desarrollando investigaciones sobre el potencial que tienen los microorganismos para ser empleados en bioprospección aplicada a la ingeniería ambiental para el control biológico, la biorremediación y demás técnicas como biocontrol, bioestimulación y bionutrición con aplicaciones en la industria para lograr cultivos más productivos, nutritivos y saludables (Carranza, 2017).

Es por esto que se hace necesario revisar el estado actual de la bioprospección en Colombia con el fin de determinar cuáles son los principales grupos de investigación en el área que podrían presentar alternativas para el mejoramiento de las prácticas agrícolas con el fin de reducir la contaminación ambiental. Así mismo realizar una revisión sobre las principales técnicas que se utilizan actualmente para la bioprospección y evaluación de las características metabólicas de los microorganismos que se obtienen de diferentes fuentes, con el fin de conocer sus posibles aplicaciones para reducir el impacto ambiental generado por sector agrícola.

Por lo tanto, en este documento presentarán los principales trabajos reportados sobre la aplicación de la bioprospección y los principales grupos de investigación a nivel nacional que realizan esta actividad tanto a nivel de institutos o de universidades. También se presentarán

algunas investigaciones internacionales en países como India, Estados Unidos, Reino Unido, China, Italia, Costa Rica, Brasil etc., siendo la India uno de los principales referentes en bioprospección a nivel mundial con más publicaciones en bioprospección.

Estas experiencias a nivel mundial han sido replicadas en diferentes estamentos en Colombia de estos países en materia bioprospección como la búsqueda de microorganismos con aplicaciones en biorremediación y recuperación de combustibles fósiles, servicios ambientales como recuperación de suelos, aire y agua, realizar estudios de bioprospección microbiana para la obtención de patentes de productos como alimentos, medicinas y productos a base de microorganismos con capacidades biorremediadoras que permitan el reemplazo de los agroquímicos por productos 100% orgánicos. Todo esto se ha realizado con el propósito de contribuir a la preservación del medio ambiente, mediante estas estrategias de mitigación de las cuales se pueden encontrar un sin número de estudios demostrando la importancia y la efectividad de la bioprospección como la principal alternativa para el cuidado, renovación y conservación de nuestro medio ambiente.

Marco referencial

Bioprospección

La bioprospección o prospección biológica es considerada como un proceso sistemático de búsqueda de genes, compuestos naturales, fragmentos u organismos enteros en la naturaleza que tengan el potencial para desarrollar un producto que beneficie al hombre (Oyemitan 2017). Específicamente, la bioprospección microbiana es definida como la búsqueda de microorganismos con características deseables que pueden ser empleados en diversas industrias con la intención de otorgarles un valor comercial a través de la elaboración de productos en sectores como cosmética, biotecnología, farmacéutica, medicina, alimentos y agricultura entre otros (Duarte & Velho, 2009).

También puede expresarse como la búsqueda de biodiversidad con el fin de obtener nuevos recursos con un valor comercial y social ofreciendo beneficios al sector de la industria y el medio ambiente (Beattie et al 2011). De la misma manera, ha sido definida como “la búsqueda sistemática, clasificación e investigación de nuevas fuentes de compuestos químicos, genes, proteínas y otros productos que poseen un valor económico actual o potencial, y que se encuentran en los componentes de la diversidad biológica” (Duarte, 2011). Según el autor esta actividad está basada en el acceso, caracterización, transformación de recursos biológicos y genéticos de forma que se propenda por la conservación de la biodiversidad.

La bioprospección en general resulta esencial para descubrir, cultivar y aprovechar recursos naturales como plantas, animales y microorganismos obteniendo productos de alta calidad o contribuyendo a la solución de problemática ambientales. Desde la política colombiana la bioprospección es entendida como “la exploración sistemática y sostenible de la biodiversidad para identificar y obtener nuevas fuentes de compuestos químicos, genes, proteínas,

microorganismos y otros productos que tienen potencial de ser aprovechados comercialmente (DNP, 2011).

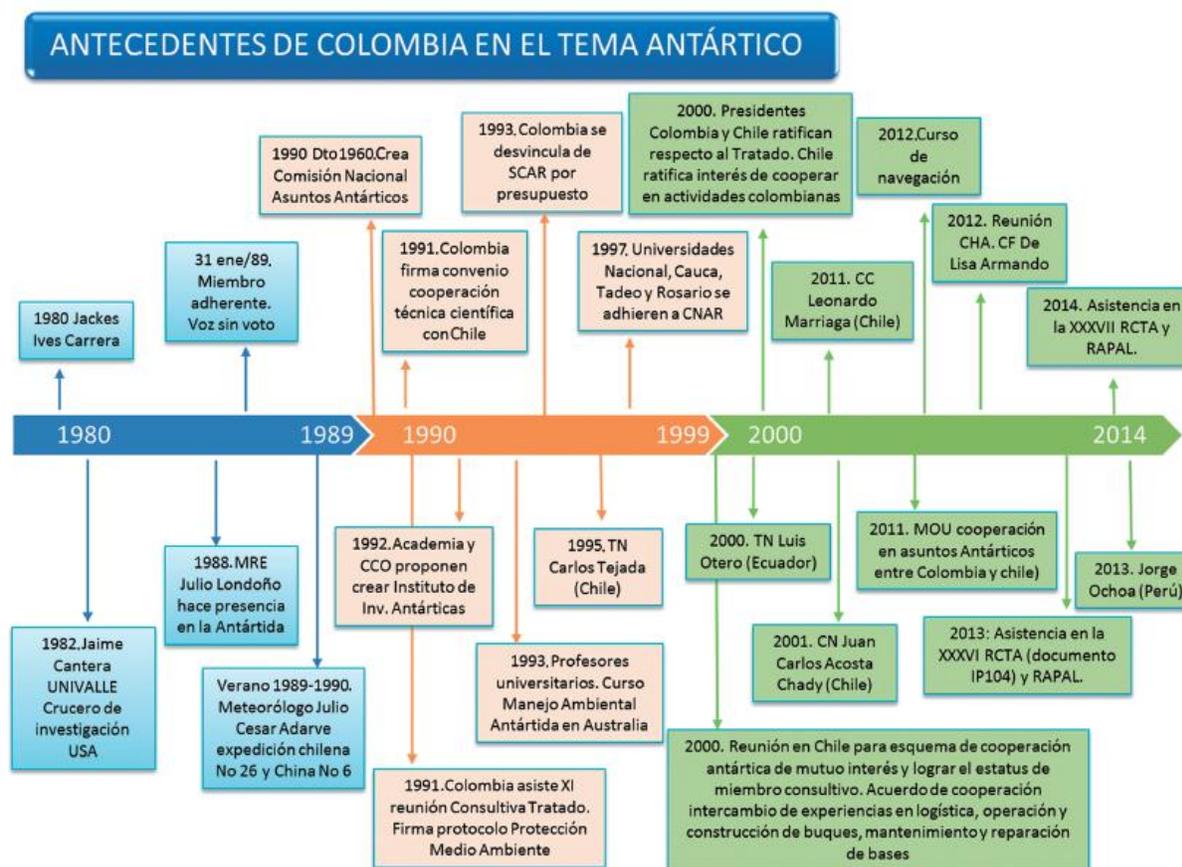
Debido al efecto que tiene la explotación de estos recursos para el bien de la humanidad, es importante aclarar que los asuntos dirigidos a la bioprospección se han abordado en tratados internacionales y acuerdos jurídicos destinados a controlar la biopiratería que consiste en la utilización de recursos sin la aprobación de los pueblos originarios en donde se encuentran obteniendo ganancias sin respetar los tratados internacionales (Beattie, et al 2011). El acceso a estos recursos genéticos representa un tema de desarrollo y conservación para la gran diversidad de microorganismos y fuentes naturales de moléculas útiles. Así mismo, el uso potencial de estos organismos y sus productos representa una alternativa para intervenir un mundo contaminado por el uso excesivo de productos químicos (Castree, 2003).

A nivel internacional se maneja primordialmente la bioprospección relacionada con metabolitos secundarios debido al impacto económico generado por la industria farmacéutica. Que incluye la búsqueda de genomas y componentes biológicos primarios como alimentos, fibras y protección de cultivos mediante la aplicación de insumos biológicos, entre otros de importancia económica y ambiental para la preservación de la condición de la vida de la Tierra (Melgarejo 2013). En países como en Sur África (Instituto Nacional de Botánica de Sur África en conjunto con la empresa estadounidense Ball), Costa Rica (INBio, Instituto Nacional de Biodiversidad), México donde se cuenta con dos grandes grupos de investigación como ICBG-Maya (Grupos Internacionales de Cooperación para la Biodiversidad) y FONCICYT (Fondo de Cooperación Internacional en Ciencia y Tecnología en Colombia), Invemar (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras), Colombia, Brasil, Ecuador, Perú, Argentina entre muchos otros países, se han dado a la tarea de explorar su biodiversidad genética con el fin de

realizar estudios que ofrezcan no solo un beneficio ambiental sino también una comercialización y elaboración de productos a partir de sus recurso genéticos (Rodríguez, 2019).

Colombia forma parte del grupo científico internacional que realiza estudios en la Antártica. Según la agenda científica propuesta en 2014, el país en este momento ya tendría su propia estación permanente de investigación lo que ocurrió en 2020 con la instalación de la estación geofísica liderada por la Universidad Nacional de Colombia. En el campo de la bioprospección, la Antártida es un lugar con grandes expectativas debido a que los microorganismos que allí viven han desarrollado condiciones únicas constituyendo un ecosistema exclusivo en el mundo.

Esto ha generado la necesidad de proteger la biodiversidad microbiana existente y a su vez explorar su biodiversidad. Por medio de la cooperación de varios países se ha podido demostrar el potencial biológico presente en esta parte del mundo lo que constituye para Colombia, un eventual origen de nuevos productos farmacéuticos, insumos agroindustriales, cosméticos y otros bioproductos, que pueden generar importantes ingresos económicos y soluciones ambientales para el país (Comité Técnico Nacional De Asuntos Antárticos 2014). En la figura 1 se observa la participación de Colombia en temas relacionados con la Antártica en un espacio de tiempo entre 1980 y el año 2014.

Figura 1.*Antecedentes de Colombia en el tema antártico*

Fuente: Agenda científica Antártica de Colombia 2014 -2035

En Colombia, los grupos de investigación especializados en bioprospección han realizado estudios enfocados en los principios bioactivos en vegetales, bacterias y organismos marinos. Así mismo se observan trabajos relacionados con el aislamiento de sustancias volátiles de vegetales y aceites esenciales vegetales, identificación y caracterización de hongos, control biológico de plagas y enfermedades agrícolas entre otros (Duarte & Velho, 2009). Aunque en el país la bioprospección microbiana es un tema relativamente nuevo aun, poco explorado y del cual se tiene poca información, es un tema de gran expansión y de grandes beneficios para el desarrollo económico y de sostenibilidad ambiental.

La bioprospección requiere de técnicas de exploración sostenible de la biodiversidad para identificar nuevas fuentes de compuestos químicos para el fortalecimiento y desarrollo de las diferentes industrias. Identificar y fortalecer las áreas de bioprospección microbiana, mediante la aprobación de medidas específicas de ciencia y tecnología que representan un potencial económico permitirá consolidar la biotecnología enfocada al sector agropecuario. En este sentido se podrán desarrollar sistemas de producción animal, bioproductos etc., asegurando la conservación biológica y microbiana del país. Este campo de la ciencia permite una producción agrícola a gran escala, con el propósito de aprovechar los beneficios que ofrece la bioprospección mediante desarrollos como la biorremediación (Cotes, 2011).

Algunos modelos de bioprospección exitosos y con logros en prácticamente todas las etapas de la bioprospección, ha sido con el café de Colombia. Este ha sido un trabajo investigativo desarrollado por Cenicafe con el apoyo de varias universidades nacionales e internacionales, la comunidad y apoyo gubernamental (Rodríguez et al 2013). En bioprospección aplicada en la producción de frutas, este el caso de la uchuva que según ASOHOFRUCOL (Asociación Hortofrutícola de Colombia) es la fruta de mayor exportación de Colombia.

Este cultivo ha sido afectado por el hongo *Fusarium* sp. y los microorganismos benéficos empleados como biofertilizantes y biocontroladores incrementaron el vigor y la fitosanidad de la planta controlando el hongo y aumentando la calidad organoléptica, nutricional y el potencial nutracéutico de la planta el cual es un descubrimiento prometedor que beneficiaría otros cultivos frutales como granadilla, pitahaya, maracuyá, flores y hortícolas etc. (Barrero et al 2012). Este tipo de adelantos son de gran importancia a nivel ambiental ya que al aplicar microorganismos en lugar de controladores químicos para hongos fitopatógenos se evita la liberación de posibles contaminantes para los alimentos, el suelo y los cuerpos de agua.

Con respecto a la investigación dedicada a la bioprospección desarrollada en Colombia, existen varios referentes cuyos trabajos han contribuido en la búsqueda de alternativas para la recuperación de zonas contaminadas por medio de prácticas de biorremediación y para reducción del empleo de agrotóxicos en el país. Teniendo en cuenta que la biomasa microbiana útil para diferentes actividades de importancia ambiental puede ser obtenida en diferentes espacios, la bioprospección marina ha sido una gran herramienta en esta búsqueda. En este sentido el INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés) ha sido el centro de investigación pionero en bioprospección de ambientes acuáticos. “El INVEMAR es un instituto de investigación vinculado al Ministerio de Ambiente y centro de investigación reconocido, que desarrolla proyectos de investigación básica y aplicada en Ciencias del mar” (INVEMAR. 2021), actualmente cuenta con 6 megaproyectos, dos en ejecución que están enfocados directamente en biorremediación de ambientes contaminados

Entre los grupos de investigación dedicados a este tema está el denominado “Estudios de aprovechamiento de Productos Naturales Marinos y Frutas de Colombia” (Universidad Nacional de Colombia. 2021), cuyas áreas de interés son los invertebrados marinos, corales, esponjas, algas, microorganismos y algunas especies de plantas todos obtenidos de ambientes marinos como fuentes de compuestos bioactivos. Este grupo cuenta con casi 30 proyectos a lo largo de su trayectoria relacionados con la búsqueda y aplicación de compuestos bioactivos para la industria cosmética y salud.

En la Universidad de la Sabana existe el “Grupo de investigación en bioprospección” que se enfoca en la “búsqueda, aislamiento, caracterización, evaluación y escalado a nivel industrial de genes, proteínas y metabolitos presentes en macro y microorganismos obtenidos en diferentes ambientes de Colombia” (Universidad de la Sabana, 2021). Este grupo cuenta con 11 proyectos

de investigación en ejecución actualmente con líneas dedicadas a la búsqueda de compuestos bioactivos y su modificación con potencial biológico e industrial.

El Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología (CIAB) de la Universidad Nacional, Abierta y a Distancia, la cual, según con la UNAD (2021), cuenta con una línea de investigación denominada Biotecnología agrícola y ambiental con sublíneas de biofertilización, bioprospección y biorremediación con 7 proyectos asociados a estos temas.

Colombia es uno de los países con mayor diversidad del planeta en especies de fauna, flora y microorganismos lo que representa una oportunidad para el fomento de investigación en el tema de bioprospección microbiana. Existen en el país estudios en el área de bioprospección de organismos marinos, animales, plantas en microorganismos y en ecología, aunque es de señalar que estos estudios son limitados pues como se menciona anteriormente hay poca información acerca del tema a nivel local, su utilidad y aprovechamiento (Invemar 2002).

Este tema de bioprospección microbiana requiere de gran atención por parte del gobierno e instituciones públicas y privadas con el fin de financiar proyectos de investigación, para la búsqueda selección y aprovechamiento de microorganismos benéficos, con el propósito de dar solución a problemáticas ambientales como la contaminación de suelos por agroquímicos y fertilizante en agricultura. Lo anterior con el fin de brindar posibles soluciones en diferentes campos como la medicina y la veterinaria (Bernal, 2019).

Existen numerosos estudios de bioprospección en Colombia, sin embargo, al filtrar esta información, se observa que los estudios enfocados al área medio ambiental son pocos en comparación con los estudios realizados en temas relacionados con la salud.

En la tabla 1 se presentan algunos proyectos de bioprospección enfocados a ofrecer soluciones al medio ambiente desarrollados en el país.

Tabla 1.

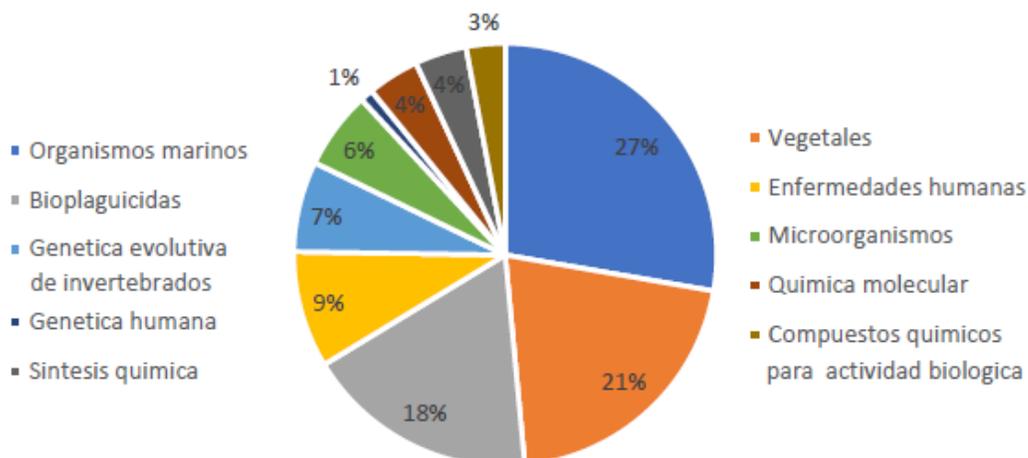
Principales proyectos de los grupos de investigación reconocidos en bioprospección

Grupo de investigación	Proyecto
Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología (CIAB) - UNAD	Hongos micorrizicos arbusculares asociados a la rizosfera de Naidi (<i>Euterpe oleracea</i>) y su relación con absorción de fosforo en el pacífico colombiano”
	Herramientas biotecnológicas en el manejo ambiental de la rizosfera de plántulas de aguacate
Invemar	Estudio técnico ambiental en áreas de interés del caribe y pacífico colombiano como apoyo al crecimiento sostenible del sector de hidrocarburos costa afuera - Fase 2021
	Acciones para la recuperación ambiental territorial de la zona costera del departamento de Córdoba
	Investigación científica hacia la generación de información y conocimiento de las zonas marinas y costeras de interés de la nación
Facultad de Ingeniería Química de la Universidad EAN	Bioprospección del cáñamo soportada en procesos verdes para la industria colombiana
Fondo de Investigaciones del Comité de Investigaciones y Postgrado Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes	Evaluación preliminar de las bacterias reductoras de mercurio mercúrico en un suelo contaminado con hidrocarburos
	Caracterización De Genes chrA y chrB y proteínas ChrA y ChrB En Bacterias Nativas Resistentes A Cromo Hexavalente.

En la figura 2 se observan las principales áreas de estudio en las cuales se desarrolló la bioprospección en Colombia hasta el 2009.

Figura 2.

Investigaciones en bioprospección desarrolladas en Colombia hasta el 2009

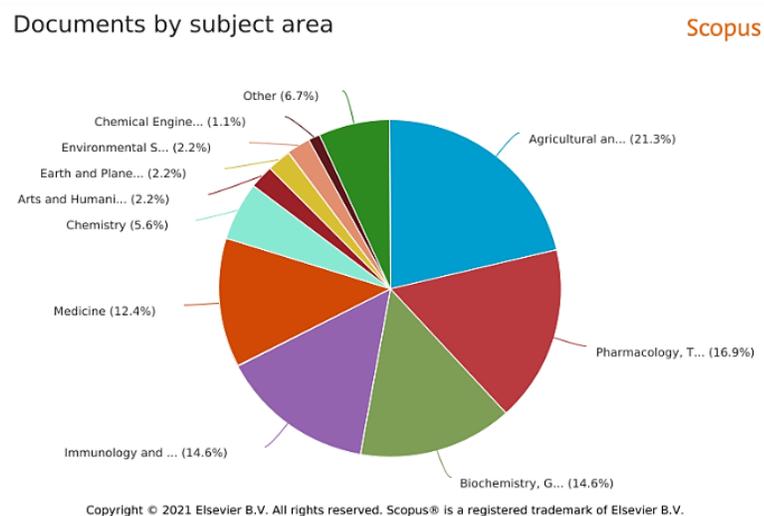
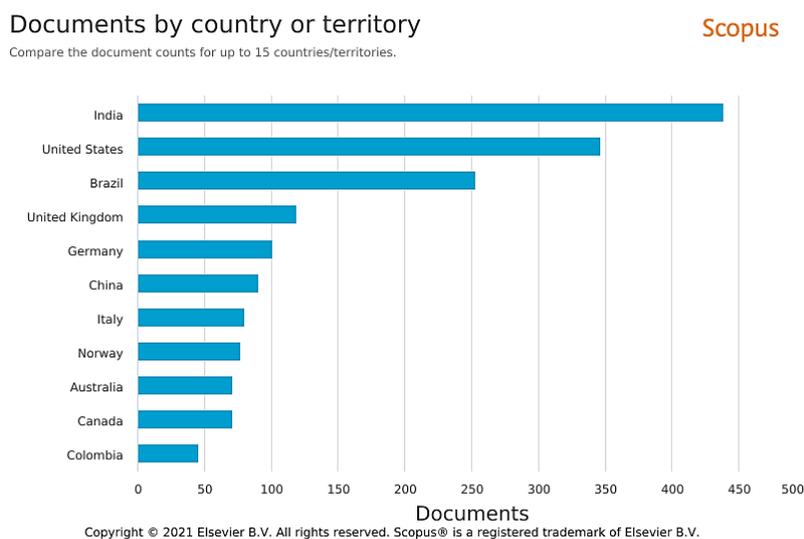


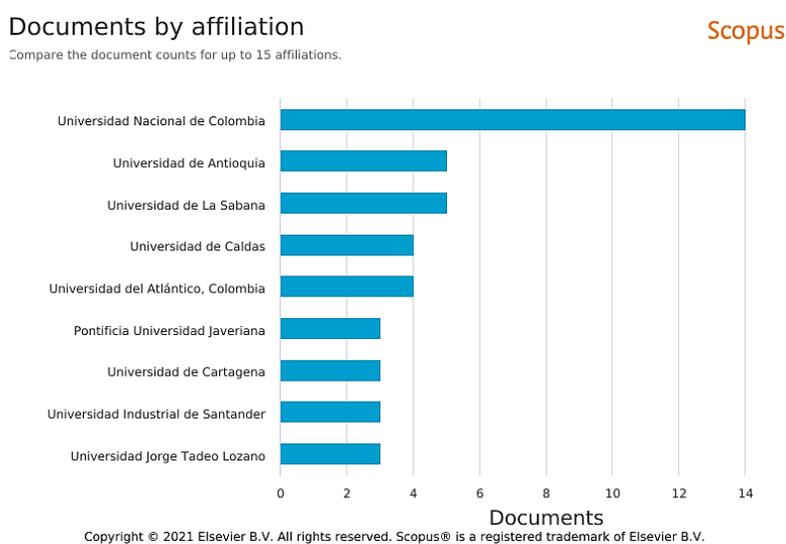
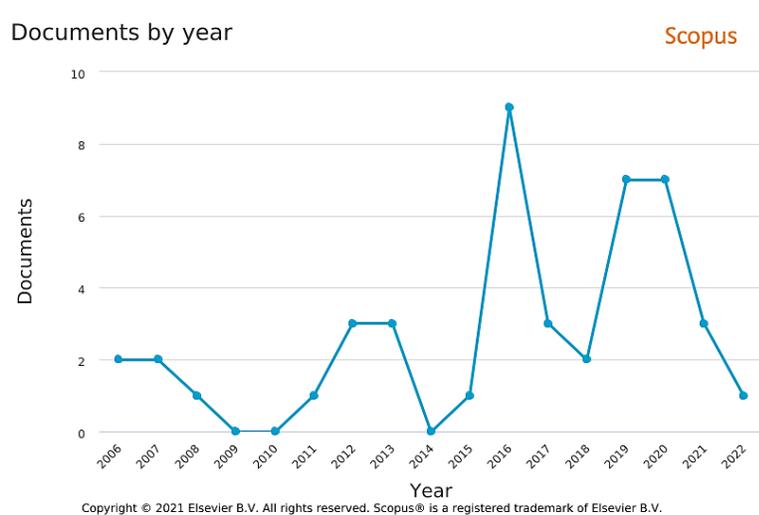
Fuente: Bernal (2018)

Al contrastar con datos más recientes se observa que según Scopus a nivel mundial existen aproximadamente 2022 publicaciones que incluyen el tema de bioprospección. De estos, 45 fueron realizados en Colombia y se encuentran registros desde 2006 (figura 3). Se observa a su vez que se conservan las mismas áreas de interés. También se puede observar las entidades pioneras en estas publicaciones como la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Antioquia.

Figura 3.

Análisis de los resultados de búsqueda de publicaciones sobre bioprospección en el recurso electrónico Scopus





Fuente: Scopus (2021).

En el mundo, la bioprospección microbiana ofrece una alternativa sostenible y amigable con el medio ambiente ofreciendo más servicios benéficos que contraproducentes. Por lo anterior, se posiciona cómo la ciencia del futuro pues los campos de aplicación son diversos y ofrecen mayores ganancias con bajos costos de inversión. Los países pioneros en el tema de bioprospección son India, estados Unidos, Brasil y Reino Unido, los cuales tiene el mayor número de publicaciones sobre este tema.

La India como país pionero en bioprospección, cuenta con un gran grupo de investigadores establecido por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI) en 2001. Este equipo llevó a cabo una búsqueda en las bases de datos de patentes encontrando más de 5000 referencias de patentes relativas a 90 medicamentos de origen vegetal sólo en la Oficina de Patentes y Marcas de los Estados Unidos. 80 por ciento de las patentes relacionadas con estas 90 plantas medicinales vinieron de siete plantas, las cuales eran de origen indio. Ese país también cuenta con recursos fitogenéticos para la alimentación y agricultura, incluyendo el desarrollo de variedades modificadas genéticamente utilizadas por las agroempresas (Kabir & Morten 2015).

En un estudio de bioprospección realizado en la India sobre el potencial de microorganismos en la metabolización de hidrocarburos mediante la biorremediación de sitios contaminados por petróleo, se evaluó el efecto de las actividades microbianas para la recuperación del terreno afectado por derrames de petróleo con bacterias degradadoras de sulfatos. Las bacterias capaces de utilizar el petróleo son conocidas como reductoras de azufre SO_4 toman como fuente de oxígeno el azufre o azufre elemental, mediante un proceso de respiración anaerobia. Estas bacterias son extremófilas halófilas, barófilas y termófilas, según las condiciones físico-químicas in situ como salinidad, presión y temperatura respectivamente. Bacterias del género *Geobacillus* sp. son termófilas microanaerobias que pueden degradar alcanos estrictamente en condiciones tóxicas o reducir nitratos en condiciones anóxicas.

En otro estudio se analizó el comportamiento de *Deferribacter thermophilus* aislada de campos de petróleo de Mar del Norte (Reino Unido), encontrando que era una bacteria termófila reductora de Fe y Mn. Esta bacteria puede utilizar diversos sustratos como el lactato, acetato, triptona, peptona e hidrógeno como fuente de energía. Otra cepa anaerobia facultativa *Shewanella putrefaciens* aislada de un campo de petróleo ha sido muy bien caracterizada por su

propiedad reductora de azufre y hierro. Se ha establecido que la naturaleza de los sitios en donde se realiza la bioprospección, como por ejemplo un depósito de aceite, juega un papel fundamental en la supervivencia y crecimiento de microorganismos nativos, ya que estos pueden adaptarse a nichos específicos y controlar las características y funciones de los reservorios. Con el propósito de establecer técnicas para la recuperación de lugares afectados por aceites se han utilizado sistemas microbianos capaces transformar por reacciones catalizadas por enzimas en depósitos de petróleo para lograr la recuperación de ese tipo de sistemas y de reducir las actividades de perforación (Singh, & Choudhary 2021).

Técnicas de bioprospección

El proceso de aprovechamiento de los recursos naturales por medio de bioprospección microbiana requiere de métodos y técnicas que permiten una producción a gran escala. Sin embargo, estos recursos genéticos deben ser explotados con moderación garantizando la preservación de biodiversidad microbiana presentes en el territorio. La bioprospección involucra actividades de investigación, interacciones y procesos para garantizar el mantenimiento de los microorganismos, en las poblaciones naturales y de los ecosistemas sobre los que se ejerce mayor presión, bien sea por causas naturales o antrópicas.

Para la búsqueda y estudio de microorganismos se emplean técnicas microbiológicas convencionales como el aislamiento en medios de cultivo, gota aplastada, tinción simple y tinción de Gram y pruebas bioquímicas. Existen métodos de mayor alcance como las técnicas de biología molecular y cromatografía. Estas técnicas permiten el estudio y clasificación de los microorganismos con el fin de saber cuál puede ser su aplicación en la industria (Melgarejo, 2002).

A continuación, se mencionan algunas de las técnicas utilizadas en el estudio de la biodiversidad microbiana:

Técnicas microbiológicas convencionales. Siembra en medios de cultivo: existe un gran número de microorganismos procedentes de diferentes ambientes que se pueden cultivar y estudiar mediante el uso de técnicas convencionales. Para esto, se utilizan diferentes medios de cultivo desarrollados por casa comerciales que son considerados como la combinación de nutrientes que permite el desarrollo y multiplicación de una población microbiana. Los componentes de estos medios varían de acuerdo con el tipo de microorganismo a estudiar. Adicionalmente, en esta técnica se debe tener en cuenta factores como humedad, pH y temperatura, entre otras condiciones esenciales para el desarrollo de los microorganismos (Madigan, 2015).

Los medios pueden ser líquidos, sólidos o semisólidos (figura 4) y cumplen con los requerimientos nutricionales necesarios para el crecimiento de los microorganismos que se quieran estudiar.

Figura 4.

Siembras en medios de cultivo en los procesos de bioprospección microbiana



Fuente: Elaboración propia.

Entre los medios de cultivo se tienen tres grupos principales y se presentan algunos ejemplos en la tabla 2.

Tabla 2.

Ejemplos de los principales tipos de medios de cultivo

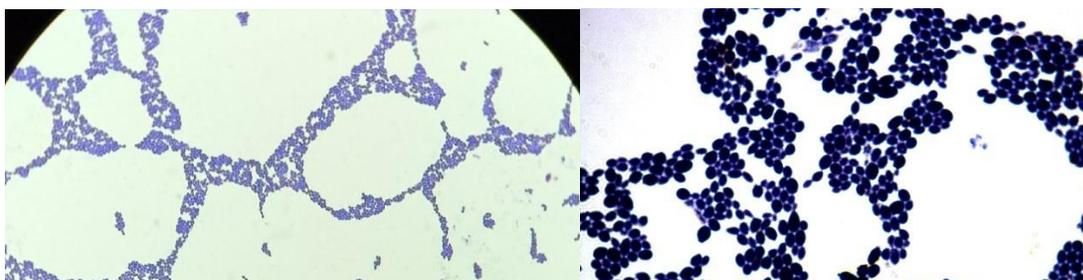
Simples	Enriquecido	Selectivos y diferenciales
Agar PDA (Potato, Dextrosa Agar)	Agar Chocolate	Agar EMB (Eosina Azul de Metilo)
Agar SPC (Standard plate count)	Medio de Tioglicolato	Agar o caldo MRS (de Man, Rogosa y Sharpe)
Agar base Sangre	Agar MacConkey	Agar citrato
Agar o caldo nutritivo	Agar Sabouraud Agar Baird Parker	Agar urea

Fuente: Madigan, (2015).

Tinción de Gram: es uno de los métodos de coloración más importantes en bacterias, donde se emplean una solución de colorantes y disolventes. Comúnmente se realiza con cultivos jóvenes (de 12 a 18 horas) que para las bacterias más comunes es el momento en que están en fase exponencial de crecimiento y se pueden ver sus características morfológicas básicas (Sanz, 2011). De acuerdo a la coloración se clasifican en Gram positivas (moradas) y Gram negativas (rosadas) y por su morfología en cocos, bacilos y espirales (Madigan 2015). Esta coloración también permite observar otros microorganismos al microscopio como las levaduras (figura 5).

Figura 5.

Microorganismos vistos en el microscopio



Nota: Izquierda: bacterias Gram positivas; derecha: levaduras (100x)

Fuente: Elaboración propia.

Pruebas bioquímicas: Son pruebas útiles para determinar una actividad metabólica. Estas pruebas se realizan mediante la incorporación de un sustrato al cultivo y se observa si la bacteria lo modifica o no, también se utilizan los cultivos frescos. Se requiere realizar controles con bacterias conocidas que sirvan como fuente de referencia (Rojas, 2011). Actualmente es posible encontrar kits de diferentes casas comerciales en donde se pueden realizar este tipo de caracterizaciones metabólicas de microorganismos (figura 6).

Figura 6.

Kits para pruebas bioquímicas de bacterias acidolácticas (API CH 50 Biomerieux®)



Fuente: Elaboración propia.

Pruebas moleculares

PCR (Polimerase Chain Reaction): Esta es una técnica utilizada en laboratorio para amplificar secuencias de ADN, es eficaz ya que puede realizar millones de copias del ADN de un organismo en pocas horas. Esta es una herramienta diagnóstica de sensibilidad y rapidez, aplicada desde hace mucho tiempo en medicina. Ahora empleada en bioprospección para la identificación de microorganismos promisorios y sus rasgos genéticos con utilidad en la agricultura. (Bolívar, Rojas & García, 2014). Para esta técnica se necesita obtener el ADN total del microorganismo de interés. Para la amplificación, un par de iniciadores que permitan la copia de un segmento específico del ADN, los nucleótidos que serán las unidades básicas para formar las moléculas de DNA y la enzima polimerasa entre otras. Se precisa de equipos como termociclador, cámara de electroforesis, secuenciador, etc.

Figura 7.

Amplificación de ADN con la técnica de PCR



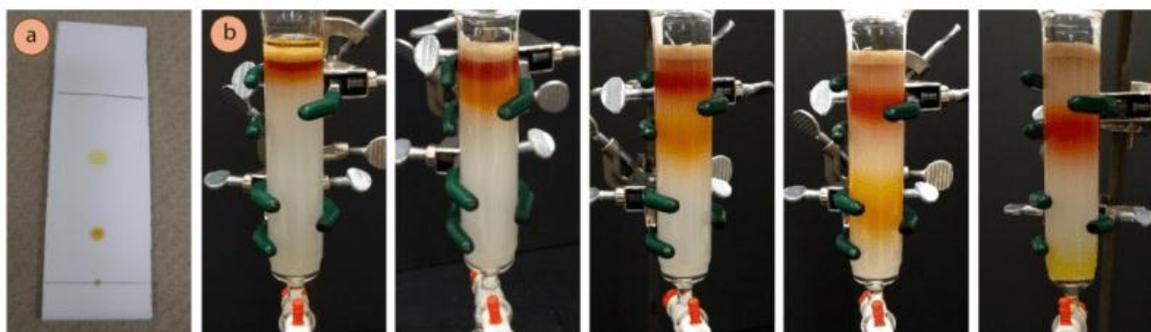
Fuente: Hinton (2018).

PCR en tiempo real: Esta técnica permite detectar y cuantificar a los ácidos nucleicos usando un sistema cuantitativo en tiempo real. Presenta ventajas de tiempo y costos frente a la PCR de punto final.

Cromatografía: Este es un método que permite la separación, identificación y determinación de los componentes químicos en mezclas complejas. Abarcando varias técnicas separativas, basadas en las propiedades físicas de los compuestos y microorganismos (Sgariglia et al., 2010). Es útil para conocer metabolitos producidos por microorganismos con el fin de encontrar potenciales aplicaciones.

Figura 8.

Ejemplos de tipos de cromatografía



Nota: a) En capa fina, b) en columna.

Fuente: Químicafacil.net (2020).

Separación por cromatografía en capa fina o TLC: Técnica en la que los compuestos son separados a través de una fase líquida o sólida. Cuenta con una fase estacionaria que se aplica en forma de capa delgada, absorbente que generalmente está entre 0,10 a 0,25 mm de espesor en los casos en que se quiere aislar un compuesto. Esta capa delgada se puede encontrar fija a una placa de vidrio, aluminio o plástico que sirve como soporte. A través de la fase estacionaria circula un líquido o solvente denominado fase móvil o eluyente.

Cromatografía líquida (LC): Es una de las técnicas de cromatografía más utilizadas debido a su capacidad de separar analitos de distinta naturaleza presentes en una mezcla. Su aplicación industrial abarca la farmacéutica, la bioquímica, los alimentos, los productos de la industria química. En esta técnica intervienen dos fases (móvil y estacionaria) en la muestra de interés. La fase móvil es líquida y su función es llevar la muestra a través de la fase estacionaria, que puede ser sólida o una película líquida soportada en un sólido inerte.

Cromatografía de gases: Es la técnica más empleada de separación y análisis de compuestos volátiles, por su exactitud, ya que permite la separación e identificación de mezclas complejas siendo una limitante de la técnica la estabilidad térmica de la muestra y algunos compuestos como los medicamentos por su elevado peso molecular (Pérez, 2014).

Técnicas de “screening”. Es un grupo de técnicas de análisis aplicadas a los microorganismos encontrados en procesos de bioprospección con el fin de determinar sus características y aplicaciones. Algunos ejemplos pueden ser: actividad antimicrobiana, fijación de nitrógeno y otros elementos de importancia en agricultura y otros rasgos como la viabilidad y metabolización de metales (Fang et al. 2016).

Actividad antimicrobiana: Esta prueba se realiza con microorganismos patógenos que son previamente aislados y mantenidos en congeladores para conservar su viabilidad. Estos

microorganismos se activan y se dejan a una concentración final de células 1×10^6 /ml y se siembran en las cajas de Petri con agar para realizar un método conocido como difusión en agar.

Se inocula un volumen específico de células 1×10^8 /ml de cultivo de las cepas aisladas en el centro de las placas previamente sembradas con el patógenos. Estas cajas se incuban a 28 o 37o C (según el microorganismo que se esté evaluando) durante 3 o más días antes de que se mida el halo transparente que rodea a la cepa aislada. Este halo representa la inhibición de patógeno que se sembró inicialmente. Se registra el crecimiento y diámetro de la zona de inhibición (mm) del patógeno.

Se puede decir que la capacidad antimicrobiana es el control biológico que ejercen cierto tipo de microorganismos que consiste en inhibir el crecimiento y aumento de una población bacteriana. Esta característica es bastante apreciable en agricultura ya que estos microorganismos son capaces de eliminar patógenos potenciales que pueden causar enfermedades en cultivos. Existen varios trabajos de investigación en los que se asegura que se deben buscar estrategias más amigables con el medio ambiente para favorecer la producción agrícola en el mundo. Las rizobacterias (PGPR) es decir las bacterias que se encuentran en la región adyacente a las raíces de las plantas pueden promover el crecimiento vegetal a través de su actividad biológica. Su aplicación para el crecimiento de los cultivos permite obtener productos de manera sostenible (Zhou et al. 2021).

Fijación de nitrógeno: El nitrógeno es un componente esencial en el crecimiento y desarrollo de las plantas, este tipo de compuestos se halla de manera natural en el aire y en el suelo en forma de nitratos, Sin embargo, la deficiencia de nitrógeno puede afectar el rendimiento de los cultivos (Lamb et al. 2014). Para este tipo de análisis las bacterias endofíticas se evalúan determinando la actividad nitrogenasa de las bacterias mediante la reducción de acetileno. En

este ensayo se utilizan tubos de vidrio con 9 ml de cultivo semisólido de NFA (nitrógeno fácilmente asimilable). La atmósfera en el tubo tapado se sustituye por 10 % de acetileno (v/v) incubado a 30 oC durante 24 h. La formación de etileno se mide por cromatografía de gases. La actividad nitrogenasa se calcula en la unidad nmol C₂H₄/mg proteína/h (Hongrattipun et al. 2014).

Solubilización de fosforo: Con el propósito de disminuir la aplicación de fertilizantes en cultivos, se buscan estrategias para reemplazar el uso de agroquímicos por métodos más seguros y amigables con la salud y el medio ambiente (Corrales et al. 2014). Este tipo de análisis se realiza con técnica de siembra en placas con agar nutritivo, agar B de King, agar triptona de soja. Posteriormente los aislamientos se analizan en Agar Pikovskaya utilizando sustratos insolubles de fósforo, incluyendo fosfato de roca, apatita y fosfato tricálcico. En el agar se observan halos que representan las zonas de solubilización de fosforo (Kour et al. 2014).

Algunas aplicaciones de la bioprospección con efecto positivo en el medio ambiente

Como se ha mencionado, la agricultura es una actividad de gran relevancia no solo en el país si no en el mundo. Esto obedece a que si bien es la actividad que provee de alimento a las poblaciones, también contribuye de gran manera a la contaminación ambiental. Es por esto que con el fin de cuidar, proteger y generar un desarrollo verde se ha buscado la aplicación de microorganismos benéficos que contribuyen a mejorar la producción y control de plagas de los cultivos. En ese sentido, varios grupos de investigación han aislado, identificado y probado microorganismos como elementos benéficos para la agricultura. Por ejemplo, en la Universidad Militar Nueva Granada se cuenta con cerca de 120 aislamientos de rizobacterias (*Pseudomonas*), cinco con potencial biocontrolador contra *Fusarium oxysporum*.

De otra parte, en Corpoica se cuenta con una colección de 303 hongos filamentosos y 249 levaduras con potencial biocontrolador de insectos plaga y de fitopatógenos del suelo, foliares y de postcosecha y con una colección de 45 bacterias y cinco micorrizas evaluadas con potencial biofertilizante (Barrero et al 2012). El descubrimiento de estos biocontroladores y biorremediadores no solo representa una alternativa para los agricultores en el aumento y utilidad de sus cultivos si no que se ve reflejado en la reducción de sus costos de producción, significando el camino a una agricultura verde, ya que a través de la aplicación de estos microorganismos podemos pensar en recuperar la salud del entorno ambiental.

La bioprospección involucra actividades de investigación para un desarrollo económico y sustentable para el sector rural, aportando soluciones en seguridad alimentaria favoreciendo las cadenas de mercados nacionales y de exportación en productos como el café, el cacao y la guayaba brindando productos libres de químicos y de excelente calidad. Estrategias de

biotecnología que representan nuevas oportunidades de expansión y negocios en mercados internacionales (Melgarejo, 2012).

Una vez obtenidos los microorganismos, es importante realizar su identificación, ya que permite contar con un registro detallado de los diferentes tipos de microorganismos presentes en cada zona del territorio nacional. Con estos especímenes, se hace necesario desarrollar un banco de microorganismos para ser estudiados y posteriormente ser introducidos como la alternativa más viable para generar procesos industriales y agroindustriales sostenibles. Este sitio de almacenamiento garantiza la conservación de los microorganismos teniendo en cuenta la importancia que estos recursos biológicos tienen y toda la información genética que contienen. Lo anterior con el fin de fortalecer su hábitat ya que al determinar las áreas con mayor diversidad microbiana se podrán desarrollar estrategias de conservación o de exploración generando así una mayor importancia económica de la zona (Flórez, 2001).

Colombia cuenta con diferentes bancos de germoplasma, el principal está ubicado en la Corporación colombiana de investigación agropecuaria (AGROSAVIA). Otras entidades como el Instituto colombiano agropecuario (ICA), la Pontificia Universidad Javeriana, el Instituto de biotecnología de la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Humboldt también cuentan con colecciones de gran interés a nivel nacional. En Colombia estos bancos se dividen en tres subsistemas animal, vegetal y microorganismos. El Instituto Humboldt está vinculado al ministerio de medio ambiente y es el ente regulador para la conservación de la diversidad genética de distintas especies. Los recursos genéticos son propiedad del Estado colombiano, son inalienables, imprescriptibles e inembargables y el acceso a estos en forma de genes y productos derivados está regulado por la Decisión Andina 391 llamada Régimen Común sobre Acceso a los Recursos Genéticos, donde también son miembros (Perú, Ecuador y Bolivia).

El documento de la decisión andina 391 plantea que la comunidad andina debe garantizar una participación justa y equitativa de los beneficios derivados del uso de los recursos y el conocimiento tradicional asociado. Sentar las bases para el reconocimiento y valoración de recursos genéticos y sus productos derivados. Promover la conservación de la diversidad y el desarrollo de capacidades científicas, tecnológicas y técnicas. Fortalecer la capacidad negociadora de los países miembros (Ministerio de medio Ambiente)

Para evitar la biopiratería (acceso o uso ilegal de los recursos genéticos) Colombia protege su potencial genético a través de la legislación. El Instituto Humboldt se encarga de promover, coordinar y realizar investigación sobre la conservación y el uso sostenible de la biodiversidad, conformación del inventario nacional de la biodiversidad, facilitar la gestión eficiente y permanente de información sobre biodiversidad que sea útil para los procesos de análisis de la información y la generación de productos de información para la toma de decisiones y definición de políticas relacionadas con las actividades de acceso y aprovechamiento a los recursos genéticos en Colombia. A continuación, se lista la normatividad relacionada con el acceso a recursos genéticos en el país:

Decreto 2811 de 1974.

Constitución Política de 1991

Ley 99 de 1993

Decisión Andina de 391 de 1996

Decreto 3570 de 2011

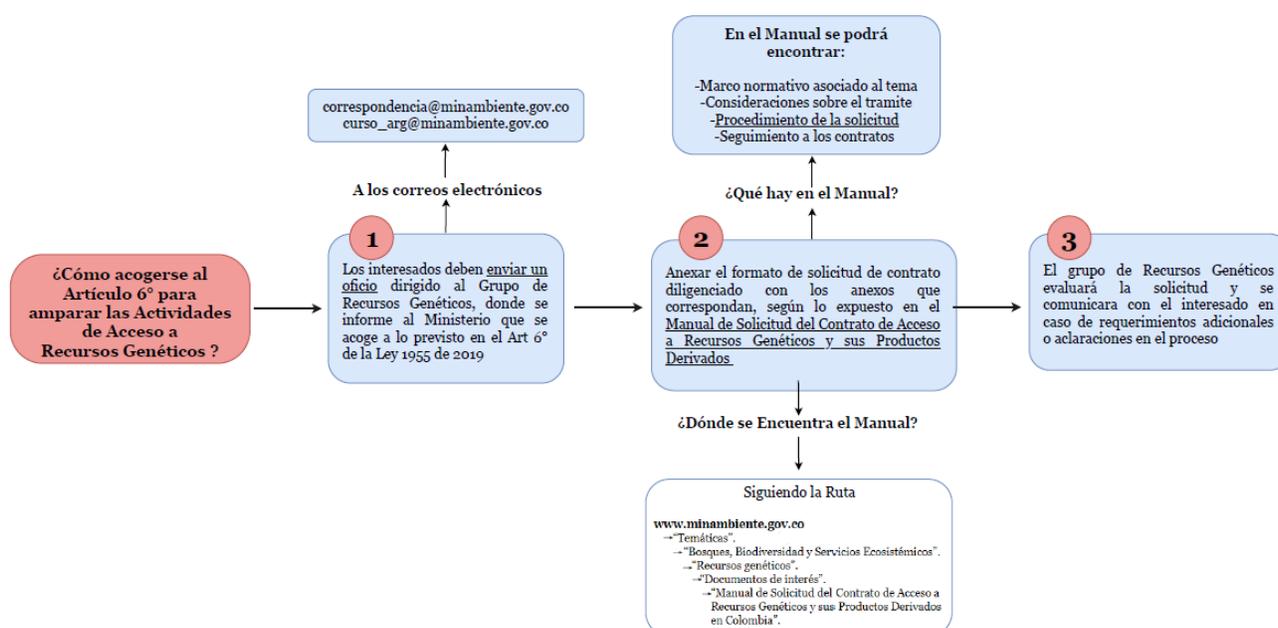
Decreto 1375 y 1376 de 2013

Resolución 1348 de 2014

El plan de desarrollo de 2018 - 2022 del Ministerio de medio Ambiente describe la ruta del proceso que se debe seguir para llevar a cabo un contrato de acceso a recursos genéticos cuando de los procesos de bioprospección se deriva algún producto con interés económico (figura 9).

Figura 9.

Contrato de acceso a recursos genéticos y/o productos derivados



Fuente: Plan de desarrollo 2018- 2022 Ministerio de medio ambiente.

Biorremediación

La contaminación ambiental como producto del inadecuado y excesivo uso de agroquímicos y fertilizantes es una problemática que debe importarle a la humanidad. Para lograr que el mundo garantice una seguridad alimentaria, se ha hecho necesario el uso de fertilizantes y agroquímicos, con el fin de garantizar la buena producción de los cultivos y poder cumplir con la demanda que hay. Desafortunadamente, muchas de las personas no saben de la cantidad de

agroquímicos que son empleados para lograr llevar a buen término los cultivos de verduras, frutas y hortalizas. Es decir, que sin darnos cuenta también estamos ingiriendo pequeñas cantidades de veneno que, si bien al momento de la ingesta no nos afectan, las consecuencias pueden darse a largo plazo.

La biorremediación se convierte en una estrategia, orientada a resolver, mitigar y prevenir problemas de carácter ambiental, producto de las diferentes actividades antrópicas. Esta tecnología de bajo costo económico emplea la capacidad catabólica de los microorganismos y sus enzimas para descontaminar o recuperar un ambiente alterado por sustancia contaminantes. Donde se emplean técnicas como bioestimulación y bioamentación. La biorremediación representa una técnica biológica que se emplea en condiciones ambientales naturales y la cual garantiza un proceso de descontaminación y recuperación de suelos, recibiendo un beneficio económico, social y de sostenibilidad ambiental (Senthil et al 2017).

Metales pesados

La contaminación ambiental, se convierte en un factor preocupante desde el punto de vista científico y moral, pues nuestros recursos naturales como el agua aire y suelo se están viendo afectados por la contaminación con metales pesados como mercurio (Hg), arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr) producto de actividades como la agricultura y la minería. Estos metales se pueden encontrar a su vez en diferentes concentraciones en peces, carnes y leche y hortalizas como resultado de la bio-acumulación, poniendo en riesgo no solo la salud humana sino también la seguridad alimentaria y el medio ambiente (Reyes et al 2016).

El cadmio es un metal pesado que se halla de manera natural en el suelo, pero también es introducido al medio de manera antropogénica a través de fertilizantes fosfatados, aumentando la

carga normal del mineral. Esto ocasiona efectos tóxicos sobre la salud de los seres humanos, plantas y animales. Una vez que el cadmio es absorbido por el cuerpo, este se aloja en órganos vitales como los riñones y el hígado pudiendo durar varios años en el organismo (Kumar et al. (2018). Al cadmio se le reconoce como uno de los metales pesados con mayor tendencia a acumularse en las plantas causando severos desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte de agua. La favorabilidad de acumulación de cadmio en las plantas ha llevado a considerarlas como potenciales candidatos para tareas de biorremediación de este metal. En Colombia en las últimas décadas los estudios de calidad de agua han mostrado un incremento de metales pesados debido al incremento de la población en sus riberas, la industrialización y actividades de minería.

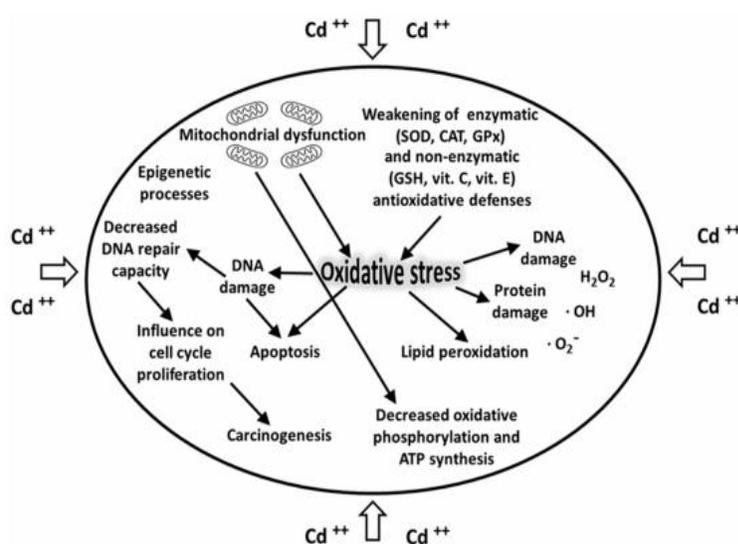
Durante el año 2013 en Colombia se realizaron 169 muestreos para cadmio y 180 de cromo y plomo (IDEAM, 2014). Según el reporte las concentraciones más altas registradas se dieron en los ríos Negro, Bogotá, Cararé, Marmato, Cauca la Pintada, Achi y Pinillos. Las cuencas de los ríos juegan un papel fundamental en la agricultura debido a que esta agua es empleada para regadío de los cultivos, lo que promueve la movilidad y retención de metales pesados en suelos y plantas como hortalizas de consumo humano (Reyes et al. 2016). El cadmio es considerado un compuesto altamente tóxico en los seres humanos y su contenido en el organismo depende de factores como el sexo, la edad y la absorción del xenobiótico y el estado de salud de los afectados (Flores et al. 2013).

La figura 10, muestra el efecto del cadmio en la salud que se caracteriza principalmente por el estrés oxidativo que causa. Este metal actúa sobre las mitocondrias, generando la producción de moléculas reactivas de oxígeno (que normalmente están controladas por mecanismos enzimáticos y no enzimáticos) que activan la apoptosis en las células, mutaciones

del DNA, alteración de la expresión génica, inhibición de fases de la respiración celular, reducción de la síntesis de ATP y alteraciones de la permeabilidad de la membrana de la mitocondria. Adicionalmente se genera el daño de macromoléculas de proteínas, lípidos y ADN lo que influye en el ciclo celular y estimula la carcinogénesis (Genchi et al. 2020).

Figura 10.

Efecto del cadmio sobre el organismo.



Fuente: Genchi *et al.* (2020).

En el caso particular del cadmio (CD) y el plomo (PB), son metales pesados que pueden ser absorbidos por las hortalizas y verduras que a diario se consumen. Estos elementos no son asimilados por el cuerpo, así que tienden a alojarse en el organismo ocasionando problemas cardiovasculares, hepáticos y renales. Esta situación convierte a estos metales pesados en un potencial precursor del cáncer según lo señala la Agencia Internacional para Investigación sobre el cáncer (IARC) originando un gran problema de salud en muchos países. Estudios realizados por la Universidad Federal de Canzas en 2016 con especies de lactobacilos como *Lactobacillus amylovorus*, *L. reuteri* y *L. dextrinicus*. demostraron ser eficientes en la descontaminación de

lodos con CD y PB convirtiéndose en una posible solución a la descontaminación de estos metales pesados en alimentos y agua (Kirillova et al. 2017).

Esta problemática global ha hecho que se busquen nuevas alternativas para la producción agrícola, ofreciendo una sostenibilidad ambiental, agrícola y económica viable, con técnicas de bioprospección que permiten lograr mejores resultados en el sector agrícola sin afectar el medio ambiente y ofreciendo una mayor rentabilidad económica. Teniendo en cuenta que la contaminación por metales pesados en suelos, alimentos y fuentes de agua es una preocupación mundial y que los procesos de descontaminación pueden llegar a generar grandes costos, la biorremediación es una alternativa económica y sostenible (Yadat et al. 2017). Debido a esto, existen varios trabajos en los que se han utilizado diferentes especies de bacterias en busca de remediar la contaminación por diferentes tipos de metales. En la tabla 3 se muestran algunas de las bacterias en las que se ha comprobado la capacidad para degradar metales pesados.

Tabla 3.

Ejemplos de bacterias utilizadas para la remediación de metales pesados

Metal pesado	Potenciales bacterias
Cadmio – Cd	<i>Aeromonas caviae</i>
	<i>Alcaligenes eutrophus</i>
	<i>Ochrobactrum anthrop</i>
	<i>Sphingomonas paucimobilis</i>
	<i>Staphylococcus xylosus</i>
Plomo – Pb	<i>Streptomyces pimprina</i>
	<i>Bacillus firmus</i>
	<i>Escherichia coli</i>
	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
	<i>Pseudomonas putida</i>
Cromo – Cr (IV)	<i>Corynebacterium glutamicum</i>
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	<i>Aeromonas caviae</i>
Níquel – Ni	<i>Bacillus coagulans</i>
Hierro – Fe	<i>Bacillus licheniformis</i>
	<i>Bacillus thuringiensis</i>
	<i>Streptomyces rimosus</i>

Zinc – Zn	<i>Bacillus firmus</i> <i>Escherichia coli</i> <i>Pseudomonas fluorescens</i> <i>Streptoverticillium cinnamoneum</i>
Cobre – Cu	<i>Bacillus firmus</i> <i>Bacillus licheniformis</i> <i>Bacillus subtilis</i> <i>Micrococcus</i> <i>Pseudomonas aeruginosa</i>

Fuente: Yadat *et al.* (2017).

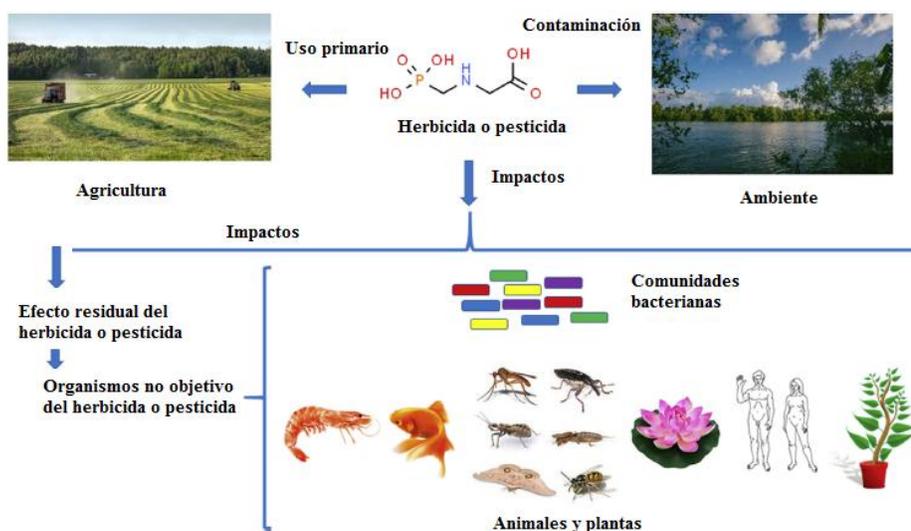
Un estudio utilizando *Lactobacillus plantarum* MF042018 aislado en las costas del mar Mediterráneo en la ciudad Alejandría (Egipto) demostró gran potencial para el tratamiento de metales pesados peligrosos en la fabricación de baterías. Así mismo, esta bacteria presentó características biosorbentes prometedoras para la eliminación de metales pesados en aguas residuales industriales. En dicho estudio se evaluaron los parámetros isotérmicos utilizando los modelos de Te Langmuir y Freundlich para la biosorción de Cd²⁺ y Pb²⁺ por *L. plantarum* MF042018 obteniendo un coeficiente de regresión óptimo de R²=0.991(Cd²⁺) Pb²⁺ (R²=0.957) para el modelo del Langmuir. Este trabajo permitió reconocer las condiciones de cultivo en las que *L. plantarum* MF042018 presenta mayor afinidad por estos metales (Ameen et al. 2020). Este tipo de trabajos son fundamentales para el conocimiento del comportamiento de las bacterias con potencial en biorremediación y cuáles serían las condiciones a nivel de laboratorio y campo para aprovechar al máximo sus características metabólicas.

Un trabajo realizado con cepas de *Viridibacillus arenosi* B-21, *Sporosarcina soli* B-22, *Enterobacter cloacae* KJ-46 y *E. cloacae* KJ-47 en donde se monitorearon parámetros como densidad óptica, pH, actividad ureasa, producción de calcita, tolerancia a metales pesados e impermeabilidad demostró que las mezclas bacterianas tenían mayor resistencia y eficiencia para la remediación de metales pesados que el uso de una sola cepa después de 48 h con eficiencia de 98,3% para Pb, 85,4% para Cd y 5,6% para Cu (Kang et al. 2016).

Agroquímicos. Como se ha mencionado a lo largo del presente documento, la agricultura tiene como prioridad aumentar la productividad y cubrir las necesidades alimenticias de las poblaciones, así que el uso herbicidas y plaguicidas es una práctica generalizada a nivel mundial. Los herbicidas actúan bloqueando la biosíntesis de aminoácidos, carotenoides o lípidos, o interrumpiendo el flujo de electrones en el proceso de fotosíntesis. La liberación de estos compuestos conduce a la contaminación de suelos agrícolas, sistemas fluviales y alrededores agua subterránea, cambiando la estructura y función de las poblaciones microbianas del suelo. Los herbicidas impactan directa o indirectamente en otros organismos diferentes a las malezas incluso a los humanos (Pileggi, 2020). En la figura 11 se presenta un esquema del impacto de estos químicos.

Figura 11.

Impacto de la utilización de agroquímicos en la producción de alimentos



Fuente: Tomado y modificado de Pileggi (2020).

Organoclorados. Son compuesto tóxicos constituidos por átomos de cloro, que son empleados en la agricultura como controladores de plagas (Gomez 2015). Este tipo de

compuestos químicos se destacan por su estabilidad química, por ser muy solubles en grasas e insolubles en agua. Estos insecticidas son comercializados en presentaciones en estado líquido, polvo y aerosol. Son muy tóxicos no solo para los animales y plantas, sino también para el ser humano que puede estar expuesto al consumo de organoclorados a través de la ingesta de alimentos contaminados como leche, verduras, frutas y carne con estos pesticidas (Zaragoza et al. 2016).

Figura 12.

Ejemplos de algunos pesticidas organoclorados utilizados para el control de insectos.



Fuente: Imágenes tomadas de la web (2021).

En la figura 3 se presentan algunos ejemplos de productos comerciales de organoclorados como son el aldrin, DDT, dieldrin y DDE, Lindafor 90, Gramoxone, Maxipon, Dicofol, Thiodan 50 WP, etc. Productos que por su alta toxicidad han sido prohibidos o restringidos en varios países como Holanda, Malacia, Argentina, Venezuela, Colombia entre otros según el Observatorio latinoamericano de conflictos ambientales.

Estos pesticidas son absorbidos por el suelo y son difíciles de degradar, su repercusión es muy importante ya que inhiben el crecimiento de los microorganismos, haciendo más difícil su biodegradación (Gregory et al. 2015). En un estudio realizado en Tamilnadu, (India), fue empleado un nuevo consorcio bacteriano en suelos contaminados con endosulfán alfa y beta

utilizando un perfil de suelo simulado en un reactor de suelo. El ensayo fue desarrollado durante 25 días y se observó la eliminación total del endosulfán obteniendo como conclusión que en un ambiente superficial y subsuperficial contaminado se puede lograr el bioaumentación de consorcios bacterianos que degradan los pesticidas de manera eficiente (Odukkathil & Vasudevan 2016).

La degradación microbiana de pesticidas ofrece la posibilidad de contar con nuevas herramientas para restaurar la contaminación o tratar los desechos de pesticidas presentes en los suelos con la biodegradación completa del pesticida. En un estudio realizado por el Departamento de Zoología de Maharashtra y el Departamento de Biotecnología de Osmanabad (India), se demostró la degradación de heptacloro y heptacloro epóxido mediante el uso de hongos macroscópicos relacionado con la degradación de la madera. En dicho estudio utilizaron los hongos *Phlebia tremellosa*, *P. brevispora* y *P. acanthocystis*. logrando la remoción de cerca del 71, 74 y 90% de heptacloro, con cada hongo respectivamente después de 14 días de incubación. Cuando se utilizaron las mismas especies frente a heptacloro epóxido se logró una remoción aproximadamente del 16, 22 y 25% respectivamente (Dar et al. 2020).

adicionalmente, géneros de mohos como *Penicillium miczynskii*, *Aspergillus sydowii*, *Trichoderma sp.*, *Penicillium raistrickii*, y *Bionectria sp.* obtenidos de esponjas marinas también poseen capacidad para la biodegradación de compuestos organoclorados (Parte et al. 2017).

Organofosforados. Son compuestos altamente tóxicos que también son empleados en sector agrícola con el propósito de controlar plagas como insectos, ácaros y nematodos, que de no ser contralados pondrían en riesgos los cultivos. Su masiva aplicación ha ocasionado grandes problemas ambientales, contaminando suelos y afectando los ciclos biogeoquímicos de los mismos (Badaii & Varela (2015).

Estos compuestos pueden ser encontrados en productos de consumo diario como los lácteos lo que genera problemas graves para la población. Es por esto que en un estudio realizado por la universidad de Harbin en China se evaluó la capacidad de degradación de organofosforados por bacterias ácidolácticas (LAB) durante la fermentación de leche. Para esto emplearon *L. plantarum* 1.0317, *L. plantarum* 1.0624, *L. plantarum* 1.0315, *L. brevis* 1.0209, *L. helveticus* 1.0203, *L. helveticus* 1.9204, *L. lactis* 4.0611, *L. bulgaricus* L6 y *Streptococcus thermophilus* 3.0503, con actividad degradadora fuerte y débil. Realizaron cuatro combinaciones de cepas: débil-débil (*L. plantarum* 1.0317 más *L. helveticus* 1.0203), débil-fuerte (*L. helveticus* 1.0203 más *L. brevis* 1.0209), fuerte-débil (*L. helveticus* 1.9204 más *L. plantarum* 1.0317) y fuerte-fuerte (*L. brevis* 1.0209 más *L. helveticus* 1.9204) demostrando que al combinar cepas que individualmente presentaban actividades débiles mostraron sinergismo y degradaron más rápidamente los plaguicidas organofosforados (Zhang et al. 2014).

Entre los productos de organofosforados más empleados a nivel mundial en agricultura se encuentra el glifosato herbicida compuesto por (N-fosfonometil-glicina, C₃H₈NO₅P, CAS 1071-83-6), es un aminofosfonato y un análogo del aminoácido natural glicina (Choque & Nogales, 2019). Varios estudios han reportado residuos del herbicida en suelos, agua y alimentos de consumo humano pudiendo generar afectaciones a la salud y el ambiente (Ruuskanen et al. 2020). En Moscú (Rusia) se realizó un estudio de biorremediación en suelos contaminados con glifosato (GP) donde se compararon cepas nativas y dos cepas introducidas reconocidas como degradadoras de GP *Achromobacter* sp. Kg 16 (VKM B2534D) y *Ochrobactrum anthropi* GPK 3 (VKM B-2554D).

El estudio llevado a cabo en primera fase en laboratorio mediante el método de cultivo enriquecido comprobó la eficiencia de las cepas introducidas por lo que procedieron al estudio

en campo con condiciones de temperaturas de 12-17°C en las noches y temperaturas diurnas de 18-28°C (humedad del suelo 7-9% a 18-21%). Encontrando que las cepas introducidas tuvieron mayor eficiencia en la biodegradación de GP (entre el 49,5% y 65,8%) a comparación de las cepas nativas que no supero el 11% para la biodegradación de GP (Ermakova et al. 2010).

En la figura 12 se presentan algunos ejemplos de estos compuestos entre los que se encuentran el glifosato de gran interés y preocupación actual en el país.

Figura 13.

Ejemplos de algunos pesticidas organofosforados utilizados para el control de insectos



Fuente: Imágenes tomadas de la web (2021).

La degradación microbiana es una de las alternativas más eficaces para el proceso de descontaminación de suelos por organofosforados como el clorpirifos. En un estudio llevado a cabo por la Universidad Nacional Agraria La Molina (Perú), realizaron el aislamiento de microorganismos como bacterias y hongos mediante recuento en cámara Neubauer y cultivo en placa con agar nutritivo y en agar Sabouraud. En dicho estudio emplearon como única fuente de carbono el clorpirifos. demostraron la capacidad degradadora de estos microorganismos nativos ya que presentaron el crecimiento en estos medios lo que representó la degradación de la sustancia para el desarrollo de las poblaciones microbianas evaluadas (Cedron & Lecaros (2018)).

Según la literatura, algunas bacterias degradadoras de organofosforados son *Bacillus pumilus*, *Streptomyces* sp., *Serratia marcescens*, *Alcaligenes* sp., *Penicillium* sp. y *Pseudomonas putida*. Dentro de estas especies, *B. pumilus* ha demostrado la capacidad de degradar 300 mg/L de clorpirifos TCP (3,5,6-tricloro-2-piridino) en 8 días. Adicionalmente se ha reportado que mohos como el *Aspergillus terreus* ha degradado la misma cantidad en 24 horas, lo cual evidencia que el hongo tiene una mayor capacidad para degradar el organofosforado (Ruiz et al. 2017).

En un estudio de biorremediación microbiana realizado en tres suelos húmedos tropicales de Malacia, donde se aplican altas dosis de clorpirifos debido a las altas infestaciones de plagas en cultivos se demostró que la degradación depende de las condiciones ambientales. En dicho estudio se observó mayor rapidez en la degradación en suelos húmedos en comparación con suelos secos. Así mismo se pudo evidenciar que las altas temperaturas, humedad moderada y la alta actividad de microorganismos presentes en el suelo favorecen la degradación y la mineralización del clorpirifos (Kuet et al. (2013).

Biorremediación en Colombia

Los suelos colombianos poseen gran cantidad de metales pesados debido a la labor agrícola que se desarrolla prácticamente en todo el territorio colombiano, lo que se convierte en un gran problema debido a la toxicidad que estos compuestos representan para la salud y el ambiente. Una forma de eliminar los contaminantes metálicos y estabilizar el ecosistema es emplear microorganismos autóctonos con mecanismos capaces de degradar dichos metales o microorganismos genéticamente modificados con capacidad demostrada para remediar y tolerar la toxicidad a la que serán expuestos.

En Colombia estos compuestos han sido muy utilizados, como es el caso del municipio de Codazzi (Cesar) en donde se emplearon grandes cantidades de insumos químicos en cultivos de algodón durante varios años. En un estudio realizado por Kopytko et al. (2017) en esta región se llevó a cabo el proceso de recuperación de la degradación de estos suelos utilizando variedades de cepas nativas de los géneros: *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Burkholderia*, *Bacillus* y *Enterobacter* los cuales están reportados en la literatura como microorganismos con alto potencial para degradar compuestos organoclorados.

En Colombia el desarrollo de procesos de biorremediación inició desde hace más de 25 años. Estudios realizados por grupos de investigación de universidades como el Centro de Investigaciones Microbiológicas (CIMIC) de la Universidad de los Andes, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y Universidad de Antioquia han recopilado los estudios publicados sobre biorremediación en Colombia. En la tabla 4 se tuvieron en cuenta los estudios más recientes entre los años 2016-2018, en donde se especifica el lugar *del país y el tipo de microorganismos aplicados en cada tipo de biorremediación*.

Tabla 4.

Estudios publicados sobre biorremediación en Colombia año 2016-2018

Departamento	Ciudad	Tipos de biorremediación	Organismo
Cundinamarca	Fómeque	Bioestimulación Bioaumentación Atenuación natural	Bacterias
Antioquia	Medellín	Biolixiviación; compostaje	Bacterias
Cundinamarca	Bogotá	Bioestimulación	Bacterias
Cundinamarca	Bogotá	Bioestimulación	Hongos
Cundinamarca	Zipaquirá	Biosorción	Bacterias
Antioquia	Rionegro	Bioestimulación Bioaumentación Atenuación natural	Bacterias
Cundinamarca	Bogotá	Bioestimulación	Bacterias
Antioquia - Putumayo	Medellín	Bioestimulación	Bacterias

	Vereda Silvania	Bioaumentación	
		Atenuación natural	
Cundinamarca	Bogotá	Bioestimulación	Hongos
Nariño	San Juan de Pasto	Bioestimulación	Bacterias
Cundinamarca	Bogotá	Degradación microbiana	Bacterias
Atlántico	Puerto Colombia	Biosorción	Microalgas
Bolívar	Cartagena	Bioestimulación	Bacterias
Bolívar	Turbaco	Bioestimulación	Bacterias
Antioquia	Medellín	Bioaumentación	Hongos
Cundinamarca	Bogotá	Degradación microbiana	Bacterias
Cundinamarca	Fontibón	Bioaumentación	Bacterias
Valle del cauca	San Pedro	Fitorremediación	Microalgas
Cundinamarca	Bogotá	Bioaumentación	Bacterias
Cundinamarca	Bogotá	Fitorremediación	Microalgas

Fuente: Arango *et al.* (2016)

Existen diferentes métodos de biorremediación in situ que han sido utilizados en diferentes regiones del país como se describe en la tabla 4 y son básicamente la atenuación natural o degradación microbiana que es considerada como un proceso de remediación pasiva y consiste en degradar los contaminantes mediante los procesos naturales del subsuelo como la dilución, volatilización, biodegradación, adsorción y las reacciones químicas con materiales del subsuelo que permiten reducir las concentraciones de contaminantes a niveles permisibles (Mulligan & Yong 2004).

Por otro lado, existe la bioaumentación que consisten en la adición de cultivos microbianos previamente cultivados que aumentan la degradación de compuestos no deseados. La bioestimulación que es el suministro de nutrientes y otros componentes suplementarios a la población microbiana nativa para inducir la propagación a un ritmo acelerado (Tyagui et al. 2010). Adicionalmente, existe la fitorremediación que es una técnica económica y sostenible con el medio ambiente que se basan en el uso de plantas para limpiar o restaurar ambientes contaminados, como aguas, suelos, e incluso aire. Esta remediación in situ es realizada a partir

de procesos bioquímicos de las plantas y de los microorganismos asociados a su sistema radicular y depende de sus tasas de crecimiento, de la profundidad de las raíces y la habilidad para bioacumular y/o degradar contaminantes (Peña et al. 2018).

Finamente, la biosorción que es un método alternativo que consiste en la captación pasiva, de sustancias contaminantes, basado en la propiedad que ciertos tipos de biomasa inactivadas o muertas para enlazar y acumular diferentes tipos de contaminantes o metales, lo cuales pueden ser recuperados posteriormente (Ramos 2010).

Colombia es un país de diversidad de pisos térmicos y de ecosistemas entre los que se encuentran páramo, sabana, zonas desérticas, bosque tropical, manglar, arrecifes coralinos, praderas de pastos marinos y ecosistema pelágico. Estas condiciones ambientales promueven una gran biodiversidad microbiana, como lo demuestra un estudio realizado por la universidad de la Sabana, donde se realizaron trabajos de prospección en Manaure Guajira. Este estudio presentó tres objetivos principales, el primero era desarrollar una estrategia de cultivo mixto para aislar bacterias halofílicas con actividad antibacteriana y citotóxica. También buscaron encontrar la integración de la red molecular y variación de los medios de cultivo para explorar la producción de metabolitos bioactivos por *Vibrio diabolicus* A1S específicamente polihidroxibutirato (PHB) que es un polímero biodegradable con características parecidas al plástico por lo que tiene varias posibles aplicaciones en diferentes industrias.

Finalmente, el último objetivo fue un proyecto de genoma de *Vibrio diabolicus* A1SM3 para establecer los genes responsables de la producción de PHB y las vías metabólicas de este microorganismo. En este trabajo bioprospección se realizó el aislamiento de por lo menos 600 microorganismos diferentes con potencial aplicación en la industria por lo que se observa el alcance que tiene este tipo de investigación (Conde 2019).

Colombia es el tercer productor del mundo de aguacate hass, según la revista Agronegocios. Esta fracción del agro colombiano tiene importantes retos para aumentar la producción, pero también por el impacto económico que esto representa pues para mayor producción se requiere mayor inversión. Las producciones de aguacate se han visto afectadas por patógenos en sus raíces y escases de pelos radiculares por esto se ha incrementado el uso de agroquímicos lo que causa graves afectaciones a la salud humana. Una de las alternativas más favorables y sustentables con el medio ambiente, es la implementación de biofertilización con HMA (micorrizas arbusculares) debido a que como explicará más adelante este tipo de hongo forma un manto alrededor de la raíz y penetran de forma intercelular su corteza, formando arbusculos dentro de la célula vegetal.

Debido a esta interacción las plantas de aguacate reciben más nutrientes como potasio, nitrógeno, fósforo, calcio, magnesio y azufre, elementos indispensables para el crecimiento y producción del aguacate, este tipo de asociación simbiótica permite tener cultivos más sanos y productivos con un menor costo económico de producción, debido a que se reduciría notablemente la compra de insumos agrícolas (Gómez et al 2017). Este tipo de asociaciones se pueden estimular mediante procesos de bioprospección en busca de hongos que se asocien con estas especies de plantas de interés comercial.

En Sucre la ganadería bovina utiliza el 13% del área de la región Caribe donde, la producción de pastos y forrajes nutritivos es vital para el mantenimiento del ganado. Por tal motivo en este departamento más específicamente en el municipio de Corozal, se realizó un estudio que evaluó la eficiencia de las bacterias endófitas aisladas, como promotoras de crecimiento y aporte de nutrientes al pasto colosuana. Para esta investigación se evaluó in vitro la eficiencia de las bacterias en el crecimiento de diferentes tejidos de pasto realizando pruebas

cuantitativas y cualitativas de la capacidad promotora de crecimiento como fijación de nitrógeno, solubilización de fosforo, producción de ácido indol acético y sideróforo. 18 de las bacterias endófitas demostraron actividad positiva para el crecimiento de pasto colosuna y fueron identificadas en su mayoría como *Delftia tsuruhatensis* M1RLP y *Pseudomonas hibiscicola* (*S. maltophilia*) M2TLP.

Estos consorcios microbianos pueden ser utilizados efectivamente como promotores del crecimiento y control biológico de las pasturas en las zonas ganaderas del municipio de Corozal (Perez et al. 2018).

Con el fin de hallar nuevos agentes antimicrobianos con el propósito de controlar los agentes patógenos como es el caso de un estudio realizado en los ríos de la Orinoquia Colombiana por investigadores de la universidad de la Sabana quienes tomaron muestras aisladas de agua y sedimentos del río Guaviare. En dicho estudio emplearon métodos de tratamiento térmico, siembra directa y enriquecimiento con carbonato de calcio para el aislamiento de actinobacterias. Las cepas seleccionadas con actividad antimicrobiana fueron identificadas y pertenecían a la familia Streptomyces. Los resultados obtenidos señalan que los sedimentos del río Guaviare son una fuente de actinobacterias con capacidad antimicrobiana, las cuales podrían ser objeto de futuras investigaciones con valiosos aportes a la medicina y la agroindustria (Patrana et al. 2016).

La universidad de la Sabana es una de las universidades que más estudios de bioprospección ha realizado en Colombia, revelando el potencial de microorganismos con aplicaciones biotecnológicas que posee Colombia en sus fuentes hídricas. En otro estudio realizado por esta Universidad en dos zonas ribereñas del río Arauca, encontraron que la combinación de pretratamientos fisicoquímicos y el uso de técnicas como MALDI-TOF MS,

facilita la detección de actinobacterias de baja abundancia con potencial uso como fuente de agentes antimicrobianos. Los microorganismos con actividad antimicrobiana fueron aislados, evaluando su resistencia a la metionina y 78 de estas bacterias eran pertenecientes a la familia Streptomycetaceae (Arango et al. 2018).

En otra investigación realizada en el mar caribe, se recolectaron siete muestras de sedimentos marinos profundos para su procesamiento en el Laboratorio de Bioprospección Marina - LabBIM en el INVEMAR. De allí se aislaron representantes de las comunidades microbianas que contribuyen al reciclaje global de carbono y representan la principal frontera de investigación ecológica. Los sedimentos de aguas profundas son sustratos para el crecimiento bacteriano debido a la gran cantidad de moléculas orgánicas compuestas principalmente por carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P). El ensamblaje bacteriano se organizó en tres grupos filogenéticos, Proteobacteria, Actinobacteria y Firmicutes. Estas comunidades bacterianas proporcionan una base para estimar la diversidad filogenética y generar inventarios taxonómicos de las poblaciones microbianas existentes de diferentes bacterias para poder investigar su capacidad de biorremediación en la industria y el medio ambiente (Invemar 2021).

Biofertilización en Colombia

La biofertilización es el empleo de microorganismos benéficos con el fin de mejorar las condiciones de los suelos los cuales, al ser aplicados a semillas, plantas o suelos, colonizan la rizosfera o el interior de las plantas para ser aprovechado especialmente por cultivos agrícolas y pastos, mitigando el impacto negativo que deja el abuso de agroquímicos (Correa 2017). La llamada revolución verde en Colombia donde se promovió el uso de fertilizante de síntesis química, no fue la solución más viable para reemplazar el uso de fungicidas y fertilizantes químicos. Por el contrario, el uso prolongado de fertilizantes de síntesis química produjo un

aumento en la productividad de los cultivos, ocasionando problemas por la salinización de los suelos, pérdida de fertilidad y pérdida de materia orgánica (Medina, 2017). Esto ha promovido la tendencia al uso convencional de agroquímicos con el fin de mejorar las condiciones de cultivo sin dar una la solución definitiva a los problema ambientales y fitosanitarios presentes en cultivos agrícolas.

La biofertilización es quizá considerada como la solución más conveniente para el remplazo de agroquímicos como fungicida y fertilizantes. Esto es debido a los grandes beneficios que esta práctica agrícola ofrece a través del uso de microorganismos que reducen el daño ecológico de los suelos producto de la acumulación de residuos de compuestos organoclorados y organofosforados presentes en muchos de los agroquímicos de uso cotidiano por el agricultor (Ruiz et al. 2017) Además de eso, los microorganismos combaten patógenos protegiendo las plantas de algunas enfermedades, son fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fosforo, ayudando a mejorar la disponibilidad de nutrientes del suelo (Rahman et al. 2018).

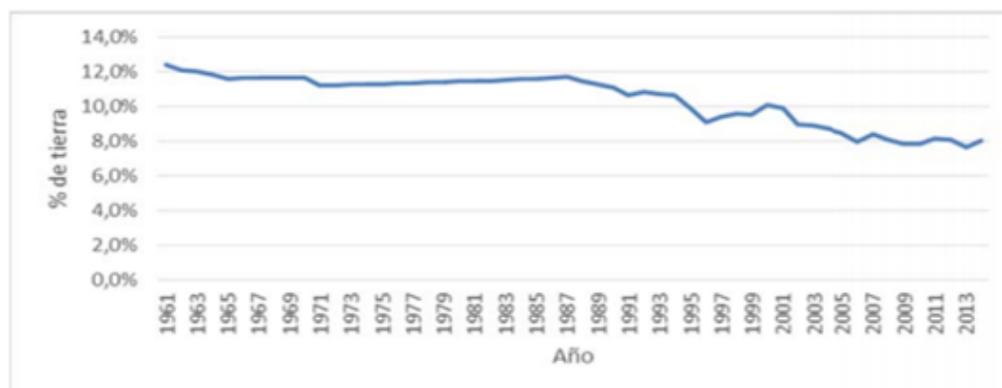
Sin lugar a duda, esta es la mejor alternativa para el sector agrícola, puesto que disminuye gastos en fertilizante y el agricultor puede ofrecer sus productos con un certificado de producción orgánica. Lo anterior le generaría un mayor ingreso económico por la venta de sus cosechas, pues en este siglo XXI se busca que los productos agrícolas que se colocan en las mesas de los hogares sean orgánicos y no provenientes de cultivos tratados con agroquímicos.

Esta tendencia no solo responde al interés en cuidar la salud sino también al medio ambiente. Según un estudio realizado por MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) y la U.D.C.A (Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales) los suelos han perdido su calidad y su diversidad microbiana generando una producción agrícola menor. Según la FAO

(Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) para el 2015 el 40% de los suelos colombianos presentó algún tipo de erosión implicando la disminución de tierra aptas para cultivo agrícola de 12% en 1961 al 8,1 % en el año 2014 (Medina, 2017) (Figura 14).

Figura 14.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura -Tierras cultivables como porcentaje de las tierras agrícolas, 1961-2014



Fuente: Medina (2017)

Teniendo en cuenta esta problemática, existen numerosos trabajos de investigación en los que se ha buscado desarrollar productos y procesos que permitan realizar la fertilización de forma natural. Se ha encontrado que microorganismos como *Pseudomonas* sp., *Citrobacter freundii*, *Acinetobacter haemolyticus*, *Serratia* sp., y *Enterobacter cloacae* han sido capaces de solubilizar más de 450 mg/ml de fósforo en suelos con altas concentraciones de metales pesados y con condiciones de alta humedad y temperatura (Correa 2017).

Al reducir la contaminación de los suelos con microorganismos se obtienen beneficios en la agricultura y los suelos como mejor fijación de nitrógeno, aumento en la producción de los cultivos y crecimiento de microorganismo benéficos para el suelo (Muñoz et al. 2010). Esto ha

sido demostrado con la implementación de cepas de cianobacterias fijadoras de N₂ como la *Anabaena* sp. UTEX 2576, *Nostoc muscorum* UTEX 2209S), y un policultivo de *Chlorella vulgaris* (UTEX 2714) y *Scenedesmus dimorphus* (UTEX 1237) en cultivos como el arroz (Jochum, et al. 2018) demostrando que la biofertilización ofrece grandes beneficios a la agricultura, el medio ambiente y la salud.

Micorrizas

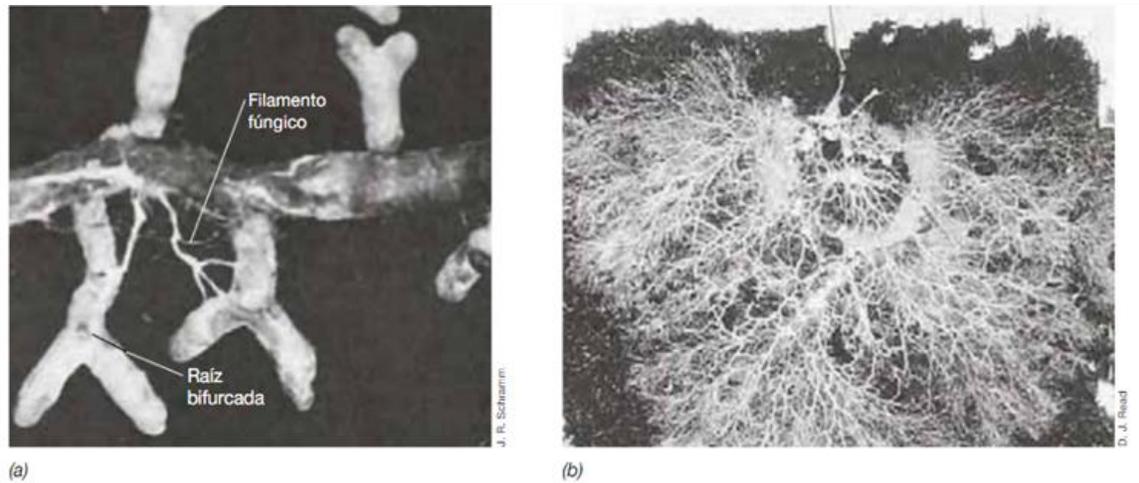
Las micorrizas son una asociación simbiótica entre un hongo y las raíces de una planta que ha sido denominada como biofertilizante y bioprotectora de cultivos. Asimismo, se considera eje fundamental de los programas de manejo integrado de suelos y cultivos (Muñoz et al. 2010). Los hongos micorrizicos arbusculares representan un recurso microbiológico promisorio para el desarrollo de una agricultura sostenible (Guerra 2013). Las hifas de estos hongos colonizan la corteza raíz y forman estructuras muy ramificadas dentro de las células, es decir, los arbusculos, donde se realiza el intercambio de nutrientes (Madigan 2015).

Las micorrizas arbusculares se encuentran ampliamente distribuidas por los trópicos. En el caso del Amazonas se encuentran el 80% de las plantas vasculares asociadas al género *Glomus* que tiene una dominancia en la composición micorrícica del Trapecio Amazónico (cerca del 50%). El género *Acaulospora* es otro tipo de hongo formador de micorrizas arbusculares y se encuentra asociado a los suelos más ácidos. El género *Gigaspora* se encuentra en suelos de loma y terraza y diferentes especies de los géneros *Scutellospora spinosissima* y *Archaeospora leptoticha* se han encontrado en suelos cercanos a Leticia (Garzón 2016). Se han encontrado especies de hongos formadores de micorrizas arbusculares asociados a distintas coberturas vegetales considerados como biofertilizantes naturales (Berruti et al. 2016)

Un estudio reportó que los biofertilizantes que poseen rasgos de fijación de nitrógeno y solubilización de fosforo tienen el mayor potencial para mejorar el rendimiento del cultivo, indicando el gran potencial de los hongos que forman micorrizas arbusculares (AMF) como único biofertilizante para la mayoría de los cultivos y situaciones climáticas (Schütz et al. 2018). En la figura 14 se observan ejemplos de algunas micorrizas asociadas a plantas superiores, las ectomicorrizas mejoran de forma considerable la captación de nutrientes del suelo.

Figura 15.

Micorrizas



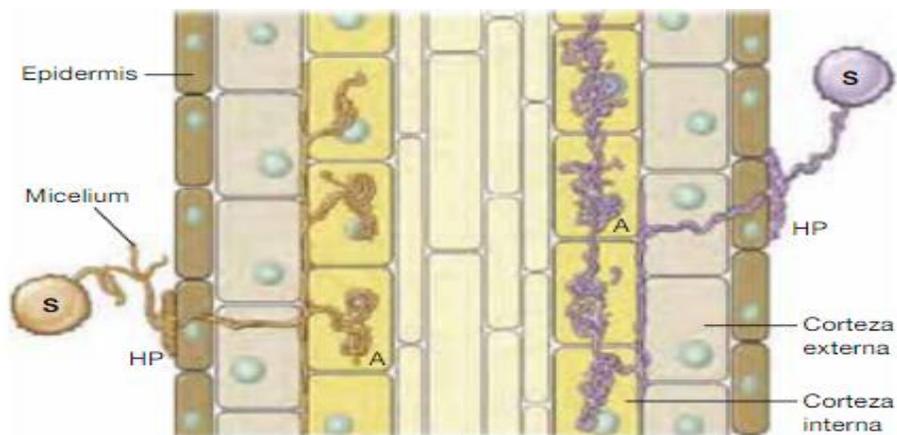
Nota: (a) Ectomicorriza de *Pinus rigida* con filamentos del hongo *Thelesphora terrestris*.
 (b) Plántula de *Pinus* con crecimiento de micelio de *Suillus bovinus*.

Fuente: Madigan (2015).

La figura 16, presenta un esquema de la colonización por micorrizas en donde se puede observar que una espóra cercana a la raíz produce un micelio corto que es atraído hacia la raíz para formar una estructura llamada hifopodio (HP). El micelio se introduce al interior de la raíz y forma los arbuscúlos que son invaginaciones ramificadas dicotómicamente. El crecimiento del micelio se extiende tanto intercelularmente (color marrón), como intracelularmente (color morado).

Figura 16.

Colonización de raíces por micorrizas arbusculares.



Fuente: Madigan (2015).

En tabla 5 se presentan los principales géneros de microorganismos con potencial uso en biofertilización.

Tabla 5.

Especies de microorganismos utilizadas en biofertilización

Categoría	Especie
AMF (hongos formadores de Micorrizas Arbusculares)	<i>Entrophosphora colombiana</i>
	<i>Glomus caledonium</i> , <i>G. clarum</i> , <i>G. etunicatum</i>
	<i>Rhizophagus irregularis</i>
	<i>Glomus mosseae</i>
	<i>Gigaspora rosasea</i>
Solubilizadores de fosforo	<i>Arthrobacter chlorophenolicus</i>
	<i>Bacillus firmus</i> , <i>B. megaterium</i> , <i>B. musilaginous</i>
	<i>Enterobacter asburiae</i> , <i>Microbacterium arborescens</i>
	<i>Paenibacillus sp.</i> , <i>P. polymixa</i>
	<i>Penicillium bilaii</i>
	<i>Pseudomonas aeuriginosa</i> , <i>P. argentinenses</i> , <i>P. cepacea</i>
Fijadores de nitrógeno	<i>Serratia marcescens</i>
	<i>Staphylococcus saprophyticus</i>
	<i>Anabaena azollae</i> , <i>A. cylindrica</i> , <i>A. variabilis</i> , <i>A. turulosa</i>
	<i>Aphanothece ssp.</i> , <i>Aulosira fertilissima</i>
	<i>Azolla caroliniana</i> , <i>Azospirillum brasilense</i> , <i>A.</i>

	<p><i>lipoferum</i> <i>Azotobacter brasilense</i>, <i>Bacillus polymyxa</i>, <i>B.subtilis</i> <i>Beijerinckia indica</i>, <i>B. japonicum</i>, <i>Brevundimonas</i> <i>diminuta</i> <i>Burkholderia vietnamensis</i>. <i>Gluconacetobacter diazotrophicus</i> <i>Herbaspirillum seropedicae</i> <i>Mesorhizobium ciceri</i>, <i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>Staphylococcus sp.</i>, <i>Tylophthrix tenuis</i></p>
Fijadores de nitrógeno más solubilizadores de fosforo	<p><i>Strains of bacillis megaterium</i> <i>B. polymixa</i> <i>Enterobacter sp.</i></p>
Otros biofertilizantes	<p><i>Actinomyces</i>, <i>Aspergillus niger</i>, <i>A. tubingensis</i> <i>Bacillus circulans</i>, <i>B. mycoides.</i>, <i>B. pummitus</i>, <i>B.</i> <i>simplex</i> <i>Ochrobactrum antrophic</i>, <i>O.ciceri</i> . <i>Penicillium brevicompactum</i>, <i>P. solitum</i> <i>Piriformopora indica</i>, <i>Rhodobacter capsulatus</i>. <i>Rhodopseudomonas sp.</i>, <i>Thiobacillus sp.</i>, <i>T.thioxidans</i></p>

Fuente: Universidad de Zurich, Suiza (2017)

Conclusiones

Para el sector de la ingeniería ambiental los descubrimientos en bioprospección y el uso responsable de los microorganismos, ofrece al área medio ambiental la solución a una problemática que se presenta desde hace décadas, debido a la contaminación y deterioro ambiental que está sufriendo el mundo a causa de las altas cargas contaminantes provenientes de actividades como la agricultura. Esto ha generado la preocupación y captado la mirada de centros e instituciones investigativas, las cuales realizan grandes esfuerzos para dar solución a una problemática tan palpable como es la contaminación ambiental y el deterioro de los recursos naturales, aunque todavía faltan estudios por realizar, los documentos existentes sobre biorremediación son una promesa para futuras investigaciones a servicio del sector ambiental.

El alcance que tiene la bioprospección en el campo industrial y ambiental es sin lugar a dudas uno de los mayores descubrimientos de las últimas décadas pues sus beneficios son puestos al servicio de la humanidad y del ambiente con el propósito de ofrecer una solución a los problemas ambientales provocados por sector industrial. La bioprospección abarca grandes campos como biorremediación en suelos y agua, biofertilización, descubrimientos de nuevos productos farmacéuticos, de uso veterinario y agrícola. Este sector, se ve muy beneficiado, pues con una implementación adecuada de la bioprospección se logra una mayor producción en los cultivos y la industria lo que le significa al sector comercial recibirá mayores ingresos económicos que pueden reflejarse en una mejor calidad de vida.

Lo anterior contribuye al medio ambiente con el cuidado y protección de los recursos naturales, encaminándose a una agricultura responsable y ambiente sostenible. La formación en ingeniería ambiental, permite la búsqueda de soluciones a problemáticas ambientales derivadas del uso excesivo de agrotóxicos, en la industria agrícola, con el fin de proponer a nivel regional,

local y nacional la utilización de microorganismos con potencial aplicación en la solución de problemáticas ambientales particulares . En este documento se plasman algunas de las alternativas que desde el punto de vista de la ingeniería ambiental busca proteger y preservar los recursos naturales. La bioprospección es una de las alternativas que deben ser abordadas para minimizar el impacto ambiental y económico que tiene el uso indiscriminado de agroquímicos pues a través del uso de microorganismos remediadores se puede dar solución a la problemática actual que enfrenta el sector agrícola a nivel mundial. Esto permite a su vez fortalecer las futuras investigaciones acerca de los beneficios y aplicaciones que tiene la bioprospección.

En Colombia la bioprospección microbiana, es un tema poco explorado para el sector agrícola específicamente. Las investigaciones encaminadas representan una herramienta innovadora promisoría para la agricultura a nivel nacional ya que estos microorganismos poseen capacidades como degradación de tóxicos, biofertilizantes, fitoestimuladores entre otras. Por eso se hace importante el apoyo económico y de recursos biológicos para el desarrollo de nuevas investigaciones sobre las propiedades que pueden ofrecer los microorganismos al sector agrícola y salud.

En la actualidad existe una importante demanda para la adquisición de recursos genéticos que beneficiarían sectores industriales, agrícolas y farmacéuticos, pero existen las limitaciones de apoyo económico por parte del gobierno y el sector privado con el fin de crear empresas biotecnológicas que ofrezcan productos como medicamentos, biofertilizantes y agentes de control biológico que ayudarían al desarrollo de cultivos sanos y libres de residuos y agroquímicos.

Recomendaciones

Es importante, que se realicen actividades de bioprospección con el propósito de producir desarrollar y patentar productos como biopesticidas y biofertilizantes generando un biocomercio. que tenga como fin reemplazar el uso de agroquímicos y fertilizantes para reducir la contaminación de suelos, agua y aire, así fomentar una agricultura y una economía verde, pues se debe cuidar y preservar el medio ambiente a través de sus propios recursos microbianos, recursos que se tiene a la mano y que deben ser tratados con rigurosidad para evitar la biopiratería y posible sobreexplotación y deterioro de los recursos biológicos.

Colombia debe centrar sus esfuerzos es la búsqueda de una nueva reforma agraria más amigable con el medio ambiente, que permita minimizar los impactos ambientales productos no solo del sector agrícolas, sino también del sector industrial, pues es lamentable la situación que el planeta vive actualmente en materia de cambio climático. Es imprescindible el apoyo económico del gobierno y del sector privado para que los institutos y universidades, puedan realizar investigaciones que permitan la obtención de nuevos productos. Generando una relación entre los recursos genéticos y la economía.

Referencias bibliográficas

- Ameen F., Hamdan A., Naggar M. (2020) *Assessment of the heavy metal bioremediation efficiency of the novel marine lactic acid bacterium, Lactobacillus plantarum MF042018*. Scientific Reports, 10 (1). *Z<ZTidal Wetland versus Paddy Soils Cultivated for Different Time Periods*. Applied and Environmental Microbiology. e <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3165419/>
- Arango, C., Acosta Gonzalez, A., Parra Giraldo, C., Sánchez Quitian, Z. A., Kerr, R., & Díaz, L. (2018). Characterization of Actinobacterial Communities from Arauca River Sediments (Colombia) Reveals Antimicrobial Potential Presented in Low Abundant Isolates. *The Open Microbiology Journal*, 181–194. Obtenido de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5997859/>
- Armenta-Bojórquez, A. D., Garcia, C., Apodaca Sánchez, M. Á., & CamachoBáez, J. R. (2010). *Role of biofertilizers in the agricultural development in Mexico*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/44122059_ROLE_OF_BIOFERTILIZERS_IN_THE_AGRICULTURAL_DEVELOPMENT_IN_MEXICO
- Badaii, M & Varela, S. (2015) *Insecticidas Organofosforados: Efectos sobre la Salud y el Ambiente*. Cultura Científica y Tecnológica. ISSN 2007-0411. Disponible en: <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/375/355>
- Barrera B. (2016). *La biocolonialidad en las relaciones entre investigadores de la biodiversidad y las comunidades en Colombia*. Recuperado de <http://www.revistatabularasa.org/numero-24/10beltran.pdf>
- Barrero E.(2012). *Generación de valor para el desarrollo competitivo del cultivo de la uchuva como modelo de bioprospección de frutas en Colombia* Recuperado de <https://www.researchgate.net/profile/Gerhard-Fischer-2/publication/257068857>
- Beattie, A., Hay, M., Magnusson, B., Nys, R., Smeathers, J., & Vincent, J. (2011, Mayo 01). *Ecology and bioprospecting*. *Austral ecology*, 36(3), 341-356. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1442-9993.2010.02170.x>
- Bernal V. (2018). *Bioprospección aplicada al tratamiento de aguas residuales: Estudio de casos y metodologías exitosas*. Recuperado <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/17814/1019060669.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Berruti A., Lumini E., Balestrini R., Bianciotto V. (2016) *Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes*.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2015.01559/full>
- Cedron M. & Lecaros M. (2018) *Aislamiento y evaluación de microorganismos nativos como biorremediadores de suelos contaminados con Chlorpyrifos en la Universidad Nacional Agraria La Molina*.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3977/cedron-maria-pia%20y%20lecaros-maria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Conde N. (2019). *Bioprospecting study of cultivable prokaryotic fraction from Manaure solar saltern, La Guajira, Colombia*.
<https://intellectum.unisabana.edu.co/bitstream/handle/10818/37414/final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cotes Prado, A. M., Barrero Meneses, L. S., Rodríguez Villamizar, F., Zuluaga Mogollón, M. V. & Arévalo Martínez, H. (2012). *Bioprospección para el desarrollo del sector agropecuario de Colombia*. Bogotá CORPOICA. 195 p.
<https://www.researchgate.net/publication/287215006>
- Corpoica (2017) *Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática*. <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v18n1/v18n1a09.pdf>
- Corrales L., Arévalo Z., & Moreno V. (2014). *Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal*. *Nova*, 12 (21), (pp 67-79).
<https://doi.org/10.22490/24629448.997>
- Choque, R. & Nogales, J. (2019). *Estudio de propiedades moleculares del glifosato usando métodos químico-cuánticos computacionales*. *Revista con-ciencia*, 7 (1). (pp 41-56).
http://www.scielo.org.bo/pdf/rcfb/v7n1/v7n1_a05.pdf
- Dar M., Kaushik G. & Villareal J. (2019) *Chapter 2 - Pollution status and biodegradation of organophosphate pesticides in the environment. Abatement of Environmental Pollutants: Trends and Strategies* (pp 25-66). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818095-2.00002-3>
- Díaz M. (2019) *Política Y Legislación Sobre La Bioprospección En Colombia* Recupero de
<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/75857/1033738579.2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Duarte & Velho (2009) *La bioprospección como un mecanismo de cooperación internacional para fortalecimiento de capacidades en ciencia y tecnología en Colombia*. Recuperado de <https://www.scielo.br/j/ci/a/ZbqbSBpwfZq3TgPjSb63PYf/?lang=es&format=pdf>
- Ermakova I., Kiseleva N., Shushkova T., Zharikov M., Zharikov G. & Leontievsky. (2010) *Bioremediation of glyphosate-contaminated soils*. Applied Microbiology Biotechnology, 88 (2). (pp 585-94). <http://doi:10.1007/s00253-010-2775-0>
- Garzón L. (2016) *Importancia de las micorrizas arbusculares (MA) para un uso sostenible del suelo en la amazonia colombiana*. Revista Luna Azul, 42, (pp 217-234). <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.42.14>
- Gomez, S., Berdugo S., & Valencia C. (2017) *Bioprospección de hongos micorrízicos arbusculares como alternativa para el fortalecimiento del cultivo de aguacate (Persea americana Miller) en Colombia*. Revista De Investigación Agraria Y Ambiental, 8(1), 71 - 79. <https://doi.org/10.22490/21456453.1839>
- Grageda-Cabrera, Oscar Arath, Díaz-Franco, Arturo, Peña-Cabriales, Juan José, & Vera-Nuñez, José Antonio. (2012). *Impacto de los biofertilizantes en la agricultura*. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 3(6), 1261-1274. Recuperado en 19 de octubre de 2021, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000600015&lng=es&tlng=es
- Gregory S., Anderson C., Arbestain M., Biggs P., Ganley A., Sullivan A., McManus M. (2015) *Biochar in Co-Contaminated Soil Manipulates Arsenic Solubility and Microbiological Community Structure, and Promotes Organochlorine Degradation*. 10 (4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125393>
- Guerra-Sierra B. (2013). *Micorriza arbuscular. Recurso microbiológico en la agricultura sostenible*. Revista Tecnología En Marcha, 21(1), (pp 191–201). https://181.193.125.13/index.php/tec_marcha/article/view/1352
- Hernández-Ruiz G., Álvarez-Orozco N. & Ríos-Osorio L. (2017). *Biorremediación de organofosforados por hongos y bacterias en suelos agrícolas: revisión sistemática*. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 18(1), 138-159. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:564
- Hinton Sheley, P. (23 de Agosto de 2018). *¿Cuál es polimerización en cadena cuantitativa en tiempo real (qPCR)?* Obtenido de [https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Real-Time-Quantitative-PCR-\(qPCR\)-\(Spanish\).aspx](https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Real-Time-Quantitative-PCR-(qPCR)-(Spanish).aspx)

- Hongrittipun P., Youpensuk S & Rerkasem B. (2014) *Screening of nitrogen fixing endophytic bacteria in Oryza sativa L.* 6 (6). <http://doi:10.5539/jas.v6n6p66>
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “INVEMAR) (2021). *Diversity of cultivable bacteria from deep-Sea sediments of the Colombian Caribbean and their Potential in Bioremediation.* Recuperado de <https://assets.researchsquare.com/files/rs-869529/v1/95d82710-0646-41fb-825e-ae8eb7bcf452.pdf?c=1631889313>
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR). (2021). *Conoce nuestros proyectos.* Obtenido de invemar.org.co/proyectos
- Jochum M., Moncayo L. & Jo Y-K (2018) *Microalgal cultivation for biofertilization in rice plants using a vertical semi-closed airlift photobioreactor.* PLoS ONE 13(9): e0203456. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203456>
- Kang-Chang H. & Kwon, J. *Bioremediation of heavy metals by using bacterial mixtures.* Ecological Engineering, 89, Pages 64-69 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857416300234>
- Khan, Z., Rehman, A., Hussain, S., Nisar M., Zulfiqar S. & Shakoori A. (2016). *Cadmium resistance and uptake by bacterium, Salmonella enterica 43C, isolated from industrial effluent.* AMB Express 6, (54). <https://doi.org/10.1186/s13568-016-0225>.
- Kirillova A, Danilushkina A, Irisov D, Bruslik N, Fakhrullin, Zakharov Y, Zakharov B, Yarullina R. (2017) *Assessment of Resistance and Bioremediation Ability of Lactobacillus Strains to Lead and Cadmium.* <https://doi.org/10.1155/2017/9869145>
- Kour D., Kusam L., Yadav N. & Ajar N. (2019). *Bioprospecting of phosphorus solubilizing bacteria from Renuka Lake Ecosystems, Lesser Himalayas.* Journal of Applied Biology & Biotechnology Vol. 7 (05), pp. 1-6. [https://doi: 10.7324/JABB.2019.70501](https://doi:10.7324/JABB.2019.70501)
- Kopytko M., Torres S. & Gómez M. (2017) *Biodegradación estimulada de los suelos contaminados con pesticidas organoclorados.* Revista de investigación agraria y ambiental. 8, (1). <https://doi.org/10.22490/21456453.1843>
- Kumar N., Kumari Y., Ram C., Thakur K., Kumar S. (2018) *Bio-prospectus of cadmium bioadsorption by lactic acid bacteria to mitigate health and environmental impacts.* [https://doi: 10.1007/s00253-018-8743-9](https://doi:10.1007/s00253-018-8743-9)

- Lamb J., Fernandez F. & Kaiser D. (2014) *Understanding Nitrogen in Soils*
<https://bwsr.state.mn.us/sites/default/files/2019-07/UnderstandingNitrogenCycleinSoils.pdf>
- Lian-Kuet C., Mee-HuaW. & Bruun H. (2013) *Degradation of chlorpyrifos in humid tropical soils*. Journal of Environmental Management.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.005>
- Lukas S., Gattinger A., Meier M, Müller A. Boller T., Mäder P. & Mathimaran N. (2018) *Improving Crop Yield and Nutrient Use Efficiency via Biofertilization—A Global Meta-analysis*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2017.02204/full>
- Madigan M., Bender K., Buckley, D., Stahl, D. & Martinko J. (2015) *Brock. Biología de los microorganismos* – Pearson Educación <http://www.ebooks7-24.com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/stage.aspx?il=5285>
- Medina, D. (2018). *Impacto ambiental generado por la agricultura colombiana 1970 - 2014*. Conexión Agropecuaria JDC, 8(1), 31-47. <https://doi.org/10.38017/22487735.615>
- Melgarejo (2003) *Bioprospección: plan nacional y aproximación al estado actual en Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/38717/26672-93439-1-pb.pdf?sequence=1>
- Muñoz-Miranda L., Higuera-Ciapara I., Gschaedler-Mathis A., Rodríguez-Zapata L., Pereira-Santana A., & Figueroa-Yáñez L. (2019). *Breve Descripción de la Biología Sintética y la Importancia de su Relación con otras Disciplinas*. Revista mexicana de ingeniería biomédica, 40 (1), e201808EE1. <https://doi.org/10.17488/rmib.40.1.9>
- Muñoz & Benavides (2010) *Fertilización biológica: técnicas de vanguardia para el desarrollo agrícola sostenible*. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552010000200007
- Niño, G. (2017). *Bioprospección y conocimiento tradicional en Colombia*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/63804/2018-06-11%20Tesis%20Final%20Bioprospecci%C3%B3n%20y%20CT.pdf?sequence=1>
- Observatorio Latinoamericano de conflictos ambientales. *Plaguicidas con solicitudes de prohibición y de severa restricción*. <http://www.olca.cl/oca/plaguicidas/plag04.htm>
- Odukkathil & Vasudevan (2016). *Residues of endosulfan in surface and subsurface agricultural soil and its bioremediation*. Revista de gestión ambiental, 165, (pp 72-80).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479715302723>

- Ojuederie & Babalola (2017) *Microbial and Plant-Assisted Bioremediation of Heavy Metal Polluted Environments*. A Review International Journal of Environmental Research and Public Health 14, (12): 1504. <https://doi.org/10.3390/ijerph14121504>
- Oyemitan, I.A. (2017). African Medicinal Spices of Genus Piper.
- Pastrana N., Suarez Z., Acosta A., Arango C., Hatly B., Correa H., Kerr R., Duque C. & Diaz L. (2016) *Bioprospecting for culturable actinobacteria with antimicrobial properties isolated from rivers in Colombian Orinoquia* Recuperado de <https://www.ajol.info/index.php/tjpr/article/view/139122>
- Parte-Satish G., Mohekar-Ashokrao D., Kharat-Arun S. (2017) *Microbial degradation of pesticide*. Revista de investigación. <https://doi.org/10.5897/AJMR2016.8402>
- Pérez C., Chamorro L., & Doncel A. (2018). *Bacterias endófitas promotoras de crecimiento aisladas de pasto colosoana, departamento de Sucre, Colombia*. Revista MVZ Córdoba, 23(2), 6696-6709. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-02682018000206696
- Pileggi S. & Sadowsky M. (2020) *Herbicide bioremediation: from strains to bacterial communities*. Heliyon. 6 (12). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020326104>
- Qu J., Xu Y., Min G., Liu Y. & Pei Z. (2015) *Novel Chryseobacterium sp. PYR2 degrades various organochlorine pesticides (OCPs) and achieves enhancing removal and complete degradation of DDT in highly contaminated soil*. 15, (161), (pp 350-357). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.025>.
- Rahman S., Singh E., Pieterse C, Schenk P. (2018) *Emerging microbial biocontrol strategies for plant pathogens*. 267, (pp 106-111) <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016894521730540X>
- Rentería & Rosero. (2019) *Estudios sobre la biorremediación en Colombia*. 10, (1-2) <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v10n1a05>
- Restrepo C., Pineda M. & Ríos O. (2017) *Mecanismos de acción de hongos y bacterias empleados como biofertilizantes en suelos agrícolas: una revisión sistemática*. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 18 (2), (pp 335-351). https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:635

- Reyes C., Vergara I., Torres E., Diaz M. & Gonzales E. (2016) *Contaminación Por Metales Pesados: Implicaciones Ensalud, Ambiente Y Seguridad Alimentaria*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096110>
- Ruuskanen S., Miia J. R., Kuosmanen V., Laihonen M., Saikkonen K., Saloniemi I. & Helander M. (2020). *Female Preference and Adverse Developmental Effects of Glyphosate-Based Herbicides on Ecologically Relevant Traits in Japanese Quails*. *Environmental Science & Technology*. 54 (2), (pp 1128-1135).
<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b07331>
- Salud pública de México (2010) *La biología sintética: las implicaciones de un nuevo campo para la salud ambiental*, 52 (3), (pp. 276-286).
<https://www.scielo.org/pdf/spm/2010.v52n3/276-286>
- Senthil Kumar P., Femina Carolin C., Varjani S.J. (2018) *Pesticides Bioremediation*. In: Varjani S., Agarwal A., Gnansounou E., Gurunathan B. (eds) *Bioremediation: Applications for Environmental Protection and Management. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7485-1_10
- Singh, N.K., Choudhary, S. *Bacterial and archaeal diversity in oil fields and reservoirs and their potential role in hydrocarbon recovery and bioprospecting*. *Environ Sci Pollut Res* **28**, 58819–58836 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11705-z>
- Shweta J.& Pratyooosh Shukla (2020). *Alternative Strategies for Microbial Remediation of Pollutants via Synthetic Biology*.
- Universidad de la Sabana . (2021).
<https://www.unisabana.edu.co/grupodeinvestigacionenbioprospeccion/>. Obtenido de <https://www.unisabana.edu.co/grupodeinvestigacionenbioprospeccion/>
- Universidad Nacional de Colombia . (2021). *Estudio y aprovechamiento de productos naturales marinos y frutas de colombia*. Obtenido de Sistema de Información de la Investigación: <http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Grupo.jsf?idGrupo=5>
- Universidad Nacional, Abierta y a Distancia . (2021). *Centro de Investigación de Agricultura y Biotecnología (CIAB)*. Obtenido de <https://investigacion.unad.edu.co/centro-de-investigacion-de-agricultura-y-biotecnologia/proyectos>

- Verma S. & Kuila A. (2019) *Bioremediation of heavy metals by microbial process*. Environmental Technology & Innovation. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100369>.
- Yadav- K, Gupta, N. Kumar, V. & Singh K. (2017) *Bioremediation of heavy metals from contaminated sites using potential species: A Review*. Indian Journal of Environmental Protection. 37 (1), (pp 65-84)
- Ying-Hua Z., Di X., Jia-Qi L.& Xin-Huai Z. (2014) *Enhanced degradation of five organophosphorus pesticides in skimmed milk by lactic acid bacteria and its potential relationship with phosphatase production*. Food chemistry 1 (164), (pp 173-178). <http://10.1016/j.foodchem.2014.05.059>
- Zaragoza B., Valladares B., Ortega C., Zamora J., Velázquez V., & Aparicio J. (2016). *Repercusiones del uso de los organoclorados sobre el ambiente y salud pública*. Abanico veterinario, 6 (1), (pp 43-55). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-61322016000100043&lng=es&tlng=es
- Zhou L, Song C., Li Z. & Kuipers O. (2021) *Antimicrobial activity screening of rhizosphere soil bacteria from tomato and genome-based analysis of their antimicrobial biosynthetic potential*. BMC genomics, 22. <https://link.springer.com/article/10.1186/s12864-020-07346-8>
- Zia C., Hussain S., Arshad K., Khalid A., & Arshad M. (2013) *Microbial degradation of chlorpyrifos in liquid media and soil*. Journal of environmental management. 114 (pp 372-80). <http://10.1016/j.jenvman.2012.10.032>