

Viabilidad de la biorremediación en la recuperación de suelos contaminados por residuos sólidos  
urbanos dispuestos en sitios inadecuados

Joan Sebastian Moreno Ayala

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Química Ambiental

Director

Fernando Martínez Ortega

Docteur en Chimie

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Programa Académico Especialización en Química Ambiental

Bucaramanga

Año 2025

### **Dedicatoria**

Con el propósito de encaminar un futuro mejor, en unión,  
a la investigación del presente y el diagnóstico adecuado del pasado,  
el porvenir pintara menos paupérrimo para las siguientes generaciones.

### **Agradecimientos**

Doy gracias a Dios por permitirme culminar la especialización en Química Ambiental. Agradezco a mi familia, quienes me apoyaron desde el comienzo hasta la finalización de mi posgrado. Agradezco a cada profesional que tuve como compañeras y compañeros. Gracias al profesor Fernando por su orientación y colaboración como director. Gracias al plantel de docentes y funcionarios de la Universidad Industrial de Santander por contribuir a este espacio académico. Y Gracias a todos los que me dieron su aliento para incentivar a alcanzar este logro.

## Tabla de Contenido

Introducción .....	9
1. Objetivos.....	11
1.1. Objetivo General.....	11
1.2. Objetivos Específicos.....	11
2. Generación de residuos sólidos urbanos .....	12
2.1. Botaderos a cielo abierto.....	12
2.2. Clausura de sitios inadecuados para la disposición final.....	19
3. Recurso suelo .....	22
3.1. Características del suelo.....	22
3.2. Afectación al suelo.....	27
4. Biorremediación.....	30
4.1. Operación de la biorremediación.....	31
4.1.1. Bioremediation In situ.....	33
4.1.2. Bioremediation Ex situ .....	37
4.2. Ventajas de la biorremediación.....	38
4.3. Recuperación de suelos.....	40
5. Conclusiones.....	43
6. Recomendaciones .....	44
Bibliografía .....	46

### **Lista de tablas**

Tabla 1.	<i>Vectores de organismos patógenos causantes de enfermedades</i> .....	13
Tabla 2.	<i>Datos cuantitativos de la disposición final Residuos Sólidos en Colombia 2021</i> ...	16
Tabla 3.	<i>Estructura mineral interactuando con moléculas de agua y oxígeno</i> .....	23
Tabla 4.	<i>Ejemplos de fitorremediación</i> .....	34

### Lista de figuras

Figura 1.	<i>Ubicación de sitios de disposición final en el territorio colombiano 2020</i> .....	15
Figura 2.	<i>Reducción de botaderos a cielo abierto en Colombia</i> .....	17
Figura 3.	<i>Transformación de un suelo con insinuación de los horizontes</i> .....	25
Figura 4.	<i>Elementos metálicos tóxicos y metales esenciales</i> .....	30
Figura 5.	<i>Interacción de factores presentes en la biorremediación</i> .....	32
Figura 6.	<i>Procesos de fitorremediación</i> .....	35
Figura 7.	<i>Fitoextracción del contaminante en el suelo.</i> .....	36
Figura 8.	<i>Procedimientos en el desarrollo de compostaje</i> .....	39
Figura 9.	<i>Porcentaje de generación de residuos sólidos</i> .....	45

## Resumen

**Título:** viabilidad de la biorremediación en la recuperación de suelos contaminados por residuos sólidos urbanos dispuestos en sitios inadecuados\*

**Autor:** Joan Sebastian Moreno Ayala\*\*

**Palabras Clave:** biorremediación, recuperación, residuo, suelo

### Descripción:

El presente escrito pretende poner a la vista la biorremediación como una posibilidad verde para recuperar el suelo que ha sido afectado negativamente por la incorrecta escogencia de sitios de disposición final de residuos sólidos provenientes de las actividades rutinarias de la población urbana.

La creciente generación de residuos sólidos ha con llevado a un aumento de los sitios inadecuados de disposición final, contraponiendo la norma jurídica de brindar un ambiente sano.

La contaminación latente de la acumulación incontrolada y el inapropiado destino de los residuos sólidos urbanos ha traído como consecuencia negativa la perturbación de la naturaleza y malestar en la salud humana.

El suelo, es el primer recurso natural en tener contacto con los xenobióticos generados de la descomposición y/o degradación de los residuos sólidos. Al escoger e incentivar los distintos microorganismos y/o especies vegetales encargados de reducir e inmovilizar las concentraciones de los contaminantes dan como resultado positivo la recuperación ambiental del sitio.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Especialización en Química Ambiental. Director: Fernando Martinez Ortega. Docteur en Chimie.

## **Abstract**

**Title:** Feasibility of bioremediation in the remediation of soils contaminated by urban solid waste disposed in inappropriate sites

**Author(s):** Joan Sebastian Moreno Ayala \*\*

Keywords: bioremediation, recovery, waste, soil.

### **Description:**

This document aims to present bioremediation as a green alternative for the restoration of soils that have been negatively affected by the improper selection of final disposal sites for solid waste generated by the routine activities of urban populations.

The increasing generation of solid waste has led to an increase in inappropriate landfills, which contradicts the legal mandate to provide a healthy environment. The latent contamination caused by uncontrolled accumulation and inappropriate management of urban solid waste has resulted in environmental degradation and adverse effects on human health.

Soil is the first natural resource to encounter xenobiotics produced during the decomposition and/or degradation of solid waste. By selecting and promoting different microorganisms and/or plant species capable of reducing and immobilizing pollutant concentrations, a positive result is achieved in the environmental remediation of the affected site.

---

\* Degree work

\*\* Industrial University de Santander. Specialization in Environmental Chemistry. Director: Fernando Martinez Ortega. Docteur en Chimie.

## Introducción

Los hábitos de consumo moderno de la población humana han incrementado la cantidad de residuos sólidos en las ciudades. Esta generación masiva de desechos dispuestos inadecuadamente causa efectos negativos a la salud pública, así, como a los ecosistemas circundantes de los basureros municipales. La afectación perjudicial al bienestar social y ambiental que generan los botaderos de basuras refleja una ineffectividad como sitios de disposición final.

El tratamiento incipiente de los municipios para el control de sus residuos sólidos ha concebido problemas de contaminación de los recursos suelo, agua y aire en los territorios. Al seleccionar sitios inadecuados como botaderos a cielo abierto, para la disposición final de los desechos urbanos, carecen de los tratamientos técnicos apropiados para realizar un efectivo reciclaje o ejecutar procesos eficientes de degradación y descomposición final sin la afectación del medio ambiente. De modo que, considerar el cierre o la transformación eficiente a rellenos sanitarios podrían ser alternativas factibles para mitigar la afectación creciente de la salud pública y del medio ambiente.

La contaminación del suelo por residuos de diferente origen dispuestos en sitios inadecuados hace que la recuperación ambiental de estos lugares contaminados sea un proceso complejo. La biorremediación puede ser una opción verde para la restauración de los sitios contaminados, dado que usa microorganismos como algas, hongos, bacterias, nemátodos y plantas que causan el menor daño a los ecosistemas en comparación con otros métodos químicos de remediación ambiental, ya que usan los contaminantes como fuente de alimento y energía (Fabelo Falcon, 2017). Esta alternativa natural permite reducir los compuestos potencialmente

contaminantes a formas más simples de degradación, como es el caso del hongo *Pleurotus ostreatus*, el cual tiene la característica de producir una enzima capaz de degradar metales pesados, o la utilización de plantas (fitorremediación) que a través de sus raíces absorben, metabolizan y pueden llegar a eliminar los metales contaminantes (Ocampo Hernández, 2021).

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Establecer la viabilidad de la biorremediación para la recuperación ambiental de los suelos contaminados por residuos sólidos urbanos dispuestos en sitios inadecuados.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Realizar una revisión bibliográfica sobre los problemas ambientales generados por la selección inadecuada de los sitios de disposición final de residuos sólidos.

Presentar las evidencias bibliográficas acerca de la afectación al recurso suelo por los botaderos a cielo abierto de residuos sólidos urbanos.

Proponer la biorremediación como operación de recuperación de suelos afectados por residuos sólidos urbanos.

## 2. Generación de residuos sólidos urbanos

La sociedad moderna de consumo ha causado una creciente generación de residuos sólidos provenientes de las actividades rutinarias de las poblaciones, de acuerdo a la Coalición cierre de basurales de América Latina y el Caribe en su Hoja de Ruta para el Cierre Progresivo de los Basurales en ALC publicado en 2021, estima que, la generación per cápita está en 1 kg/hab/día, tasa que puede aumentar en los próximos años; los hábitos de consumo sobrepasan lo necesariamente básico que sumado a la deficiente prestación del servicio público de aseo dieron paso para que los municipios optaran como medida precipitada implementar sistemas de recolección sin pensar en la disposición final (Montes Cortés, 2018, p. 17). Dado a la existencia de una resistencia a la reducción de consumo y al reciclaje por parte de la población, al finalizar el ciclo de utilidad de cualquier producto su transformación a desecho es algo ineludible. Por lo tanto, si existiera una disposición final adecuada de las basuras en un “*sitio apropiado*”, en el cual se realizarán los procedimientos convenientes para garantizar su mitigación completa se evitarían los posibles impactos negativos al ambiente por su acumulación continúa (Cruz Sotelo & Ojeda Benítez, 2013).

### 2.1. Botaderos a cielo abierto

Al saciar ese deseo por tener objetos mundanos y en su mayoría innecesarios, la población ha generado una cantidad de basura que ha perpetuado en el paisaje, irrumpiendo en el ecosistema y causando daños al medio ambiente como deficiencia en la calidad del aire, infertilidad y deterioro del suelo, entre otros (Escalona Guerra, 2014, p. 272). Los municipios que en el tiempo pasado tomaron la decisión de disponer sus residuos sólidos urbanos en un hueco carente de la técnica propicia para mitigar los impactos ambientales, trataron de enterrar la

descomposición de los desechos de sus habitantes. Estos sitios inadecuados de disposición final se localizan en las afueras de la zona urbana; muchas veces son ignorados en las planificaciones municipales, pero su actividad latente perjudica a la naturaleza circundante; como el botadero Rambrán, ubicado en la ciudad de Chota, Perú, donde la flora arbórea y arbustiva sufren un impacto negativo, también se ha evidenciado presencia de abundantes moscas y ratas (López Chávez & Purihuamán Leonardo, 2018, p. 7).

Los botaderos de basura a cielo abierto al estar desprovistos de cualquier tecnología son considerados sitios de disposición final insostenibles con el medio ambiente. La falta de cobertura y el incorrecto cercamiento hace que los desechos se dispersen por la flora aledaña, muchas veces siendo arrastrados hasta fuentes hídricas, además de atraer aves de carroña, roedores y otros vectores consignados en la Tabla 1. El equipamiento deficiente de obras ingenieriles ha ocasionado una falta de regulación en las operaciones resultantes de la disposición final de residuos como estructuras de escorrentía superficial, manejo de lixiviados y gases, recuperación edáfica, entre otros controles señalados en la Guía Ambiental Saneamiento y Cierre de Botaderos a Cielo Abierto del Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (2002).

**Tabla 1.**  
*Vectores de organismos patógenos causantes de enfermedades*

Organismos	Enfermedad
<b>Artrópodos</b>	
Mosquito	Paludismo, filariasis, fiebre amarilla
Piojo	Pediculosis, tifus exantemático
Pulga	Tifus murino
Moscas	Fiebre tifoidea, diarreas
Ácaros	Sarna
Cucarachas	Fiebre tifoidea, diarreas
<b>Múridos</b>	
Ratas y ratones	Salmonelosis, leptospirosis, rabia, peste bubónica
<b>Otros organismos</b>	
Hormigas, arañas, escorpiones, avispas,	No son vectores de enfermedades, pero pueden causar

---

gusanos, serpientes, etc.

molestias en los seres humanos y en algunos casos la muerte.

---

Nota: adoptado de Estudio de los Residuos Sólidos en Colombia (Montes Cortés, 2018, p. 78)

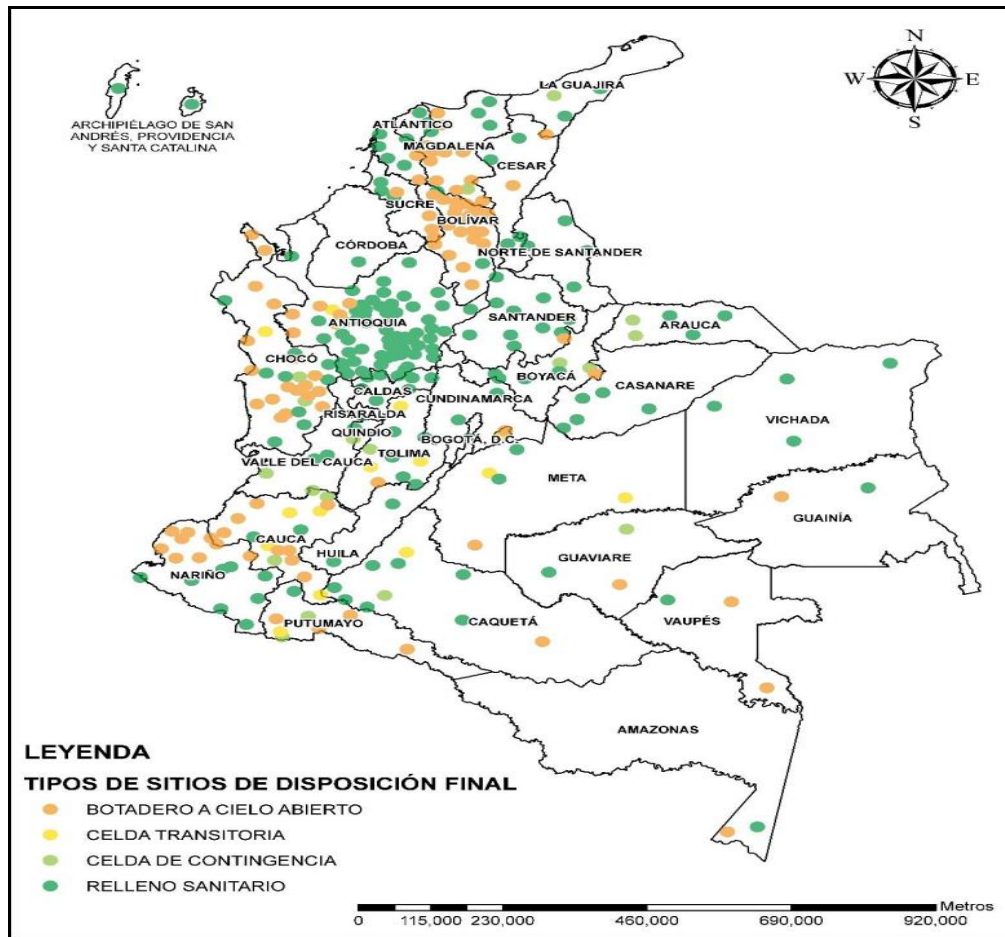
La descomposición de los RSU produce lixiviados, el cual es un líquido tóxico que se va formando por la degradación que sufren los distintos desechos orgánicos e inorgánicos; en su mayoría está compuesto por altas concentraciones de metales pesados y patógenos (García Gómez & Castro Garcés, 2019, pp. 5-6). La percolación de este xenobiótico, entre agua pluvial y el suelo puede acarrear afectaciones negativas a acuíferos o por escorrentía podría llegar a la corriente superficial más cercana. Este proceso de putrefacción también incide en la calidad del aire, pues el material particulado cargado de agentes infecciosos, las emisiones de CH<sub>4</sub> y otros contaminantes son arrastrados por las corrientes de viento perjudicando la salud ambiental y humana (Escalona Guerra, 2014, pp. 274-275). El desprovisto técnico de los sitios inadecuados de disposición final de RSU ha conllevado a la contaminación del recurso suelo, aire y agua.

En el territorio nacional, el 33,45% de los sitios de disposición final está catalogado como no autorizado. Aunque hubo una disminución en comparación con el año 2019, durante la vigencia de 2020 se identificó que el 7,70 % de los municipios disponían en lugares que no cumplían con lineamientos técnicos establecidos en la normativa, como en el caso del municipio de Tadó ubicado en el departamento del Choco. Además, para el año 2020 la disposición final de residuos sólidos de ochenta y cuatro (84) municipios se realizaba en botaderos a cielo abierto, de acuerdo con el Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020 de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios de la República de Colombia, publicado en el año 2021, disponible en [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe\\_df\\_2020%20%281%29.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20%281%29.pdf).

Para el año 2020 Colombia contaba con el funcionamiento de 174 rellenos sanitarios autorizados como sistemas “técnicamente” adecuados para la disposición final de residuos sólidos provenientes de las urbes. Los sitios no autorizados contabilizaban 94, lo que corresponde al 1,49% de las toneladas de RSU por año, que son arrojadas por el país a estos caducos lugares. La Figura 1 presenta la ubicación de los botaderos a cielo abierto, cuya localización principalmente se sitúa en los departamentos de Bolívar y Choco, e ilustra que, en las regiones del Caribe y Pacífico hay una mayor incidencia de los sitios no autorizados de disposición final.

**Figura 1.**

*Ubicación de sitios de disposición final en el territorio colombiano 2020*



Nota: adoptado del Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020, p. 24.

De acuerdo con lo reportado en el Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021, en Colombia se registró una disminución de 5 sistemas no autorizados de disposición final de RSU, comparado con la vigencia anterior. Predominando la utilización de los botaderos a cielo abierto como sitios inadecuados de disposición final sobre las celdas transitorias. En la Tabla 2, se muestran algunas de las cifras estadísticas compiladas en el citado informe.

**Tabla 2.**

*Datos cuantitativos de la disposición final Residuos Sólidos en Colombia 2021*

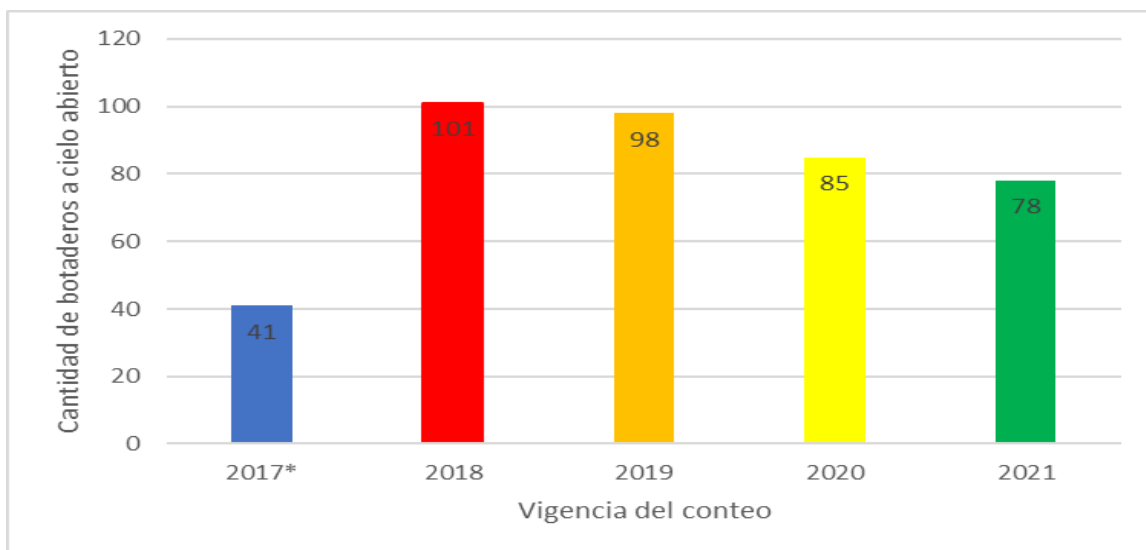
<b>Disposición final de Residuos Sólidos 2021</b>		
<b>Toneladas anuales dispuestas por sistemas autorizado o no autorizado</b>		
Sistema autorizado	11801299,30	98,7%
Sistema no autorizado	151141,60	1,26%
<b>Total</b>	<b>11952440,90</b>	<b>100%</b>
<b>Toneladas anuales dispuestas por tipo de sistema</b>		
Celda transitoria	26538,23	0,20%
Celda de contingencia	189413,56	1,60%
Botadero a cielo abierto	124603,37	1,00%
Relleno sanitario	11611885,75	97,2%
<b>Total</b>	<b>11952440,91</b>	<b>100%</b>
<b>Número de tipos de sistema</b>		
Sistema autorizado	177	66,5%
Sistema no autorizado	89	33,5%
<b>Total</b>	<b>266</b>	<b>100%</b>
<b>Sistemas no autorizados</b>		
Quema	0	0
Cuerpo de agua	0	0
Enterramiento	0	0
Botadero a cielo abierto	77	28,9%
Celda transitoria	12	4,51%
<b>Total</b>	<b>89</b>	<b>33,4%</b>

Nota: adoptado del Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021, p. 7.

Si bien, de los noventa y cinco municipios identificados en el 2020 que hacían uso de los sistemas antitécnicos de “eliminación” de residuos sólidos, para el año 2021 ocurre una disminución, pues el número se redujo a ochenta y nueve municipios. Y, para el caso de los botaderos a cielo abierto fueron atendidos 85 municipios en el 2020 bajando a 78 en el 2021, representado en la Figura 2. Lo anterior, no es una garantía de recuperación en el bienestar ambiental, ni en la calidad de vida para los habitantes afectados.

**Figura 2.**

*Reducción de botaderos a cielo abierto en Colombia*



\*Para el año 2017 la cantidad de municipios que reportaron datos fue menor a la de las vigencias posteriores.

Fuente: adoptado del Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021, p. 24.

Los municipios de Cali, Yumbo y Jamundí, entre los años 1967 y 2008, produjeron alrededor de unas 1600 toneladas de residuos sólidos que fueron dispuestas en el botadero de Navarro (Filigrana, Gómez, & Méndez, 2011, p. 323). Al disponer estos desechos de una manera inadecuada acarrearón quebrantos a la salubridad en el área de influencia, por ejemplo, en el caso de niños entre 1 y 5 años donde su exposición al botadero Navarro se ha asociado a eritema, síntomas respiratorios bajos y prurito ocular (Girón, Mateus, & Méndez, 2009, p. 397-398), en el

caso de los adultos mayores de 50 años, se vieron afectados por las partículas presentes en el ambiente dada a la exposición a largo plazo. En el área de influencia se hallaron mayores concentraciones de material particulado, CH<sub>4</sub> y benceno, en comparación a zonas no expuestas (Filigrana, Gómez, & Méndez, 2011, p. 331). Los menores expuestos tienden a contraer afectaciones respiratorias con una probabilidad del 60% sobre los no expuestos al botadero a cielo abierto (Girón, Mateus, & Méndez, 2009, p. 395); los daños a la salud de la población aledaña están principalmente asociados a problemas respiratorios, debido al material particulado, olores ofensivos y algunos agentes patógenos que son arrastrados por el viento (Escalona Guerra, 2014, p. 272).

Usar los botaderos a cielo abierto y/o celdas transitorias como sitios de disposición de final de RS, son practicas inadecuadas que han conllevado a riesgos inadmisibles como el incremento de enfermedades respiratorias agudas, parasitismo intestinal, diarreas, dengue y malaria; además del impacto negativo al medio ambiente debido a las sustancias tóxicas generadas por la acumulación antirreglamentaria de desechos que alteran las capacidades de descomposición natural y la composición prístina del suelo entre otros recursos (Escalona Guerra, 2014, p. 273-274). Al arrojar los desechos sin ningún procedimiento técnico ocasionan la transformación del paisaje local (Cáceres Cortez, 2007, p. 73), generando contaminación visual, deterioro de la flora y fauna, y degradación en la calidad del suelo (Montes Cortés, 2018, p. 67). En el caso del botadero Marmolejo ubicado en Quibdó, departamento de Choco, cuya deficiencia en la disposición final ha conllevado a cambios negativos en el ambiente (Ortega Ramírez, Marín Maldonado, & Castro, 2021); produciendo en el suelo una deficiencia de nutrientes como K, P, N, CaCO<sub>3</sub> y bajo contenido de materia orgánica (López Chávez & Purihuamán Leonardo, 2018). Contrario con la utilización de rellenos sanitarios, como tecnología de disposición final, esta trata

de minimizar el impacto negativo, dado que estos sistemas están provistos para depositar los RS, realizar compactación y tratar los productos resultantes de la descomposición (Diaz Gutiérrez & Duran Ariza, 2005, p. 9).

Entonces, posibilitar la clausura de los sitios inadecuados de basura ayuda a la mitigación de problemas salubres e impactos negativos al ambiente; otra alternativa es optar la conversión a rellenos sanitarios, como medida “aceptable” de disposición final de residuos (Ministerio del Medio Ambiente, 2002, pp. 15, 34). En el presente escrito se trabajará sobre la opción de cierre de los botaderos de basura y la posterior recuperación ambiental del suelo contaminado, usando la biorremediación como técnica apropiada y amigable al entorno natural.

## **2.2. Clausura de sitios inadecuados para la disposición final**

De acuerdo con la Ley 23 de 1973 artículo cuarto, se podría entender como contaminación la alteración de los recursos suelo, agua y aire por las actividades antrópicas o acciones de la naturaleza que interfieran de forma negativa en el bienestar de las personas y en la calidad del medio ambiente colectivo o particular. En el Decreto 2811 de 1974 parte IV, Título III, artículo 35, prohíbe “arrojar” sin consentimiento de la autoridad ambiental, los residuos, basuras, desperdicios y en general, desechos que atenten contra los suelos o causen perturbación al individuo o a la población humana, y el artículo 37, señala sobre el deber de los municipios de planificar la prestación de servicios para la recolección, transporte y disposición final de “basuras”, actividades que estarán ajustadas a requisitos y condiciones determinadas por el Gobierno. Como medida sanitaria, en el artículo 25 de la Ley 9 de 1979, el Congreso de Colombia decreta que, para realizar disposición final de basura solamente se utilizará el predio autorizado por el Ministerio de Salud o la entidad delegada.

Casi 50 años después de expedirse jurisprudencia en materia ambiental, y, comparada con el tiempo de activismo con entidades de referente mundial, como la EPA – United States Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) creada en 1970- darían para pensar que el avance para salvaguardar el ambiente sería superior al actual panorama nacional. Pero, “acciones” que no van más allá de escribir en papel, digitar y digitalizar, han ocasionado que se dilate, por aproximadamente medio siglo, la urgencia que generó el movimiento jurídico en pro del medio ambiente de su momento. Aunque la normatividad en el tema ambiental en Colombia es extensa, en comparación a su aplicación que es muy reducida, al señalar ciertas Leyes, Decretos, Resoluciones y guías aplicables al contexto de disposición final de residuos sólidos habrá cabida para vislumbrar el posible error en la escogencia de los sitios inadecuados y el sustento para realizar su clausura.

En un marco de sostenibilidad fiscal, la Constitución Política de la República de Colombia 1991, artículo 334, indica que, el Estado intervendrá para imponer racionalización económica en la explotación de recursos naturales, la prestación de servicios públicos y privados, entre otros, para garantizar un ambiente sano y mejoramiento en la calidad de vida de sus habitantes, dando alcance a los objetivos del Estado Social de Derecho. El artículo 80 indica que, el Estado deberá planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, sancionar legalmente con el fin de prevenir y controlar el daño ambiental, y exigir reparaciones por el deterioro ocasionado. En el artículo octavo, la obligación del Estado y su comunidad social es velar por la protección de las riquezas naturales y culturales de la nación.

El Estado como garante de la soberanía del territorio y autoridad vigilante del cumplimiento de la ley, que a través de los gobernantes políticos ha tratado de planificar y gestionar lo necesario para el goce y disfrute de un ambiente sano para sus ciudadanos, junto con

la protección, conservación y aprovechamiento de los recursos naturales, entre otros derechos fundamentales. Aunque los resultados no llegan a ser los esperados, el mandato escrito ordena la sanción administrativa y/o penal en la vulneración al ambiente y su repercusión en la perturbación de la salud humana. La omisión de la normativa y las acciones injustificadas del personal adscrito a las entidades territoriales han generado un traumatismo en el ordenamiento territorial (una de tantas consecuencias) donde la solución para deshacer la basura fue arrojarla a un agujero a las afueras del perímetro urbano, afectando negativamente el entorno natural-rural, quedando las estrategias de planificación ambiental o la figura de prevención relegada por las actividades de acumulación perturbadora de residuos sólidos (Montes Cortés, 2018, p.136).

La Resolución 1045 de 2003, contemplaba la metodología para elaborar el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos – PGIRS, en el artículo 13, se hablaba sobre la <clausura y restauración ambiental> otorgando a las entidades territoriales en un plazo no mayor a 2 años la clausura de botaderos de basura a cielo abierto u otros sitios que operaban sin contar con la normativa legal vigente, u optar por realizar la conversión a un relleno sanitario acorde a las medidas técnicas de manejo impartidas por la autoridad ambiental competente. En el año 2014, se expide la Resolución 754, sobre la actualización de los PGIRS, deroga la providencia citada al comienzo del presente acápite; dentro de la renovación se encuentra el seguimiento y control de los programas del PGIRS. El presente escrito tendrá un enfoque al “programa de disposición final”, enmarcado en el Decreto 838 de 2005.

La empresa de servicio de aseo articulada con las entidades territoriales y autoridades ambientales tendrán la responsabilidad de recuperar ambientalmente los lugares de uso indebido para la disposición final de basuras o desechos; o garantizar su adecuada transformación a rellenos sanitarios, de ser viable técnicamente, de acuerdo con el artículo 21 del Decreto 838 de

2005. Realizar la conversión a rellenos sanitarios para cada municipio donde se ubican los botaderos a cielo abierto, puede acarrear una inversión mayor, contrario a, si estos residuos son transportados a un relleno sanitario de índole regional; la mayoría de las veces los sitios inadecuados de disposición final, los ubicaban en lugares con el espacio justo para un “hueco”, sin la posibilidad de construir obras de control ambiental, ni de tratamiento de residuos.

Por lo tanto, optar por la clausura y recuperación ambiental del sitio permitiría cumplir con lo exigido en la Ley, además de restaurar un paisaje natural afectado por la basura que es arrojada de forma descontrolada, lo que genera la oportunidad de usar la biorremediación en el suelo como correctivo natural ante los contaminantes presentes, los cuales pueden servir de alimento a los microbios indicados, donde absorben, y arrojan al medio ambiente elementos inocuos y más asimilables (United States Environmental Protection Agency - EPA, 2012).

### **3. Recurso suelo**

El suelo posee la característica de dar sostenimiento a los servicios de producción primaria. Provee los nutrientes necesarios para el crecimiento de plantas y propicia el hábitat de microorganismos. Además, permite la interacción química de varios elementos como en el ciclo del nitrógeno, cuya fijación al suelo genera nutrientes necesarios para la flora aledaña.

#### **3.1. Características del suelo**

El suelo puede considerarse como un sistema trifásico constituido por materia mineral y orgánica, agua, y aire. Principalmente la formación del suelo puede estar orientada por medio de cinco factores: a) Materia original, b) Organismos, c) Clima, d) Relieve y e) Tiempo (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006, pp. 12, 21). Las interacciones climáticas que ejercen presión sobre la roca madre le generan alteraciones físicas y químicas (Ortiz Bernad,

Sanz García, Dorado Valiño, & Villar Fernández, 2007, p. 6), dando como resultado partículas de distinta composición y tamaño que conforman el suelo (Domènech & Peral, 2006, p. 14).

Al transcurrir cierto tiempo, la influencia que la intemperie ejerce sobre la roca de corteza, a través del viento, el agua y la temperatura, favorece la disgregación mecánica desplegando minerales primarios con proporciones de ortosilicatos y feldespatos, cuarzo, entre otros. Los fragmentos naturales, producto de la acción mecánica, sufren cambios en sus propiedades debido a agentes de meteorización química como el agua, algunos compuestos orgánicos, oxígeno molecular y dióxido de carbono (Domènech & Peral, 2006, pp. 3-7). En el caso del agua, la cual tiene la capacidad de disolución e hidratación, genera cambios en la estructura mineral, por ejemplo, el yeso es un mineral hidratado cuya reacción esta descrita en la Tabla 3. El anterior proceso químico, junto con la oxidación de elementos minerales y transformación de la materia orgánica, dan paso al material orgánico del suelo, y así a la creación del perfil del suelo conformado por una serie de horizontes (Domènech & Peral, 2006, p. 16).

**Tabla 3.**

*Estructura mineral interactuando con moléculas de agua y oxígeno*

Minerales		Agente químico	Reacción
Anhidrita	Yeso	Agua	Hidratación
CaSO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> + 2H <sub>2</sub> O → CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O
Hierro	Hematita	Oxígeno	Oxidación
Fe	Fe <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub>	O <sub>2</sub>	4Fe + 3O <sub>2</sub> → 2Fe <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub>

Nota: la adición de agua a un sulfato de calcio (anhidrita) arroja un mineral hidratado (yeso); adoptado del libro Química ambiental de sistemas terrestres, p. 4. El proceso de oxidación ocurre cuando un elemento es expuesto al oxígeno atmosférico; adoptado del libro Química ambiental básica, p. 65.

En consecuencia, la evolución del suelo puede estar marcada por varios niveles de horizontes, constituidos de la siguiente manera:

Horizonte O: conformado por materia orgánica, integrada de material vegetal, parcialmente degradada, siendo el horizonte más superficial.

Horizonte A: nivel expuesto a la intemperie. Ocurre la disolución de sustancias o lixiviación. Posee alta porosidad y aireación, hay presencia de microorganismos y ocurre la fijación de raíces. Propicia la degradación de materia orgánica y la circulación vertical de agua infiltrada (percolación).

Horizonte B: en esta zona convergen los constituyentes arrastrados de los horizontes anteriores. Es considerada zona aluvial, dado que los materiales son transportados por el lavado de agua. Se produce la liberación de algunos cationes producto de la descomposición.

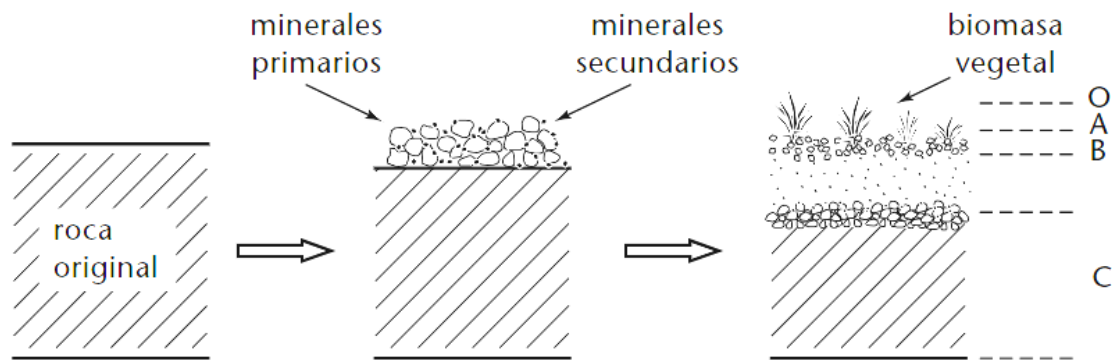
Horizonte C: formado por materiales provenientes de la roca madre. En esta zona se desarrolla la transición entre la roca original y los horizontes.

Horizonte D: roca madre consolidada.

Los distintos horizontes se caracterizan por las siguientes propiedades como color, textura, estructura, límites y perfil. El perfil de un suelo estará marcado por el clima, por las especies de vegetación, por la presencia de microorganismos, por el aspecto evolutivo del suelo y la esencia natural de la roca madre. En la Figura 3 se encuentra representada la transformación de la roca, dando paso a la creación del suelo (Castro Salazar, 2021, p. 67), (Domènech & Peral, 2006, pp. 15,16) y (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006, pp. 14-16).

**Figura 3.**

*Transformación de un suelo con insinuación de los horizontes*



Nota: esquema de la formación del suelo, evolución, perfil e indicación de horizontes. Adoptado del libro *Química ambiental en sistemas terrestres* (Domènech & Peral, 2006, p. 15), <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/viewepub/?id=67917>

La materia orgánica del suelo se origina, en gran parte, por la descomposición de la biomasa vegetal (Domènech & Peral, 2006, p. 7), compuesta en su mayoría por un material denominado humus, proveniente de la degradación por parte de microorganismos de los residuos de plantas fotosintéticas (Domènech Antúnez & Baird, 2018, p. 722). La fracción de humus es rica en nitrógeno, además está conformada por otros elementos como carbono, oxígeno e hidrógeno; la materia orgánica del suelo disminuye a mayor profundidad del suelo (Domènech Antúnez & Baird, 2018, p. 723). La capacidad complejante del humus, a través de los grupos funcionales, principalmente carboxilo y fenólico, donan electrones a los orbitales vacíos de los metales de transición, formando compuestos más estables; de esta manera contribuye a la retención de iones de metales tóxicos, evitando que se infiltren al medio hidrosférico (Domènech & Peral, 2006, p. 12).

El porcentaje de materia orgánica presente en el suelo minimiza la presencia de elementos metálicos a través del proceso de quelación, además, aporta al almacenamiento de nutrientes y agua, mitiga la afectación adversa de los metales pesados, contribuye a la capacidad de intercambio catiónico, y a la capacidad tampón del suelo (Pérez, 2022, p. 35), pues los ácidos

húmicos y ácidos fúlvicos presentes en la Materia Orgánica, desarrollan procesos de disociación y asociación, dando lugar a la capacidad reguladora del pH, lo que evita excesos de elementos esenciales o tóxicos, alteraciones e inestabilidades en la actividad microbiana, entre otros desequilibrios (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006, p. 294). En los diferentes comportamientos químicos, los aspectos físicos y las interacciones biológicas del suelo, se genera un intercambio iónico, definido como “*capacidad que tiene un suelo para retener y liberar iones positivos o negativos [...] mediante el cual se cambian cationes y aniones entre las fases sólida y líquida del suelo*” (Pérez, 2022, p.35).

La capacidad de intercambio catiónico es la “*cantidad total de iones adsorbidos reversiblemente, expresada en moles de carga positiva por unidad de masa de material (normalmente por kg de suelo)*” (Domènech & Peral, 2006, p. 68). Esta propiedad de intercambio del suelo contribuye a la retención y disponibilidad de nutrientes para las especies vegetales (Domènech & Peral, 2006, p. 71). En el suelo los cationes más usuales son  $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  (Domènech Antúnez & Baird, 2018, p. 722); dentro los cationes intercambiables presentes en la disolución del suelo se hallan  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Na^+$  y  $NH_4^+$ , y algunos cationes de metales en transición son  $Cd^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , entre otros (Domènech & Peral, 2006, p. 68).

Dada la carga superficial positiva en los coloides del suelo, ocurre una adsorción de aniones (iones de carga negativa), demandando una capacidad de intercambio aniónico, expresada como “*la suma de los moles de carga de aniones adsorbidos reversiblemente por unidad de masa de suelo*” (Domènech & Peral, 2006, p. 76). Algunos aniones de importancia son  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Br^-$ , entre otros (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006, p. 463). En la adsorción aniónica se retienen sulfatos, fosfatos, y otros nutrientes esenciales para la

vegetación (Domènech & Peral, 2006, p. 75) y (Lanfranco, Pellegrini, & Cattani, 2014, p. 170). En condiciones normales del suelo, el pH oscila en 5 - 8,5; en la disolución del suelo los componentes disueltos más abundantes son los cationes intercambiables, estos suelen ser básicos, y el pH está correlacionado con el exceso o ausencia de dichos cationes; entre los cationes básicos están  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , y en los ácidos están  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ , entre otros (Domènech & Peral, 2006, p. 93).

### **3.2. Afectación al suelo**

El suelo sufre contaminación principalmente en su parte biológica, dado que los microorganismos influyentes en los procesos biogeoquímicos son afectados por las concentraciones altas de sustancias provenientes de la degradación de residuos (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006, p. 555). Por ejemplo, en residuos que contengan cromo, como recubrimientos plásticos, algunas pinturas y pigmentos, entre otros desechos cotidianos generados por las industrias; el Cr en su forma Cr(III) y en suelos con un pH de 7, puede oxidarse y desprender anión de cromato  $\text{CrO}_4^{2-}$ , siendo su forma tóxica (Domènech & Peral, 2006, p. 139), dada a la movilidad de este ion tóxico, puede lixiviarse a través del suelo. Una propiedad de la materia orgánica del suelo es la capacidad de absorción, la cual mitiga los efectos de algunas sustancias al adherir y retener elementos como Cd y Cr, aptitud predominante en suelos de cultivo sobre los suelos de bosque (Pérez, 2022, p. 151). Pero, su capacidad de absorción puede verse afectada cuando las concentraciones de los elementos exógenos sobrepasan la presencia de los elementos de la materia sólida en su estado natural (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006, p. 556).

En el interior del suelo suceden movimientos de fluidos entre agua y la fase sólida del suelo (disolución del suelo) y, aire edáfico; cuando el oxígeno molecular se disuelve en la zona edáfica, ocurren procesos de oxidación de la materia orgánica y de especies inorgánicas. La mayoría de las especies disueltas en la disolución del suelo corresponden a iones inorgánicos intercambiables:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  (nutrientes),  $\text{Na}^+$  (relevantes en suelos alcalinos) y  $\text{Al}(\text{OH})_2^+$  (presentes en suelos ácidos), etc. En la clasificación como iones tóxicos se encuentran  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{AsO}_4^{3-}$ , entre otros, provenientes de actividades naturales o antrópicas; por ejemplo, la afectación fitotóxica del  $\text{Al}^{3+}$ , presente en suelos ácidos (Domènech & Peral, 2006, pp. 17 y 18).

El valor del pH, la humedad, el tamaño de la partícula, la permeabilidad, la materia orgánica, además de otras propiedades fisicoquímicas presentes en el componente suelo (Volke Sepulveda & Velasco Trejo, 2002, pp. 17 y 18), se ven afectadas por la presencia de sustancias tóxicas que sobrepasan la capacidad de asimilación y degradación del suelo. Los elementos exógenos se someten a mecanismos de sorción que *“incluyen la adsorción, que es la atracción de un compuesto hacia una superficie sólida, y la absorción, que es la penetración de un contaminante en un sólido”* (Volke Sepulveda & Velasco Trejo, 2002, p. 15). El contaminante incorporado en la matriz del suelo causa alteraciones en su biodiversidad, reduce su capacidad de actuar como filtro, entre otros impactos negativos, pues la reacción en cadena de la contaminación del suelo, produce en el agua almacenada subterráneamente un desequilibrio en sus nutrientes, causado por el transporte vertical del material contaminante, los cuales, de acuerdo a un reportaje del año 2018 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, pueden ser transferidos a los cultivos e incorporados a la cadena alimentaria, llegando a provocar intoxicaciones en la población.

En los sistemas ambientales se encuentran trazas de metales, en el recurso suelo principalmente se hallan micronutrientes esenciales para las plantas como el Mn, el Mo, el Cu, el Co, el Zn, el Sc y el V, y otros elementos que son fundamentales para la alimentación de los animales (Ni, el Sn y el Cr), señalados en la Figura 4. Cuando estos elementos se presentan de forma excesiva en el ambiente, causan desequilibrios en el entorno natural y pueden llegar a ser tóxicos para los seres vivos. El mayor contribuyente al aumento de metales pesados a los ciclos naturales proviene de las acciones antropogénicas, como los desechos provenientes de circuitos electrónicos, materiales plásticos, recubrimientos metálicos (Cu, Sn, Cr, Cd, Ni, Hg, Pt, Ru, Pd, As, Sb, Se, Mo y Zn), los lixiviados de los botaderos (Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn), así como la ganadería y agricultura (As, Cu y Zn), aportan una cantidad considerable de metales al medio ambiente (Domènech & Peral, 2006, pp. 120 y 121).

Algunas características de importancia de los contaminantes son la concentración (cantidad del elemento), estructura del contaminante (movilidad y degradabilidad) y toxicidad (grado de daño a un organismo), (Volke Sepulveda & Velasco Trejo, 2002, p. 14). Al existir mayor circulación de agua en el suelo, por lluvias, genera elevación de la humedad ocasionando que elementos potencialmente tóxicos (como As, Pb, Cd, Hg) se movilicen a horizontes más profundos; por ejemplo, el Hg en su forma orgánica (metilmercurio), es más soluble, infiltrándose en sedimentos hasta formar parte del alimento para plancton, algas y peces, introduciéndose en la cadena trófica, causando bioacumulación, y produciendo toxicidad en el sistema nervioso central (Domènech & Peral, 2006, p. 135). En la degradación del suelo el proceso de contaminación por sustancias nocivas provenientes de residuos urbanos, agrícolas, industriales, etc., causan agresiones al medio ambiente natural y pérdida de la diversidad ecológica (Juárez Sanz, Sánchez Andreu, & Sánchez Sánchez, 2006, p. 554).

**Figura 4.**  
*Elementos metálicos tóxicos y metales esenciales*

		GRUPOS																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
PERIODOS	1	H																He	
	2	Li	<b>Be</b>											B	C	N	O	F	Ne
	3	Na	Mg										<b>Al</b>	Si	P	S	Cl	Ar	
	4	K	Ca	<i>Sc</i>	Ti	<i>V</i>	<b>Cr</b>	Mn	Fe	<i>Co</i>	<b>Ni</b>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	Ga	Ge	<b>As</b>	Se	Br	Kr
	5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	<i>Mo</i>	Tc	Ru	Rh	Pd	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	In	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	Te	I	Xe
	6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	<b>Hg</b>	<i>Tl</i>	<b>Pb</b>	<b>Bi</b>	Po	At	Rn
	7	Fr	Ra	Ac															

Nota: los elementos metálicos se encuentran sombreados, en cursiva se indican los metales esenciales (micronutrientes) y en negrita los elementos metálicos tóxicos para plantas y animales. Adoptado del libro Química Ambiental de sistemas terrestres (Domènech & Peral, 2006, p. 120) <https://www-digitaliublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/viewepub/?id=67917>

El suelo que ha sido contaminado por el basural queda impregnado de sustancias nocivas, especialmente de metales pesados (Coalición cierre de basurales América Latina y el Caribe, 2021, p. 26). En la degradación del material xenobiótico se producen lixiviados caracterizados por las altas concentraciones de Cd, Ni, Cr y Pb, que infiltrados debilitan la estructura orgánica del suelo (Rueda Balcazar, Gómez Rodríguez, García Ocaña, & López Ocaña, 2020). Además, en la percolación también se encuentran altos niveles de N, P, constituyentes orgánicos y algunos patógenos (García Gómez & Castro Garcés, 2019).

#### 4. Biorremediación

La transformación de sustancias químicas mediante el uso de técnicas biológicas ha dado como resultado productos más asimilables al entorno. Esta biodegradación se puede realizar basada en el diagnóstico particular del contaminante, el elemento a tratar, la selección del sistema biorremediador y aplicación en el lugar afectado. Por ejemplo, se ha evaluado la

utilización de la fitorremediación (uso de plantas) para “*absorber, retener, degradar o transformar sustancias contaminantes a formas menos tóxicas*” para la recuperación ambiental del suelo afectado (López Martínez, Gallegos Martínez, Pérez Flores, & Gutiérrez Rojas, 2005).

#### **4.1. Operación de la biorremediación**

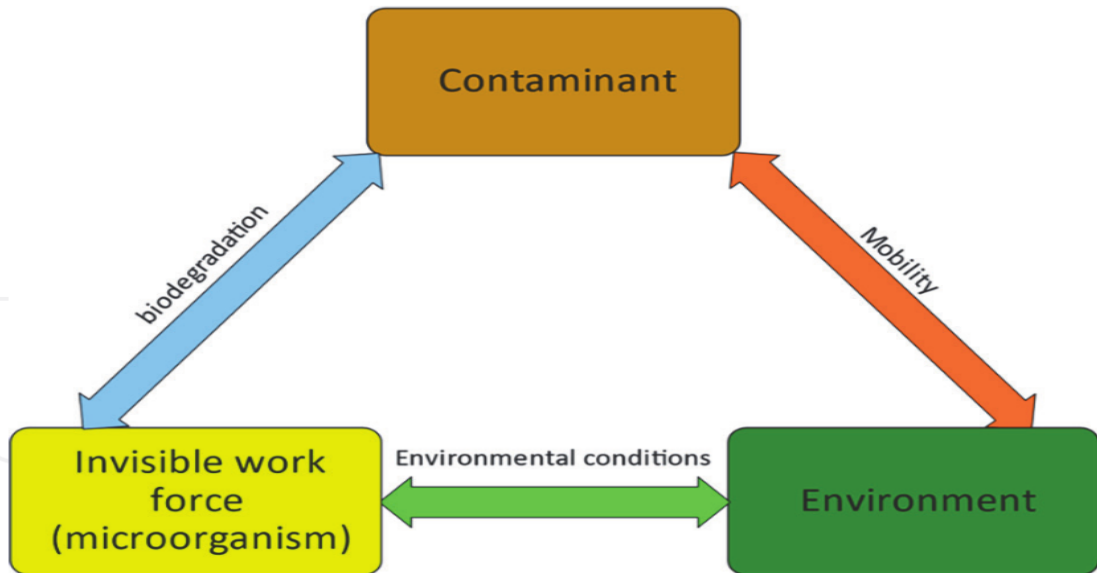
La biorremediación se utiliza para eliminar contaminantes y toxinas del suelo, el agua y otros entornos, su uso tecnológico para mitigar y restaurar la afectación causada al suelo ha tomado gran auge debido a su costo económico, calculada entre 60-70% más baja que otros métodos de remediación. Además, su impacto en el ambiente es mínimo debido a los procesos naturales que allí interactúan para la transformación de los contaminantes a sustancias más tolerables. Por ejemplo, al usar el proceso de compostaje (degradación a través del metabolismo anaeróbico de microorganismos) en suelos contaminados por cobre (Cu), manganeso (Mn), zinc (Zn) y plomo (Pb), se logró una inmovilización de Zn y Pb, una reducción de Mn y Pb, y un aumento de la solubilidad del Cu al sufrir una quelación con la materia orgánica (Cuautle Hernández, y otros, 2021). El éxito de la biorremediación -alternativa natural- se basa en la adecuada escogencia de las especies biodegradantes, las cuales deben adaptarse a las condiciones de contaminación del ambiente (González Chávez, 2005).

La biorremediación emplea organismos típicos del sitio contaminado o de otras procedencias para degradar, remover o transformar sustancias tóxicas a productos menos ofensivos o inocuos. La actividad catabólica de los organismos (plantas, hongos, bacterias, etc.) consiste en usar como fuente de energía y alimento el contaminante presente; se puede realizar in situ o ex situ, en condiciones anaeróbicas o aeróbicas (Volke Sepulveda & Velasco Trejo, 2002). La dinámica, representada en la Figura 5, entre el contaminante identificado, los componentes ambientales (temperatura, humedad, pH entre otros) y, los microorganismos presentes o los

adecuadamente escogidos, permite reducir o erradicar el elemento contaminante (Dar & Naseer, 2022).

**Figura 5.**

*Interacción de factores presentes en la biorremediación.*



Nota: representación ecológica de la biorremediación y sus factores. Adoptado de Recent Applications of Bioremediation and Its Impact [Aplicaciones recientes de la biorremediación y su impacto] (Dar & Naseer, 2022).

Se presenta como opción de tratamiento del suelo contaminado la utilización de fitorremediación para desarrollar de forma in-situ y la inmovilización del contaminante por medio de microbios para realizar de forma ex-situ. Aunque la versatilidad de la biorremediación permite que se puedan aplicar de forma viceversa. Por ejemplo, al adicionar nutrientes por medio de soluciones acuosas u oxígeno (bioestimulación) se incentiva la actividad de microorganismos nativos mejorando la biodegradación de los contaminantes, o, cuando la capacidad degradadora de los microbios autóctonos disminuye, se adicionan microorganismos vivos (bioaumentación) para promover la biotransformación del elemento en cuestión (Volke Sepulveda & Velasco Trejo, 2002).

#### **4.1.1. Bioremediation In situ**

Para desarrollar una técnica propicia de biorremediación es importante conocer la naturaleza del xenobiótico junto con su toxicidad y concentración, para así escoger adecuadamente los microorganismos que transformaran los compuestos (Di Paola & Vicién, 2010, p. 7). Al llevar a cabo procesos para tratar en el sitio - in situ - la contaminación del suelo, además de reducir costos en el transporte del material contaminado, permite aumentar la actividad microbiana endógena (bioestimulación) al adicionar oxígeno, agua y nutrientes, y controlar factores ambientales como temperatura y pH, para lograr la inmovilización de los contaminantes. Otra alternativa es añadir microorganismos (bioaumentación) con la propiedad de degradar el contaminante de interés para fomentar su biotransformación o biodegradación (Cota Ruiz, Nuñez Gastelúm, Delgado Rios, & Martínez Martínez, 2019, p. 39) y (Volke Sepulveda & Velasco Trejo, 2002, pp. 33 y 34).

La autodepuración del suelo autogenera un proceso de atenuación natural, donde la presencia de microorganismos nativos con llevan a la transformación de contaminantes a sustancias biodegradables. Al usar plantas para la descontaminación del suelo, se desarrolla una biotecnología denominada fitorremediación, dado que, algunas especies vegetales tienen la capacidad de sobrevivir en lugares contaminados, además de extraer, acumular, estabilizar y transformar los elementos contaminantes; ciertos ejemplos de esta medida fitocorrectora están descritos en la Tabla 4. Sin embargo, cuando existan situaciones de una incesante contaminación o entrada de diversos contaminantes en concentraciones elevadas, la contaminación traspasa a la hidrosfera (por lixiviación) o a la atmósfera (por volatilización) (Domènech & Peral, 2006, pp. 184 y 185) y (Ortiz Bernad, Sanz García, Dorado Valiño, & Villar Fernández, 2007, p. 47).

**Tabla 4.**  
*Ejemplos de fitorremediación*

Tipo	Proceso involucrado
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes que se cosechan (hojas y raíces).
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de estos y evitar el pasaje a capas subterráneas o al aire.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos que degradan (bacterias y hongos).
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.

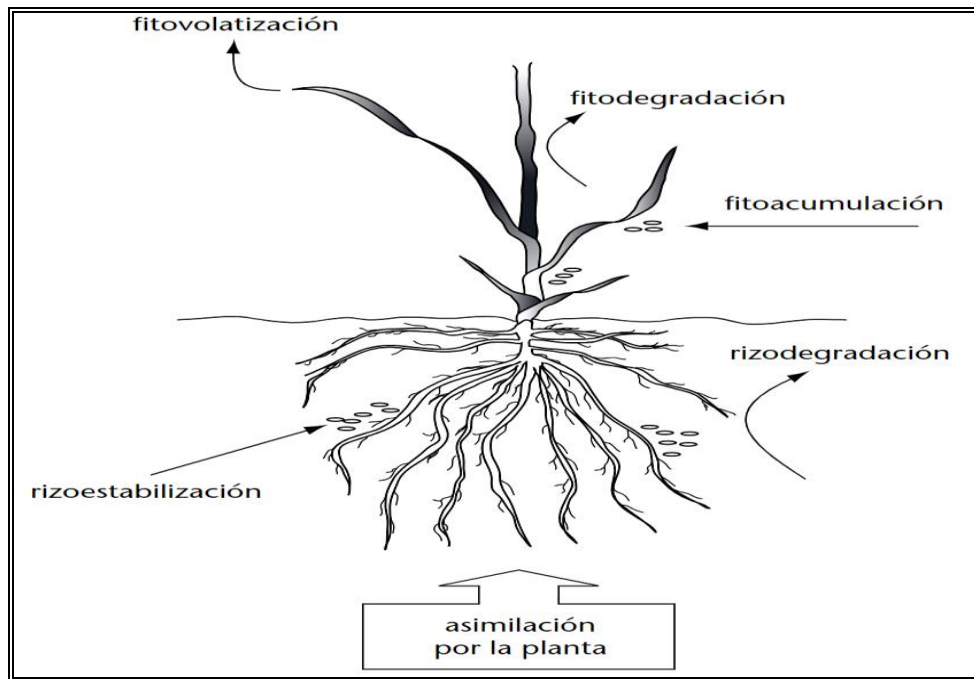
Nota: descripción de los procesos de fitorremediación. Adoptado de Biorremediación: vinculaciones entre investigación, desarrollo y legislación (Di Paola & Vicién, 2010, p. 26).

A través de las raíces, las plantas acumuladoras asimilan y extraen el contaminante metálico, siendo conducido hacia las hojas, formando complejos más estables e inhibiendo su acción tóxica; estas especies vegetales se caracterizan por tener la capacidad de acumular por encima del 0,1% de cationes metálicos como Co, Cu, Cr, Pb o Ni, y para metales esenciales como Zn o Mn, niveles superiores del 1% (Domènech & Peral, 2006, p. 206). Al realizar la absorción de los contaminantes, las plantas metabólicamente los reducen a formas menos tóxicas, siendo liberados a la atmósfera por la transpiración vegetal, por ejemplo, la volatilización de ciertos metales como Se y Hg, entre otros elementos con alta volatilidad (López Hernández & Morales Hernández, 2022, pp. 20 y 21). Principalmente la fitorremediación se ciñe

por procesos de degradación, extracción y estabilización (Domènech & Peral, 2006, p. 205), esquematizados en la Figura 6.

**Figura 6.**

*Procesos de fitorremediación*

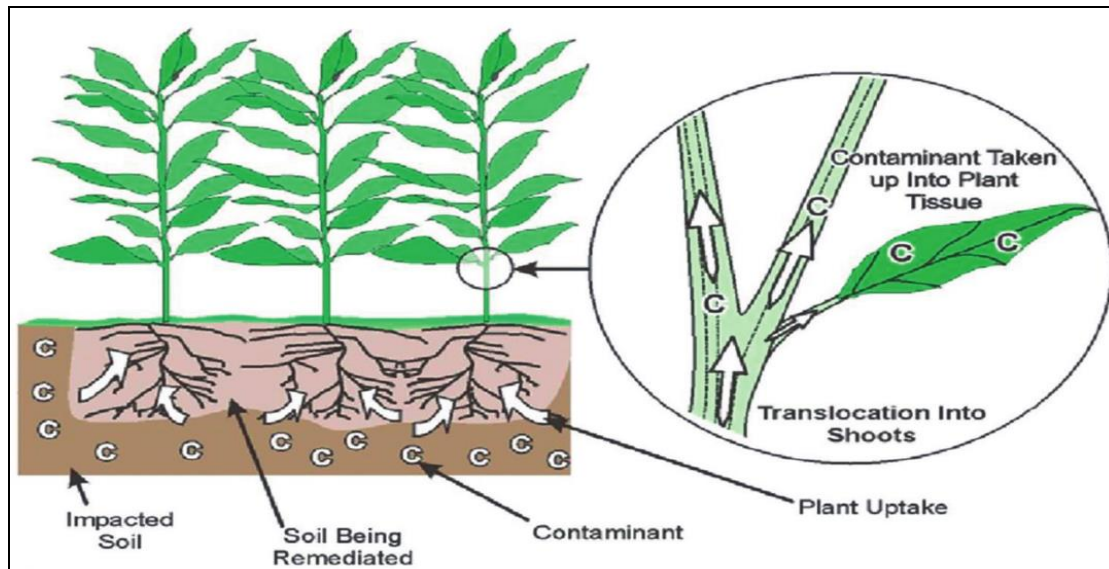


Nota: absorción y transformación de un contaminante en la fitorremediación. Adoptado del libro Química ambiental de sistemas terrestres (Domènech & Peral, 2006, p. 207) <https://www-digitaliublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/viewepub/?id=67917>

Para lograr una mayor efectividad de la fitorremediación, los metales presentes en el suelo deben estar en su forma química soluble (López Hernández & Morales Hernández, 2022, p. 22). Este tratamiento natural pretende ser más limpio y económico, dado que al usar plantas para contener o eliminar contaminantes, puede ser menos invasivo que procesos físicos o químicos (Ortiz Bernad, Sanz García, Dorado Valiño, & Villar Fernández, 2007, p. 47). Esta propuesta de fitolimpieza, ha demostrado reducir los niveles de selenio, cadmio, cromo, plomo y mercurio, entre otros, incidiendo en la descontaminación del suelo, mostrado en la Figura 7, y del agua (Salamanca Rivera, y otros, 2023).

**Figura 7.**

*Fitoextracción del contaminante en el suelo.*



Nota: procedimiento de fitoextracción en la remediación ambiental del suelo. Adoptado de Recent Applications of Bioremediation and Its Impact [Aplicaciones recientes de la biorremediación y su impacto] (Dar & Naseer, 2022, p. 7).

El potencial de la fitorremediación radica en las especies vegetales escogidas para reducir la toxicidad del contaminante, el cual es fitoestabilizado para evitar su movilidad a la cadena alimentaria o a las aguas subterráneas (López Hernández & Morales Hernández, 2022, p. 20). La planta *Amaranthus hybridus L*, apoyada por micorrizas (*Entrophospora columbiana*, *Glomus intraradices*, *G. etunicatum*, *G. clarum*), dan una asociación positiva con gran capacidad de inmovilización y extracción de Pb y Cd, a medida que aumenta la edad de la planta (Nieves, Parra, & Villanueva, 2019, p. 99). El uso de plantas como medida biorremediadora genera un menor impacto en el ambiente, con una menor incidencia en la calidad del suelo, dado que a través de sus raíces pueden extraer el metal tóxico del suelo (López Hernández & Morales Hernández, 2022, p. 22).

#### **4.1.2. Bioremediation Ex situ**

Al caracterizar el suelo afectado por la presencia de contaminantes, y escoger el biotratamiento afuera del lugar, hay que excavar para remover el suelo contaminado, trasladarlo hacia un sitio acondicionado con los microorganismos escogidos para la biocorrección, donde son estimulados y ambientados para degradar los contaminantes identificados (Ocampo Hernández, 2021, p. 31). Un ejemplo de esta técnica fuera del sitio es el *land farming*, consiste en transportar la tierra impregnada de elementos tóxicos a un área alejada, depositarla en una cama de cultivo microbiana, donde se agregan nutrientes como fósforo y nitrógeno, se controlan las condiciones ideales de aireación, pH y humedad para descomponer la partícula contaminante (Di Paola & Vicién, 2010, p. 27). En el caso de las bacterias *Zoogloea* y *Bacillus subtilis*, entre otras, tienen la capacidad de seleccionar iones metálicos, acumularlos o transformarlos, además, algunas bacterias fotosintéticas son capaces de disminuir concentraciones de hierro y manganeso (Mejía Sandoval, 2006, p. 91).

Entre otros tipos de tratamiento que se pueden realizar afuera del sitio se encuentra el composteo, donde por medio del metabolismo de microorganismos en condiciones anaerobias, principalmente degrada desechos orgánicos (Ocampo Hernández, 2021, p. 32), comúnmente se realiza a una temperatura entre 55 – 65 °C (Cota Ruiz, Núñez Gastelum, Delgado Ríos, & Martínez Martínez, 2019, p. 39). Esta técnica ha demostrado impactos positivos gracias a la actividad degradadora de los microbios mezclados con la tierra contaminada, reduciendo la disponibilidad de plomo y manganeso e inmovilización de zinc y cobre (Cuautle Hernández, y otros, 2021). Otra técnica con buenos resultados de degradación son los biorreactores, donde por medio de recipientes la tierra contaminada es mezclada con microorganismos y nutrientes, bajo parámetros controlados y predecibles (Cota Ruiz, Nuñez Gastelúm, Delgado Rios, & Martinez

Martinez, 2019, p. 40), mejorando la función degradadora y la inmovilización de metales como cadmio, mercurio, o uranio (Di Paola & Vicién, 2010, p. 27).

#### **4.2. Ventajas de la biorremediación**

En las condiciones apropiadas las bacterias y/o microorganismos se desarrollan de forma efectiva para asimilar e inhibir el contaminante, lo que puede resultar ser más económica, dado que, se requiere una mínima cantidad de equipo y menor esfuerzo del personal laboral (Pasquali, 2020, p. 330), a su vez, la biorremediación, incentiva el restablecimiento de las especies vegetales presentes en los sitios contaminados, generando reducción en costos y aprovechando la capacidad que tienen las plantas de absorber e inmovilizar los elementos contaminantes (Fakhar, y otros, 2020, p. 1870). Según dato de la Unión Europea, el costo de usar biorremediación por metro cúbico oscila entre 52 y 131 dólares, es más bajo en comparación a otros métodos que pueden llegar a costar entre 327 a 1.046 dólares (Di Paola & Vicién, 2010, p. 6). Al utilizar procesos biológicos para sanear sitios contaminados, se reduce el uso de mano de obra y maquinaria, por lo tanto, hay una disminución en el costo (Environmental Protection Agency, 2012).

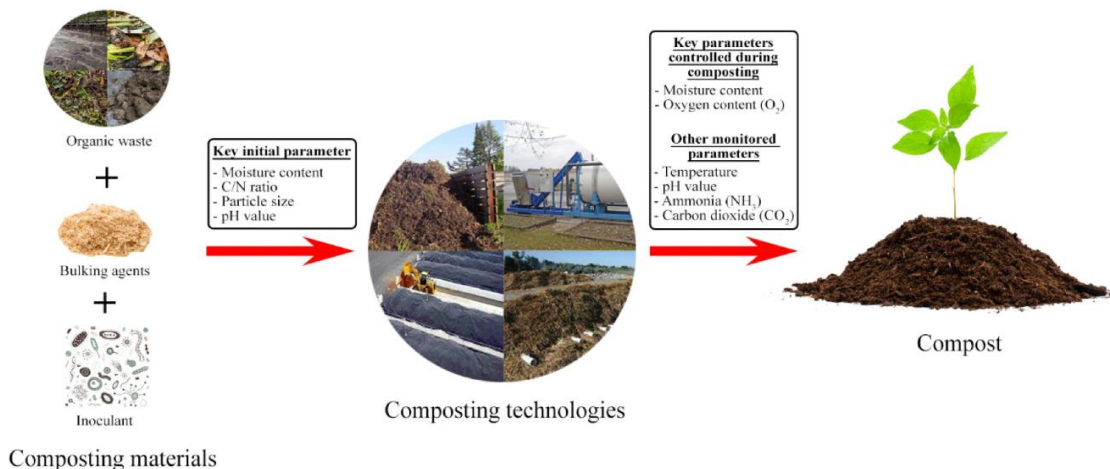
Ademas de la rentabilidad, al degradar los compuestos tóxicos por medio de sistemas naturales la afectación a la flora y fauna nativa es mínima y suprime la expulsión de gases tóxicos al aire (Pasquali, 2020, p. 330). Por ejemplo, el método bioventeo consiste en inyectar aire y nutrientes por medio de tuberías en el sitio contaminado con el fin de motivar el metabolismo de los microorganismos e incentivar la oxidación de elementos contaminantes, reduciendo así su emisión a la atmósfera (Cota Ruiz, Nuñez Gastelúm, Delgado Rios, & Martinez Martinez, 2019, p. 39). O la simbiosis que puede ocurrir entre las plantas y los hongos

micorrizas, pues el apoyo de estos protege las raíces y funcionan como un refuerzo para el crecimiento del material vegetal en suelos contaminados con plaguicidas y metales pesados (González Chávez, 2005, p. 33), incidiendo en la rizo-estabilización del contaminante.

La biomasa cultivada, en algunos casos, es posible utilizarla en la producción de bioenergía, o, se pueden extraer los metales adsorbidos, lo que puede compensar los costos de la biorremediación (López Hernández & Morales Hernández, 2022, pp. 22 y 24). También, cuando se usa compost en su etapa madura, derivado de los residuos sólidos urbanos, el cual contiene concentraciones elevadas, principalmente de Zn y Pb, y otros compuestos inorgánicos; se adicionan compuestos orgánicos como biocarbón, paja, tusas del maíz, entre otros, junto con la biomasa fúngica, para reducir los efectos negativos al ambiente y encapsular los metales pesados evitando la traslocación al suelo (Nuñez, Sotomayor, Ballardo, & Herrera, 2023, pp. 88 y 89). A su vez, incentivar los microbios presentes en el proceso de compostaje, descrito en la Figura 8, genera una metabolización de los compuestos tóxicos, por ejemplo, la producción de ramnolípidos (biosurfactante) potencia la biodegradación al solubilizar el contaminante (Lin, Cheruiyot, Bui, & Ngo, 2022, p. 1074).

**Figura 8.**

*Procedimientos en el desarrollo de compostaje*



Nota: parámetros de importancia en la generación de compostaje. Adoptado de Composting and its application in bioremediation of organic contaminants [El compostaje y su aplicación en la biorremediación de contaminantes orgánicos] (Lin, Cheruiyot, Bui, & Ngo, 2022, p. 1075)

### **4.3. Recuperación de suelos**

Una vez retirados los residuos sólidos del botadero a cielo abierto, estos deben ser transportados a otro sitio que cumpla con la tecnología adecuada de disposición final, de acuerdo con la guía ambiental para el saneamiento y cierre de botaderos a cielo abierto (2002). La basura retirada puede ser llevada a rellenos sanitarios regionales, pero la instalación y/o construcción de estos sistemas de disposición final tienen una gran oposición de la comunidad (Montes Cortés, 2018, p. 151). Al quedar el suelo base, en su mayoría contaminado por los restos de la degradación de los desechos urbanos, se propone realizar una remoción del material afectado para aplicar alguna medida biocorrectiva (ex-situ) o se toma la decisión de desarrollar el biotratamiento de manera in-situ (en el área polucionada). Dada la versatilidad de la biorremediación permite escoger una opción ajustada a la necesidad del servicio para la recuperación ambiental del suelo.

#### **- Tratamiento del suelo en el sitio.**

De acuerdo con la Guía Técnica para la Clausura y Conversión de Botaderos de Residuos Sólidos de Perú (2004), los monitoreos ambientales y en particular al recurso suelo, se deberá realizar seguimiento a metales pesados (Sb, As, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni, Se, Ag, Tl, V, Zn) y compuestos orgánicos volátiles, en caso de que se tenga sospecha de contaminación y de forma de comprobación. Por medio de la fitorremediación se ha evidenciado que el uso de plantas ha logrado la metabolización de contaminantes, como por ejemplo *Thlaspi caerulescens*

para degradar (cadmio y zinc), *Zea mays* y *Thlaspi rotundifolium* (plomo y diesel), y *Alyssum* (níquel), *Gnaphalium chartaceum* (cobre, manganeso, zinc y plomo) (Garzón, Rodríguez Miranda, & Hernández Gómez, 2017). Por lo tanto, usar plantas, y posiblemente otros organismos, para la absorción y posterior degradación del material contaminante, podría permitir mantener niveles aceptables de afectación.

El uso de plantas para biorremediar provoca alteraciones mínimas a las características del suelo, su eficacia se basa en escoger la especie vegetal, el metal específico a remover, las condiciones climáticas, entre otros factores de influencia (López Hernández & Morales Hernández, 2022, pp. 23 y 24). Por ejemplo, el girasol *Helianthus annuus* presenta tolerancia y gran capacidad de acumular concentraciones de Cd sin alterar su crecimiento (Clemente Huachen, Medina Contreras, Laura Pfuño, Pariona Aguilar, & Gutierrez Vilchez, 2021, pp. 167 y 169), también, el pasto vetiver *Chrysopogon zizanioides* bioacumula a través de sus hojas y raíces cantidades de talio, vanadio y plomo (metales presente en lixiviados de RSU) ocurriendo una movilización y extracción del suelo a la planta (De la Cruz López, Ramos Arcos, & López Martínez, 2019). Recurrir a los procesos fitorremediadores previenen la migración del contaminante del suelo al agua subterránea, reduciendo la afectación en la cadena alimentaria, en el caso de Pb, As, Cd, Cr, Cu y Zn pueden ser fitoestabilizados mayormente (López Hernández & Morales Hernández, 2022, p. 20).

- **Transportar el volumen de tierra contaminada para tratarla.**

Al crear una cama con el cultivo microbiano adecuado e impermeabilizado con una membrana para evitar filtraciones, el material contaminado, que fue excavado y transportado, es arrojado para mezclarlo y permitir la biosorción a través de microorganismos capaces de

sintetizar iones metálicos. En el caso de algunas bacterias y hongos son eficientes para remover metales tóxicos, por ejemplo, el uso de *Bacillus licheniformis* para elementos como Cu, Zn, Cr, Fe, *Bacillus licheniformis* (Cu, Zn, Cr, Fe), *Citrobacter* (Cd, Pb), o el hongo *Rhizopus arrhizus* para Cd, Cu, Pb, Hg, An, Cr (Mejía Sandoval, 2006, pp. 92 y 93). Incorporar actividad fúngica al volumen de suelo afectado por los RSU conlleva a la biodegradación de varios componentes, por ejemplo, el uso del hongo *Pleurotus ostreatus* descompone metales pesados a través de la segregación de enzimas (Ocampo Hernández, 2021, p. 32).

La capacidad que tienen hongos, bacterias y algas para acomplejar ciertos metales pesados, dan la opción de usar estos microorganismos para remover las sustancias tóxicas del suelo. En el caso de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* produce un biosurfactante, que solubiliza y remueve las concentraciones de Pb y Zn, y de Cd hasta un 80% en el suelo (González Chávez, 2005, p. 33). Por otro lado, la simbiosis entre la lombriz roja y los microorganismos del suelo da como resultado una mejoría en la actividad microbiana, pues las deyecciones de la lombriz aumentan los nutrientes como N, P y K (Zapata, Martínez, Posada, González, & Saldarriaga, 2016, p. 83), lo que podría permitir optimizar la técnica de compostaje para aumentar los buenos resultados al momento de retener los metales pesados.

## 5. Conclusiones

Al optar por el cierre de los sitios inadecuados para la disposición final de residuos sólidos urbanos ocurre una conversión a pasivos ambientales; dejando la posibilidad de proponer como estrategia sostenible, que, con la gestión municipal apropiada, las obras ingenieriles adecuadas y la técnica correcta de biorremediación, se lograría una transformación a espacios de desarrollo y bienestar social. Dado que, la incesante polución que generan los botaderos a cielo abierto, entre otros sitios inapropiados usados para arrojar sin control los RSU, afectan negativamente a los ecosistemas, contaminando el suelo y perjudicando la salud de la población circundante.

El suelo queda contaminado al ser expuesto a la descomposición desmesurada de los residuos sólidos urbanos, que, al desprender metales tóxicos, presentes en concentraciones elevadas, son capaces de irrumpir en los procesos de amortiguación y filtración que se desarrollan en la zona edáfica. Además, la movilización del contaminante puede trasgredir a los demás elementos como al agua subterránea por infiltración vertical, o al aire por procesos de volatilización.

Al usar la biorremediación como tecnología de recuperación ambiental de los suelos, mejora sus condiciones fisicoquímicas, debido a la interacción de microorganismos y en algunos casos de especies vegetales, capaces de estabilizar, degradar, inmovilizar, extraer y hasta volatilizar los diversos elementos tóxicos, en particular los metales pesados, generados de la descomposición de los RSU dispuestos inadecuadamente.

## 6. Recomendaciones

Al aplicar estrategias de ciclo de vida de los productos para reducir la generación de residuos sólidos urbanos, dando un sentido más profundo a la reutilización, recuperación, reparación, entre otras “R”, que reintegran los distintos residuos al ciclo productivo; adoptando una verdadera y congruente labor de reciclaje (incluyendo la formalización de los recicladores de oficio).

El Gobierno Nacional de Colombia, debería actualizar la(s) guía(s) para el cierre de botaderos a cielo abierto o sitios inadecuados de disposición final, además de aplicar eficazmente la normativa jurídica (que hace décadas está escrita) sobre las sanciones al incumplimiento o trasgresión de un ambiente sano, en este caso, por la contaminación persistente que genera un lugar sin la técnica adecuada de disposición final de residuos sólidos urbanos.

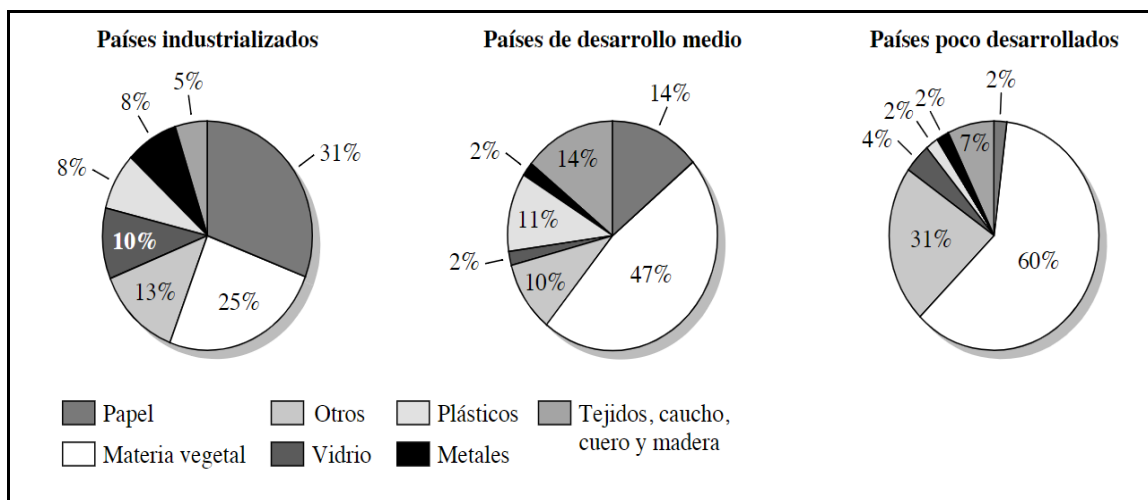
Además, urge que los ciudadanos se apropien de prácticas de consumo responsable, siguiendo lo señalado en la constitución y normativa paralela a la educación ambiental, junto con sus dirigentes, que deberían aplicar de forma estricta una planeación ambiental territorial y organizada, que gestione y promulgue la protección del ambiente. Dado que, el crecimiento de la población en el territorio colombiano conlleva a un incremento en la generación de residuos sólidos urbanos, ocasionando un aumento de los sitios no autorizados de disposición final, principalmente en departamentos del Caribe y Pacífico, de acuerdo con lo señalado en el Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos con datos del año 2022 (link de acceso: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos-2022.pdf>).

El usar la biorremediación como biotecnología que corrige las afectaciones al suelo, a su vez, puede llegar a incentivar la degradación de los residuos sólidos orgánicos, residuos predominantes en varios países del mundo, representado en la Figura 9.

**Porcentaje de generación de residuos sólidos** Figura 9, dando la posibilidad de recurrir al compostaje para reducir sustancialmente la cantidad de desechos que van a terminar en los rellenos sanitarios, o aún más grave, a los sitios inadecuados de disposición final.

**Figura 9.**

*Porcentaje de generación de residuos sólidos*



Nota: clasificación de residuos señalados en los países por niveles de desarrollo económico. Adoptado del libro *Química ambiental*, p. 207.

### Bibliografía

- Caceres Cortez, A. T. (2007). Recuperación paisajística de vertederos de basura: un ejemplo de brownfields. 71-80. Bogotá, Colombia: Cuadernos de Geografía - Revista Colombiana de Geografía. doi:<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281821949007>
- Castro Salazar, H. T. (2021). *Química ambiental básica*. Colombia: Editorial CORHUILA. Obtenido de <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/176264>
- Clemente Huachen, J. P., Medina Contreras, J., Laura Pfuño, J. D., Pariona Aguilar, L. A., & Gutierrez Vilchez, P. P. (10 de diciembre de 2021). Fitorremediación en suelos contaminados con Cd usando girasol (*Helianthus annuus* L. var. Sunbright). 163-170. Lima, Perú: Acta Agronómica. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/acag/v70n2/0120-2812-acag-70-02-163.pdf>
- Coalición cierre de basurales America Latina y el Caribe. (enero de 2021). Recuperado el 28 de sept. de 2021, de [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34919/Roadmap\\_ES.pdf?sequence=8](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34919/Roadmap_ES.pdf?sequence=8)
- CONGRESO DE COLOMBIA. (19 de diciembre de 1973). LEY 23 DE 1973. Bogota D.C, Colombia. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9018>
- Consejo Nacional del Ambiente (CONAM) y el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS). (2004). Guía técnica para la clausura y conversión de botaderos de residuos sólidos. Lima, Perú. Obtenido de <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/bitstream/handle/123456789/337/BIV00141.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cota Ruiz, K., Nuñez Gastelúm, J. A., Delgado Rios, M., & Martinez Martinez, A. (2019).

BIORREMEDIACIÓN: ACTUALIDAD DE CONCEPTOS Y APLICACIONES. 37-44.

Ciudad Juárez, Chihuahua, México: Biotecnia. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/6729/672971082005.pdf>

Cruz Sotelo, S. E., & Ojeda Benítez, S. (2013). *Gestión sostenible de los residuos sólidos*

*urbanos*, 29(3), 7-8. Distrito Federal, México: Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/370/37029665017.pdf>

Cuautle Hernández, V. Á., Mendoza Patiño, L., Minto Rojas, M., Mota, S. G., Jiménez, N. A.,

Vásquez Contreras, M. F., Pérez Osorio, G. (2021). Obtenido de [www.rlac.buap.mx](http://www.rlac.buap.mx): <https://rlac.buap.mx/sites/default/files/RLAC%2012%2831%29-5.pdf>

Dar, A., & Naseer, A. (28 de junio de 2022). Recent Applications of Bioremediation and Its

Impact [Aplicaciones recientes de la biorremediación y su impacto]. Pakistan. **doi:<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.104959>**

De la Cruz López, C. A., Ramos Arcos, S. A., & López Martínez, S. (2019). Efecto de la adición

de ácidos orgánicos sobre la bioacumulación de Plomo, Talio y Vanadio en *Chrysopogon zizanioides* creciendo sobre suelos contaminados de un relleno sanitario. 10(21), 403-422. Villahermosa, Tabasco, México: Nova scientia. Obtenido de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/2033/203359541022/203359541022.pdf>

Di Paola, M. M., & Vicién, C. (5 de octubre de 2010). Biorremediación: vinculaciones entre

investigación, desarrollo y legislación. Argentina. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/261986733\\_Documento\\_de\\_Trabajo\\_52010\\_Octubre\\_Biorremediacion\\_vinculaciones\\_entre\\_investigacion\\_desarrollo\\_y\\_legislacion](https://www.researchgate.net/publication/261986733_Documento_de_Trabajo_52010_Octubre_Biorremediacion_vinculaciones_entre_investigacion_desarrollo_y_legislacion)

Diaz Gutierrez, D. C., & Duran Ariza, R. J. (2005). Propuesta metodológica para clausura y posclausura de rellenos sanitarios y/o botaderos de basuras. pág. 9. Bucaramanga, Santander, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Domènech Antúnez, X., & Baird, C. (2018). *Química ambiental*. (E. Reverte, Ed.) Barcelona, España: Reverte. Obtenido de <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/viewepub/?id=67839>

Domènech, X., & Peral, J. (2006). *Química Ambiental de sistemas terrestres*. Barcelona: Reverte, S.A. Obtenido de <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/viewepub/?id=67917>

Environmental Protection Agency. (septiembre de 2012). Guía del ciudadano sobre la biorremediación. Estados Unidos. Obtenido de [https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/epa-542-f-12-003s\\_guia\\_del\\_ciudadano\\_sobre\\_la\\_biorremediacion.pdf](https://19january2017snapshot.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/epa-542-f-12-003s_guia_del_ciudadano_sobre_la_biorremediacion.pdf)

Escalona Guerra, E. (2014). Daños a la salud por mala disposición de residuales sólidos y líquidos en Dili, Timor Leste. 270-277. Dili, Timor Leste: Revista Cubana de Higiene y Epidemiología. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/hie/v52n2/hig11214.pdf>

Fabelo Falcon, J. A. (2017). PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS. (Y. Albornas Carvajal, Ed.) *Revista Centro Azúcar*, 44. doi:<http://centroazucar.uclv.edu.cu>

Fakhar, A., Gul, B., Gurmani, A. R., Khan, S. M., Ali, S., Sultan, T., Rizwan, M. (2020). Heavy metal remediation and resistance mechanism of *Aeromonas*, *Bacillus*, and *Pseudomonas*: A review [Mecanismo de resistencia y remediación de metales pesados *Aeromonas*,

Bacilo, y Pseudomonas: Una reseña]. 52, 1868-1914. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. doi: <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1863112>

FAO. (2 de mayo de 2018). (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) Obtenido de <https://www.fao.org/newsroom/story/Polluting-our-soils-is-polluting-our-future/es#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20suelo%20provoca,un%20des%20equilibrio%20de%20sus%20nutrientes>

Filigrana, P. A., Gómez, O. L., & Méndez, F. (2011). Impacto de un sitio de disposición final de residuos sólidos en la salud respiratoria de los adultos mayores. *Biomédica*, 322-34. Recuperado el 28 de 09 de 2021, de <https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/346/752>

García Gómez, C. F., & Castro Garcés, J. (2019). SISTEMAS DE DISPOSICIÓN FINAL EN COLOMBIA Y SU IMPACTO AMBIENTAL Y SOCIO ECONOMICO.

Garzón, J. M., Rodríguez Miranda, J. P., & Hernández Gómez, C. (30 de agosto de 2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*. doi:<http://dx.doi.org/10.22267/rus.171902.93>

Girón, S. L., Mateus, J. C., & Méndez, F. (2009). Impacto de un botadero a cielo abierto en el desarrollo de síntomas respiratorios y en costos familiares de atención en salud de niños entre 1 y 5 años en Cali, Colombia. 392-402. Cali, Colombia: *Biomédica*. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/bio/v29n3/v29n3a08.pdf>

GOBIERNO NACIONAL DE COLOMBIA. (23 de marzo de 2005).

[www.funcionpublica.gov.co](http://www.funcionpublica.gov.co). Obtenido de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=16123>

González Chávez, M. Á. (2005). RECUPERACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON METALES PESADOS UTILIZANDO PLANTAS Y MICROORGANISMOS RIZOSFÉRICOS. *Terra Latinoamericana*, 23, 29-37. Recuperado el 28 de 09 de 2021, de <https://www.redalyc.org/pdf/573/57323104.pdf>

Juárez Sanz, M., Sánchez Andreu, J., & Sánchez Sánchez, A. (2006). *Química del suelo y medio ambiente*. Alicante, España: Publicaciones de la Universidad de Alicante. Obtenido de <https://www-digitaliublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/viewepub/?id=781>

Lanfranco, J., Pellegrini, A. E., & Cattani, V. M. (2014). *Contenidos de edafología, génesis, evolución y propiedades físico químicas del suelo*. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de La Plata. Obtenido de <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/66430>

Lin, C., Cheruiyot, N. K., Bui, X. T., & Ngo, H. H. (2022). Composting and its application in bioremediation of organic contaminants [El compostaje y su aplicación en la biorremediación de contaminantes orgánicos]. *13*, 1073–1089. BIOENGINEERED. doi:<https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2017624>

López Chávez, M., & Purihuamán Leonardo, C. N. (septiembre de 2018). (U. -H. Cultura, Ed.) Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6586430>

López Hernández, M. E., & Morales Hernández, O. E. (diciembre de 2022). FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS:

- UNA REVISIÓN. *12(02)*, 15-28. Managua, Nicaragua: EL HIGO Revista de Ciencia y Tecnología. Obtenido de <https://camjol.info/index.php/elhigo/article/view/15197/18001>
- López Martínez, S., Gallegos Martínez, M. E., Pérez Flores, L. J., & Gutiérrez Rojas, M. (febrero de **2005**). Recuperado el 28 de 09 de 2021, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v21n2/0188-4999-rica-21-02-91.pdf>
- Mejía Sandoval, G. (junio de **2006**). Aproximación teórica a la biosorción de metales pesados por medio de microorganismos. *1(1)*, 77-99. Medellín, Colombia: Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321428096010>
- Ministerio del Medio Ambiente. (**2002**). Colombia. Recuperado el 28 de 09 de 2021, de <http://www.ods.org.pe/material-de-consulta/21-guia-ambiental-para-saneamiento-y-cierre-de-botaderos-a-cielo-abierto-kpesic-colombia/file>
- Montes Cortés, C. (**2018**). Estudios de los Residuos Sólidos en Colombia. pág. 19-220. Bogotá, Colombia: Universidad Externado de Colombia.
- Nieves, Y., Parra, N., & Villanueva, S. (22 de marzo de **2019**). Biorremediación, enemigo del cadmio. *26(1)*, 96-104. Venezuela: Revista INGENIERÍA. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/707/70758484010/70758484010.pdf>
- Núñez, W. E., Sotomayor, D. A., Ballardo, C. V., & Herrera, E. (**2023**). Potencial de la biomasa fúngica: producción y mecanismos de biorremediación de metales pesados del compost de residuos sólidos orgánicos municipales. 79-91. Scientia Agropecuaria. Obtenido de <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/scientiaagrop/article/view/4684/5291>

Ocampo Hernández, C. E. (2021). El potencial de la biorremediación. 2(2), 30-33. México: Herreriana.

**doi:**<https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/herreriana/issue/archive>

Ortega Ramírez, A. T., Marín Maldonado, D. F., & Castro, N. E. (06 de 12 de 2021).

**doi:**<https://doi.org/10.22507/pml.v16n2a9>

Ortiz Bernad, I., Sanz García, J., Dorado Valiño, M., & Villar Fernández, S. (2007). (C. d. (CITME), Ed.) Obtenido de [https://www.madrimasd.org/sites/default/files/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6\\_tecnicas\\_recuperacion\\_suelos\\_contaminados.pdf](https://www.madrimasd.org/sites/default/files/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/vt6_tecnicas_recuperacion_suelos_contaminados.pdf)

Pasquali, R. C. (2020). Química Ambiental. 361. Córdoba, Argentina: Jorge Sarmiento Editor - Universitas. Obtenido de <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/174540>

Pérez, E. H. (2022). *Química ambiental de suelos ándicos*. (U. d. Cauca, Ed.) Popayán, Cauca, Colombia. Obtenido de <https://www-digitaliapublishing-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/viewepub/?id=129864>

PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. (18 de diciembre de 1974). DECRETO 2811 DE 1974. Colombia. Obtenido de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551#0>

Republica de Colombia Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2021). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020*. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá. Obtenido de [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe\\_df\\_2020%20%281%29.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/informe_df_2020%20%281%29.pdf)

Rueda Balcazar, I. R., Gómez Rodríguez, A. C., García Ocaña, J. A., & López Ocaña, G. (2020).

EFFECTOS DE CONTAMINANTES EN SUELO POR UN VERTEDERO A CIELO ABIERTO EN TABASCO. *JEEOS*, 4(1), 1-18. doi:10.19136/Jeeos.a4n1.3475

Salamanca Rivera, Á. P., Silva, D. A., Muñoz, J. C., Rojas Sánchez, F., Meléndez Mazabel, J.

C., & Borda-Chingate, L. S. (2023). Fitorremediación con Brassicaceae y Apiaceae en suelos contaminados con metales pesados. *71*. (R. d. Tropical, Ed.) Bogota, Colombia: Scielo. Obtenido de [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0034-77442023000100017#B5](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442023000100017#B5)

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia. (31 de enero de

2023). Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2021. *No. 14*. Bogotá D.C., Colombia. Obtenido de <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-Nacional-de-Disposicion-Final-de-Residuos-Solidos.pdf.pdf>

United States Environmental Protection Agency - EPA. (septiembre de 2012). (EPA, Ed.)

Obtenido de [https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2015-09/documents/epa-542-f-12-003s\\_guia\\_del\\_ciudadano\\_sobre\\_la\\_biorremediacion.pdf](https://19january2021snapshot.epa.gov/sites/static/files/2015-09/documents/epa-542-f-12-003s_guia_del_ciudadano_sobre_la_biorremediacion.pdf)

Volke Sepulveda, T., & Velasco Trejo, J. A. (2002). Tecnologías de remediación para suelos contaminados. Google Académico. Obtenido de

[https://books.google.com.co/books?id=mj9rVEShCcC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.co/books?id=mj9rVEShCcC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Zapata, I. C., Martínez, L., Posada, E., González, M. E., & Saldarriaga, J. F. (23 de octubre de

2016). EFECTOS DE LA LOMBRIZ ROJA CALIFORNIANA (*Eisenia foetida*), SOBRE EL CRECIMIENTO DE MICROORGANISMOS EN SUELOS CONTAMINADOS CON MERCURIO DE SEGOVIA, ANTIOQUIA. *27*, 77-90.

Bogota D.C, Colombia: CIENCIA E INGENIERÍA NEOGRANADINA. Obtenido de

<http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v27n1/v27n1a05.pdf>