



**Estudio de procesos de fitorremediación aplicados en suelos contaminados con
hidrocarburos por el desarrollo de actividades de las EDS**

Lina Marcela Chitiva Torres

Código11231323456

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

**Estudio de procesos de fitorremediación aplicados en suelos contaminados con
hidrocarburos por el desarrollo de actividades de las EDS**

Lina Marcela Chitiva Torres

Directora:
MsC Vanessa Rodríguez Rueda.

Monografía

Línea de investigación: Contaminación de Suelos

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____, Cumple con

los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Contenido

Pág.

Contenido

Resumen	1
Abstract	2
Introducción.....	3
4. Objetivos	4
4.1 General	4
4.2 Específicos	4
5. Planteamiento del problema.....	5
6. Justificación	6
7. Marco conceptual	7
7.1 El suelo y la fitorremediación a través de la historia	7
7.1.1 Datos históricos del suelo	7
7.1.2 Inicios de los procesos de fitorremediación	7
7.2 Evolución de las normas Nacionales.....	8
7.3 El suelo, sus características y principales fuentes de contaminación.....	10
7.3.1 Características del suelo	10
7.3.2 Fuentes de contaminación	11
7.3.3 Suelos contaminados por hidrocarburos.....	12
7.4 Procesos de fitorremediación	14
7.5 Condiciones normativas de los manejos de hidrocarburos y los procesos de fitorremediación	15
7.6 Categorías y métodos de fitorremediación.....	17
8. Estado del Arte	20
8.1 Métodos experimentales con resultados de remoción.....	20
8.1.1 Primer método de remoción con especie <i>Cajanus cajan</i>	20
8.1.2 Segundo método de remoción con especie <i>Koelerutera paniculata</i>	21
8.1.3 Tercer método de remoción con especie <i>Alternanthera philoxeroide</i>	22
8.1.4 Cuarto método de remoción con especie <i>trifolium repens</i>	23

8.1.5	Quinto método de remoción especie <i>Leersia hexandra</i>	24
9.	Metodología.....	26
9.1	Revisión Bibliográfica.....	26
9.2	Análisis Documental y Revisión de los Datos Estadísticos	27
9.2.1	Procedimiento	27
9.3	Marco Normativo	29
9.4	Determinación del Método Según su Remoción y Adaptabilidad	31
10.	Resultados	32
10.1	Resultados de Métodos Escogidos	32
10.2	Análisis de los Resultados Legislativos	35
10.3	Resultados del Mejor Método de Fitorremediación	36
	Conclusiones.....	38
	Recomendaciones.....	40
	Bibliografía.....	42

Lista de Figuras

	<u>Pág.</u>
<i>Figura 1. Evolución normativa ambiental</i>	8
<i>Figura 2. Componentes del suelo</i>	11
<i>Figura 3. Clasificación de hidrocarburos</i>	13
<i>Figura 4. Metabolismo y categorías Fito remediadoras</i>	17
<i>Figura 5. Resultados de remoción</i>	21
<i>Figura 6. Remoción de Fenantreno</i>	22
<i>Figura 7. Remoción de Diesel</i>	23
<i>Figura 8. Remoción de Diesel 2</i>	24
<i>Figura 9. Características del suelo en estudio</i>	25
<i>Figura 10. Resultados de remoción</i>	25
<i>Figura 11. Resultados bibliográficos</i>	32
<i>Figura 12, Porcentaje de remoción en especies</i>	33
<i>Figura 13, Características de las especies métodos 3 y 4</i>	35
<i>Figura 14. Leyes y decretos del suelo</i>	36

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 1 Fuentes de contaminación ambiental	12
Tabla 2. Ventajas y Desventajas de un Proceso de Fitorremediación	15
Tabla 3. Normatividad aplicada al manejo de hidrocarburos y usos y cuidados del suelo	15
Tabla 4. Métodos de fitorremediación	18
Tabla 5. Normatividad Colombiana de usos y cuidados del suelo	9
Tabla 6. Comparación Estudios de fitorremediación.....	28
Tabla 7. Normatividad para cuidados y usos del suelo en el manejo de hidrocarburos para las EDS.....	29

Agradecimientos

Primeramente, quiero dar gracias a Dios por haberme concedido llegar hasta el final de este proceso, por guiar mi camino, darme la fortaleza suficiente para continuar y no dejarme desfallecer a pesar de los obstáculos.

Agradezco el apoyo incondicional de mi familia, en especial el de mi madre Maricel Torres quien ha dedicado su tiempo a cuidarme y enseñarme lo correcto y que además es mi ejemplo, mi guía y mi motivación para mejorar cada día como persona y como profesional.

Quiero agradecer a todo el cuerpo de profesores de la Universidad Antonio Nariño, quienes se dedicaron a compartir sus conocimientos siempre con proyecciones de formar excelentes profesionales, pero especialmente doy todos mis agradecimientos, total admiración, respeto y cariño a la docente y tutora Vanessa Rodríguez Rueda, quien creyó en mí más que cualquier persona, quien me motivó y me ayudó con sus enseñanzas, su comprensión y calidez, pues su paciencia, conocimiento y sencillez me permitieron llegar a este punto.

Finalmente, a mis compañeros y amigos que hicieron parte en todo este proceso de crecimiento profesional, gracias por su apoyo y compañía.

Resumen

En la presente monografía se buscó realizar un estudio bibliográfico de los métodos más significativos en los procesos de fitorremediación que contribuyeron a la descontaminación de suelos afectados, básicamente por el desarrollo de actividades industriales que generan alteraciones directas en las capas del suelo.

Se tuvo en cuenta el reconocimiento de la legislación ambiental que regula los procesos de reparación en eventos contaminantes y que van direccionados al cuidado y uso del suelo en el transcurso de la historia.

Para la identificación de los métodos que resaltan por su eficacia en los procesos de fitorremediación, se realizó un análisis de sus resultados, teniendo en cuenta los parámetros que más se adaptan a suelos tropicales como los de Colombia y que arrojaron un alto índice de remoción de contaminantes derivados de los hidrocarburos.

Palabras claves: Suelos contaminados, Hidrocarburos, Fitorremediación, Diesel, petróleo.

Abstract

In this monograph we sought to carry out a bibliographic study of the most outstanding methods in phytoremediation processes that contribute to the decontamination of affected soils, basically due to the development of industrial activities that generate direct alterations in the soil layers.

The application of environmental legislation that regulates remediation processes in polluting events and that are directed to the care and use of the soil in the course of history was taken into account.

In order to identify the methods that stand out for their effectiveness in phytoremediation processes, an analysis of their results was carried out, taking into account the parameters that are best suited to tropical soils such as those of Colombia and that yielded a high rate of removal of contaminants derived from hydrocarbons.

Key words: Contaminated soils, Hydrocarbons, Phytoremediation, Diesel, petroleum, Soil Pollutants, Plant Root and Rhizosphere.

Introducción

La contaminación ambiental es una problemática que refleja los malos el mal uso de los recursos naturales y la falta de conciencia o conocimiento que tiene el ser humano en el desarrollo de las actividades del día a día, esta problemática se ve reflejada de las alteraciones que sufren los diferentes factores que conforman un entorno ambiental como aire, agua y suelo, este último es afectado básicamente por el desarrollo de actividades industriales que generan alteraciones directas en la capa del suelo. (Olivares, 2020).

Teniendo en cuenta las alteraciones mencionadas, el sector gubernamental se ve en la obligación de generar normas y estrategias que contribuyan a la protección ambiental y al mejoramiento de las afectaciones generadas que a su vez mitiguen el daño que causa el desarrollo de los procesos industriales y de cotidianidad humana, esto con el fin de garantizar un ambiente sano como derecho fundamental del ser humano a pesar de la explotación de los recursos naturales. (PULGARIN, 2012).

Debido es esto, se realizó un análisis bibliográfico de procesos que contribuyan a la descontaminación de los factores afectados como el suelo, enfatizando en la remoción de contaminantes generados por la industria de hidrocarburos, en aras de identificar cuales pueden ser los mas opcionales a utilizar según corresponda.

Adicionalmente se relacionó la evolución de la legislación normativa aplicada en cada área mencionada, con el fin de proporcionar el listado de leyes y decretos que se deben tener en cuenta en el caso de desarrollar cualquier actividad, que implique el peligro de contaminar el factor del suelo y que su composición contaminante tenga relación con hidrocarburos.

Finalmente, bajo una metodología de estudio cualitativo y estadístico, se identifica los métodos de fitorremediación que mejores resultados han arrojado en procesos de descontaminación de suelos por hidrocarburos, de tal manera que, bajo sus parámetros y porcentajes de remoción, se cataloga como uno de los mejores métodos empleados hasta el momento y que a su vez cumple con las condiciones que podrían darse en un país tropical como Colombia.

4. Objetivos

4.1 General

Determinar los métodos de fitorremediación que podrían ser adaptados para descontaminar los alrededores de una estación de servicio de combustibles

4.2 Específicos

- Realizar un análisis bibliográfico de los procesos de fitorremediación que contribuyen a la remoción de combustibles derivados del petróleo.
- Analizar los componentes normativos de la legislación vigente, aplicados a procesos de fitorremediación e inactivación de las estaciones de abastecimiento de combustibles.
- Establecer entre los métodos estudiados el de mayor efectividad y adaptabilidad para el tratamiento de suelos contaminados por combustibles

5. Planteamiento del problema

Los hidrocarburos son conocidos como la principal fuente de energía debido a su composición, puesto que están conformados por moléculas como hidrogeno y carbono, las cuales en procesos de modificación y extracción generan sustancias como gas metano, combustibles y otros componentes que son utilizados para la movilidad de vehículos, generación de electricidad y calor (HEREDIA, 2000),

Sin embargo, a pesar de sus múltiples beneficios para la evolución de hombre, causan un problema grave al medio ambiente, ya que, al entrar en contacto con medios bióticos como suelo, fauna o fuentes hídricas alteran sus componentes naturales y dañan su estructura, quedando de esta manera inservibles y no consumibles para el ser vivo.

Las alteraciones anteriormente relacionadas, se reflejan con frecuencia en el desarrollo de actividades de las Estaciones De Servicios (EDS) de abastecimiento de combustibles, ya que, pueden surgir derrames de (gasolina o Diesel), que afectan de directamente las características del suelo, alterando sus propiedades originales y que por lo tanto surge la necesidad de hacer procesos de reparación a través de métodos que ayuden a remover los componentes de los hidrocarburos de los medios bióticos como el suelo.

6. Justificaciòn

Teniendo en cuenta las afectaciones que genera el desarrollo de las actividades petroleras como el abastecimiento de combustibles (gasolina y Diesel) en áreas como suelo o cuerpos hídricos, el presente estudio busca realizar una comparaciòn de los métodos de fitorremediaciòn existentes que se usan en el procedimientos de descontaminaciòn de suelos afectados por derivados de los hidrocarburos y que segùn los resultados de remociòn de los contaminantes, nos dan a concluir los métodos más recomendables para un proceso de descontaminaciòn ambiental en suelo.

Se debe tener en cuenta que el potencial de la especie seleccionada para limpiar un suelo contaminado por algùn metal o contaminantes mediante procesos de fitorremediaciòn depende básicamente de la capacidad de absorciòn que tiene en el tratamiento de metales o contaminantes de hiper acumulaciòn, las propiedades del suelo y la adecuaciòn mutua de las relaciones planta-suelo. (R. Huang, 2020),

Es por esto, que se busca evidenciar que los métodos empleados en procesos de fitorremediaciòn cumplan con los parámetros de adecuaciòn para que los resultados sean exitosos en el tratamiento.

Es importante señalar que los métodos de fitorremediaciòn tienen preferencia dentro de las técnicas para la descontaminaciòn de suelos, ya que resulta ser la propuesta más atractiva por su bajo costo en el mejoramiento de las condiciones del suelo, por ser estéticamente agradable y ambientalmente amigable (Hernández, Navas & Infante, 2017) es debido a eso, que se considera como uno de los métodos más adecuados para recuperar las características de suelos contaminados y que mejor se adaptan al medio, teniendo en cuenta los componentes del estudio que se realice para su aplicaciòn.

Pregunta problema: ¿Cuál sería el mejor método de fitorremediaciòn que se adapte al medio y que remueva el mayor porcentaje de contaminantes derivados de hidrocarburos?

7. Marco conceptual

En la actualidad, la contaminación del suelo es un problema ambiental de alto impacto, pues las alteraciones que sufre por el desarrollo de actividades antrópicas como la minería, la industria, la ganadería, entre otras. Modifican negativamente su estructura y nivelación generando una degradación en sus componentes y reduciendo su potencial nutricional, el cual es importante para la generación de cultivos y conservación de especies (Ballesta, 2017).

7.1 El suelo y la fitorremediación a través de la historia

Para dar alcance al presente estudio bibliográfico, es importante conocer que ha pasado a través de la evolución del hombre con el uso del factor de nuestro interés, desde que la concientización humana generó el desarrollo de estrategias en procesos de fitorremediación y como se evidencia su evolución a través de la historia hasta el día de hoy.

7.1.1 Datos históricos del suelo

El suelo es un componente existente desde el inicio de los tiempos en el desarrollo del planeta y la formación de vida en las distintas teorías de la evolución tanto científicas como religiosas, los datos documentados de estudio de suelo y sus conceptos iniciaron en el siglo XVIII en países de Europa, Inglaterra y Alemania, pero sus enfoques de estudio eran distintos en cada país (Osorio, 2012).

Según data la historia, la contaminación antes de la década de los 70 solo se resaltaba en los factores como el agua y aire, el suelo fue considerado factor contaminante de recursos finitos des pues de la Carta Europea de suelos que fue emitida en el año 1972, calificando a este factor como un recurso limitado e igual de vulnerable y necesario como los demás factores ambientales (Marin, 2008).

7.1.2 Inicios de los procesos de fitorremediación

En la identificación de contaminantes del suelo en la década de los 70, la humanidad se vio comprometida a buscar métodos que ayudaran a descontaminar los recursos, sin embargo, a pesar de que ya se manejaba el uso de especies para limpieza de fuentes hídricas

hace 3000 años, el termino de fitorremediación para suelo y agua se vino a conocer en la época de los 90, según data (Gomez, 2015).

Desde entonces, el uso de plantas para retirar contaminantes se ha vuelto uno de los procesos más usados por la industria y las actividades agrícolas, esto debido a que los procesos de fitorremediación suelen arrojar resultados de alto impacto en remoción y su costo en el desarrollo del proceso es bajo versus otros procesos biológicos, con la desventaja que se debe contar con suficiente tiempo y análisis para obtener resultados exitosos. (Angélica Evelin Delgadillo-López^{1*}, 2011)

7.2 Evolución de las normas Nacionales

Desde los inicios de los 70, cuando se consideró el suelo un factor de vulnerabilidad y carga contaminante, las instituciones iniciaron la emisión de normas que contribuyeron al buen uso del recurso y su recuperación, según lo describe (Sanchez & Holguin, 2014) la (figura 4) representa la evolución del marco normativo nacional señalando las primeras leyes que dieron paso a la variedad de legislación ambiental que se tiene hoy en día en el país.



Figura 1. Evolución normativa ambiental

Fuente: modificado a partir de (Colombia, 2021)

Para garantizar el cuidado del recurso ambiental, las Instituciones Colombianas implementaron leyes basadas en los decretos internacionales que dictan las exigencias y determinaciones que se deben tener presentes a la hora de ejecutar de cualquier actividad industrial, agrícola o de construcción y que esta vulnere el factor del suelo, tal como lo relaciona la (tabla 5).

Tabla 1. *Normatividad Colombiana de usos y cuidados del suelo*

Año	Decreto	Observaciones
2009	Resolución 170	La cal establece el año 2009 como el año de los suelos y a su vez reconoce el día 17 de junio como Día Nacional de los Suelos en Colombia, adoptando medidas que permitan la protección y conservación del medio
1997	Ley 338	Establece y diseña los modelos que se deben seguir en los planes de ordenamiento territorial y su ejecución
1998	Decreto 879	Dictamina las disposiciones que hacen referencia al ordenamiento del territorio de un municipio y de un distrito para que se adapten al plan de ordenamiento territorial
1989	Decreto 2462	Dicta los lineamientos referentes a la explotación de materiales de construcción
1974	Decreto 2811	Genera los parámetros que diferencian los usos del suelo agrícola y no agrícola

Fuente: modificada a partir de (Colombia, 2021)

Para el desarrollo del presente análisis es importante conocer los principales conceptos que se manejan en un proceso de fitorremediación en suelos, también los que conciernen al manejo de los derivados de hidrocarburos utilizados en las estaciones de abastecimiento de combustibles (EDS) para vehículos.

7.3 El suelo, sus características y principales fuentes de contaminación.

El suelo tiene diferentes definiciones según sea el enfoque de búsqueda, generalmente, es considerado como un factor ambiental que proporciona diferentes beneficios para la supervivencia de los seres vivos, puesto que, sus componentes físicos y químicos deben generar un equilibrio para su correcto funcionamiento y de esta manera garantizar una buena calidad en el aporte de sus nutrientes para los cultivos y las especies que habitan y dependen de él (Cruz, Barra, Castillo, & Gutiérrez, 2004).

7.3.1 Características del suelo

El conocimiento de las propiedades del factor suelo, es importante ya que permite clasificar el aprovechamiento del recurso suelo y sus diversos usos, según lo describe (O & M, 2014) sus componentes principales se dividen en inorgánicos (arena, arcilla, agua y aire) y orgánicos (humus), este último es definido por los restos que quedan de los animales y plantas en descomposición y se considera fuente principal de nutrientes, pero su concentración suele ser más baja que los demás componentes, tal como lo representa la (Figura 1).

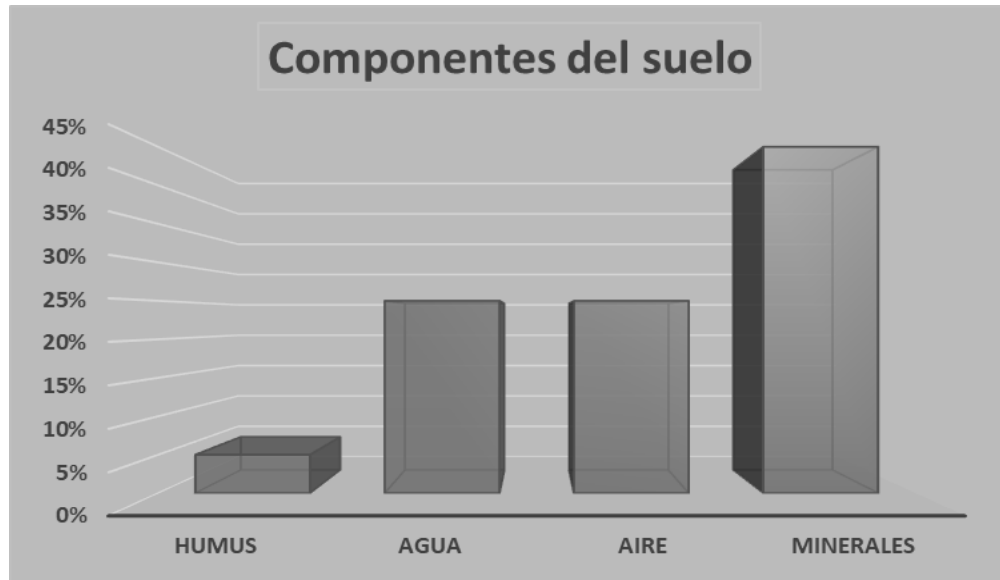


Figura 2. Componentes del suelo

Fuente: modificado a partir de (O & M, 2014)

La combinación y afinidad de los compuestos mencionados permiten un buen sostenimiento de las raíces, capacidad de drenaje (absorción de agua), permeabilidad (paso del fluido por su interior) y otros factores que influyen en la conservación de nutrientes para sembrado agrícola, el habitat y alimento para los seres vivos (Rucks, García, Kaplán, León, & Hill, 2004),

7.3.2 Fuentes de contaminación

El desarrollo de actividades industriales, domesticas, de transporte entre otras, generan desechos que se convierten en cargas contaminantes para los factores ambientales, en el suelo la afectación suele suceder por la infiltración de líquidos (lixiviados) con componentes tóxicos alterando su estructura natural, los cuales dependen de las actividades desarrolladas y del uso que se le dé al suelo contaminado (Ballesta, 2017), las actividades mencionadas se consideran son las generadoras de las principales fuentes de contaminación ambiental, como lo describe la (tabla1).

Tabla 2 Fuentes de contaminación ambiental

Recurso Natural	Fuente Contaminante
SUELO	Tala de arboles
	Producción de energía y extracción de derivados fósiles
	Vertimiento de líquidos contaminados directamente en suelos y en afluentes hídricas
AGUA	Vertimiento de líquidos contaminados en fuentes hídricas y suelos
	Extracción de derivados fósiles (petróleo, carbón, etc.)
	Desarrollo de actividades mineras, ganadería y agricultura.
AIRE	Uso de automóviles y otros medios de transporte
	Emisión de partículas por actividades industriales
	Desarrollo de actividades de ganadería

Fuente: Modificado de (SAGREDO & SANDOVAL, 2020)

Existen contaminantes en los que su estructura es orgánica y de fácil degradación, de tal forma que, al ser puestos en contacto con el suelo, los microorganismos que habitan en él los digieren y transforman de manera natural generando un proceso de resiliencia (capacidad de recuperarse) en el cual se ajustan todos los parámetros en su forma ideal (Zuñiga, 1999).

7.3.3 Suelos contaminados por hidrocarburos

Los hidrocarburos pertenecen a los compuestos de características orgánicas, ya que su estructura está conformada por átomos de carbono e hidrogeno, debido a esto no es posible tener una descomposición natural (Ministerio de Edcaçiòn , 2000), de tal manera que, al ser puestos en contacto con el suelo en altas cantidades, alteran sus características físicas y químicas causando daños de difícil remediación.

En la (Figura 2) se muestran las diferentes clasificaciones de los hidrocarburos según su cadena de composición que tengan ya sea lineal o cíclica, de los cuales la gasolina y el Diesel pertenecen a categorías de hidrocarburos clorados (contienen átomos de cloro), aromáticos (contienen una molécula de benceno) y aromáticos policíclicos (contienen varias moléculas de benceno) en los que su estructura varía de 4 a 11 carbonos, haciéndolos de esta manera difíciles de descomponer y generando un grado de toxicidad alto para el medio ambiente (Aranda, 2013).



Figura 3. Clasificación de hidrocarburos

Fuente: tomado de (Aranda, 2013)

Los escenarios más frecuentes en los que se presentan contaminación de suelos por hidrocarburos y sus derivados se encuentran en el manejo, uso, almacenamiento, transporte y distribución del líquido que se realiza en los puntos de extracción de petróleo, oleoductos y fuentes de abastecimiento como las EDS de combustibles, generando contacto con el suelo de manera directa por derrame o por infiltración del líquido (Zarate, 2014).

En los episodios de contaminación por hidrocarburos, el suelo sufre una afectación que logra modificar sus características físicas y químicas generando efectos negativos, dichos cambios son identificados través de análisis que donde busca evaluar la modificación de propiedades geotécnicas en los límites de Atterberg (plasticidad o consistencia del suelo), la capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, acidez, humedad y densidad de

un suelo contaminado con petróleo y compararlas con propiedades de un suelo no contaminado, con el fin de identificar el grado de afectación (Zahermand, Vafaeian & Bazyar, 2020).

7.4 Procesos de fitorremediación

La fitorremediación es el avance de los estudios de las plantas que, por sus características, permiten utilizarse como técnica de remoción de contaminantes en medios como suelos o fuentes hídricas, mediante diversos mecanismos que forman parte de su estructura (HEREDIA, 2000), estos estudios han dado lugar a demostración del tratamiento de contaminantes, obteniendo resultados que permiten disminuir el impacto de la toxicidad del contaminante.

Es uno de los procesos más utilizados en descontaminación ambiental por su beneficio y su bajo costo de implementación, estos fueron desarrollados con el objetivo de remover contaminantes en factores como suelo, agua y aire haciendo uso de especies plantías o microorganismos que cuenten con capacidad de absorción y metabolización de contaminantes pesados (A, C, F, J, & O., 2011).

Para garantizar el mejoramiento de un suelo contaminado por hidrocarburos y sus derivados con procesos de fitorremediación, se debe prever las condiciones y características tanto del medio como de la especie a utilizar, pues cada especie (flora arbórea, arbustiva, herbácea) tienen especificaciones como temperatura, pH, capacidad de acumulación que deben tenerse presentes para garantizar su funcionamiento (Jeannette Marrero-Coto, 2012).

En la (tabla 2) se puede encontrar la descripción de los puntos a favor y en contra que tiene un proceso de fitorremediación al ser aplicado en zonas afectadas con contaminantes pesados como los derivados de los hidrocarburos.

Tabla 3. Ventajas y Desventajas de un Proceso de Fitorremediación

TÉCNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fitorremediación	Recuperación y mejoramiento de las zonas afectadas	Exige un estudio cuidadoso de la planta a seleccionar
	Bajo costo de implementación	Son procesos de larga duración
	Resultados de remoción eficientes	Exige un seguimiento cuidadoso del proceso

Fuente: Modificado a partir de (Jeannette Marrero-Coto, 2012)

7.5 Condiciones normativas de los manejos de hidrocarburos y los procesos de fitorremediación

Para cumplir con la necesidad del mejoramiento y la reparación ambiental, el Estado ha definido en lo largo de su mandato el desarrollo de la normatividad que permita exigir el buen uso de los recursos y la reparación de los daños ambientales, la (tabla 3) relaciona algunas de las normas que se deben tener en cuenta en el manejo de combustibles y reparación de suelos contaminados

Tabla 4. Normatividad aplicada al manejo de hidrocarburos y usos y cuidados del suelo

Año	Resolución/Decreto	Observaciones
		Art. 35: El cual prohíbe la descarga y disposición de los residuos o sustancias

	Decreto 2811	directamente en el suelo y que estos causen daño o alteración en su estructura y entorno.
1974		
		Contiene 17 artículos que esta direccionados al uso, la conservación, reestructuración y mejoramiento de los recursos naturales, entre ellos el suelo
1991	Constitución política de Colombia	
		En el artículo 19 menciona la responsabilidad que se debe tener en temas de contaminación y remediación de sitios
2005	Decreto 4741	
		Define las características que catalogan a una acción como daño ambiental, señalando las afecciones que se pueden generar en el entorno de un ecosistema.
1993	Ley 99	
		Fue decretada internacionalmente con el objetivo de establecer parámetros que permitieran medir de manera química, los componentes de los recursos ambientales como el pH, concentraciones de hidrocarburos, etc. Para de esta manera identificar las alteraciones que se puedan presentar en los mismos.
Norma Luisiana 29 B	Norma Luisiana 29 B	
		En donde se obtiene el programa diseñado para la

2010	ISO 4113	caracterización y el control de la calidad de suelos, también el programa permite identificar fuentes de contaminación y efectos en la estructura
2015	Decreto 1073	El cual relaciona todas las pautas y lineamientos para el aprovechamiento y la distribución de los hidrocarburos

Fuente: modificado a partir de (Ministerio de Minas y Energía , 2021)

7.6 Categorías y métodos de fitorremediación

Inicialmente, es importante conocer las características de la planta o especie que es utilizada para hacer procesos de fitorremediación, de este modo se puede comprender como funciona su metabolismo en el momento de transformar un contaminante, tal como lo describe la (Figura 3) para así, tener presente los factores que influyen en las categorías de los diferentes métodos.

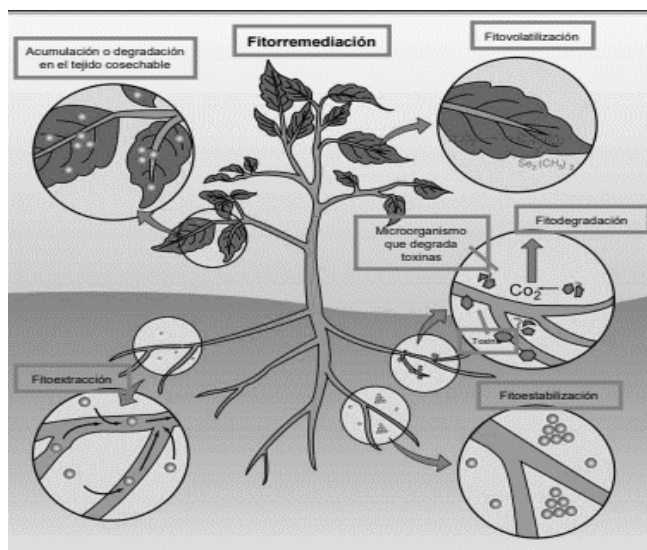


Figura 4. Metabolismo y categorías Fito remediadoras

Fuente: tomada de (Mentaberry, 2011).

En la actualidad, los procesos de fitorremediación operan mediante diversos mecanismos que incluyen diferentes partes de la planta, algunos de los mecanismos asociados a la fitorremediación son la Fito extracción, la Fito estabilización, la Fito volatilización y Rizo degradación, esta última, se conoce como la técnica que más se utiliza en procesos de remover contaminantes, específicamente de hidrocarburos del medio (Ismael HERNÁNDEZ VALENCIA^{1*}, 2017).

La clasificación de los métodos existentes de fitorremediación depende de factores como la clase de contaminante que tiene el medio, la capacidad de la planta a utilizar para descomponer o transformar el contaminante y la capacidad de acumular un contaminante, de modo que se dividen como lo ilustra (Tabla 4).

Tabla 5. Métodos de fitorremediación

Método	Características
Fito-extracción	Las especies se utilizan tratar y remover la concentración de metales pesados, y los acumulan en su raíz y hojas
Rizo-filtración	La función está en la raíz de la planta, ya que estas absorben las concentraciones del contaminante y generan una precipitación en el medio.
Fito-estimulación	Las raíces generan exudados que se utilizan como concentración de nutrientes para los macroorganismos que degradan en contaminante
Fito-estabilización	Se utilizan plantas que se adapten al medio contaminado y que eviten la movilización del contaminante, de esa manera no pasa a otro medio subterráneo o de aire

Fito-degradación	Se emplean plantas capaces de captar, transformar y degradar el contaminante con el fin de descontaminar el medio o bajar el grado de toxicidad
Fito-volatilización	Es este caso las especies utilizadas tienen la capacidad de captar y modificar tanto metales pesados como compuestos orgánicos y en su proceso los liberan a la atmósfera en sustancias menos tóxicas.

Fuente: modificado a partir de (Mentaberry, 2011)

8. Estado del Arte

El desarrollo del estado de arte tiene como objetivo realizar una búsqueda bibliográfica de información que centralice los datos en los métodos biorremediadores usados comúnmente de manera evolutiva y que según sus resultados permite identificar cuáles han sido los que mejor se han desenvuelto en la remoción de contaminantes derivados de los hidrocarburos.

8.1 Métodos experimentales con resultados de remoción

A continuación, se realiza un relacionamiento de algunos casos de estudio y artículos que enfatizan en el desarrollo de procesos de fitorremediación que han sido implementados y que muestran resultados favorables en la degradación de hidrocarburos.

8.1.1 Primer método de remoción con especie *Cajanus cajan*

Inicialmente, se expone el presente método experimental en donde se avaluó de la especie *Cajanus cajan*, ya que se busca medir su capacidad Fito-remediadora reflejada en el comportamiento de la actividad microbiana de un suelo contaminado con Lodos Aceitosos de Petróleo (POS), Por tal motivo, se realizó una clasificación de 4 medios de rizosfera diferentes, etiquetadas como rizosfera contaminada (CR), no rizosfera contaminada (CN), rizosfera no contaminada (UR) y no contaminada rizosfera (UR), las cuales fueron contaminadas con POS en una concentración del 1% al 5% y evaluados por un periodo de 90 días, en donde los resultados se vieron reflejados en la biodegradación del contaminante. (Allamin, Halmi, Yasid, 2020).

En el proceso los autores garantizaron un pH del suelo de muestra de 7.2 y con un mecanismo de roció de agua diario en un suelo arcilloso y textura combinada, esto con el fin de proporcionar condiciones adecuadas que les permitieran el crecimiento a las plántulas y que se generara desarrollo microbiano apto para el tratamiento con el contaminante.

Los resultados de degradación de los lodos aceitosos de petróleo en el estudio realizado con la *Cajanus cajan* que describe el estudio anterior, muestran efectividad en periodos evaluados de 30, 60 y 90 días, en donde la afectación en suelos contaminados fue disminuyendo a medida que avanzaba el tiempo, bajando las concentraciones del

contaminante en cada prueba y aumentando su porcentaje de biodegradación como lo ilustra la (figura 5), en donde se evidencia que las muestras CR1, CR2 y CR3 reflejan porcentajes de remoción del 92%, 90% y 89%, haciendo uso solo de la especie y en el caso de la CR1 se realizó uso de la especie con una baja adición de nutrientes.

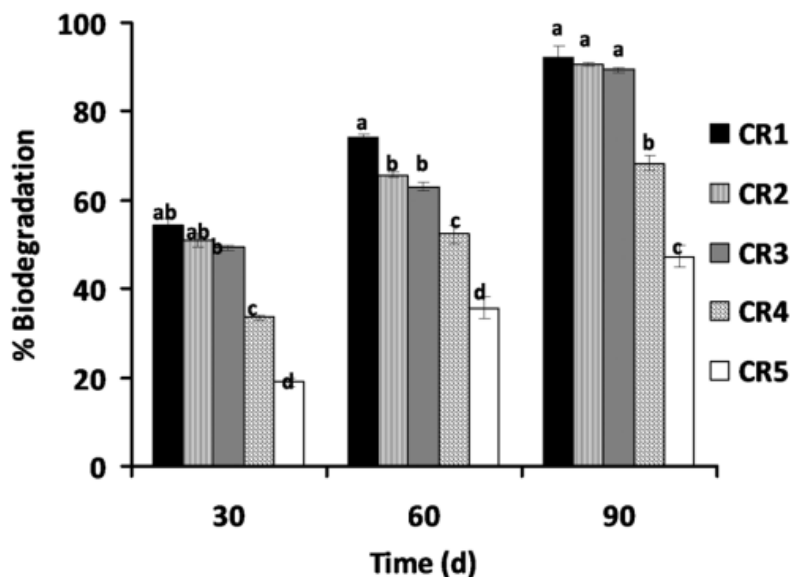


Figura 5, Resultados de remoción
Fuente: tomado de (Allamin, Halmi, Yasid, 2020)

8.1.2 Segundo método de remoción con especie *Koelreuteria paniculata*

Otro de los estudios realizados en especies Fito remediadoras y que arrojó resultados benéficos en el proceso de suelos contaminados con hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) fue el realizado a la especie *Koelreuteria paniculata*, en donde se emplea el exudado de las raíces (ARE) para lograr una biodegradación del fenantreno (PHE), este proceso se realizó durante un periodo de 180 días en 4 lotes de cultivos diferentes, en donde las concentraciones de ARE varían de la siguiente manera: baja concentración de ARE, alta concentración de ARE, plantación de la especie directa y un experimento de control en donde no se agrega ARE ni se planta, (Wang, Chen & etal , 2020).

En el proceso los autores escogieron un suelo con características mistas, con un pH de 5,4 y con componentes de carbono, nitrógeno y fosforo, en donde se permitieron tomar muestras en diferentes concentraciones de ARE y de esta manera estudiar el comportamiento de la comunidad bacteriana, arrojando como resultados prometedores que según aumenta la concentración de ARE en un suelo contaminado con fenantreno o HAP en condiciones de acidez, el aditivo mejora la actividad microbiana y permite que la plántula empleada se desarrolle en el medio para realizar el proceso de remoción, generando una remoción del contaminante de aproximadamente el 74%, según lo muestra la (figura 6)

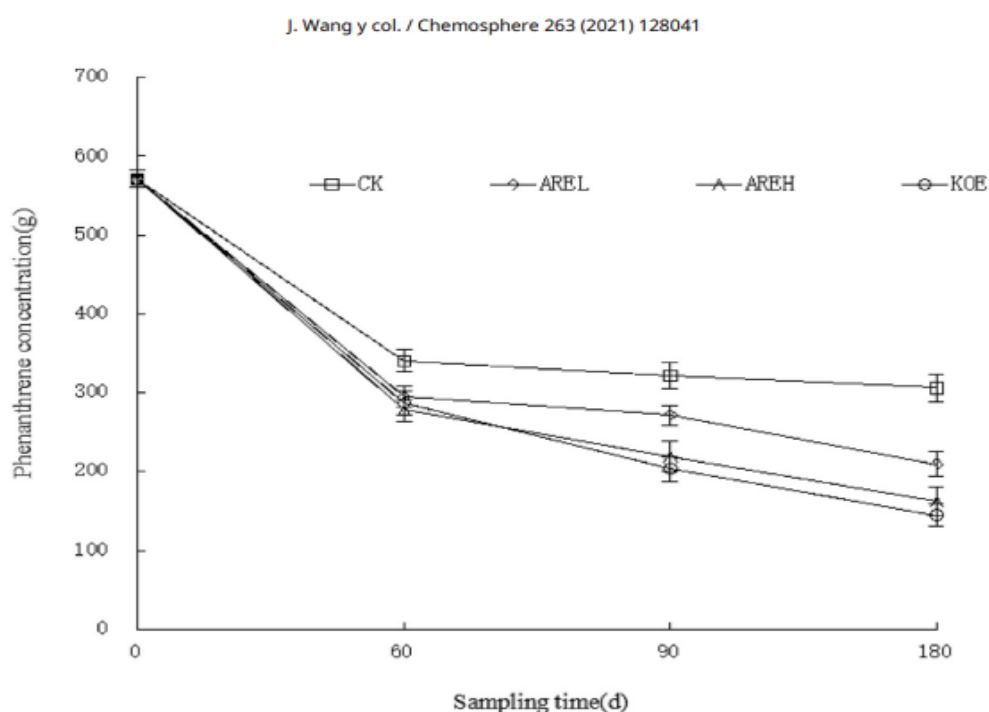


Figura 6. Remoción de Fenantreno
Fuente: tomado de (Wang, Chen & etal , 2020)

8.1.3 Tercer método de remoción con especie *Alternanthera philoxeroide*

Por otro lado, se expone un estudio en donde se emplea como agente fitorremediadora la especie *Alternanthera philoxeroide* conocida como (planta cocodrilo), que junto con las propiedades que aporta el selenio (Se), se busca identificar la capacidad de remoción de los HAP de un suelo contaminado con Diesel mediante el crecimiento de la especie plantada, en donde se extrajo una muestra de suelo y se dividió en 3 macetas contaminándolas con diferentes concentraciones de Diesel, las cuales se sometieron a estudio por un periodo de 60

días y en algunas de las muestras se iban tratando con concentraciones de Se en diferentes proporciones (Huang, Yizhi y etal , 2019).

Para el desarrollo del método los autores tomaron una muestra desuelo con pH de 7.4 y con concentraciones de materia orgánica, fororo, nitrógeno y selenio en bajas cantidades, en donde sacaron muestras contaminadas con Diesel y aplicaron diferentes concentraciones de selenio por periodos de tiempo que mostraron resultados en la actividad microbiana y el crecimiento de la plántula en el suelo contaminado, generando un porcentaje de remoción del 46%, ver (figura 7)

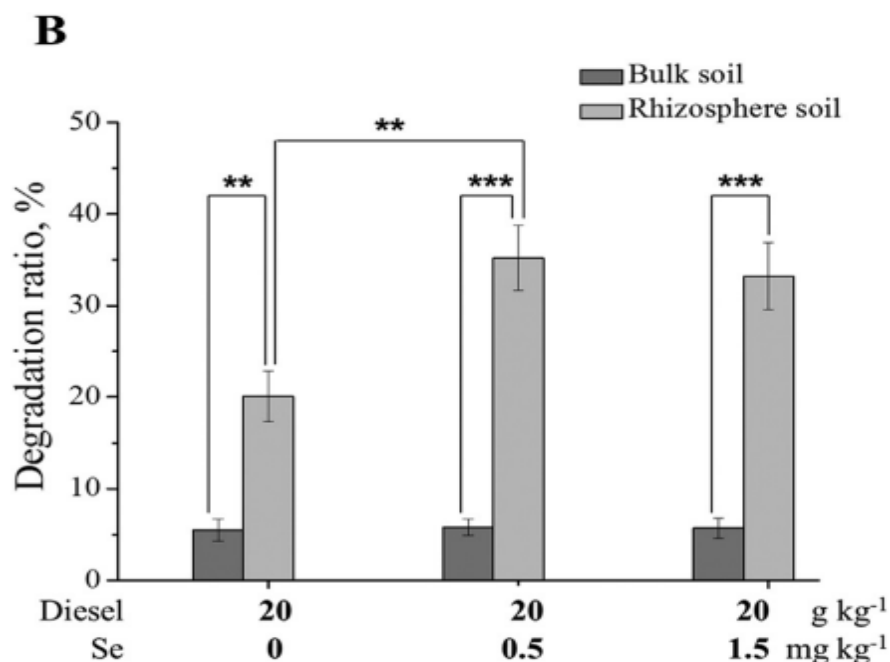


Figura 7. Remoción de Diesel
Fuente: tomado de (Huang, Yizhi y etal , 2019)

8.1.4 Cuarto método de remoción con especie *trifolium repens*

En este método, se relaciona el estudio realizado con la especie *trifolium repens* que es utilizada para remediar un suelo contaminado con Diesel y que se somete a estudio en diferentes concentraciones del contaminante por periodos de tiempo de 30 a 60 días, en donde se evidencia que la planta realiza aun adaptabilidad al medio contaminante con ayuda de dosis de selenio, de manera que le permite crecer rápidamente y hacer procesos de remoción (Ying Xi, 2018).

En continuidad con el proceso, los autores seleccionaron un suelo de contextura mixta, con un pH de 7.4, con presencia de materia orgánica y selenio en bajas cantidades, en donde formaron muestras contaminadas con Diesel y aplicaron Selenio en diferentes dosificaciones en periodos de tiempo de 30 y 60 días, los cuales mostraron un mejoramiento en la actividad microbiana y el crecimiento de la plántula en el medio contaminado, obteniendo porcentajes de remoción aproximados del 45% según lo ilustra la (figura 8)

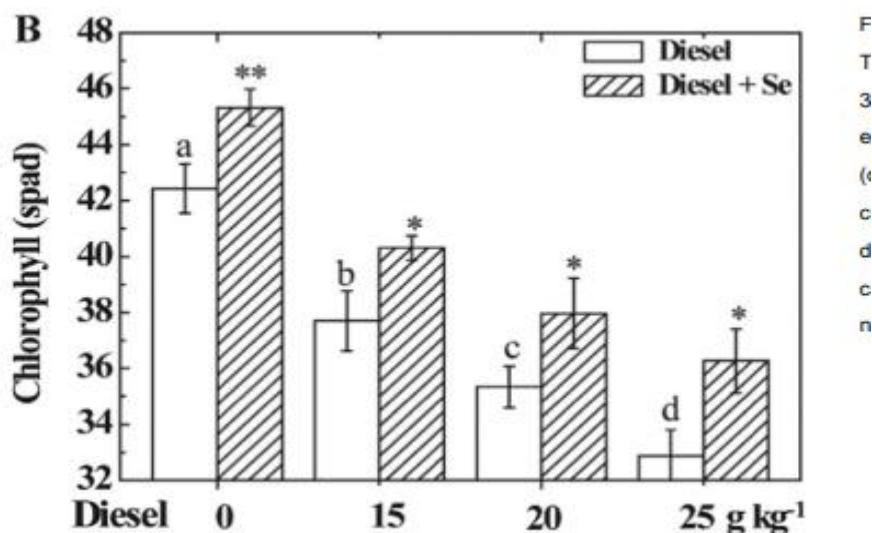


Figura 8. Remoción de Diesel 2
Fuente: tomado de (Ying Xi, 2018)

8.1.5 Quinto método de remoción especie *Leersia hexandra*

Finalmente se relaciona un método que fue desarrollado en México, en donde utilizan la especie *Leersia hexandra* y toman como muestra de suelo un área contaminada por un derrame de petróleo, inicialmente tomaron 5 muestras del suelo en diferentes zonas del derrame (figura 9), en donde el pH oscila de 6.9 a 6.14 y cuentan con concentraciones de nitrógeno y materia orgánica en proporciones moderadas, sacando de estas 8 muestras para estudio, la cuales fueron evaluadas en un periodo de tiempo de 3 y 6 meses, divididas en suelo contaminado con petróleo puro y con petróleo intemperizado, con el objetivo de identificar el desarrollo y crecimiento de la planta en el medio contaminado y el porcentaje de remoción del petróleo (Alfredo Arias-Trinidad1*, 2017).

Physical and chemical properties of soil collected from the study sites

Suelo	Textura	pH	Materia orgánica (%)	Nitrógeno total (%)	Hidrocarburos totales del petróleo (mg.kg ⁻¹ b. s.)
GL1 ¹	Arcillosa	6.9	10.18	0.4	2 607
GL2 ²	Arcillosa	6.09	21.93	0.6	14 173
GL3	Arcillosa	5.71	23.00	0.5	28 400
GL4	Arcillosa	5.36	16.39	0.6	50 598
GL5	Arcillosa	6.49	23.59	0.5	75 492
GL6	Arcillosa	6.14	16.39	0.5	112 142

1. Suelo testigo (hidrocarburos de origen biogénico) generado por quema de vegetación.
2. Suelos del sitio dos (GL2-GL6) presentan concentraciones de petróleo que superan los límites máximos permisibles estipulados en la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2008 (DOF, 2013).

Figura 9. Características del suelo en estudio
Fuente: tomado de (Alfredo Arias-Trinidad1*, 2017)

En las pruebas de estudio seleccionadas los autores realizaron ensayos con acciones de materia orgánica seca en diferentes proporciones y fijaciones de cepas bacterianas en el medio, lo cual ayudo a la especie a que desarrollara una evolución dentro el medio contaminado y se generó actividad microbiana que permitió el proceso y remoción del contaminante, obteniendo como resultado un 87% en remoción en el periodo final de 6 meses como lo representa la (figura 10)

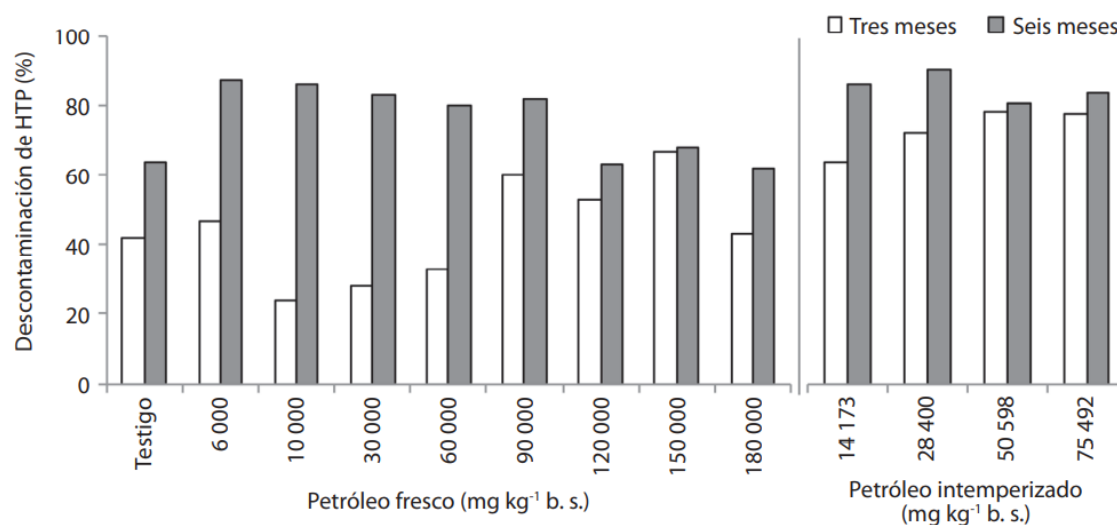


Figura 10. Resultados de remoción
Fuente: tomado de (Alfredo Arias-Trinidad1*, 2017)

9. Metodología

Para este proceso se describe el desarrollo metodológico que se realiza con el fin de afianzar el marco investigativo, el cual consiste en hacer una búsqueda detallada de los procesos de fitorremediación que han arrojado resultados prometedores para la remoción de contaminantes, esta información se toma de los artículos científicos e investigativos existentes en las plataformas digitales de Scopus y ScienceDirect , que fueron publicados en los últimos 6 años comprendidos entre el 2015 y el 2021,

9.1 Revisión Bibliográfica

En esta fase se procede a realizar la búsqueda en las plataformas digitales anteriormente mencionadas, en donde inicialmente se utilizan ecuaciones de búsqueda básicas con palabras clave como (*Contaminated soils, Hydrocarbons, Phytoremediation, Diesel y petroleum*), las cuales arrojaron un resultado total de 17 artículos con acceso abierto, en donde se realizó una selección de 3 de ellos debido a que estos estudios cuentan con características importantes como el tipo de suelo y la variación climática, que se asemejen a las de los suelos contaminados por hidrocarburos en estaciones de combustibles inhabilitadas en el país.

Posteriormente, se llevó a cabo una segunda búsqueda con nuevas ecuaciones que contienen palabras claves como (*Hydrocarbon, Soil Pollutants, Diesel, Plant Root y Rhizosphere*), las cuales arrojaron un resultado total de 12 artículos con acceso abierto, en donde se realiza la selección de 1 de ellos, ya que en los 11 restantes se encontraban algunos repetidos con la anterior búsqueda o las características no se asemejan al medio de este estudio.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, cabe resaltar que los artículos no seleccionados, fueron descartados debido a que muchos de ellos se desarrollaron en países como Canadá, china, Nigeria etc. En donde los medios climáticos o las características del suelo son diferentes a las de un país tropical como Colombia, lo cual dificulta la aplicación de estos métodos de fitorremediación bajo condiciones diferentes.

Adicionalmente, como criterios de exclusión no se tomaron en cuenta artículos que en su metodología el proceso de fitorremediación era para remover contaminantes diferentes a los hidrocarburos, que el medio a tratar era un factor diferente al suelo, que en las características de los suelos como el pH eran o muy ácidos o alcalinos, ya que este tipo de suelos no es comúnmente compatible con suelos de Colombia en la mayoría de las regiones.

Los documentos que se seleccionaron cumplieron con criterios como que su desarrollo estuviese dentro de los últimos 6 años del 2015 al 2021, que en su metodología aplicada fuese de carácter experimental y los resultados contenidos mostraran porcentaje de remoción de contaminantes derivados de los hidrocarburos y que en el desarrollo metodológico el principal método empleado fuese la fitorremediación por medio de especies de plantas que son utilizadas para el proceso.

9.2 Análisis Documental y Revisión de los Datos Estadísticos

En esta fase se busca analizar los resultados encontrados de los procesos o métodos de fitorremediación implementados en suelos contaminados por combustibles como el Diesel y la gasolina derivados del petróleo, guiados bajo el porcentaje de remoción del contaminante, el mejoramiento del medio contaminado y las condiciones propias del suelo a descontaminar.

9.2.1 Procedimiento

Para en análisis de remoción se evaluó de manera cuidadosa los porcentajes de remoción de cada especie en el contaminante y el tiempo que dura cada procedimiento, datos que describe la (tabla 6) a continuación.

Tabla 6. Comparación Estudios de fitorremediación

Especies utilizadas	Contaminantes para remover	Proceso	Tiempo de duración	Porcentaje de remoción
<i>Cajanus cajan</i>	lodos aceitosos de petróleo	Se utilizaron métodos independientes y dependientes del cultivo, basados en 5 muestras a diferentes porcentajes de contaminación de lodos aceitosos, distribuidos en 1, 2, 3, 4 y 5% (p / p) de POS (Allamin, Halmi, Yasid, 2020)	90 días	92%
<i>Koelreuteria paniculata</i> y exudados de raíces artificiales (ARE)	fenantreno	Se realizó el estudio a 4 tratamientos o muestras diferentes distribuidas de la siguiente manera: tratamiento de control (CK), baja concentración de ARE (AREL), alta concentración de ARE (AREH) y plantación <i>Koelreuteria paniculata</i> plántones (KOE) (Wang, Chen & etal , 2020)	180 días	74%
<i>Alternanthera philoxeroides</i> y Selenio	Diesel	se separaron nuestras muestras contaminados con diesel y se empezaron a alimentar con concentraciones de Selenio (Se) (Huang, Yizhi y etal , 2019)	60 días	46%
<i>Trifolium repens</i> y selenio	Diesel	Se manejaron muestras de suelo contaminado por periodos de 30 a 60 días, comparando las concentraciones en 4 dosificaciones del contaminante, ayudando a la planta con pequeñas dosis de selenio, lo cual favoreció su adaptación y remoción. (Ying Xi, 2018).	60 días	45%

<i>Leersia hexandra</i> (<i>Poaceae</i>)	petróleo fresco e intemperizado	Se tomaron 3 muestras una con petróleo fresco, otra con petróleo intemperizado y un tratamiento de control, cada muestra con un patrón de 8 repeticiones.	3 meses y 6 meses	87%
---	---------------------------------	---	-------------------	-----

Fuente: Elaboración propia

9.3 Marco Normativo

Teniendo en cuenta los análisis legislativos que se relacionaron anteriormente, en este punto se busca fusionar y especificar la normatividad final que aplica en los casos de contaminación de suelos, específicamente en las EDS de combustibles, con el fin de abarcar todos los ámbitos aquí descritos.

Para llevar a cabo el análisis legislativo se realizaron búsquedas en plataformas generales como Google Chrome, tomando las bases más confiables en los resultados, como la información que tiene pública las páginas de las Entidades Públicas como el Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio del Medio ambiente, los cuales nos llevan a concluir que normatividad necesaria y obligatoria para tener en cuenta en procesos de uso, tratamiento y reparación del suelo las describe la (Tabla 7).

Tabla 7. Normatividad para cuidados y usos del suelo en el manejo de hidrocarburos para las EDS.

AÑO	RESOLUCIÓN/DECRETO	OBSERVACIONES
1974	Decreto 2811	En el Art. 35: Prohíben la disposición de residuos y basuras que afecten o deterioren el suelo y causen daño a los seres vivos, sin debida autorización

1991	Constitución política de Colombia	Contiene 17 artículos específicos que están relacionados con la protección, conservación, control, cuidado y mejoramiento de los recursos naturales.
2005	Decreto 4741	Que hace referencia a la responsabilidad que se asume en la generación de contaminantes y la obligación de generar un proceso de remediación en el medio.
1993	Ley 99	Brinda definición de daño ambiental, los daños que este genera y que afectaciones pueden repercutir al ser humano
Norma Luisiana 29 B	Norma Luisiana 29 B	Relaciona y permite la medición y control de los diferentes parámetros físicos y químicos del suelo, con el fin de identificar medios contaminantes.
2010	ISO 4113	Determina programas de muestreo que permitan controlar y caracterizar la calidad suelo
2015	Decreto 1073	El cual pone en relación las pautas y reglamenta el aprovechamiento y distribución de los hidrocarburos

Fuente: Modificada a partir de (Ministerio de Minas y Energía , 2021)

9.4 Determinación del Método Según su Remoción y Adaptabilidad

En esta fase final del estudio se definirá un método adaptable al estudio de caso empleado, con buenos resultados de remoción, como recomendación para ser aplicado en los casos de contaminación, identificando las variables más relevantes para un método eficaz, el cual se resaltarán en las discusiones y recomendaciones finales que se describen en el siguiente punto.

10. Resultados

A partir del análisis bibliográfico realizado, se identificaron métodos de fitorremediación cualitativos y experimentales para la remoción y mitigación de contaminantes derivados de los hidrocarburos, que fueron vertidos en suelos de estaciones de combustibles EDS.

La revisión bibliográfica generó un total de 28 artículos, arrojados como resultado de las fórmulas de búsqueda y el uso de palabras clave empleadas, estos estaban dentro de la clasificación del periodo de interés del 2015 al 2021, sin embargo habían varios los cuales no cumplían con criterios de selección como el medio a descontaminar, o el uso de hongos y bacterias como único proceso de descontaminación.

10.1 Resultados de Métodos Escogidos

En el análisis metodológico que se realizó, se utilizaron palabras generales del tema en relación para la búsqueda de artículos en las plataformas bibliográficas seleccionadas, en donde los artículos que se escogieron tenían como factor común la remoción de hidrocarburos o derivados del petróleo con una alta eficiencia de remoción del contaminante, arrojando como resultado 4 artículos que cumplieron con los parámetros de estudio como se muestra en la (figura 6)

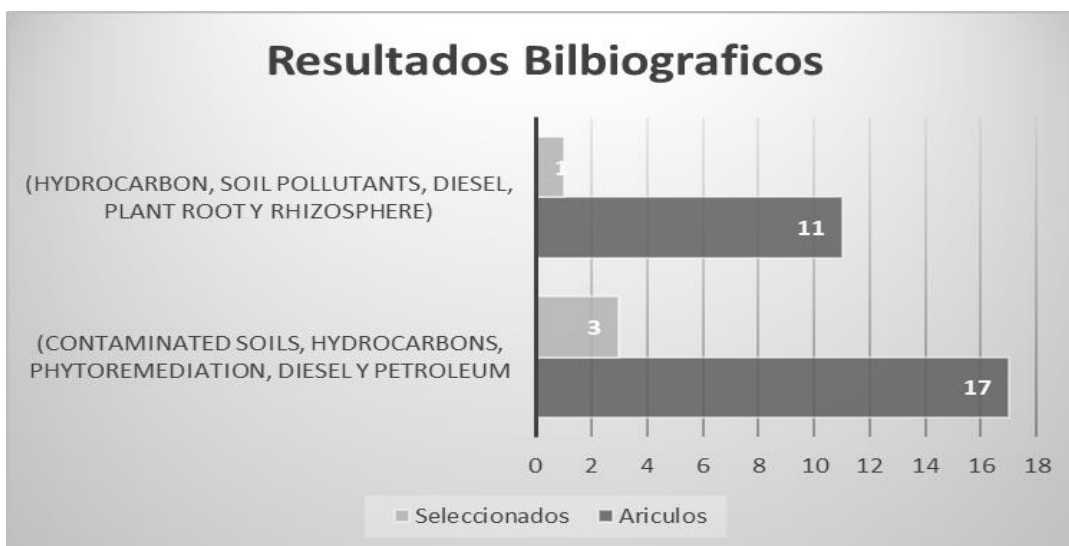


Figura 11. Resultados bibliográficos
Fuente: Elaboración propia

Se logro identificar los estudios que han realizado en diferentes partes del mundo, pero que, por caracterizarse en climas de lugares trópicos como Colombia, se pueden adaptar a los casos de contaminación que se generen, ya que las especies utilizadas en cada caso lograrían una adaptabilidad en el medio de manera eficiente y arrojarían los porcentajes de remoción muy similares a los que se dieron en los estudios en seleccionados.

De las especies utilizadas en cada estudio seleccionado, se tuvo en cuenta su capacidad de modificar o remover un contaminante ya que, genera expectativas de recuperación del medio afectado, debido a sus porcentajes de efectividad (figura 7) y las características de remoción que aportaron, lo cual, fueron factores importantes para resaltar su proceso y tomarlos como ejemplo modelo

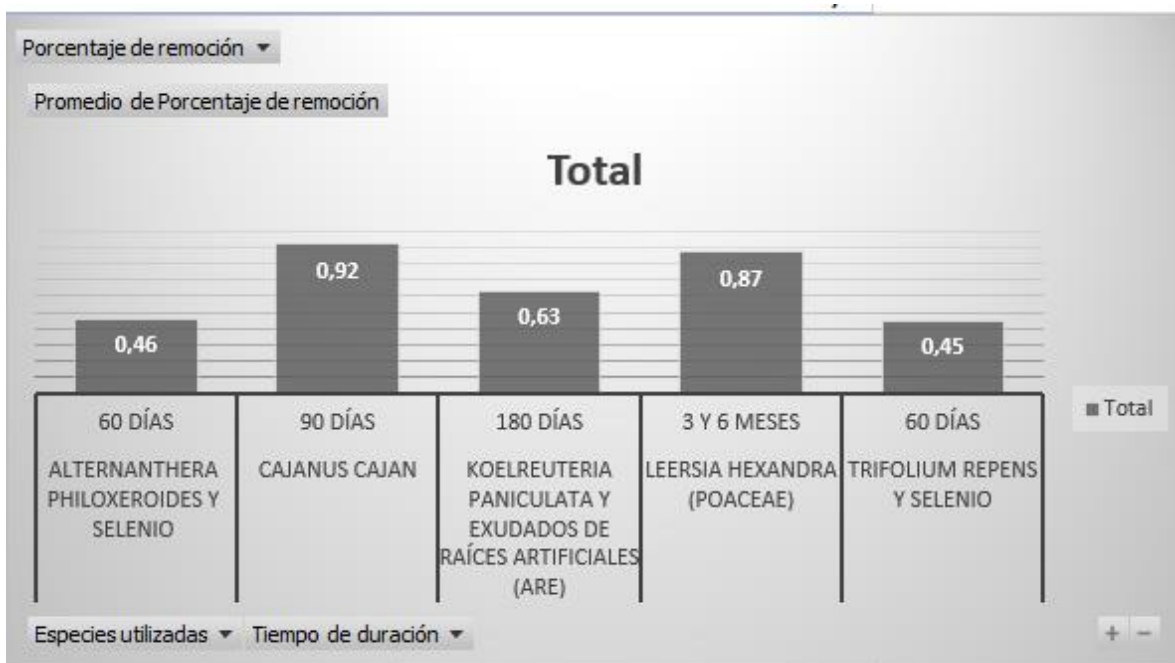


Figura 12, Porcentaje de remoción en especies
Fuente: Elaboración propia

La exposición anterior resalta que la especie de mejor manejo en procesos de descontaminación es la *Cajanus Cajan*, ya que en un periodo promedio de 90 días logró remover el 92% del contaminante, que en este caso era petróleo aceitoso, tal como lo menciona (Allamin, Halmi, Yasid, 2020) en su estudio.

Con respecto al tratamiento con *Koelreuteria paniculata* y exudados de raíces artificiales (ARE), el contaminante a remover que utilizaron (Wang, Chen & etal , 2020) era fenantreno, en donde su composición química es de alta complejidad ya que es un derivado de hidrocarburos, la especie mostro una efectividad en remoción del 63% en un periodo de estudio de 180 días, pero se debe tener en cuenta que tuvo un aporte adicional para su efectividad, que fueron los exudados aplicados durante el tratamiento, puesto que estos aportan concentraciones importantes de nutrientes que ayudan a la especie a sobrevivir en el medio contaminado.

En el tercer y cuarto método se logran identificar factores similares de tratamiento, ya los autores (Huang, Yizhi y etal , 2019) y (Ying Xi, 2018) utilizaron como contaminante el Diesel y emplearon Selenio para su tratamiento, y aunque las especies empleadas *Alternanthera philoxeroides* y *Trifolium repens* son distintas en sus nombres científicos y en algunas cualidades, pero tienen características en su estructura muy similares (figura 8), esto conlleva a que el porcentaje de remoción del contaminante fuese del 45% y 46% en un periodo evaluado de 60 días.

Y en el quinto método los porcentajes de remoción del contaminante son muy favorables, sin embargo, de debe tener presente el tiempo que dura el proceso, puesto que es bastante extenso a comparación de los demás métodos en relación.

En las diferencias encontradas de las especies, se pudo evidenciar que la *Alternanthera philoxeroide* tiene buena adaptabilidad en temperaturas tropicales y bajas, mientras que la *Trifolium repens*, suele ser de temperaras tropicales.

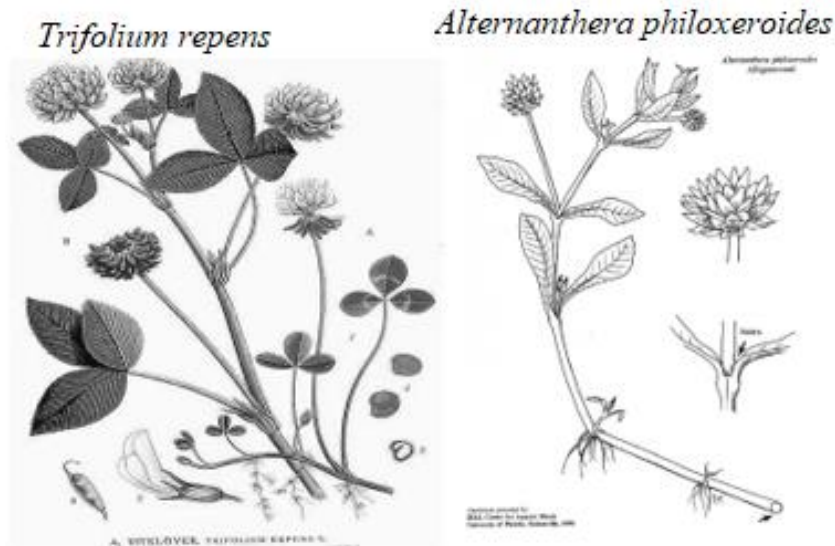


Figura 13, Características de las especies métodos 3 y 4
 Fuente: Modificada de (ARAGÓN, 2021)

10.2 Análisis de los Resultados Legislativos

El registro de la legislación normativa ambiental fue desarrollado con base a lo referenciado por entidades públicas y del Estado, obteniendo así una relación de una manera cronológica y consecuente con el tema de fitorremediación en suelos contaminados por hidrocarburos, según su fase de desarrollo en el presente documento, la (figura 8) resalta las normas y decretos que se deben tener presentes en el uso y cuidados del suelo.

Dentro de las normativas relacionadas, se logró evidenciar que Colombia cuenta con un marco estructural legislativo basado en los convenios y decretos internacionales, que le apunta a la protección, cuidado y remediación de los recursos naturales y que a la vez garantiza la evolución y el desarrollo de procesos industriales como lo dictamina la Constitución política de Colombia.

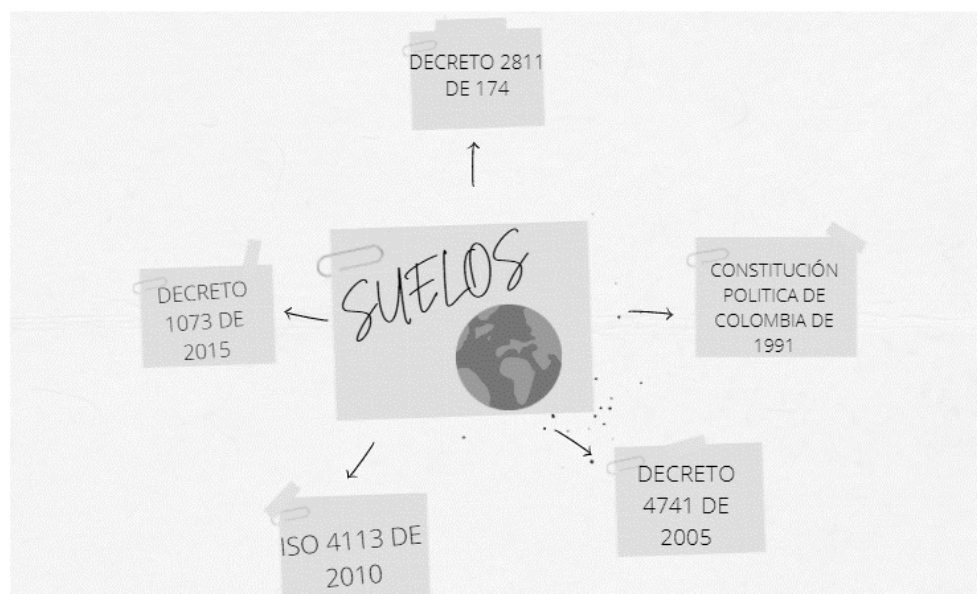


Figura 14. Leyes y decretos del suelo
Fuente: autoría propia

El sector industrial en el uso de hidrocarburos debe tener en cuenta la normatividad vigente para el desarrollo de sus actividades, esto con el fin de garantizar el cuidado y reparación de los recursos naturales como principal objetivo y evitar las multas sancionatorias por las entidades competentes. (Ambiente, 2016).

10.3 Resultados del Mejor Método de Fitorremediación

Para llegar a este punto se tuvieron presentes los criterios seleccionados desde un inicio, en donde se buscaba obtener el mejor método de fitorremediación desarrollado en los últimos 6 años, en el cual se hiciera uso de una especie plantía y que con las adaptaciones necesarias lograra demostrar el tratamiento y remoción de contaminantes derivados de los hidrocarburos

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó la selección de 5 métodos que cumplían con dichos criterios, sin embargo, se buscó aplicar criterios de selección más profundos que permitieran identificar un método que al aplicarlo se adaptara a las condiciones físicas y químicas de los suelos en Colombia, para esto se tuvo en cuenta el pH, las concentraciones de materia orgánica, de fosforo, nitrógeno y demás componentes que suelen ser muy comunes en suelos del país, de tal modo que de los métodos evaluados, se identificó como el mejor

método de fitorremediación el desarrollado por los autores (Allamin, Halmi, Yasid, 2020) que implementado el de uso de la especie *Cajanus cajan*, en un suelo contaminado con petróleo aceitoso de pH promedio 7,2, con bajas concentraciones materia orgánica y otros componentes tradiciones, mantenido un porcentaje de humedad diario, este método obtuvo porcentaje de remoción del contaminante fue del 92%, brindando una reparación exitosa de las muestras contaminadas sin necesidad de usar adicionales o complementos de refuerzo.

Teniendo en cuenta que el medio tratante está enfocado en suelos contaminados por Diesel o gasolina, se tiene la expectativa que la especie mencionada logre un porcentaje de remoción considerable, siempre y cuando los parámetros se asimilen a los del experimento expuesto.

Cabe la pena señalar, que los demás métodos pueden ser utilizados en los mismos procesos de remoción, puesto que se identificó que sus características reparadoras de las especies tratantes, contribuyen de manera directa en la desintegración de los contaminantes causados por el Diesel y la Gasolina.

Conclusiones

En los resultados de los estudios evaluados, se puede observar que los procesos de fitorremediación aumentan su efectividad cuando son complementados con alguna cepa bacteriana o un compuesto químico, ya que estos adicionales ayudan a mejorar la capacidad de remoción de las especies empleadas para dichos fines y disminuyen a su vez el tiempo del tratamiento.

La afinidad de los contaminantes de un suelo de EDS de combustibles con las de los métodos en relación son más apropiadas en los métodos 3 y 4, esto debido a que el contaminante a tratar era Diesel, el cual tiene presencia en los suelos contaminados por las estaciones de servicio de abastecimiento de combustibles.

Se debe tener en cuenta que la presencia de contaminantes en suelos de las EDS puede variar, sin embargo, los más comunes en estos casos son los derivados de hidrocarburos como el Diesel y la Gasolina, ya que son los líquidos empleados en el desarrollo de sus funciones.

Los recursos normativos existentes a nivel nacional promueven el aprovechamiento y cuidado de los recursos naturales, generando herramientas que permitan tener un control y disposición sobre las actividades realizadas por el ser humano, sin embargo, las autoridades de control y vigilancia muestran cierta permisividad en el cumplimiento de las normas, esto causa un desequilibrio entre el uso de los recursos y la garantía de su existencia.

Los procesos de fitorremediación son considerados como los mecanismos de contaminación más accesibles y utilizados en la industria por las ventajas que ofrece en cuanto a precios como a beneficios obtenidos, sin embargo, a pesar de que el estudio de los procesos avanza día tras día, a la fecha no se ha logrado obtener un mecanismo que genere beneficios de tiempo, eficiencia y precio a la vez.

Por lo anterior, muchas de las industrias optan por la utilización de métodos, con organismos, como hongos y bacterias que cuentan con capacidad de eliminar los contaminantes o transformarlos en sustancias menos tóxicas que puedan ser retiradas con

otro proceso de descontaminación y aunque la efectividad de este tipo de procedimientos es muy alta, los costos de implementación también lo son.

El mejoramiento de las condiciones ambientales del planeta depende no solo de la implementación y control a través de las normas y leyes, sino de la educación y conciencia que se instaura en el desarrollo y crecimiento de un ser humano, por tanto, si los temas ambientales fuesen de desarrollo obligatorio dentro de la educación colombiana, podríamos obtener profesionales, amas de casa y empresarios más conscientes del cuidado del planeta.

Recomendaciones

El método de fitorremediación recomendado por este estudio bibliográfico proyecta un alto aspecto de remoción, por lo que se recomienda que al ser implementado en un caso a tratar se tengan en cuenta los parámetros y características del medio, siguiendo las pautas tal como lo describen los autores para no desmejorar su efectividad.

Lo que quiere decir, que la eficiencia para remover los contaminantes también depende de que los parámetros de cada método se lleven a cabalidad, puesto que alguna alteración en sus características podría disminuir el proceso de remoción.

Considero que, para lograr un cumplimiento efectivo del manejo adecuado y el cuidado de los recursos naturales, es importante implementar acciones sancionatorias que contribuyan más a la restauración de daños, generación de conciencia y conocimiento ambiental, que, a los montos económicos establecidos por los entes de control y regulación, pues este tipo de acciones permitiría que las personas realizaran sus actividades de la mano con el cuidado de los recursos.

Ese tipo de ideología es la que les ha permitido a otros países más desarrollados, contar con estrategias de mejoramiento ambiental más avanzadas y mantener el control de las afectaciones causadas por el desarrollo de actividades en general, puesto que, la generación de conciencia ambiental es uno de los retos más difíciles que se tiene hoy en día para mejorar el estado del planeta.

La aplicabilidad y el conocimiento de los temas ambientales desde los primeros años de estudio permite que el comportamiento de los seres humanos sea adecuado y razonable, si bien es cierto el desarrollo de actividades ya sean industriales u de cualquier otro factor, siempre van a generar impactos negativos al medio ambiente, pues de cualquier forma generamos algún tipo de residuo en lo que hagamos,

Sin embargo, hay acciones que contribuyen a la disminución de ese impacto y que pueden ser instauradas en el conocimiento ambiental que tenemos cada uno, adicionalmente,

el desarrollo de estrategias que ayuden a mejorar o remediar el ambiente vienen de personas que son conscientes que en la actualidad tenemos una afectación al planeta altamente poderosa y que gracias a ello la subsistencia del ser humano y los demás seres en general cada vez es menos probable o más corta.

De manera que, cada estrategia desarrollada para mitigar el impacto ya sea en agua, suelo o aire generalmente, la desarrollan con el objetivo de darle más vida útil al planeta y a su vez contribuye al cuidado y preservación de los recursos naturales que como bien sabemos son recursos finitos y no renovables, pensando siempre en las generaciones futuras y en las oportunidades de que tengan el derecho a vivir en un ambiente sano y de bienestar.

Bibliografía

- A, D., C, G., F, P., J, V., & O., A. (2011). FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 597-612.
- Alfredo Arias-Trinidad^{1*}, M. d.-C.-G. (2017). Use of *Leersia hexandra* (Poaceae) in soil phytoremediation contaminated with fresh and weathered oil. *Biologia Tropical* , 21-30.
- Allamin, Halmi, Yasid, i. (2020). *Rhizodegradation of Petroleum* . Malassia: SCIENTIFIC REPORTS.
- Ambiente, M. d. (11 de 2016). *Politica Para La Gestión Sostenible del Suelo*. Obtenido de http://www.andi.com.co/Uploads/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_sostenible_del_suelo_FINAL.pdf
- Angélica Evelin Delgadillo-López^{1*}, C. A.-R.-G.-I.-S. (2011). Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 52-63.
- ARAGÓN, L. F. (11 de 2021). *StudyLib*. Obtenido de <https://studylib.es/doc/7067524/alternanthera-philoxeroides.-lagunilla--hierba-del-lagart...>
- Aranda, R. M. (15 de Octubre de 2013). *U. Politecnica de Cartagena* . Obtenido de Universidad Plitecnica de Cartagena : <https://docplayer.es/59558304-Deteccion-y-evaluacion-de-la-contaminacion-del-suelo-por-tanques-enterrados-de-almacenamiento-de-hidrocarburos-en-estaciones-de-servicio.html>
- Ballesta, R. J. (2017). Introducció a la contaminació de suelos . En R. J. Ballesta, *Introducció a la contaminació de suelos* (págs. 4-5). España: Mundi Prensa.
- Colombia, R. p. (4 de Septiembre de 2021). *SUELOS*. Obtenido de SUELOS: <https://justiciaambientalcolombia.org/herramientas-juridicas/suelos/>
- Cruz, A. B., Barra, J. E., Castillo, R. d., & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *ECOSISTEMAS*, 90-97.
- Gomez, M. (16 de 11 de 2015). *Histpria de la Fotorremediación* . Obtenido de https://prezi.com/0-ox5ces5_md/historia-de-la-fitorremediacion/
- HEREDIA, U. C. (2000). *LOS HIDROCARBUROS*. BORJA: MINISTERIO DE EDUCACIÓN.

- Hernández, Navas & Infante, I. (2017). Fitorremediación de suelo contm. con petroleo ext. pesado con *Megathyrus maximus*. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, 496-502.
- Huang, Yizhi y etal , Y. (2019). Selenium enhanced phytoremediation of diesel contaminated soil by *Alternanthera philoxeroides*. *ELSEVIER*, 347-352.
- Ismael HERNÁNDEZ VALENCIA1*, G. N. (2017). FITORREMEDIACIÓN DE UN SUELO CONTAMINADO CON PETRÓLEO EXTRA PESADO. *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 496-497.
- Jeannette Marrero-Coto, I. A.-S.-P. (2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* , 52-61.
- Marin, A. S. (Septiembre de 2008). *La Contaminación del Suelo*. Obtenido de Tesis en Red: <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/11036/Tasm03de16.pdf>
- Mentaberry, A. (Septiembre de 2011). *Agrobiotecnología*. Obtenido de Agrobiotecnología: http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/IQM_fitorremediacion_argentina_25620.pdf
- Ministerio de Edcación . (2000). *Los Hidrocarburos* . San Borja: Ciencia, Teconologia y Ambiente .
- Ministerio de Minas y Energia . (22 de Abril de 2021). *Decreto 1073 de 2015 Sector Administrativo de Minas y Energía*. Obtenido de Decreto 1073 de 2015 Sector Administrativo de Minas y Energía: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77887>
- O, J., & M, M. (2014). *El medio ambiente y los recursos naturales* . Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE NICARAGUA : <https://repositorio.unan.edu.ni/774/1/10397.pdf>
- Olivares, M. P. (18 de 03 de 2020). *Ayuda en Acción*. Obtenido de <https://ayudaenaccion.org/ong/blog/sostenibilidad/tipos-contaminacion-ambiental/>
- Osorio, S. (26 de Febrero de 2012). *Apuntes de Geotecnia con Enfasis en Laderas* . Obtenido de Apuntes de Geotecnia con Enfasis en Laderas : <http://geotecnia-sor.blogspot.com/2012/02/historia-de-la-geotecnia-historia-de-la.html>
- PULGARIN, M. D. (junio de 2012). *EVALUACION DE LA FITOREMEDIACION COMO ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO DE SEDIMENTOS CONTAMINADOS*.

Obtenido de UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA:

<http://recursosbiblioteca.utp.edu.co/tesis/textoyanexos/6281683P981.pdf>

- R. Huang, M. D. (24 de 2 de 2020). Evaluation of phytoremediation potential of five Cd.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., León, J. P., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. MONTEVIDEO-URUGUAY: UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. Obtenido de UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA.
- SAGREDO, A., & SANDOVAL, D. (2020). Aproximación a las principales fuentes de contaminación ambiental y sus impactos ecológicos. *Bioética y Medio Ambiente*, 16-17.
- Sanchez, M., & Holguin, M. (2014). La institucionalidad del suelo en Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 55-76.
- Wang, Chen & etal , J. (2020). Both artificial root exudates and natural Koelreuteria paniculata. *ELSEVIER*, 2-9.
- Wang, Chen & etal , J. (2020). Hidrocarburos aromáticos policíclicos, exudados de la raíz Koelreuteria Paniculata. *ELSEVIER*, 2-9.
- Ying Xi, Y. S. (2018). Se enhanced phytoremediation of diesel in soil by Trifolium repens. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 137-144.
- Zahermand,Vafaeian & Bazyar, S. (2020). Análisis de las propiedades físicas y químicas de suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo (petróleo). *CIENCIAS DE LA TIERRA DIARIO DE INVESTIGACIÓN*, 163-168.
- Zarate, Y. A. (Mayo de 2014). *Universidad Autonoma de Querétaro*. Obtenido de U. Autonoma de Querétaro: <http://ri-ng.uaq.mx/handle/123456789/333>
- Zuñiga, F. B. (1999). INTROCUCCION AL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO . En F. B. Zuñiga, *INTROCUCCION AL ESTUDIO DE LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO* (págs. 18-21). Mexico: Ediciones de la Universidad Autonoma de Yucatan .
-