



**Contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos en Colombia
Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación**

Especialización en Biotecnología Agraria

Presentado por:

Johana Andrea Velásquez Arias

Directora:

Ms Yolvi Prada Millan

Yopal Casanare, Diciembre de 2016

Índice

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción | 5 |
| 1.1 | Objetivo General | 7 |
| 1.2 | Objetivos Específicos..... | 7 |
| 2. | Marco Conceptual y Teórico..... | 8 |
| 2.1 | ¿Qué son los hidrocarburos? | 8 |
| 2.2 | Composición Química de los Hidrocarburos | 8 |
| 2.3 | Los hidrocarburos en Colombia y en el Mundo | 10 |
| 2.4 | Derrames y Problemática Ambiental | 12 |
| 2.5 | Contaminación por Hidrocarburos en Suelos y Cuerpos de Agua | 15 |
| 2.5.1 | Cuerpos de Agua | 16 |
| 2.5.2 | Suelos | 16 |
| 2.6 | Derrames históricos en Colombia | 18 |
| 2.6.1 | Saint Peter, 1976 | 19 |
| 2.6.2 | Daedalus, 1996..... | 19 |
| 2.6.3 | Río Rosario, 2000..... | 19 |
| 2.6.4 | Bahía de Cartagena, 2001..... | 20 |
| 2.6.5 | Caño Limón-Coveñas. Petróleo perdido, 2001 | 20 |
| 2.6.6 | Boyacá, 2002..... | 20 |
| 2.6.7 | Derrame frente a Cartagena, 2005..... | 20 |
| 2.6.8 | Caño Limón Coveñas, 2007 | 21 |
| 2.6.9 | Reserva Natural de las Aves de Pangán, 2009 | 21 |
| 2.6.10 | Caño Limón Coveñas, 2011 | 21 |
| 2.6.11 | Putumayo, 2014..... | 22 |
| 2.6.12 | Oleoducto Caño Limón, 2015 | 22 |
| 2.6.13 | Ocaña, 2015..... | 22 |
| 2.6.14 | Tumaco, 2015..... | 22 |
| 2.6.15 | Putumayo, 2015..... | 23 |
| 2.6.16 | Zona Insular de Cartagena 2016..... | 24 |
| 2.7 | Factores que influyen en la aceleración del daño | 25 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.8 | La fitorremediación y su papel en la recuperación de ambientes contaminados con hidrocarburos..... | 26 |
| 2.8.1 | Fitorremediación de suelos..... | 29 |
| 2.8.2 | Fitorremediación de cuerpos de agua..... | 31 |
| 2.8.3 | Evaluación de la fitorremediación..... | 32 |
| 2.8.4 | La Fitorremediación y sus asociaciones..... | 34 |
| 2.8.5 | Fitorremediación con especies nativas..... | 35 |
| 2.9 | Fitorremediación y biorremediación como estrategias conjuntas..... | 36 |
| 2.10 | Ventajas y desventajas de la fitorremediación..... | 37 |
| 2.11 | Legislación Nacional..... | 39 |
| 3. | Conclusiones..... | 42 |
| 4. | Bibliografía..... | 43 |

Índice de tablas

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1. | Descripción de métodos fitorremediadores..... | 28 |
| Tabla 3. | Métodos de remediación de suelos contaminados con hidrocarburos..... | 29 |
| Tabla 4. | Ventajas y desventajas de la fitorremediación como técnica remediadora..... | 38 |

Índice de figuras

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1. | Estructura química de los hidrocarburos. Compuestos orgánicos de gama gasolina (ejemplos) y productos orgánicos de rango diesel (ejemplos). Adaptado de Kamath <i>et al</i> (sf)..... | 9 |
| Figura 2. | Pataforma de extracción de petróleo. Fuente: Ospar Commission..... | 11 |
| Figura 3. | Etapas del aceite derramado en el pozo de Macondo. Fotografías National Oceanic and Atmospheric Administration. FuenteMendelssohn <i>et al.</i> (2012)..... | 13 |
| Figura 4. | Atentados por grupos al margen de la ley en 2015 que han generado derrames de petróleo. Fuente grupo de energía de Bogotá..... | 14 |
| Figura 5. | Agua de Tumaco luego de derrame. Fuente el Tiempo (2015)..... | 23 |

| | |
|--|----|
| Figura 6. Desastre ambiental Nariño. Fuente el Tiempo (2015) | 23 |
| Figura 7. Vertimiento de aceites de motor y lubricantes industriales en cuerpos de agua. Fuente: Colprensa/Germán Arenas Usme el Espectador Septiembre, 2016 | 24 |
| Figura 8. Derrame de hidrocarburos en el medio acuático. Fuente NOAA (2001)..... | 25 |
| Figura 9. Mecanismos de eliminación de contaminantes por la planta. Adaptado de Kamath <i>et al.</i> (sf) | 28 |

Contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos en Colombia. Fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación

Resumen

Los problemas de contaminación a nivel mundial tanto en suelos como en agua y aire se deben principalmente a diversos tipos de acciones antropogénicas, entre las que cabe destacar la extracción de recursos naturales, en este caso en particular de hidrocarburos. El impacto ambiental que se genera en Colombia debido a esta situación incluye la contaminación de miles de hectáreas, fuentes hídricas afectadas, fauna y flora deterioradas o cambios drásticos en el paisaje. Por ello, las entidades gubernamentales como el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y/o la Agencia Nacional de Licencias Ambientales ANLA, han desarrollado diversas estrategias de control con el fin de reducir el impacto en el medio ambiente. El objetivo de la presente revisión fue elaborar una síntesis sobre la contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos y señalar estrategias biotecnológicas adecuadas para ser utilizadas en su recuperación. Se encontró que la principal fuente de contaminación en suelos y cuerpos de agua se debe principalmente a derrames accidentales durante la exploración, extracción, transporte de hidrocarburos; en lo referente a la recuperación, en los últimos tiempos, ha surgido la fitorremediación como técnica capaz de disminuir el daño ambiental además de ser estéticamente agradable.

1. Introducción

Los hidrocarburos son combustibles fósiles ampliamente utilizados alrededor del mundo como generadores fundamentales de diversas formas de energía, ellos están en la naturaleza gracias a la acumulación de biomasa durante millones de años. Sin embargo, es posible que en su extracción se genere contaminación en cuerpos de agua y suelos debido a constantes derrames accidentales, los cuales son muy comunes en países productores de hidrocarburos entre los cuales está Colombia.

El sector de hidrocarburos se ha expandido de manera importante en los últimos años, convirtiéndose en pieza clave del crecimiento de la economía mundial, el consumo de energía, la exploración, las reservas y la producción han aumentado de manera considerable y este es actualmente considerado como motor del crecimiento económico en varios países del mundo (Castro *et al.* 2014). El mayor consumo de energía a nivel mundial son los recursos no renovables como el petróleo (Maldonado *et al.* 2010); además, es la fuente de energía más importante con el 33% del consumo mundial (British Petroleum. 2012. Citado en Trujillo-García *et al.* 2014). Debido al crecimiento que han tenido los hidrocarburos la contaminación por estos, ha sido de igual forma significativa; entre algunas de las consecuencias ambientales generadas por derrames en el caso del suelo están que “los hidrocarburos impiden el intercambio gaseoso con la atmosfera, iniciando una serie de procesos físico-químicos simultáneos, como evaporación y penetración, que dependiendo del tipo de hidrocarburo, temperatura, humedad, textura del suelo y cantidad vertida pueden ser procesos más o menos lentos lo que ocasiona una mayor toxicidad” (Benavides *et al.* 2006); generando de esta manera graves consecuencias ambientales tanto en la flora como en la fauna. Estas sustancias tienden a acumularse y a formar una capa hidrofóbica, induciendo la fragmentación de los agregados, causando de igual forma reducción, inhibición de la cobertura vegetal y modificación las poblaciones microbianas del ambiente edáfico (Díaz *et al.* 2013).

En Colombia como en muchos otros países existen políticas desarrolladas por entes gubernamentales encargados de conservar y recuperar el medio ambiente deteriorado a causa de los diversos tipos de actividades humanas que ha afectado de forma directa o indirecta a la naturaleza. El Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA, son los encargados de vigilar de cerca, el desarrollo de las actividades de extracción de hidrocarburos en nuestro país. Así, como controlar y exigir las medidas adecuadas para que dicho proceso deteriore lo menos posible nuestro territorio. Casanare, es uno de los departamentos colombianos en donde la exploración, extracción y transporte de hidrocarburos pertenecen a la cotidianidad de los habitantes. De esta manera, es importante darle a conocer a la población cuales son sus efectos sobre los suelos y los cuerpos de agua; así como las posibilidades de recuperación una vez dichas actividades finalizan.

Es entendible que la economía mundial gira en torno al uso de diversas energías, pero también es necesario tener en cuenta que este constante desgaste acaba o impide el normal desarrollo de especies de plantas y animales, contamina fuentes hídricas y disminuye la productividad de los suelos; en sí, los lugares contaminados son fuente de riesgo para el medio ambiente en general. Por ello, es importante generar estrategias eficaces y sencillas que permitan recuperar parte del medio ambiente contaminado. La fitorremediación ofrece la ventaja de usar procesos naturales para la degradación del petróleo; ya que es necesario disminuir el impacto ambiental negativo de los derrames de hidrocarburos en los diferentes ambientes (cuerpos de agua y suelos) usando microorganismos, plantas o enzimas de manera estratégica con el fin de restaurar la calidad ambiental (Ñustez. 2012). En este caso en particular la utilización de plantas en procesos de fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos contribuyen a transformar, acumular o inmovilizar sustancias tóxicas. Esta técnica biológica aumenta la tasa de transpiración, mejora el flujo de agua en el perfil del suelo y por tanto favorece la aireación dentro del suelo (Maldonado *et al.* 2010), además de ser estéticamente agradable. Por lo anterior se hace indispensable desde el punto de vista académico realizar búsquedas bibliográficas en torno a la contaminación de suelos y cuerpos de agua y a las estrategias biológicas más adecuadas para su recuperación.

1.1 Objetivo General

- ❖ Realizar una revisión de fuentes bibliográficas sobre la contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos en Colombia, señalando la fitorremediación como estrategia biotecnológica

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar factores incidentes en la contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos.
- Enumerar las ventajas y desventajas que tiene la fitorremediación como estrategia biotecnológica para la recuperación de suelos y cuerpos de agua contaminados por hidrocarburos

- Identificar la normatividad encargada de regular la contaminación por hidrocarburos en Colombia

2. Marco Conceptual y Teórico

2.1 ¿Qué son los hidrocarburos?

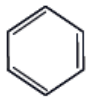
Son sustancias naturales originadas a partir de algas acuáticas establecidas durante millones de años, gracias a la materia orgánica formada en la superficie de la tierra. Este proceso es iniciado con la fotosíntesis, la cual hace parte del ciclo del carbono; y a través del tiempo geológico este aporte ha producido grandes cantidades de materia fósil, (Yavari *et al.* 2015). Dichas sustancias están conformadas principalmente de compuestos con diferente solubilidad, volatilidad, y debido a que son formadas únicamente por átomos de carbono e hidrógeno son compuestos orgánicos susceptibles para ser biodegradados, ya sea eliminados o transformados en sustancias menos tóxicas tanto en suelos como en cuerpos de agua contaminadas, permitiendo de este modo elaborar estudios con el fin de diseñar estrategias fitorremediadoras para contribuir con su degradación y por ende contribuir con la descontaminación de los suelos y cuerpos de agua.

2.2 Composición Química de los Hidrocarburos

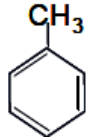
Los hidrocarburos totales de petróleo se dividen en dos categorías Figura 1. Los compuestos orgánicos de la gama de gasolina corresponden a alcanos de cadena pequeña (C6-C10), tales como isopentano, 2,3-dimetilbutano, n-butano y n-pentano y compuestos aromáticos volátiles como los hidrocarburos monoaromáticos benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); y por otro lado, los productos orgánicos de rango diesel, los cuales incluyen alcanos de cadena más larga (C10-C40) y productos químicos hidrófobos tales como hidrocarburos aromáticos policíclicos (Kamath *et al.*). El número de carbonos y su estructura química determina su clasificación.

COMPUESTOS ORGÁNICOS DE GAMA GASOLINA

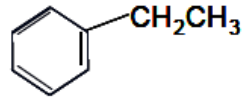
BTEX Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos



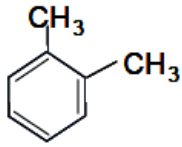
Benceno



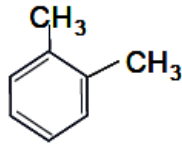
Tolueno



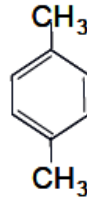
Etilbenceno



a-Xileno

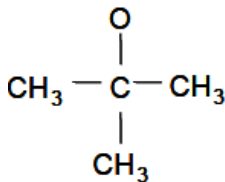


m-Xileno

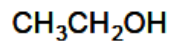


p-Xileno

Oxigenados Comunes



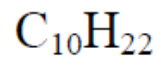
MTBE



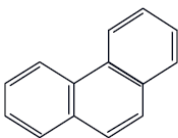
Etanol

PRODUCTOS ORGÁNICOS DE RANGO DIESEL

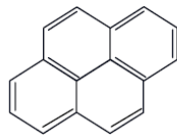
Compuestos orgánicos no-halogenados semi-volátiles



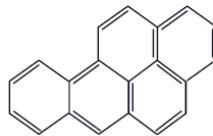
Hidrocarburos aromáticos policíclicos



Fenantreno



Pireno



Benzo(a)pireno

Figura 1. Estructura química de los hidrocarburos. Compuestos orgánicos de gama gasolina (ejemplos) y productos orgánicos de rango diesel (ejemplos). Adaptado de Kamath *et al* (sf)

Los hidrocarburos con cadenas cíclicas con uno o más anillos bencénicos son los aromáticos. Estos al ser poco polares o no polares presenta la capacidad de no disolverse en agua. Los hidrocarburos constituyen del 50-80% de la composición total del petróleo;

mientras la gasolina está constituida aproximadamente por un 70% de compuestos alifáticos y 30% de hidrocarburos aromáticos (Olguín *et al.* 2007).

2.3 Los hidrocarburos en Colombia y en el Mundo

La industria del petróleo mueve grandes cantidades de dinero alrededor del mundo; sin embargo, es necesario tener en cuenta lo que envuelve dicha industria. Durante estas operaciones, los materiales pueden contaminar el medio ambiente circundante a través de filtraciones accidentales o deliberadas y descarga regulada de residuos a cuerpos de agua, tierra, aire o ecosistemas. De esta manera, durante la últimas décadas los hidrocarburos han dado lugar a una amplia liberación de contaminantes en el medio ambiente; Oyarzun & Oyarzun (2011) afirman: “el contenido de dióxido de carbono en la atmósfera se ha incrementado casi en un 30% desde el inicio de la revolución industrial”. Además estos pueden interferir en el desarrollo de forrajes, cultivos y flora natural al afectar la fertilidad del suelo. Adams *et al.* (2008) reporta por ejemplo que los hidrocarburos pueden afectar la fertilidad a través de varios mecanismos como la toxicidad directa a los organismos en el suelo, reducción en la retención de humedad y/o nutrientes, compactación, así como cambios en pH y salinidad. La toxicidad de los hidrocarburos de petróleo, tanto alifático como aromático, es variable pero, en general, aquellos de menor peso molecular son más tóxicos. En la figura 2 se puede observar una plataforma común de extracción de petróleo de un cuerpo de agua, así como los posibles derrames que se generan, y como el agua residual generada en la plataforma cae directamente al mar.

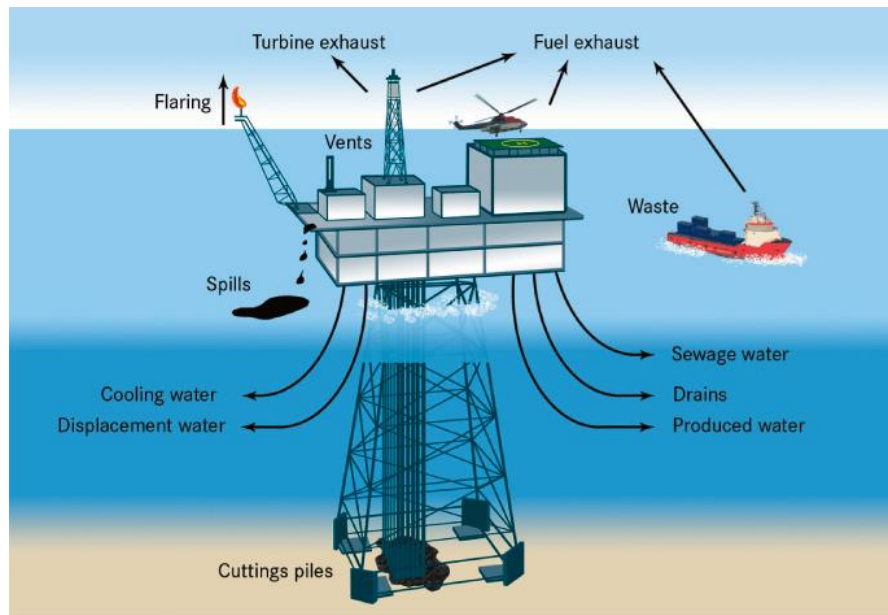


Figura 2. Pataforma de extracción de petróleo. Fuente: Ospar Commission

A nivel global, un informe reciente estima un total de 2,5 millones de lugares potencialmente contaminados en Europa (Agnello *et al.* 2016). En México Maldonado *et al.* (2010) reporta que la industria petrolera es una fuente importante de contaminación del suelo, de hecho las actividades de perforación, extracción, conducción y transformación del petróleo en zonas petroleras han originado la contaminación del suelo y el agua ocasionada por derrames, fugas, filtraciones, lodos y recortes de perforación desde hace más de 40 años. De esta manera podemos ver que la contaminación del suelo por el petróleo crudo es un problema universal.

En lo referente a Colombia, el sector petrolero ha tenido una importante creciente en la economía del país en los últimos años; este sector es estratégico para la economía por su alta participación en el producto interno bruto (Ñustez, 2012). Sin embargo la contaminación por este tipo de sustancia es cada vez mayor afectado la flora, fauna e incluso la salud de los seres humanos. Es importante que todas las personas conozcamos qué está pasando, qué servicios ecosistémicos y por ende qué procesos son los que se ven afectados; no solo los entes gubernamentales o investigadores; puesto todos somos habitantes del mismo planeta y a todos nos compete lo que está pasando con el lugar que nos propociona todos los bienes y servicios para vivir.

2.4 Derrames y Problemática Ambiental

El desarrollo de la población lleva consigo el consumo de recursos naturales renovables y no renovables, siendo el suelo el más afectado. Este, es nuestro componente primordial para la conservación del ser humano en el planeta tierra; además de ser un recurso no renovable a escala humana. De él se obtienen alimentos, insumos para la industria y recursos energéticos.

Los derrames de hidrocarburos son comunes durante los procesos de producción de crudo, así como también durante su comercialización, transporte y almacenamiento en sitios de acopio y distribución como se ha mencionado en reiteradas ocasiones. Los derrames accidentales a gran escala presentan un volumen significativo de contaminantes en todo el mundo. Lastimosamente, son varios los ejemplos que se pueden citar. Entre estos está el derrame del Exxon Valdez en Alaska en 1989 y el derrame de BP Deepwater Horizon en el Golfo de México en 2010 catalogados como los dos peores desastres ambientales en la historia de los Estados Unidos que aún están afectando algunos de los ecosistemas marinos más productivos y vulnerables (Spier *et al.* 2013). Sin embargo, este tipo de contaminación relacionada con sustancias derivadas del petróleo no tiene origen exclusivo en las actividades petroleras; existe un aporte masivo y continuo que proviene de labores diversas, tales como: la pesca; el transporte marítimo y de cabotaje; las operaciones de limpieza de buques y los expendios de combustible a embarcaciones pequeñas, cuyo suministro se realiza a través de mangueras, sin llave de cierre al final; el vertimiento de los residuos del cambio de aceite, las latas de lubricante en lanchas (Jiménez. 2006). De esta manera, podemos afirmar que no solo los grandes y reconocidos derrames mundiales son los que causan mayores daños ambientales; puesto que, día a día son innumerables las situaciones como las mencionadas por Jiménez (2006) las que se presentan sin ser catalogadas como desastres ambientales, pero que sí son acumulativas con el paso del tiempo y poco a poco generarán graves impactos.

En lo referente a los hidrocarburos, el aceite al ser un derivado del petróleo puede causar daños al medio ambiente a través de varios mecanismos, incluyendo la toxicidad asociada con la ingestión o absorción a través de las estructuras de la piel o respiratorias;

revestimiento o asfixia, que afecta el intercambio de gases, regulación de la temperatura y el agotamiento del oxígeno por procesos microbianos asociados con la degradación del aceite. (Mendelssohn *et al.* 2012). La figura 3 muestra el movimiento del derrame en el pozo de Macondo en el Golfo de México (2010), catástrofe ambiental que aún evidencia secuelas en la naturaleza, las cuales están pronosticadas a durar décadas (Diario el Mundo. 2013).

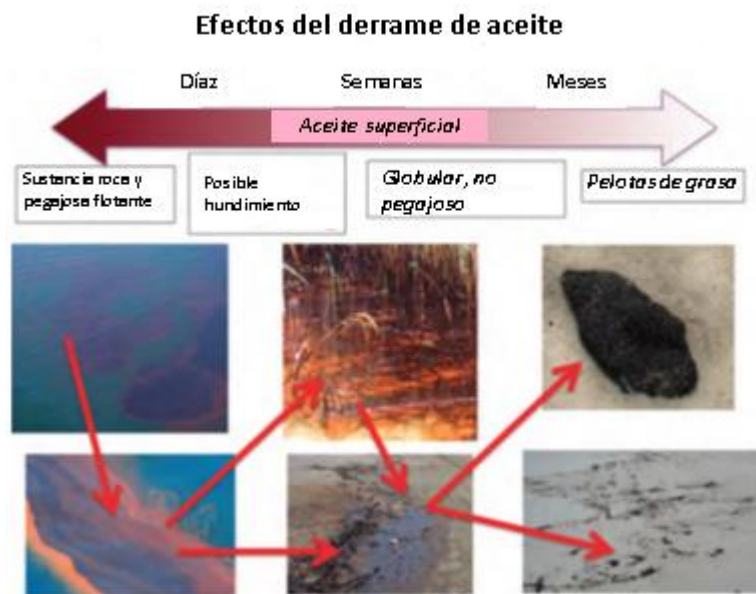


Figura 3. Etapas del aceite derramado en el pozo de Macondo. Fotografías National Oceanic and Atmospheric Administration. Fuente Mendelssohn *et al.* (2012)

En el caso de los derrames en Colombia, estos se han presentado por diversas circunstancias entre las que cabe destacar: voluntaria, accidental o por atentados de grupos al margen de la ley. En algunas circunstancias, dichas situaciones se han generado en sectores del país de difícil acceso impidiendo el desarrollo de estrategias de vigilancia y control o en el caso dado, de recuperación. La figura 4 nos muestra algunos de los derrames ocasionados debido a atentados por grupos al margen de la ley en 2015. Este tipo de situación causan una alteración en la calidad del paisaje y en los servicios ecosistémicos (provisión, regulación, soporte y culturales) que proporcionan los ecosistemas para el normal desarrollo de la vida de los seres humanos. En Colombia hasta noviembre de 1998 se presentaron 920 ataques contra la infraestructura petrolera, 575 de ellos en el oleoducto

Caño Limón-Coveñas, que mediante roturas y abolladuras han perjudicado no solo a los ecosistemas y fuentes de producción y abastecimiento de las comunidades aledañas al oleoducto, sino a regiones por donde este transita. Las áreas perjudicadas por los derrames de petróleo se ubican principalmente en la zona alta de la llanura Araucana, en la región de la cuenca del río Catatumbo, en la llanura del valle medio y medio bajo del río Magdalena; departamentos de Santander, Cesar y Sucre, principalmente, y en los departamentos del Putumayo y Nariño Figura 4 (Benavides *et al.* 2006).



Figura 4. Atentados por grupos al margen de la ley en 2015 que han generado derrames de petróleo. Fuente grupo de energía de Bogotá

Sin embargo, durante las últimas décadas la población en general ha manifestado una mayor preocupación por las problemáticas ambientales tanto a nivel nacional como internacional, permitiendo de este modo el desarrollo y seguimiento de políticas estrictas al momento de extraer recursos de la naturaleza. No obstante, esto no es igual para los países del tercer mundo, en donde el dinero aún es el encargado de aprobar en cierto grado las explotaciones. Día a día hay más esperanza y conciencia por parte de la población para recuperar lo deteriorado y conservar lo que aún nos queda.

Por otro lado, debido a la amplia gama de productos derivados del petróleo que se manejan no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta la obtención de los petroquímicos básicos, ni del seguimiento a la infraestructura petrolera (Ñustez, 2012), sin embargo, se estima que hasta el 2006 las áreas afectadas han sido de 6000 hectáreas de terrenos con potencial agrícola y pecuario, 2600 kilómetros de ríos y quebradas y 1600 hectáreas de ciénagas y humedales (Benavides *et al.* 2006). Finalmente, es necesario hacer énfasis en que la problemática no es solo ambiental, puesto que la contaminación de la naturaleza ya sea en suelos o en cuerpos de aguas con lleva a generar grandes impactos económicos en donde las actividades como la pesca, consumo de agua, o el cultivo de especies primordiales para la sociedad son las primeras afectadas. De igual forma, se desencadena un impacto social importante, en donde la población directa o indirectamente se ve afectada.

2.5 Contaminación por Hidrocarburos en Suelos y Cuerpos de Agua

Los derivados de hidrocarburos (gasolina, queroseno, aceites, combustibles, parafinas, y el asfalto entre muchos otros) son generalmente de uso común en las actividades humanas que de alguna manera permiten su permeación en el medio ambiente debido a los accidentes (Cubillos *et al.* 2014) no solo impactan la capa superficial del suelo, también corren el riesgo de ser movilizados hasta aguas subterráneas generando así su contaminación, o incluso pueden ser transportados por escorrentía extendiendo aún más el daño ambiental. Las condiciones fisicoquímicas, se ven alteradas, por ejemplo en los cuerpos de agua se presenta disminución del oxígeno disuelto debido a la reducción de la transferencia de oxígeno entre la fase atmósfera – agua, al igual que la entrada de luz al medio, lo que inhibe el crecimiento de ciertas especies y disminuye la fijación de nutrientes (Jiménez. 2006).

Uno de los efectos adicionales tanto en cuerpos de agua como suelos es que el petróleo consume oxígeno, aumenta la demanda bioquímica del agua y puede generar condiciones anóxicas, que a su vez pueden producir mortalidad de peces que no hayan sido afectados directamente por el petróleo.

2.5.1 Cuerpos de Agua

Los cuerpos de agua como lagos, ríos y humedales ofrecen una variedad de recursos y comunidades acuáticas que pueden ser amenazadas por derrames de hidrocarburos.

Por ejemplo, cuando los hidrocarburos contaminan cuerpos de agua superficiales estos, tienden a flotar debido a la diferencia de densidad que presentan con respecto al agua; por este motivo bloquean la penetración de la luz y el intercambio de gases, favoreciendo así la solubilización de materiales que afectan a las distintas poblaciones como el plancton o los microinvertebrados que viven en el fondo de ríos y pantanos (Adams *et al.* 2008), impidiendo el correcto desarrollo de la fotosíntesis. De esta manera, ya estamos hablando de la afectación que se genera en la fauna y flora directamente implicada. Por otro lado, cuando un derrame de petróleo entra en el medio acuático, se expone a una serie de cambios en la composición que afectan a sus propiedades físicas y tóxicas (Mendelssohn *et al.* 2012). La mayor parte de los componentes tóxicos y volátiles pueden ser eliminados por evaporación, mientras, otros se oxidan por la radiación UV en la luz del sol. Dependiendo de su peso molecular, algunos compuestos tóxicos de los hidrocarburos pueden disolverse en el agua y degradarse mientras otros presentan la capacidad de depositarse en los sedimentos. Cualquiera que sea la respuesta o acción de dichas sustancias la fauna y flora del lugar es la primera y afectada.

De esta manera, González *et al.* (2011) han reportado efectos letales y subletales de hidrocarburos del petróleo en los peces. Chang *et al.* (2013) han notificado los efectos negativos de la contaminación del aceite de crustáceos, tortugas y algunas especies de vertebrados costeros como patos marinos y nutrias. Estas situaciones son conocidas por todas las personas que tienen acceso a los medios de comunicación; puesto que, es común ver en las noticias o en las redes sociales información en donde los animales y las plantas son las víctimas inocentes de las actividades humanas.

2.5.2 Suelos

El tipo de suelo (arena, limo y arcilla) y la cantidad de materia orgánica existente determina el destino de los hidrocarburos del petróleo y la extensión del daño a las plantas (Yu *et al.* 2013).

Serrano *et al.* (2013) reporta: “la contaminación por hidrocarburos de petróleo ejerce efectos adversos sobre las plantas, generando minerales tóxicos en el suelo disponible para ser absorbidos, además, conduce a un deterioro de la estructura del suelo; pérdida del contenido de materia orgánica; y pérdida de nutrientes minerales del suelo, tales como potasio, sodio, sulfato, fosfato, y nitrato” de igual forma, el suelo se expone a la lixiviación y erosión. La presencia de estos contaminantes, ha dado lugar a la pérdida de la fertilidad del suelo, bajo rendimiento de cosechas, y posibles consecuencias perjudiciales para los seres humanos y el ecosistema entero. En Colombia existe una gran diversidad de unidades de suelo, formados a través del tiempo como producto de la acción de diferentes factores como: el relieve, el clima, el material parental, la vegetación, los microorganismos y el hombre. La determinación de dichas unidades resulta muy compleja y el criterio de agrupación lo constituyen el paisaje geomorfológico y el clima (Jiménez. 2006), por ello, cada situación de derrame es única. Cada lugar afectado tiene su particularidad, temperatura, pH, humedad, tipo de suelo; y por lo cual no existe una receta universal que nos permita llevar a cabo las mismas actuaciones para todos los casos de derrames que se presentan.

Ante la presencia de aceite, por ejemplo, un suelo arenoso saturado por este tipo de derrame tiende a perder parámetros como la permeabilidad o la compactación, puede llegar a sufrir variaciones cuyos comportamientos están asociados a la saturación del aceite en el medio (Serrano *et al.* 2013). Además, Shin & Das (2001) encontraron que suelos arenosos con concentraciones de aceites superiores hasta del 6% pueden reducir drásticamente la capacidad de carga de los suelos.

Por otro lado, Petro & Mercado (2014) sugieren una situación particular de derrames, las cuales no son reportadas, pero que se presentan con fuerza en Colombia; estos son debido a las tuberías corroídas, las cuales en algunos casos cuentan con alrededor de 50 años de antigüedad; de igual forma, reporta que el movimiento de los hidrocarburos depende de las tasas a las que este fluye y de las características del subsuelo, afirmando que suelos de tipo granular es más rápido que los suelos de grano fino como los arcillosos o rocosos.

Con esto podemos afirmar, que dependiendo del tipo del suelo los hidrocarburos tienden a comportarse en diferente forma, puesto algunos presentan la capacidad de adsorción y retención, impidiendo de esta forma que los contaminantes sean absorbidos por las especies vegetales o imposibilitando su movilización hacia aguas subterráneas; no obstante, otros con poca cantidad de materia orgánica facilitan la movilidad de los contaminantes aumentando de esta forma los riesgos para los ecosistemas en general. Cabe mencionar, que el petróleo únicamente penetra los suelos porosos y permeables, por ejemplo la combinación que produce la más rápida penetración es la de petróleos de baja viscosidad en suelos arenosos (Petro & Mercado. 2014).

Para ser más específicos, en lo referente a las características físicas como la porosidad, tiende a disminuir debido a que los hidrocarburos ocupan los espacios porosos del suelo. Mientras que, el cambio de la textura del suelo es prácticamente mínimo al ser este expuesto a diversas concentraciones de hidrocarburos. Por otro lado, en lo referente a las propiedades químicas, a diferencia de lo que reporta Serrano *et al.* (2013), Martínez y López (2001) establece que al ser el suelo expuesto a hidrocarburos, estos causan un aumento del contenido de materia orgánica, el cual no es benéfico ya que puede presentar un riesgo ecotóxico para los organismos del suelo.

Finalmente, los hidrocarburos producen efectos importantes sobre las propiedades de textura, materia orgánica y porosidad de los suelos, las cuales varían según el tipo y la concentración del contaminante.

2.6 Derrames históricos en Colombia

Los impactos ambientales que generan los derrames de hidrocarburos son prácticamente incalculables debido a sus grandes dimensiones. Solo en Colombia los derrames de petróleo superan 11 veces a la tragedia del buque petrolero Exxon Valdez en Alaska en 1989, considerado uno de los mayores incidentes de contaminación de petróleo en el mundo derramando más de 11 millones de galones al mar; o en el golfo de México en 2010 en donde se vertieron más de 13 millones de galones en el océano Atlántico. Vemos como

Colombia estas cantidades son superadas, sin tener en cuenta que para que un ecosistema sse recupere requiere de cientos de años.

En el siguiente apartado, se realiza un recuento de solo algunos de los derrames de hidrocarburos ocurridos en Colombia. Dicha situación ha causado un gran impacto ambiental debido a la muerte de especies claves como los productores primarios. Sin embargo, con el paso del tiempo las áreas afectadas se han ido recuperando en algunos casos, por ejemplo cuando son pequeñas fugas de petróleo la propia naturaleza con la ayuda de los microorganismos los degrada.

2.6.1 Saint Peter, 1976

Hundimiento del petrolero Saint Peter. Este buque transportaba 33000 Toneladas de crudo. El impacto de la contaminación afectó un área de 1300 km², equivalente al 10% del Pacífico colombiano. Con esta experiencia se determinó que no existían los medios, tanto en recurso humano como tecnológico, planes de contingencia ni reservas para atender este tipo de emergencias.

2.6.2 Daedalus, 1996

Bahía de Tumaco, cerca de 1500 barriles de crudo fueron vertidos al mar en el Terminal Convencional Multiboyas de ECOPETROL, ocasionado por la ruptura de la tubería submarina principal. El mayor impacto se ocasionó sobre un área de 3 km de longitud por 100 m de la playa de Salahonda, 20 Km al Norte de Tumaco. Un factor que evitó que se produjera un impacto más negativo fue el cambio de la dirección de las corrientes durante el cambio de la marea, de alta a baja, modificando la ruta de desplazamiento de la mancha de crudo, haciendo que ésta se alejara de la bahía.

2.6.3 Río Rosario, 2000

3500 barriles de crudo se extendieron aproximadamente 50 Km. a lo largo del río Rosario, amenazando con llegar al océano Pacífico a través de la bahía de Tumaco. Dado que la mancha corría río abajo, ésta se contuvo en tres puntos antes de llegar a la bahía usando barreras de contención. Las condiciones de marea facilitaron el control de la mancha debido

al contraflujo que ésta genera en el drenaje hacia la desembocadura en la bocana del río Rosario. A causa de estas fluctuaciones de nivel del río Rosario, las riberas y vegetación aledañas presentaron impregnación de crudo en alturas que oscilaron entre los 2 y 3 m. Este río se constituye en la principal fuente de abastecimiento para las comunidades ribereñas, pero la contaminación de sus aguas impidió su consumo.

2.6.4 Bahía de Cartagena, 2001

Aproximadamente, quinientos barriles unas 70 toneladas de combustibles (IFO 380) de un buque cayeron en la bahía de Cartagena, en el área de influencia del muelle de la refinería de Ecopetrol, en la zona de Mamonal.

2.6.5 Caño Limón-Coveñas. Petróleo perdido, 2001

Los 2.400.000 barriles de crudo derramados desde 1986 hasta la fecha equivalen a 10 veces el petróleo derramado en el desastre del buque Exxon Valdés el 24 de marzo de 1989 entre Alaska y Canadá, el que se conoce universalmente como la peor tragedia ambiental de todos los tiempos. Aproximadamente 786 ha sido los atentados de los que ha sido víctima Caño Limón-Coveñas durante los últimos 15 años han ocasionado movimientos de petróleo que se van al otro lado de la frontera.

2.6.6 Boyacá, 2002

Grupos armados al margen de la ley dinamitaron un tramo de oleoducto subterráneo Cusiana-Coveñas en inmediaciones del municipio de Zetaquirá Boyacá, contaminando al menos tres ríos; los cuales presentan trazas y manchas en aguas, así como en suelo y vegetación en forma sectorizada hasta cercanías del casco urbano de Orocué.

2.6.7 Derrame frente a Cartagena, 2005

El buque Saetta de bandera de Malta, cargado con 300.000 barriles de combustóleo, un derivado del petróleo, registró una fuga de producto tras encallar en la salida de la refinería de Cartagena en la ruta del Canal Colonial. El accidente se produjo cuando la embarcación salía de la bahía de Cartagena por el canal Colonial hacia mar abierto. Por el tamaño de la

nave la salida se hace lenta y compleja, al parecer el barco se fue demasiado a uno de los costados ocasionando el roce que perforó el casco.

2.6.8 Caño Limón Coveñas, 2007

Rotura del oleoducto Caño Limón – Coveñas de propiedad, administración y operación de ECOPETROL S.A. a la altura del km. 238 en el corregimiento La Donjuana, municipio de Chinácota, hecho que generó como consecuencia del derrame y posterior vertimiento al Pamplonita, de 9316 barriles de petróleo, contaminando la principal fuente de abastecimiento del acueducto de la capital del departamento de Norte de Santander en localizado en la zona nor oriental de Colombia, situación que obligo al cierre del mismo y dejar por más de 9 días sin agua y de manera continua a más de 480.000 habitantes equivalente al 70% de la población. hecho sin precedentes en la historia de Colombia, considerado por los expertos como el derrame de petróleo crudo más representativo en la historia petrolera Colombiana, por los impresionantes daños sanitarios, ambientales, ecológicos, sociales y económicos que ocasionó.

2.6.9 Reserva Natural de las Aves de Pangán, 2009

El derrame de petróleo crudo no se debe a un accidente sino a la extracción ilegal que se realiza de esta sustancia del oleoducto, de propiedad de la Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol, y manejado por ella. Infortunadamente, personas inescrupulosas han perforado el oleoducto para extraer petróleo. Estas personas procesan la sustancia, y los productos secundarios de esta destilación artesanal, además del desbordamiento de petróleo crudo, fluyen a través de quebradas hacia el río Ñambí. Se calcula que tal vez más de cien mil galones de petróleo han fluido a los ríos, causando un daño irreparable y la muerte a la fauna y la flora de la región.

2.6.10 Caño Limón Coveñas, 2011

El derrame de petróleo afectó tanto a esa localidad como al acueducto de Cúcuta, al haberse extendido la mancha de crudo hasta el río Pamplonita y ahora alcanzar a Puerto Santander. La consecuencia de la mancha es el desabastecimiento de agua en Cúcuta hasta en un 75%

al haberse contaminado con el crudo el río Pamplonita que abastece el acueducto El Pórtico.

2.6.11 Putumayo, 2014

Un grupo armado al margen de la ley obligaron a los conductores de 27 camiones a derramar los 5.600 barriles de petróleo que transportaban, es decir, unos 235.200 galones que no solo se regaron por la carretera entre los municipios de Orito y Puerto Asís, sino que inundaron de oro negro el colegio, las fincas aledañas y las fuentes hídricas. Los niños llegan a estudiar con los zapatos embarrados de petróleo y muchos han presentado problemas digestivos y brotes en la piel.

2.6.12 Oleoducto Caño Limón, 2015

Municipio de Teorama (Norte de Santander), el sistema de transporte de crudo presentaba una abolladura a raíz de un hostigamiento por parte de grupos subversivos. Este estalló por la presión del bombeo. Aunque el bombeo en el oleoducto fue cerrado al poco tiempo de presentarse el incidente, parte del crudo derramado cayó en la quebrada La Llana y luego al río Catatumbo.

2.6.13 Ocaña, 2015

Contaminación del río Algodonal debido a que un vehículo tipo tracto-camión que transportaba 200 barriles de crudo se volcó, provocando un derrame en el río Algodonal, principal fuente hídrica que representa el 80 % del abastecimiento del municipio.

2.6.14 Tumaco, 2015

Un ataque de un grupo subversivo contra el oleoducto Trasandino en Tumaco (Nariño) vertió cerca de 4.000 barriles de crudo. Dicha catástrofe inició en la quebrada El Aguacate hasta el río Caunapí, y después avanzó al río Rosario, que desemboca en el océano Pacífico. Contaminando todo a su paso. Por lo cual, generó un gran impacto ambiental (Figura 5 y 6). "El daño ambiental es irreparable, se están haciendo estudios del impacto en el agua, pero se estima que hay fuentes hídricas que tardarán hasta 12 años en recuperarse. Hay más de 36 kilómetros de contaminación que además afectarán la salud de las personas,

no solamente por olor del crudo, también hay comunidades que utilizan esta agua para sus labores domésticas".



Figura 5. Aguas de Tumaco luego de derrame. Fuente el Tiempo (2015)



Figura 6. Desastre ambiental Nariño. Fuente el Tiempo (2015)

2.6.15 Putumayo, 2015

La afectación ambiental ocasionada por el derrame de cerca de 130.000 galones de crudo obligado por un grupo armado al margen de la ley cerca de Puerto Asís (Putumayo) se prolongará por meses, e incluso años, en la vegetación y las fuentes hídricas. En el agua los efectos serán más preocupantes, porque allí el crudo puede moverse y llegar a áreas más extensas. “El impacto más inmediato es la contaminación del agua, que la vuelve im potable para el consumo. Luego puede tener efectos más serios, dependiendo a dónde se dirige. Empieza afectando toda la biota acuática, los peces que son más importantes, pero también a los demás elementos del entorno, como las plantas y los insectos que crecen en el agua, sobre todo en la fase larval. Eso desbarajusta completamente las cadenas tróficas y disminuye la productividad del agua en términos de sus beneficios”, De concentrarse en ciénagas o cuerpos de agua estancados, allí la tendencia del petróleo es a hundirse. Otras partes se disuelven y unas más pueden formar capas superficiales, de manera que dejará daños en todas partes.

2.6.16 Zona Insular de Cartagena 2016

Derrame de una gran cantidad de "desechos oleosos" en la Bahía de Cuatro Calles, llegando hasta Punta Arenas y Tierra Bomba. emergencia que ocasiona que el Buque descargue aguas oleosas en el sector de la bahía de Cuatro Calles.

Finalmente, vemos como en Colombia se presentan año tras año derrames accidentales o provocados que afectan de forma directa a los ecosistemas terrestres y acuáticos. Así mismo, Colombia es uno de los pocos sitios en el mundo en donde se realizan sabotajes a la infraestructura petrolera con fines políticos y terroristas. Para dar un ejemplo, solamente en el Oleoducto Cano Limon Covenas, en cerca de 19 años de operation han ocurrido más de mil ataques, que han provocado el derrame de más de 3 millones de barriles de petróleo crudo que han ido a parar a delicadas cuencas y ecosistemas tropicales (Miranda & Restrepo. 2005).

Para cerrar este apartado, se trae a coalición un artículo del medio de comunicación “El Espectador” (2016), en el cual se hace mención a que *el peor derrame de hidrocarburos es gota a gota* (Figura 7). Los grandes derrames de crudo entre 1901 y 2013 suman 2.700 millones de galones. Los vertimientos de aceites y lubricantes rondan los 10.000 millones de galones.



Figura 7. Vertimiento de aceites de motor y lubricantes industriales en cuerpos de agua. Fuente: Colprensa/Germán Arenas Usme el Espectador Septiembre, 2016

Los grandes derrames de hidrocarburos como el del buque Exxon Valdez en 1989, el del Golfo de México o la mancha negra en Tumaco, perdurarán en nuestra memoria por mucho tiempo. Pero no tenemos en cuenta un desastre mucho más mayor pero silencioso, que incluso supera en cantidad de galones derramados en el medio ambiente al de estos grandes

derrames históricos. Estos son los vertimientos de aceites de motor y lubricantes industriales en cuerpos de agua y suelos alrededor del mundo, el cual es necesario conocer, para de esta misma forma poder controlarlo o incluso prevenirlo, ya que es nuestro medio ambiente el que se encuentra en fuego y con ello la supervivencia de la raza humana sobre la faz de la tierra.

2.7 Factores que influyen en la aceleración del daño

Entre los principales factores a tener en cuenta se encuentran las características físicas y químicas del petróleo, las cuales empiezan a modificarse casi en el mismo instante en que se produce su derrame en el medio, debido a fenómenos de evaporación, dispersión, emulsificación, disolución, oxidación, sedimentación y biodegradación (Figura 8). La evaporación es la principal causa de desaparición del petróleo, siempre y cuando sean crudos ligeros en un intervalo de dos días a 19 °C se evapora el 100% de gasolinas, un 80% de combustibles diesel; mientras la emulsificación incrementa la cantidad de contaminantes (Jiménez. 2006).

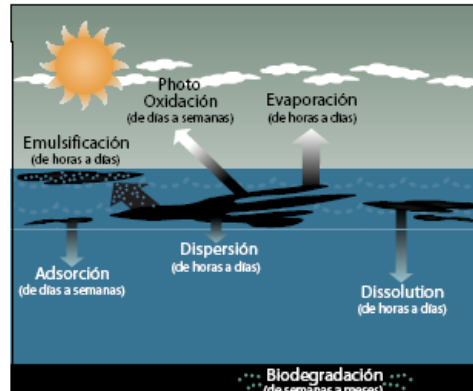


Figura 8. Derrame de hidrocarburos en el medio acuático. Fuente NOAA (2001)

Entre otros factores de aceleración de la contaminación se encuentra la escorrentía, la cual incrementa el daño ambiental debido al arrastre de sustancias tóxicas a sitios aledaños. Las características del suelo como la profundidad textura, permeabilidad, fertilidad natural, pH, salinidad y pedregosidad; las características topográficas (pendiente y relieve) de drenaje o climáticas determinan a movilización de los hidrocarburos una vez son derramados en suelos.

Finalmente, pero no menos importante están los factores sociales; en donde la población en general se ve involucrada debido a posibles afectaciones económicas, turísticas, de salud pública o educación. Las cuales afectan en muchas circunstancias a las personas ya sea de forma directa o indirecta.

2.8 La fitorremediación y su papel en la recuperación de ambientes contaminados con hidrocarburos

Como alternativa de restauración de suelos contaminados con hidrocarburos se ha establecido la utilización de elementos biológicos que contribuyen a la oxidación, degradación, transformación y completa mineralización de contaminantes (Ferrera-Cerrato *et al.* 2006).

La fitorremediación como técnica biológica permite llevar a cabo la descontaminación de suelos o la depuración de aguas residuales, debido a la capacidad restauradora de algunas plantas. Dicha técnica engloba un conjunto de métodos encargados de degradar, asimilar, metabolizar o detoxificar contaminantes; mediante tratamientos *in situ* (Mahar *et al.* 2016). De igual forma, la fitorremediación se basa en los procesos que ocurren naturalmente por los cuales las plantas y los microorganismos rizosféricos degradan y secuestran contaminantes orgánicos e inorgánicos (Lin & Li. 2016) (Figura 9). Las plantas también ayudan a impedir que el viento, la lluvia y las aguas subterráneas extiendan la contaminación a otras zonas. Entre los diversos métodos utilizados para fitorremediar están: fitoextracción, fitovolatilización, fitodegradación, fitoinmovilización y fitoestabilización (Tabla 1). En lo referente a la recuperación de suelos Mahar *et al.* (2016), reporta las técnicas de fitoextracción y fitoestabilización como métodos alternativos prometedores para la recuperación de suelos. Mientras Almeida *et al.* (2015) sugiere el potencial de por *Canavalia ensiformis* como fitoestabilizadora del cobre en suelos arenosos. En general, son varias las opciones que ofrecen las plantas a la hora de recuperar suelos o aguas contaminadas con cualquier tipo de sustancias.

La fitorremediación se lleva a cabo gracias a la relación planta-suelo-microorganismos. Al tomar por las raíces el agua y los nutrientes, las plantas también extraen del suelo los contaminantes, los cuales dependiendo de la sustancia, podrán almacenarse en las raíces,

tallos y hojas, o por el contrario transformarse en sustancias menos perjudiciales en el interior de la planta o en gases no tóxicos que se liberan al ambiente. En otras palabras, cuando el suelo presenta un exceso de contaminantes, en este caso sustancias orgánicas como los hidrocarburos (los cuales son biodegradables) la planta y sus microorganismos asociados tienen la tarea de utilizarlos como fuente adicional de energía. No obstante, cabe destacar que no todas las especies vegetales presentan dicha característica.

El sistema de raíces de las plantas tienen la capacidad de hacer infiltraciones de sustancias del suelo (Figura 9), en donde se inicia la biodegradación. Se conoce que las raíces de las plantas, a través de sus vellos radicales y en especial su capa dérmica, son capaces de segregar enzimas, que condicionan el suelo. Las estructuras subcelulares de la epidermis de la raíz y sus células están dominadas por membranas ricas en sistemas de golgi y vesículas involucradas en el transporte macromolecular de componentes en este caso de hidrocarburos. Los reservorios físicos como vacuolas subcelulares, células epidermales y elementos vasculares muertos presentan la capacidad para almacenar grandes cantidades de algunos tóxicos en las partes superiores de las plantas nativas hiperacumuladoras (Vidal, 2009)

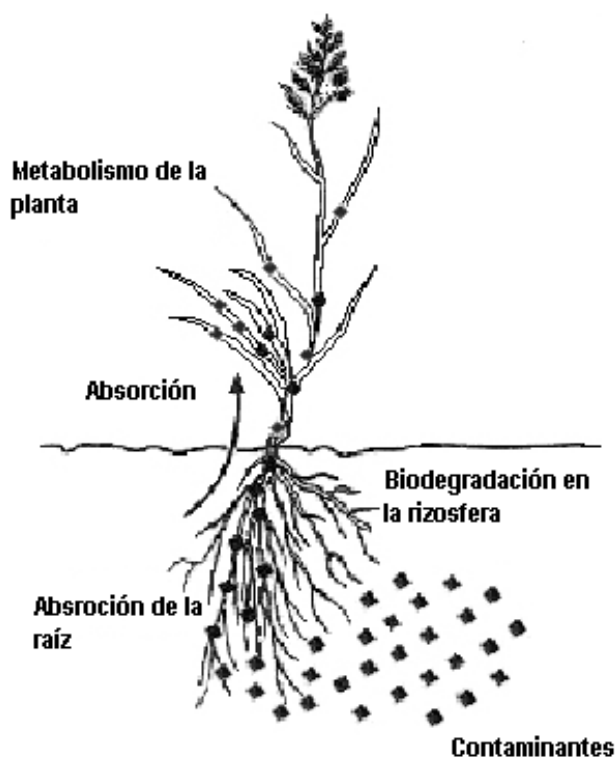


Figura 9. Mecanismos de eliminación de contaminantes por la planta. Adaptado de Kamath *et al.*(sf)

Tabla 1. Descripción de métodos fitorremediadores.

| Método | Descripción | Referencia |
|---------------------------|--|---|
| Fitoextracción | Las plantas se cosechan para su posterior incineración, debido a que su uso puede ser peligroso. Este mecanismo incluye tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos que no cuentan con la capacidad de transformarse en sustancias no tóxicas | Ramírez-Perez <i>et al.</i> (2015); Arias <i>et al.</i> (2016); Salamanca <i>et al.</i> (2013) |
| Fitovolatilización | Se produce a medida que las plantas en crecimiento absorben agua junto con diversos tipos de contaminantes, algunos de estos pueden llegar a las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera | Salamanca <i>et al.</i> (2013); Harvey <i>et al.</i> (2002) |
| Fitodegradación | Se encarga de transformar un contaminante en uno menos “perjudicial” para el medio ambiente, lo cual solo se puede presentar con contaminantes orgánicos. | Wiszniewska <i>et al.</i> (2016); Arias <i>et al.</i> (2016); Salamanca <i>et al.</i> (2013) |

| | | |
|---------------------------|---|---|
| Fitoimmobilización | Provoca la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz-suelo-raíz los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de adsorción o precipitación | Delgadillo <i>et al.</i> (2011); Bernal. (2007); Salamanca <i>et al.</i> (2013) |
| Fitoestabilización | Se inmovilizan los contaminantes del suelo o el agua por medio de adsorción, precipitación y acumulación de sustancias en las raíces de las plantas. De igual forma este proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire | Salamanca <i>et al.</i> (2013); Delgadillo <i>et al.</i> (2011). Mahar <i>et al.</i> (2016) |

2.8.1 Fitorremediación de suelos

Ñustez (2012) evaluó el efecto de la biorremediación por medio de bioestimulación y bioaumentación de sedimentos contaminados en una estación de servicio de combustible para ello, se adicionaron nutrientes como fuentes de nitrógeno y fósforo; y agua y oxígeno para favorecer el crecimiento microbiano; o bien microorganismos endógenos y/o exógenos para favorecer la eficiencia de la transformación de los contaminantes. Presentaron tasas de degradación entre 79,7% y 95,1%. En esta situación la degradación de hidrocarburos se realizó sin la actividad de las plantas. Mientras, Balderas-León & Sánchez-Yáñez. 2015 integran la bioestimulación (biorremediación) y la fitorremediación, por medio de las bacterias *Bacillus cereus* promotoras del crecimiento vegetal y la planta *Sorghum vulgare* sugieren la combinación de ambos procesos en donde inicialmente las bacterias en esta situación la integración de ambas técnicas promueven el crecimiento, desarrollo y efectividad de las plantas durante la absorción de contaminantes (Tabla 2).

Tabla 2. Especies usadas en fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos

| Especies de plantas usadas | Autores | Observaciones |
|-----------------------------------|-------------------------------------|---|
| <i>Sorghum vulgare</i> | Balderas-León & Sánchez-Yáñez. 2015 | Integración de la bioestimulación (biorremediación) y la fitorremediación |

| | | |
|---|----------------------------------|---|
| <i>Festuca arundinacea</i> | Siciliano <i>et al.</i> 2003 | Los resultados demostraron que los sistemas de fitorremediación aumentan el potencial catabólico de suelo de la rizosfera mediante la alteración de la composición funcional de la comunidad microbiana |
| <i>Festuca arundinacea</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Elymus canadensis</i> | Huang <i>et al.</i> 2004 | <i>Festuca arundinacea</i> , es la más adecuada para ser usada en fitorremediación, ya que esta especie fue capaz de aumentar o mantener el contenido de agua en tejido fotosintético, aumentar el crecimiento de raíces y su desarrollo, mediante el transporte de material fotosintético a las raíces durante condiciones de estrés |
| <i>Ludwigia octovalvis</i> | Almansoori <i>et al.</i> 2015 | La inclusión de varios aditivos con <i>L. octovalvis</i> demostró que el uso de un biotensioactivo a una concentración de 10% es eficaz |
| <i>Festuca arundinacea L.</i> | Hou <i>et al.</i> 2015 | Degradación de petróleo durante rhizoremediation |
| <i>Brachiaria mutica</i> , <i>Leucaena leucocephala</i> | Maldonado <i>et al.</i> 2010 | La interacción de rizósfera, consorcio microbiano y el fertilizante originaron efectos positivos significativos, promoviendo la degradación de los hidrocarburos |
| <i>Clitoria ternatea</i> , <i>Phaseolus coccineus</i> , <i>Cicer arietinum</i> , <i>Brachiaria híbrido</i> | Sangabriel <i>et al.</i> 2006 | <i>Phaseolus coccineus</i> fue la única leguminosa con tolerancia y crecimiento en suelo contaminado |
| <i>Brachiaria mutica</i> y <i>Leptochloa fusca</i> | Fatima <i>et al.</i> 2016 | La degradación del aceite crudo (78%) se logró con las plantas de <i>B. mutica</i> inoculados con consorcio |
| Casuarina equisetifolia | Díaz-Martínez <i>et al.</i> 2013 | Bioestimulación y la bioaumentación proporcionaron mayor tolerancia y acumulación de biomasa seca |
| <i>Festuca rubra</i> , <i>Lolium multiflorum</i> | Leewis <i>et al.</i> 2013 | Árboles nativos en combinación con hierbas. |
| <i>Miscanthus x giganteus</i> | Techer <i>et al.</i> 2012 | Disminución en el contenido de nitrato en el suelo de la rizosfera mientras que un aumento en las moléculas orgánicas disueltas indicó insumos no despreciables de carbono orgánico de plantas que pueden participar en la formación de la materia orgánica del suelo |

Algunas de las especies de plantas probadas con éxito en la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos son: *Zea mays L*, *Panicum máximum jacq*, *Paspalum xirgatum*, *Echinochloa polystachya H B K*, *Sorghum vulgare L*, *Phaseolus vulgaris L*, *Phaseolus coccineus L*, *Chamaecrista nictitens*, *Hordeum vulgare*. Ferrera-Cerrato *et al.* (2006) sugiere inoculación de microorganismos en plantas para incrementar la eficiencia de la degradación.

En su mayoría la especies vegetales usadas se han destacado por ser gramíneas, especies de plantas herbáceas características por presentar diversos tipos de asociaciones simbióticas con microorganismos, cuando dicha asociación con micorrizas, la planta recibe nutrientes minerales del suelo, principalmente fósforo. Por otro lado, las relaciones también se llevan a cabo con bacterias fijadoras de nitrógeno atmosférico.

Las raíces de las gramíneas son abundantes y su sistema fibroso propicia la formación de agregados, favoreciendo la formación de poros en los primeros 30 cm del suelo, permitiendo de esta manera la recuperación de una de las propiedades físicas del suelo que se pierde al entrar en contacto con altas concentraciones de hidrocarburos.

Sin embargo, especies leñosas de uso maderable también han presentado la capacidad de crecer sobre suelos contaminados con hidrocarburos, generando de esta forma un aporte económico adicional a la fitorremediación.

2.8.2 Fitorremediación de cuerpos de agua

En lo referente a los procesos de fitorremediación en cuerpos de agua son muchos los estudios e investigaciones que se han realizado cuando los contaminantes son principalmente aguas residuales o dado el caso metales pesados. No obstante, cuando nos referimos a aguas contaminadas con hidrocarburos la cantidad de publicaciones disminuyen drásticamente; esto puede ser, debido a la particularidad en lo referente la composición de dichas sustancias, puesto que en casos de derrames en cuerpos de agua estos pueden ser retirados de forma manual, por medio de adición de químicos (aparentemente más rápidos) que en la mayoría de los casos son más tóxicos que los propios hidrocarburos, como en el caso del Golfo de México (2010). También puede ser debido a que los cuerpos de agua presentan la

particularidad del movimiento como ríos o mares, dificultando de dicha forma la plantación de especies vegetales, además de ser un proceso que puede tardar desde meses hasta años. En los últimos 10 años, se ha venido investigando la capacidad de las microalgas para biotransformar y biodegradar contaminantes orgánicos como hidrocarburos, plaguicidas; las microalgas y cianobacterias proveen carbono reducido y nitrógeno a la microbiota presente en los ecosistemas acuáticos, lo que incrementa el potencial de degradación y eliminación de contaminantes (Ferrera-Cerrato *et al.* 2006).

Rezania *et al.* (2015) reporta *Eichhornia crassipes*, conocido como jacinto de agua se caracterizada por ser un especie muy productiva, pero invasiva a lo largo de mundo, siendo muy difícil su erradicación; sin embargo, debido a su alta capacidad de absorber contaminantes de cuerpos de agua es utilizada hoy en día como planta pionera en procesos de fitorremediación de cuerpos de agua. Por otro lado, Akinbile & Monh (2012) sugieren a *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes* para reducir la turbidez en cuerpos de agua con una efectividad de 92,70% 87,05% respectivamente. *Brachiaria mutica* por su parte, tiene el potencial de remover los contaminantes orgánicos e inorgánicos de los efluentes de cuerpos de aguas, en este caso en particular de humedales Ijaz *et al.*(2015). De esta manera, se plantean algunas especies usadas con éxito en la absorción y retención de sustancias contaminantes de cuerpos de agua.

2.8.3 Evaluación de la fitorremediación

La bibliografía nos presenta algunos de los estudios que se han realizado en lo referente a la fitorremediación, encontrando las siguientes evaluaciones: San Gabriel *et al.* Evaluarón la tolerancia y la capacidad para reducir el contenido de hidrocarburos de tres especies de leguminosas (*Clitoria ternatea*, *Phaseolus coccineus*, *Cicer arietinum*) y tres gramíneas (*Brachiaria* híbrido, *Brachiaria brizantha* y *Panicum maximum*), reportando que *Phaseolus coccineus* fue la única leguminosa con tolerancia y crecimiento en suelo contaminado; además que la presencia de plantas en suelo contaminado estimuló la proliferación de microorganismos en la rizósfera. De igual forma, Peng *et al.* (2009) presentan la capacidad de remediación de *Mirabilis Jalapa L.* para tratar el suelo contaminado con petróleo del campo petrolífero mediante experimento de campo en invernadero, mostrando que la eficiencia promedio de remoción de hidrocarburos totales de petróleo por *M. jalapa* durante

el período de cultivo de 127 días fue de 41,61-63,20%. Por otro lado, Chan *et al.* (2012), estudio la capacidad de germinación y sobrevivencia de siete especies arbóreas nativas que crecen en suelos contaminados con petróleo y que las hace potenciales para la fitorremediación. *Byrsonima crassifolia*, *Cedrela odorata*, *Guazuma*, *Ulmifolia*, *Inga inicuil*, *Psidium guajava*, *Swietenia macrophylla* y *Tabebuia rosea*. Estas son especies arbóreas que además de servir como fitorremediadoras generan utilidad económica ya que algunas son especies frutales, maderables, utilizadas como cercos vivos o de forraje; dando como resultados que las especies *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, y *Tabebuia rosea*; presentaron un porcentaje de germinación mayor al 80%, mientras *Guazuma*, *Ulmifolia* presentó un porcentaje de germinación menor que las demás especies pero un porcentaje de supervivencia mayor. Debido a que estas especies además de ser herramientas exitosas en fitorremediación, también presentan la capacidad de generar utilidad económica, hacen más interesante su investigación para ser utilizadas en estudios posteriores.

Petenello *et al.* (2014) estudio el efecto de dos Fabáceas: *Spartina argentinensis* y *Melilotus alba* Las Fabáceas se caracterizan por hacer simbiosis mutualistas con fijadores de nitrógeno; en presencia de las plantas se observó un incremento en la biomasa y se promovió la respiración. De igual manera, la presencia de *Melilotus alba* produjo una más temprana mineralización del diesel-oil en comparación con *Spartina argentinensis*; probablemente porque aporta una mayor cantidad de nitrógeno al suelo a través de sus exudados y descamación de células de la raíz incorporadas al suelo. Por otra parte, *Spartina argentinensis* incremento la biomasa. Es este estudio, se demostró la efectividad de las plantas en el proceso de disminución de los contaminantes en suelos con diesel-oil y sus asociaciones naturales. Delgadillo *et al.* (2003) reportaron algunas plantas utilizadas con fines de fitoestabilización; *Hyparrhenia hirta*, *Zygophyllum fabago*, *Lupinus albus*, *Anthyllis xulneraria*, *Deschampsia italicum*, *Festuca arundinaceae* y *Brassica júncea*, con resultados satisfactorios; aunque es importante reiterar que cada ecosistema es dinámico y particular por lo cual no existen recetas universales al momento de planear una recuperación. Hernández y Mager (2003) evaluaron la capacidad de las gramíneas *Panicum máximum* y *Brachiaria brizantha* para fitorremediar un suelo contaminado levemente 3% con hidrocarburo de petróleo; estas plantas fueron seleccionadas gracias a su rápida

capacidad de germinación y crecimiento, dicha concentración del 3% no afectó la capacidad germinativa de las semillas; *B. brizantha* tendió a ser más tolerante, con una sobrevivencia del 82% respecto al 64% que presentó *P. maximum*. Mientras, Rivera *et al.* (2015) reportaron *Cyperus Laxus* (considerada una mala hierba), como planta pionera en sitios de derrames de petróleo, esta especie tiene la capacidad de crecer bajo condiciones de estrés debido a sus rasgos bioquímicos que le permiten una mayor tasa fotosintética, además de ventajas reproductivas sobre otras plantas para sobrevivir en áreas perturbadas.

Es necesario tener en cuenta que el diseño de un sistema de fitorremediación varía según el tipo de contaminante, las condiciones en el sitio, el nivel de limpieza requerido y las plantas usadas. Pese a que la fitorremediación es una excelente estrategia biotecnológica no recupera el 100% del área contaminada y requiere que previamente a la plantación se utilicen métodos manuales para disminuir la cantidad de contaminantes en la zona. Adicionalmente, al momento de seleccionar una planta para fitorremediación, es necesario tener en cuenta sus requerimientos fisiológicos de crecimiento, su condición de planta nativa o introducida para de esta manera evaluar su distribución (Peña-Salamanca *et al.* 2013).

2.8.4 La Fitorremediación y sus asociaciones

Además de las bacterias, los hongos micorrízicos también son de gran importancia para lograr un proceso de recuperación, ya que los tratamientos de fitorremediación en los cuales se establecen asociaciones micorrízicas son más eficientes en la remoción de hidrocarburos y en la disminución de la toxicidad del suelo remediado (Joner *et al.* 2001); Peña-Castro *et al.* (2006) señalan que existe un efecto positivo adicional de la simbiosis micorrízica en la fitorremediación de petróleo y la estimulación de una microflora de bacterias específica y a partir de esta simbiosis se registra un aumento en la eficiencia de la fitorremediación.

Por otra parte, Mohsenzadeh *et al.* (2010) determinaron hongos asociados a la raíz de las plantas *Alhaji cameleron L.* (Fabaceae), *Amaranthus retroflexus L. var. Retroflexus* (Amaranthaceae), *Convólvulus arvensis L.* (Convolvulaceae), *Chrozophora hierosolymitana Spreng.* (Euphorbiaceae), *Noea mucronata L.* (Boraginaceae), *Poa sp.* (Poaceae) y *Polygonum aviculare L.* (Polygonaceae), las cuales presentan la particularidad

de crecer en áreas contaminadas y por ende absorber e inmovilizar los contaminantes en la raíz, el tallo y las hojas de las plantas. De igual manera, Soleimani *et al.* (2010) estudiaron los efectos de dos especies de hierba (*Festuca arundinacea* Schreb y *Festuca pratensis* Huds.), infectadas y no infectadas por hongos endofíticos (*Neotyphodium coenophialum* y *Neotyphodium uncinatum*, respectivamente) en la degradación de petróleo en un suelo, mostrando como resultado que las plantas infectadas por los hongos contenían más biomasa de raíces y brotes que las plantas no infectadas; por lo tanto, las gramíneas infectadas con hongos endofíticos podrían ser más eficientes para la eliminación de petróleo de suelos.

Finalmente, Rajtor & Piotrowska-Seget (2016) evalúan el papel y la importancia de los hongos micorrízicos arbusculares en la fitorremediación de sitios contaminados con hidrocarburos, concluyendo que los sistemas de fitorremediación de los componentes basados en interacciones sinérgicas entre las raíces de las plantas, los hongos micorrízicos arbusculares y los microorganismos degradantes de hidrocarburos manifiestan una alta eficacia en la disipación de contaminantes orgánicos en el suelo.

Con los estudios reportados en este apartado, vemos una vez más como la fitorremediación es una estrategia que contempla varias facetas con el fin de mejorar la eficacia de eliminación de contaminantes ya sea de suelos o cuerpos de agua contaminados.

2.8.5 Fitorremediación con especies nativas

Colombia se caracteriza por ser uno de los países más biodiversos del planeta, gracias a ello, contamos con gran variedad de especies nativas, con diversos tipos de asociaciones en sus raíces y por ende con la habilidad de crecer en diversos tipos de ambientes contaminados. Esto nos permite generar estrategias fitorremediadoras en cualquier sector de Colombia que presente problemas de contaminación, con el fin de degradar sustancias orgánicas como lo son los hidrocarburos. Autores como Díaz-Martínez *et al.* (2013); Leewis *et al.* (2013); Techer *et al.* (2012) y Marchand *et al.* (2016) sugieren el uso de especies vegetales nativas al momento de plantear un proceso de fitorremediación, debido a los beneficios que genera tanto en otras especies vegetales como en la fauna de los ecosistemas. Sin embargo, esta sugerencia es muy bien recibida para países que se encuentran en el trópico, puesto que presenta la facilidad de elegir entre un amplio número

de especies; lo cual no es igual para zonas templadas, en donde debido a sus características, físicas, climáticas, o de relieve, el número de especies es reducido; y por ende, se opta por la utilización de especies introducidas, para de esta forma, llevar a cabo procesos de fitorremediación ya sea de contaminantes orgánicos como en el caso de los hidrocarburos o por el contrario de elementos inorgánicos como los metales pesados.

Por otro lado, las investigaciones realizadas en lo referente a la fitorremediación y en especial con especies nativas se presenta con más frecuencia en suelos o cuerpos de agua contaminados por metales pesados; Marrugo-Negrete *et al.* (2016), sugieren el uso de especies *J. curcas*, *P. marginatum*, *C. annuum* y *S. bifidus*, las cuales son autóctonas de Montería Colombia y presentan la capacidad de acumular mercurio en sus tejidos.

De esta forma, cabe destacar la necesidad de ampliar investigaciones en lo referente a los procesos fitorremediadores de suelos y cuerpos de agua contaminados con hidrocarburos en Colombia, en donde debido a los constantes accidentes de derrames que se presentan nos brinda la posibilidad de un amplio campo de estudio.

2.9 Fitorremediación y biorremediación como estrategias conjuntas

Es común observar estudios en donde se combine el uso de biorremediación y fitorremediación, con el fin de obtener óptimos resultados en la extracción de contaminantes. Este es el caso de Fatima *et al.* (2016), en donde el consorcio de dos bacterias endofíticas degradadoras de petróleo (*Acinetobacter* sp. BRSI56 tensión y *Pseudomonas aeruginosa* cepa BRR154) inoculadas en *Brachiaria mutica* y *Leptochloa fusca* reportan un 78% de degradación de crudo, comparado con un 40% de degradación al usar solo fitorremediación. De igual forma, Almansoory *et al.* (2015) reportan el uso de un agente tensoactivo producido mediante la inoculación de *S. marcescens* en *Ludwigia octovalvis* proporcionando una eliminación de 93.5% de hidrocarburos totales de petróleo. Hou *et al.* (2015) por su parte sugieren la inoculación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal *Klebsiella* sp. D5A y *Pseudomonas* sp. SB en *Testuca arundinacea* L. aumento de la biomasa y eliminación de hidrocarburos. De esta manera, podemos concluir los beneficios de utilizar técnicas de remediación unificadas, además de prestar más atención a la función de las bacterias durante la fitorremediación del petróleo, para de esta

forma mejorar su eficacia. Lo anterior manifiesta la amplia variedad de métodos fitorremediadores con el único fin de mejorar la captación de contaminantes y recuperar así suelos y cuerpos de agua contaminados por hidrocarburos.

2.10 Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Aunque la fitorremediación una técnica económica y en muchos sentidos benéfica para la recuperación de los suelos, puede contener algunas desventajas que deben ser conocidas antes de iniciar un proyecto de recuperación utilizando como fundamento dicha técnica (Tabla 3). En base a la bibliografía revisada se identificaron cuatro factores relevantes a tener en cuenta al momento de elegir las especies más adecuadas para llevar a cabo una recuperación de suelos y cuerpos de agua afectados por hidrocarburos:

1. La profundidad de la raíz de la especie vegetal a elegir.
2. Tipo de contaminante
3. Parte del suelo afectada (horizonte), o en lo referente a cuerpos de agua superficialidad o profundidad.
4. Tiempo. Este último es de gran de importancia puesto que tener la certeza del tiempo transcurrido desde que ocurre a contaminación hasta que se inicia la fitorremediación permite estimar la profundidad de penetración del contaminante y de esta manera elegir las especies más adecuadas.

Por ejemplo, al utilizar especies arbóreas con raíces profundas, permite la absorción de contaminantes a profundidades hasta de 2 metros; pero si por el contrario, se usan especies como gramíneas o leguminosas el desarrollo de sus raíces es superficial permitiendo, la absorción, degradación o inmovilización de sustancias acumuladas en la superficie. El tipo de contaminante, su presencia en los horizontes del suelo y, de esta manera, elegir las especies más apropiadas para iniciar la recuperación. Finalmente, el tiempo que tarda la especie en establecerse; puesto que dependiendo de la especie, su velocidad de crecimiento y desarrollo se pueden obtener resultados de meses e incluso años.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de la fitorremediación como técnica remediadora

| Ventajas | Desventajas | Fuente |
|--|---|--|
| Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras para depurar suelos y aguas contaminadas | El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o a aguas poco profundas | Zhou <i>et al.</i> (2015); Shen <i>et al.</i> (2013) |
| La fitorremediación es método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos | La fitotoxicidad es un limitante en áreas fuertemente contaminadas. Riesgo para la cadena alimenticia, si se eligen especies utilizadas como fuente de alimento | Harvey <i>et al.</i> (2002); Thakur <i>et al.</i> (2016) |
| La fitorremediación es una metodología con buena aceptación pública | Los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados | Ibañez <i>et al.</i> (2016) |
| La fitorremediación genera menos residuos secundarios | Se requiere comprender mejor la naturaleza de los productos de degradación (fitodegradación) | Rezania <i>et al.</i> (2015) |
| Las plantas emplean energía solar. El tratamiento es <i>in situ</i> | No todas las plantas son resistentes a crecer en presencia de contaminantes | Weyens <i>et al.</i> (2015); Fawzy <i>et al.</i> (2012) |
| Mejora las propiedades físicas y químicas del suelo | | Vidal. (2009);); Thakur <i>et al.</i> (2016) |
| Las especies vegetales utilizadas pueden ser de interés económico como especies maderables u ornamentales | | Peña-Castro <i>et al.</i> (2006) |
| No requiere personal especializado para llevar a cabo su manejo | | Peña-Castro <i>et al.</i> (2006); Vidal. (2009) |

Finalmente, el impacto de los derrames de hidrocarburos tiene consecuencias a corto y largo plazo. El impacto inmediato es de características graves, pues generalmente involucra la mortandad masiva de aves, peces, mamíferos e invertebrados marinos. Las poblaciones afectadas tardan un tiempo considerable en recuperarse. Un tiempo después, algunos componentes tienden a solubilizarse y otros a oxidarse, conformando bolas de alquitrán, que según reportes causan daños importantes y mortalidad de las comunidades afectadas, como microorganismos asociados al suelo o cuerpos de agua, microinvertebrados,

macroinvertebrados, hongos, plantas y animales. La fracción aromática de los hidrocarburos del petróleo es la que presenta mayor toxicidad y efectos cancerígenos; luego de su incorporación a los organismos por ingestión o a través de las membranas braquiales se acumula principalmente en los tejidos grasos (Moreno. 2006), permitiendo de esta manera su acumulación a través de las diferentes redes tróficas que se forman en los ecosistemas magnificando su toxicidad.

2.11 Legislación Nacional

Hasta la fecha son varios los decretos, normas o leyes las que el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible ha implementado con el fin de ser más exigentes en lo que respecta a la normativa contra derrames de hidrocarburos en Colombia. Con el paso del tiempo, Colombia y su gobierno ha sido más consciente en lo referente al cuidado de los ecosistemas. Por ello, exige a las empresas de exploración, explotación y transporte de combustibles el cumplimiento de la normativa.

Colombia forma parte de los países miembros del protocolo de Kyoto, en donde según el principio 16 de la declaración de Rio (1992) se propone que las autoridades nacionales deben procurar fomentar la internacionalización de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos teniendo en cuenta el enfoque de que el que contamina debe, en principio, cargar con los costos de la contaminación. Como se menciona, “el que contamina paga”. Esta situación es regulada por entes gubernamentales como la ANLA (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales) en Colombia, no obstante, los medios de comunicación nos muestran de forma constante diversos tipos de situaciones en donde los derrames de hidrocarburos tristemente son comunes y en muchas circunstancias no se presenta una solución inmediata.

A continuación se presenta un recuento de decretos y leyes por los cuales se vigila la protección y conservación del medio ambiente en lo referente a las actividades de exploración, explotación y transporte de hidrocarburos en Colombia.

Constitución Política de Colombia en sus artículos 79 y 80 establece que es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación ambiental para garantizar el derecho de

todas las personas a gozar de un ambiente sano y planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución; debiendo prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

Decreto 1594 de 1984

Mediante el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI, parte III, Libro II y el Título III de la parte III, Libro I del Decreto 2811 de 1974, en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. El Artículo 87 prohíbe el vertimiento de residuos líquidos no tratados, provenientes de artefactos navales en aguas dulces o marinas. En el Artículo 88 se establece la obligatoriedad para los puertos de contar con sistemas de recepción y manejo de dichos líquidos. En el párrafo del Artículo 95 se establece que las aguas de lavado de embarcaciones deben ser dispuestas de acuerdo con lo establecido en el Artículo 88.

El compromiso y la responsabilidad de los explotadores y productores, al igual que el temor por las sanciones económicas por incumplimiento de los planes de manejo ambiental, obliga a que se destinen cantidades significativas de dinero para la remediación de zonas afectadas (Serrano *et al.* 2013). Además, cada empresa interesada en llevar a cabo algún tipo de explotación debe de presentar ante la ANLA y el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible un plan de impacto ambiental, con las estrategias que va a desarrollar la empresa durante todo su proceso y como esta va a devolverle a la naturaleza su funcionalidad. Las autoridades competentes se encargan de revisar la viabilidad de dicho plan y su posible o no aprobación. Con el desarrollo de políticas como estas la protección del medio ambiente cada vez es más posible.

Decreto 2190 Diciembre 14 de 1995

Este decreto ordena la elaboración del Plan Nacional de Contingencia contra derrames de hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas en Aguas Marinas, fluviales y Lacustres, como instrumento rector del diseño y realización de actividades dirigidas a prevenir, mitigar y corregir los daños que estos puedan ocasionar. Desarrolla normas como: la Ley

46 de 1988, que creó la Oficina Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y su Decreto Reglamentario 919 de 1989; la Ley 99 de 1993, la cual en su Artículo 1, Numeral 9 consagra: “La prevención y atención de desastres es materia de interés colectivo y las medidas tomadas para evitar o mitigar los efectos de su ocurrencia serán de obligatorio cumplimiento”, y la Directiva Presidencial N° 33 de 1991, que hace referencia al “Componente de emergencias en los planes de desarrollo locales y regionales”. establece compromisos para el país y sus autoridades marítimas en la solución de problemas de contaminación por hidrocarburos. Que la existencia en el país de líneas de tráfico marítimo y terrestre del petróleo, pueden potencialmente afectar por contaminación proveniente de derrames de hidrocarburos, escapes de gas y sustancias nocivas, la gran cantidad de vertientes, la abundancia de ríos, la variedad de lagos y lagunas, y las amplias zonas marinas de extensión cercana a la superficie del territorio continental; Que es urgente reglamentar, establecer y mantener las medidas necesarias para responder efectivamente a derrames de hidrocarburos, derivados y sustancias nocivas que contaminen el medio marino, fluvial o lacustre con el apoyo y asesoría del sector afín o complementario, En desarrollo de este Decreto se ha formulado un plan que fue aprobado por el Gobierno Nacional mediante el Decreto 321 del 17 de febrero de 1999.

Artículo 35 del Decreto 3930 Octubre de 2010

Se exige un plan de contingencia para el manejo de derrames de hidrocarburos o sustancias nocivas. Los usuarios que exploren, exploten, manufacturen, refinen, transformen, procesen, transporten o almacenen hidrocarburos o sustancias nocivas para la salud y para los recursos hidrobiológicos, deberán estar provistos de un plan de contingencia y control de derrames, el cual deberá contar con la aprobación de la autoridad ambiental competente.

Modificado por el artículo 3 Decreto Nacional 4728 Diciembre de 2010 adicionand lo siguiente: Cuando el transporte comprenda la jurisdicción de más de una autoridad ambiental, le compete el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial definir la autoridad que debe aprobar el Plan de Contingencia.

Decreto 4137 Noviembre de 2011 del Ministerio de Minas y Energía

Las actividades de exploración y de producción de hidrocarburos se han incrementado de manera significativa, generando nuevas condiciones a las cuales debe adaptarse la institucionalidad para que responda a las necesidades específicas de los asuntos que les corresponde atender, con el propósito de incrementar el desarrollo económico y social de país. También hace referencia a el seguimiento y cumplimiento de las normas técnicas relacionadas con la exploración y explotación de hidrocarburos dirigidas al aprovechamiento de los recursos de manera racional e integral.

Dicho decreto sale a partir de la subrogación del decreto 4130 de 2011, sin embargo, algunos de sus artículos (6,7,8,9,10) fueron subrogados como consecuencia del cambio de naturaleza según el Decreto 714 de 2012 expedido por el Ministerio de Minas y Energía, por el cual se establece la estructura de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH, y se dictan otras disposiciones.

En este apartado, entendemos por seguimiento a una vigilancia permanente de las condiciones de la explotación, exploración, transporte y disposición final del recurso. No obstante, esto no se evidencia en un 100% ya que de serlo así los accidentes por derrames serían mínimos o de serlos las estrategias de restauración de las zonas implicadas sería inmediatas. Este es el último decreto vigente y se puede observar como los entes gubernamentales han hecho un gran esfuerzo por establecer políticas y vigilancia a las empresas encargadas de la exploración, explotación y transporte de hidrocarburos en Colombia; no obstante, es importante que cada día la exigencia sea mayor y que las empresas se comprometan de lleno a cumplir con el cuidado del medio ambiente, ya que estas son las directamente implicadas.

3. Conclusiones

Los principales factores que evidencian la contaminación de suelos y cuerpos de agua por hidrocarburos son los derrames accidentales durante la exploración, extracción y transporte de los mismos.

Al ser la explotación, extracción y transporte de hidrocarburos causantes de contaminación al medio ambiente, es importante señalar la fitorremediación como una estrategia biotecnológica prometedora al momento de recuperar ambientes contaminados.

La fitorremediación entre sus ventajas se destaca por ser un método apropiado para descontaminar suelos y cuerpos de agua de forma natural, con la ayuda de los procesos biológicos de los ecosistemas y la energía solar, sin la necesidad de adicionar sustancias químicas que pueden llegar a ser más peligrosas que los mismos contaminantes. No obstante, la fitorremediación se caracteriza por ser un proceso que puede tardar de meses a incluso años, lo cual se manifiesta como una desventaja al momento de elegirla, pero como una alternativa viable y amigable con el medio ambiente..

Los decretos vigentes de la Normativa Colombiana son claros y se evidencia el esfuerzo realizado por parte de los entes gubernamentales en lo referente a la protección, conservación y recuperación de los ecosistemas. Sin embargo, es necesario que las empresas y comunidades aledañas a las zonas de riesgo conozcan de su existencia, así como las entidades que apoyan el cumplimiento de estas y adquieran un compromiso en pro del medio e implementen el desarrollo de estrategias de recuperación.

Finalmente, la elaboración de esta revisión nos permitió conocer la afectación de los suelos y cuerpos de agua por los derrames de hidrocarburos, así mismo el identificar las zonas que han sido afectadas en el transcurso del tiempo en Colombia, la normativa vigente y las propiedades de la fitorremediación como estrategia biotecnológica adecuada para recuperar ambientes contaminados con hidrocarburos.

4. Bibliografía

Adams, R., Zavala-Cruz, J., Morales-García, F. (2008). Concentración residual de hidrocarburos en el suelo del trópico. II: Afectación a la fertilidad y su recuperación. *Interciencia*. (33), 483-48

Agnello, A. C., Bagard, M., VanHullebusch, E.D., Esposito, G., Huguenot, D. (2016). Comparative bioremediation of heavy and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by

natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *Science of the Total Environment*.(563-564), 693-703

Akinbile, C.O & Mond, S. (2012). Assessing water hyacinth *Eichhornia crassipes* and Lettuce *Pistia Stratiotes* effectiveness in aquaculture wastewater treatment. *International Journal of phytoremediation*. (14), 201-211

Almansoori, A., Hasan, H., Idris, M., Abdullah, S. R., Anuar, N. (2015). Potential application of a biosurfactant in phytoremediation technology for treatment of gasoline-contaminated soil. *Ecological Engineering*. (134), 113-120

Almeida, N., Avelar, P., Soriani, H., Brunetto, G., Nicoloso, F., Antonioli, Z., Jacques, R. (2015). Interaction between arbuscular mycorrhizal fungi and vermicompost on copper phytoremediation in a sandy soil. *Applied soil Ecology*. (96), 172-182

Arias, S., Betancur, M, Gómez, G., Salazar, J.P., Hernández, M. L. (2016). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador técnico (Colombia)*. (74)

Balderas-León, I., Sánchez-Yáñez, J.M. (2015). Biorremediación de suelo contaminado con 75000 ppm de aceite residual automotriz por bioestimulación y fitorremediación con *Sorghum vulgare* y *Bacillus cereus* y/o *Burkholderia cepacia*. *Journal of the Selva Andina Research Society*. (6), 26-32

Benavides, L., Quintero, G., Guevara, A.L., Jaimes, A., Gutiérrez, S.M., García, J. (2006). Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos derivados del petróleo. *NOVA Publicación científica*. (4) No. 5

Bernal, M. P., Clemente, R., Vazquez, S., Walker, D. J. (2007) Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Ecosistemas* (16), 67-76

Beylerin, Ulrich y Marauhn, Thilo. *International Environmental Law*. Hart Publishing Ltd. United kingdom. 211. P 57

- Castro, F., Forero, D., Ramírez, J., Reina, M. (2014). Evaluación de la contribución económica del sector de hidrocarburos colombiano frente a diversos escenarios de producción. FEDESARROLLO para la Unidad de Planeación Minero Energética –UPME
- Chan, J. G., Ochoa, S., Pérez, I. (2012). Germinación y sobrevivencia de especies arbóreas que crecen en suelo contaminados por hidrocarburos. Universidad de Quintana Roo unidad Cozumel. Teoría y Praxis. (12), 102-119
- Chang, M., Wang, M., Kuo, D. T., Shih, Y. (2013). Sorption of selected aromatic compounds by vegetables. Ecological Engineering. (61), 74-81
- Cubillos, J., Pulgarín, P., Gutiérrez, J., Paredes, D. (2014). Phytoremediation of Water and Soils Contaminated by Petroleum Hydrocarbons. Ingeniería y Competitividad. (16), 131-146
- Delgadillo- López, A., González- Ramírez, C., Prieto- García, F., Villagómez-Ibarra, J. R., Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitoremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Tropical and subtropical agroecosystems. (14) no.2
- Díaz-Martínez., E., Alarcón, A., Ferrera- Cerrato, R., Almaraz-Suarez, J. J., García-Barradas, O. (2013). Crecimiento de *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae) en suelo con diesel, y aplicación de bioestimulación y bioaumentación. Biología Tropical. (61), 1039-1052
- Fatima, K., Imran, A., Amin, I., Khan, Q.M., Afzal. (2016). Plant species affect colonization patterns and metabolic activity of associated endophytes during phytoremediation of crude oil-contaminated soil. Environmental Science Pollution Restoration. (23), 6188-6196
- Fawzy, M., Badr, N., El-Khatib, A, El-Kassem, A. (2012). Heavy metal biomonitoring and phytoremediation potentialities of aquatic macrophytes in River Nile. Environmental Monitor Assessment. (184), 1753-1771
- Ferrera-Cerrato, R., Rojas- Avelizapa, N., Poggi- Varaldo, H. M., Alarcón, A., Cañizares-Villanueva, R. O. (2006). Procesos de biorremediación de suelo y agua contaminados por

hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. *Revista Latinoamericana de Microbiología*. (48), 179 – 187

González, N., Simarro, R., Molina, M.C., Bautista, L. F., Delgado, L., Villa, J. A. (2011). Effect of surfactants on PAH biodegradation by a bacterial consortium and on the dynamics of the bacterial community during the process. *Bioresource Technology*. (102), 9438-9446

Harvey, P., Campanella, B. F., Castro, P., Harms, H., Lichtfouse, E., Scháffner, A., Smrcek, S., Weck-Reichhart, D. W. (2002). Phytoremediation of Polyaromatic Hydrocarbons, Anilines and Phenols. *Environmental Science and Pollutant Restoration*. (9), 29-47

Hou, J., Lui, Y., Wang, B., Wang, Q., Luo, Y., Franks, A.E. (2015). PGPR enhanced phytoremediation of petroleum contaminated soil and rhizosphere microbial community response. *Chemosphere*. (138), 592-598

Huang, X., Ei-Alaxi, Y., Penrose, D. M., Glick, B., Greenberg, B. (2004). A multi-process phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils. *Environmental Pollution*. (130), 465-476

Ibañez, S., Talano, M., Ontan, O., Suman, J., Medina, M., Macek, T., Agostini, E. (2016). Transgenic plants and hairy roots: exploiting the potential of plant species to remediate contaminants. *New Biotechnology*. (33), 625-633

Ijaz, A., Shabir, G., Khan, Q. M., Afzal, M. (2015). Enhanced remediation of sewage effluent by endophyte-assisted floating treatment wetlands. *Ecological Engineering*. (84), 58-66

Jiménez, D. L. (2006). Estudio de impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre una zona estuarina, aledaña al terminal de ecopetrol en Tumaco. (tesis de maestría). Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá, Colombia

Joner, E.J., Johansen, A.P., Loibner, M.A., De la cruz, O.H., Leyval, C. (2001). Rhizosphere effects on microbial community structure and dissipation and toxicity of

polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in spiked soil. *Environmental Science and Technology*. (35), 2773-2777

Kamath, R., Rentz, J.A., Schnoor, J.L., Alvare, J. (s.f). Phytoremediation of hydrocarbon-contaminated soils: principles and applications. Department of Civil and Environmental Engineering, Seamans Center, University of Iowa, Iowa City, Iowa, U.S.A

Leewis, M.C., Reynolds, C., Leigh, M. (2013). Long-term effects of nutrient addition and phytoremediation on diesel and crude oil contaminated soils in subarctic Alaska. *Cold Region Science and Technology*. (96), 129-137

Lin, Y & Kunli, B. (2016). Removal of pharmaceuticals and personal care products by *Eichhornia crassipe* and *Pistia stratiotes*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. (58), 318-323

Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awathi, M.K., Lahori, A., Wang, Q., Li, R., Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. (126), 111-121

Maldonado, E., Chávez-Rivera, M C., Izquierdo, F., Palma, D J. (2010). Efectos de rizosfera, microorganismos y fertilización en la biorremediación de suelos con petróleo crudo nuevo e intemperizado. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*. 26(2), 121-136

Marchand, L, Sabaris, C., Desjardins, D., Oustrire, N., Pesme, E., Butin, D., Wicart, G., Mench, M. (2016). Plant responses to a phytomanaged urban technosol contaminated by trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science Pollution Restoration*. (23), 3120-3135

Marrugo- Negrete, J., Marrugo-Madrid, S., Pinedo-Hernández, J., Durango-Hernández, J., Díaz, S. (2016). Screening of native plant species for phytoremediation potential. *Science of the total environment*. (542), 809-816

Martínez, V & López, F. (2001). Efectos de los hidrocarburos en las propiedades físicas y químicas de suelo arcilloso. *Terra*. (19), 9-17

Mendelssohn, I. A., Andersen, G.L., Baltz, D., Caffey, R., Carman, K., Fleeger, J., Joye, S. B., Lin, Q., Maltby, E., Overton, E. B., Rozas, L. (2012). Oil Impacts on Coastal Wetlands: Implications for the Mississippi River Delta Ecosystem after the Deepwater Horizon Oil Spill. *Bioscience*. (62), 562-574

Mohsenzadeh, F., Nasser, S., Mesdaghinia, A., Nabizadeh, R., Zafari, D., Khodakaramian, G., Chehregani, A. (2010). Phytoremediation of petroleum-polluted soils: Application of *Polygonum aviculare* and its root-associated (penetrated) fungal strains for bioremediation of petroleum-polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. (73), 613-619

Moreno, V. M. (2006). Derrames de hidrocarburos. Grupo Evaluación Ambiental de Proyectos Subdirección Técnica Parques Nacionales Naturales

Ñustez, D. C. 2012. Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible. (tesis de maestría) Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia

Olguín, J. E., Hernández, M. E., Sánchez- Galván, G. (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Contaminación Ambiental* (23) no.3

Peng, S., Zhou, Q., Cai, Z., Zhang, Z. (2009). Phytoremediation of petroleum contaminated soils by *Mirabilis Jalapa* L. in a greenhouse plot experiment. *Journal of Hazardous Materials*. (168), 1490- 1496

Peña-Castro, J. M., Barrera-Figueroa, B. E., Ruiz-Medranol, R., Xoconostle-Cázares, B. (2006). Bases moleculares de la fitorremediación de hidrocarburos totales de petróleo. *Terra Latinoamericana*. (24), 4.

Peña-Salamanca, E. J., Madera-Parra, C. A., Sánchez, J. M., Medina-Vásquez, J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (Heliconiaceae). *Académica Colombiana de Ciencias*. (145), 469-481

Petenello, M. C., Beltrán, C., Feldman, S. R. (2014). Efecto del agregado de diesel-oil sobre algunos parámetros microbiológicos del suelo con y sin presencia de plantas. *Terra Latinoamericana*. (32), 301-309.

Petro, P. H., Mercado, G. (2014). Biorremediación de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos derivados del petróleo en Colombia. Facultad de ingeniería, Arquitectura, Artes y Diseño. (Tesis de pregrado) Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia

Rajtor, M & Piotrowska-Seget, Z. (2016). Prospects for arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to assist in phytoremediation of soil hydrocarbon contaminants. *Chemosphere*. (162), 105-116

Ramírez - Pérez, F (2015). Fitoextracción de plomo de dos suelos contaminados utilizando espinaca y dos agentes quelantes. (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro División de Ingeniería. México

Rezania, S., Ponraj, M., Talaiekhosani A., Mohamad, S., Md Din, M., Taib, S., Sabbagh, F., Md Sairan, F. (2015). Perspectives of phytoremediation using water hyacinth for removal of heavy metals, organic and inorganic pollutants in wastewater. *Journal of Environmental Management*. (163), 1125-133

Rivera, N. A., Montes, M.C., Rodríguez, R. V., Esparza, F. J., Vargas, J. P., Ariza, A., Ferrera-Cerrato, R., Gómez, O. G. (2015). The fatty acid profile analysis of *Cyperus laxus* used for phytoremediation of soils from aged oil spill-impacted sites revealed that this is a C 18: 3 plant species. *PLOS ONE* | DOI:10.1371/journal.pone.0140103

Salamanca, E., Madera- Parra, C., Sánchez, J. M., Medina- Vásquez, J. (2013). Bioprospección de plantas nativas para su uso en procesos de biorremediación: caso *Heliconia psittacorum* (Heliconiaceae). *Revista Académica de Colombia Ciencia*. (37) no.145

Sangabriel, W., Delgadillo, J., Alarcón, A. (2006). Tolerancia y capacidad de fitorremediación de combústoleo en el suelo por seis especies vegetales. *Contaminación Ambiental*. (22), 63-73

Siciliano, S., Germida, J., Banks, G. K., Green, C. (2003). Changes in Microbial Community Composition and Function during a Polyaromatic Hydrocarbon Phytoremediation Field Trial. *Applied and Environmental Microbiology*. (69), 483-489

Serrano, M.F., Torrado, L.M., Pérez, D.D. (2013). Impacto de los derrames de crudo en las propiedades mecánicas de suelos arenosos. *Ciencia y Tecnología*. (11), 233-244

Shen, Mi., Liu, L., Li, D-W., Zhou, W., Zhou, Z-P., Zhang, C., Luo, Y., Li, H. (2013). The effect of endophytic *Peyronellaea* from heavy metal-contaminated and uncontaminated sites on maize growth, heavy metal absorption and accumulation. *Fungal Ecology*. (6), 539-545

Shin, E.C. & B.M. Das. (2001). Bearing Capacity of Unsaturated Oil-Contaminated Sand. *International Journal Offshore Polar Engineering* (11), 220-227.

Soleimani, M., Afyuni, M., Hajabbasi, M., Nourbakhsh, F., Sabzalian, M., Christensen, J.H. (2010). Phytoremediation of an aged petroleum contaminated soil using endophyte infected and non-infected grasses. *Chemosphere*. (81), 1084-1090

Spier, C., Stringfellow, W. T., Hazen, T., Conrad, M. (2013). Distribution of hidrocarbons released during the 2010 MC252 oil spill in deep offshore waters. *Environmental pollution*. (173), 224-230

Techer, D, Martínez-Chois, C., Laval-Gilly, P., Henry, S., Bennasroune A., D´Innocenzo, M., Falla, J. (2012). Assessment of *Miscanthus × giganteus* for rhizoremediation of long term PAH contaminated soils. *Applied Soil Ecology*. (62), 42-49

Thakur, S., Singh, L., Wahid, Z., Siddiqui, M., Atnaw, S., Md Din, M. (2016). Plant-driven removal of heavy metals from soil: uptake,translocation, tolerance mechanism, challenges, and future perspectives. *Environmental Monitor Assessment*. 188-206

Trujillo-García, A., Rivera-Cruz, M., Lagunes, L., Palma- López, D. J., Sánchez, S., Ramírez- Valverde, G. (2014). Parámetros biológicos de la restauración de suelos contaminados por petróleo crudo. *Ecosistemas y recursos. Agropecuarios* (1) n.2

Vidal-Durango, J. (2009). Capacidad del guarumo (*Cecropia peltata*) como planta fitorremediadora de suelos contaminados con mercurio. (Tesis de Maestría). Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia

Weyens, N., Thijs, S., Witters, N., Przybysz, A., Espenshade, J., Gawronska, H., Vangronseveld, J., Gawronski, W. (2015). The role of plant-Microbe interactions and their exploitation for phytoremediation of air pollutants. *Int. J. Mol. Science.* 16(10), 25576-25604

Wiszniewska, A., Hanus-Fajerska, W., Muszynska, W., Ciarkowska, K. (2016). Natural Organic Amendments for Improved Phytoremediation of Polluted Soils: A Review of Recent Progress. *Pedosphere.* (26), 1-12

Yavari, K., Yeganeh, E., Abolghasemi, H. (2015). Production and characterization of Ho poly(lactic acid) microspheres. *Journal of labelled compounds.* (59), 24-29

Yu, Y., Liu, Y., Wu, L. (2013). Sorption and degradation of pharmaceuticals and personal care products (PPcPs) in soils. *Environmental Science Pollution Restoration.* 20, 4261-4267.

Zhou, L., Li, Z., Liu, W., Liu, S., Zhang, L., Zhong, L., Luo, X., Liang, H. (2015). Restoration of rare earth mine areas: organic amendments and phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Restoration.* (22), 17151-17160