

# Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación

## Contamination of soil and water by hydrocarbons in Colombia. Analysis of phytoremediation as a biotechnology strategy for recovery

### *Solo e água contaminação por hidrocarbonetos em Colômbia. Análise de fitorremediação como estratégia de recuperação de biotecnologia*

**Johana Andrea Velásquez Arias**

Licenciada en Biología y Educación Ambiental, Especialista en Biotecnología Agraria, Magister en Restauración de Ecosistemas

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA. Universidad Nacional Abierta y a Distancia –UNAD. Yopal, Casanare, Colombia.

[javelasqueza@uqvirtual.edu.co](mailto:javelasqueza@uqvirtual.edu.co)

#### **Resumen**

A nivel mundial, los problemas de contaminación tanto en suelos como en agua y aire se deben principalmente a 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 fuentes hídricas, 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 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 del presente

estudio es elaborar una síntesis con información sobre la contaminación de suelos y agua por hidrocarburos y evaluar la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. Se encontró que la principal fuente de contaminación en suelos y 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 eficaz para disminuir el daño ambiental además de ser estéticamente agradable.

**Palabras claves:** hidrocarburos, derrames, fitorremediación, contaminación, suelos, agua.

## Abstract

At the global level, the problems of pollution in both soils and water and air are mainly due to anthropogenic activities; which include the extraction of natural resources, in this particular case of hydrocarbons. The environmental impact that is generated in Colombia due to this situation include the contamination of water sources, deterioration of fauna and flora or drastic changes in the landscape. Therefore, government entities such as the Ministry of Environment and Sustainable Development and the National Agency for Licenses Environmental ANLA, have developed various strategies of control in order to reduce the impact on the environment. the objective of this paper is to elaborate a synthesis with information about soil and water pollution by hydrocarbons and evaluate phytoremediation as a biotechnology strategy for recovery. It was found that the main source of pollution in soil and water is mainly due to accidental spills during the exploration, extraction, transportation of hydrocarbons; with regard to the recovery, in recent times, there has arisen a phytoremediation as an effective technique to reduce environmental damage in addition to be aesthetically pleasing.

**Key-words:** hydrocarbons, spills, phytoremediation, pollution, soil, water

## Resumo

No mundo, problemas de contaminação tanto no solo quanto na água e ar, devem-se principalmente a ações antropogênicas entre elas, a exploração de recursos naturais, particularmente hidrocarbonetos. O impacto ambiental gerado na Colômbia por esta situação abrange a contaminação de fontes hídricas e fauna e flora em detrimento à mudanças radicais na paisagem. É por isso que agências do governo como o Ministerio de meio ambiente e desenvolvimento sustentável e a agência nacional de permissões ambientais (ANLA), tem desenvolvido diferentes estratégias do controle com a finalidade de reduzir o impacto no meio ambiente. O objetivo do presente artigo foi fazer uma revisão com informações sobre a contaminação de solos e água por hidrocarbonetos e avaliar a fitorremediação como estratégia biotecnológica de recuperação. Foi observado que a principal fonte de contaminação no solo e água deve-se principalmente a derrames acidentais na exploração, extração e transporte dos hidrocarbonetos. Relacionado à recuperação, no últimos anos tem começado a ser usada a fitorremediação como técnica eficaz para diminuir o deterioro ambiental além de ser esteticamente agradável.

**Palavras-chave:** hidrocarbonetos, derrames, fitorremediação, contaminação, solos, água.

## 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 agua y suelos debido a constantes derrames accidentales, los cuales son muy comunes en países productores.

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). Debido al crecimiento que han tenido los hidrocarburos, la contaminación por estos ha sido de igual forma, significativa. Los hidrocarburos impiden el intercambio gaseoso con la atmósfera, 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. Díaz-Martínez *et al.* (2013) reportan que dichas sustancias tienden a acumularse y a formar una capa hidrofóbica, induciendo la fragmentación de los agregados, causando reducción, inhibición de la cobertura vegetal y la modificación de las poblaciones microbianas del ambiente edáfico.

En Colombia como en muchos otros países existen políticas desarrolladas por entes gubernamentales encargados de conservar y restaurar 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 Colombia. Así, como controlar y exigir las medidas adecuadas para que dicho proceso deteriore lo menos posible el territorio nacional. La fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación ofrece la ventaja de usar procesos naturales para la degradación del hidrocarburos en diferentes ambientes -agua y suelo-; así como también permite la asociación con técnicas que empleen microorganismos o enzimas de manera estratégica con el fin de restaurar la calidad ambiental. En este caso en particular, el uso 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 suelo y agua y a las estrategias biológicas más adecuadas para su recuperación.

El objetivo del presente estudio es elaborar una síntesis con información sobre la contaminación de suelos y agua por hidrocarburos y evaluar la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. De igual forma, determinar factores que influyen en la contaminación de aguas y suelos y

finalmente, enumerar las ventajas y desventajas de la fitorremediación como estrategia biotecnológica para recuperar aguas y suelos contaminados por hidrocarburos. Para ello, se realizó una búsqueda bibliográfica de los últimos 15 años a nivel mundial en fuentes científicas como *Web of Science*, *Scopus*, *Science Direct* y *SciELO* utilizando palabras claves en inglés: *hydrocarbons*, *spills*, *phytoremediation*, *water pollution*, *soil pollution*. Teniendo en cuenta que toda la información estuviera relacionada al conocimiento en ciencias ambientales y biológicas. Una vez recopilado el material bibliográfico, se realizó una selección cualitativa de la información teniendo en cuenta, su actualidad y la problemática tratada. Se conservó la linealidad, pertinencia y coherencia de la misma. Con base en dicha investigación se pretende aportar información para el desarrollo de futuros estudios.

## 1. Acerca de los hidrocarburos

Conocidos como 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, proceso 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 el análisis de estudios con el fin de diseñar estrategias fitorremediadoras para contribuir con su degradación y por ende con la descontaminación de los suelos y agua.

## 2. Contaminación por hidrocarburos en Colombia y en el Mundo

Durante las operaciones de explotación, extracción y transporte los materiales pueden contaminar el medio ambiente circundante a través de filtraciones accidentales o deliberadas. De esta manera, durante la últimas décadas los hidrocarburos han dado

lugar a una amplia liberación de contaminantes en el medio ambiente. Adams *et al.* (2008) reportan la afectación que los hidrocarburos generan a la fertilidad a través de mecanismos como la toxicidad directa en los organismos en el suelo, reducción en la retención de humedad y/o nutrientes, compactación, 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.

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) reportan como la industria petrolera es una fuente importante de contaminación del suelo, 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. 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 las personas conozcan qué está pasando, qué servicios ecosistémicos y por ende qué procesos son los que se ven afectados; no solo los entes gubernamentales o comunidad científica.

### 3. 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 el 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; la literatura permite conocer que 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, y el descargue de sentinas de los buques pequeños caen directamente al agua (Jiménez, 2006).

De esta manera, se puede 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. El aceite por ejemplo, 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 de la biota; 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 (Mendelsohn *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 1 muestra algunos derrames causados 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.



**Figura 1.** Atentados por grupos al margen de la ley en 2015 que han generado derrames de petróleo.

Fuente: Grupo de Energía de Bogotá

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 de seguimiento políticas estrictas al momento de extraer recursos de la naturaleza. Día a día hay más conciencia por parte de las personas para recuperar lo deteriorado y conservar lo que aún queda. Por otro lado, debido a la amplia gama de productos derivados del petróleo no ha sido posible evaluar cuantitativamente la contaminación involucrada desde la fase de explotación hasta su obtención, sin embargo, se estima que hasta el

2006 las áreas afectadas han sido de 6000 ha de terrenos con potencial agrícola y pecuario, 2600 km de ríos y quebradas y 1600 ha de ciénagas y humedales (Benavides *et al.*, 2006). Es necesario enfatizar que la problemática no es solo ambiental, puesto que la contaminación de la naturaleza ya sea en suelos o aguas conlleva a generar grandes impactos económicos en la sociedad en donde las actividades como la pesca, consumo de agua, o el cultivo de especies primordiales son las primeras afectadas, desencadenando un impacto social considerable, en donde la población directa o indirectamente se ve afectada.

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 ecosistemas, fuentes de producción y abastecimiento de las comunidades aledañas al oleoducto. 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 (Benavides *et al.*, 2006).

#### 4. Contaminación por hidrocarburos en suelos y aguas

Los derivados de hidrocarburos -gasolina, queroseno, aceites, combustibles, parafinas, y el asfalto, entre muchos otros- 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 incrementado aún más el daño ambiental. Dicha contaminación afecta las condiciones fisicoquímicas de agua al presentarse una disminución de 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 agua como suelos es que el petróleo consume oxígeno, aumenta la demanda bioquímica del agua y puede generar condiciones anóxicas

#### 4.1. 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. Los hidrocarburos tienden a flotar debido a la diferencia de densidad que presentan con respecto al agua, bloqueando de esta manera la penetración de la luz y el intercambio de gases. Adams *et al.* (2008) reportan que dicho bloqueo favorece 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. Mendelssohn *et al.* (2012) de igual forma, reportan que la mayor parte de los componentes tóxicos y volátiles son eliminados por evaporación, mientras, otros se oxidan por la radiación UV en la luz del sol, todo esto depende del peso molecular, debido a que, 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 directamente afectada.

De esta manera, González *et al.* (2011) han reportado efectos letales y subletales de hidrocarburos del petróleo en los peces. También, Chan *et al.* (2012) 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.

#### 4.2. Suelo

El tipo de suelo -arena, limo y arcilla- y la cantidad de materia orgánica existente determinan el destino de los hidrocarburos del petróleo y la extensión del daño a las plantas (Yu *et al.* 2013). Serrano *et al.* (2013) reportan que “la contaminación por hidrocarburos de petróleo ejerce efectos adversos sobre las plantas indirectamente, 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, es importante mencionar una situación particular de derrames, las cuales no son evidenciadas en Colombia, Petro & Mercado (2014) reportan tuberías corroídas, las cuales en algunos casos cuentan con alrededor de 50 años de antigüedad y sus condiciones actuales no son óptimas generando de esta manera un derrame silencioso pero acumulativo.

#### 5. Derrames históricos en Colombia

Cabe reiterar que los impactos ambientales generados por derrames de hidrocarburos son prácticamente incalculables debido a sus grandes

dimensiones. Sólo en Colombia los derrames de petróleo superan 11 veces a la tragedia del buque petrolero Exxon Valdez en Alaska en 1998, 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. En Colombia estas cantidades son superadas, sin tener en cuenta que para que un ecosistema se recupere requiere de cientos de años, 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 recuperando, como cuando son pequeñas fugas de petróleo por ejemplo, la propia naturaleza con la ayuda de los microorganismos los degrada. Por otro lado, Colombia, por su posición geográfica, amplio número de vertientes, gran cantidad de ríos, variedad de lagos, zonas marinas y continentales, es un potencialmente vulnerable a eventos de origen natural y antrópico probabilidad de ser afectada por contaminación proveniente de derrames (Moreno, 2006).

En el año 2015, en Tumaco, Nariño, un ataque de un grupo subversivo contra el oleoducto Trasandino 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. De igual forma, en el mismo año, esta vez en Puerto Asís, Putumayo, un derrame de cerca de 130.000 galones de crudo afectó suelos y aguas. Se analizó como el impacto inmediato fue la contaminación del agua, la cual se vuelve imponible para el consumo además a la afectación en la biota acuática, como peces de consumo animal y humano; plantas y los insectos que crecen en el agua, sobre todo en la fase larval. 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 Caño Limón Coveñas, en cerca de 19 años de operación 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 cuencas y ecosistemas tropicales.

## **6. La fitorremediación y su papel en la recuperación de ambientes contaminados con hidrocarburos**

Como alternativa de recuperar de suelos contaminados con hidrocarburos se ha establecido la utilización de elementos biológicos que contribuyen a la oxidación, degradación, transformación y completa mineralización de estos 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 & Kunli, 2016) (Figura 2). Las plantas también ayudan a impedir que el viento, la lluvia y las aguas subterráneas extiendan la contaminación a otras zonas. En la Tabla 1 se reportan diversos métodos fitorremediadores que se aplican para recuperar áreas -acuáticas o terrestres-, contaminadas. En lo referente a la recuperación de suelos Mahar *et al.* (2016), reportan las técnicas de fitoextracción y fitoestabilización como métodos alternativos prometedores para la recuperación de suelos. Mientras Almeida *et al.* (2015) sugieren 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.

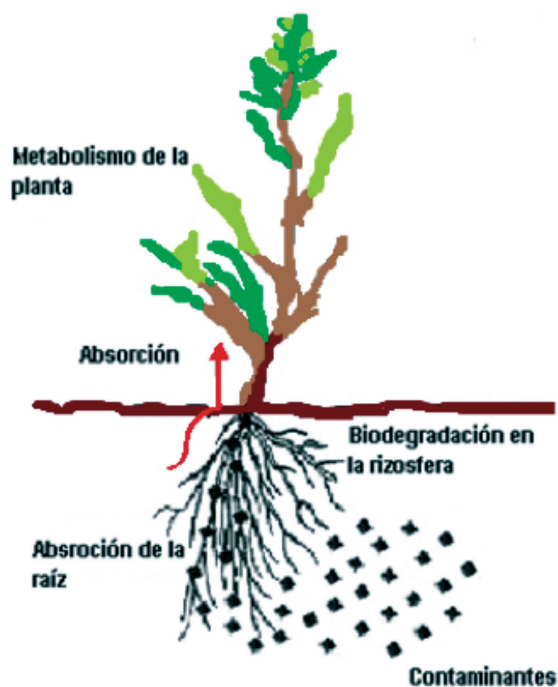


Figura 2. Mecanismos de eliminación de contaminantes por la planta.

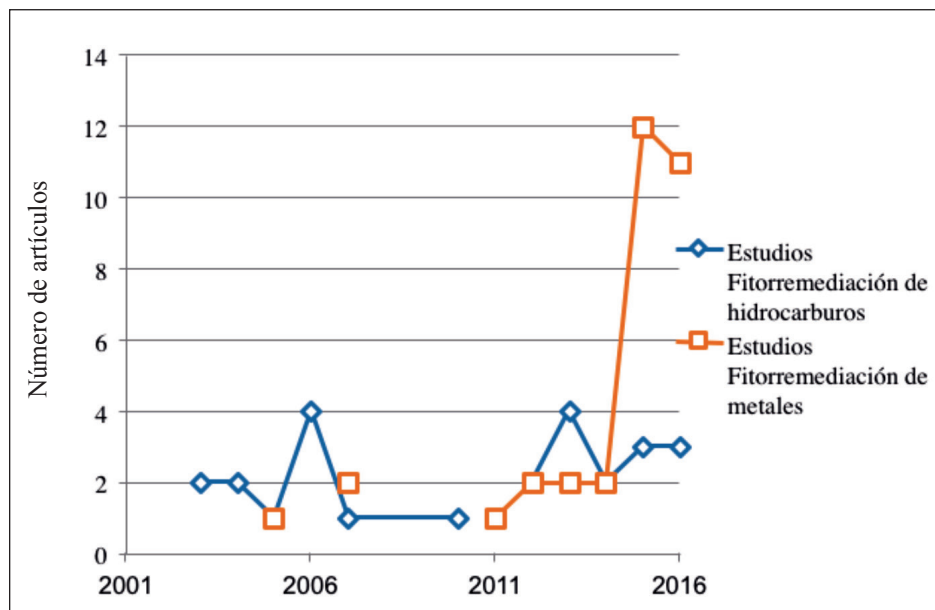
Tabla 1. Descripción de métodos fitorremediadores.

Método	Descripción	Referencia
<b>Fitoextracción</b>	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 cuenten 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)
<b>Fitovolatilización</b>	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)
<b>Fitodegradación</b>	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)
<b>Fitoimmobilización</b>	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- López <i>et al.</i> (2011); Bernal. (2007); Salamanca <i>et al.</i> (2013)
<b>Fitoestabilización</b>	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)



El crecimiento de las plantas altera las propiedades del suelo, lo que puede facilitar la remediación de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos, de esta manera tanto los hidrocarburos como los metales pueden ser captados por las plantas, evitando la extensión el daño en los ecosistemas; sin embargo, la literatura muestra que las investigaciones en fitorremediación se han centrado en la recuperación

de sitios contaminados por metales por encima de los hidrocarburos (Figura 3), de esta manera, se puede formular la hipótesis de que existe una mayor preocupación por parte de la ciencia por la eliminación de metales de los ecosistemas, por encima de los hidrocarburos, esto puede ser debido a que sus efectos pueden llegar a ser más perjudiciales por tratarse de compuestos inorgánicos.



**Figura 3.** Estudios realizados sobre fitorremediación como estrategia biotecnológica para recuperar ambientes contaminados con hidrocarburos y ambientes contaminados con metales entre 2003 – 2016

Gerhardt *et al.* (2017) reportan que el éxito de la fitorremediación depende, ante todo, de la selección juiciosa de las especies de plantas, su capacidad de sobrevivir, el clima en la región geográfica en un sitio dado es un requisito absoluto; además es necesario que las plantas elegidas para la fitorremediación también tengan tolerancia a concentraciones relevantes del contaminante que se está remediando, capacidad para crecer en suelos pobres, crecimiento rápido y alto La producción de biomasa y raíces profundas y densas.

### 6.1. Fitorremediación de suelos

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*. En esta situación la integración de ambas técnicas promueven el crecimiento, desarrollo y efectividad de las plantas durante la absorción de contaminantes (Tabla 2). Las especies más usadas en los estudios mencionados se caracterizan por ser gramíneas.

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

Especies de plantas	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>	Almansoory <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</i> L.	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
<i>Casuarina equisetifolia</i>	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)

sugieren inoculación de microorganismos en plantas para incrementar la eficiencia de la degradación.

## 6.2. Fitorremediación en 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 en 2010. También puede ser debido a que el agua presenta 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, Ferrera-Cerrato *et al.* (2006) reportan 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.

Rezania *et al.* (2015) reportan *Eichhornia crassipes*, conocido como jacinto de agua se caracteriza por ser una 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 aguas.

### 6.3. Evaluación de la fitorremediación

San Gabriel *et al.* (2006) evaluarán la tolerancia y capacidad de reducción de 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), estudiaron 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) reportan el efecto de dos Fabáceas: *Spartina argentinensis* y *Melilotus alba*. Dichas especies 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. En 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-López *et al.* (2003) reportaron algunas plantas utilizadas con fines de fitoestabilización; *Hyparrhenia hirta*, *Zygophyllum fabago*, *Lupinus albus*, *Anthyllis vulneraria*, *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. 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.

#### 6.4. Fitorremediación y sus asociaciones

Además de las bacterias, los hongos micorrízicos son de gran importancia para lograr un proceso 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 área 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.*-, infectados y no infectados 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.

#### 6.5. Fitorremediación con especies nativas

Colombia se caracteriza por ser uno de los países más biodiversos del planeta, gracias a ello, se cuenta con gran variedad de especies nativas, diversos tipos de asociaciones en sus raíces y por ende con la habilidad de crecer en diferentes tipos de ambientes contaminados. Esto permite generar estrategias fitorremediadoras en cualquier sector de Colombia que presente problemas de contaminación, con el fin de degradar sustancias orgánicas como 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 aguas 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.

### 6.6. 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 BRRI54) 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, Almansoori *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, se concluye sobre 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.

### 6.7. 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 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.

Al utilizar especies arbóreas con raíces profundas, permite la absorción de contaminantes a profundidades hasta de 2 m. 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); Gerhardt <i>et al.</i> (2007)
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)

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.

## 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 destaca por ser un método apropiado para descontaminar suelos y 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.

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

## Literatura citada

- 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)*. Vol 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*. Vol.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.
- 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*. 102-119.
- Delgadillo- López, A., González- Ramírez, C., Prieto-García, F., Villagómez-Ibarra, J. R. & Acevedo-Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Versión On-line ISSN 1870-0462. *Trop. subtrop. agroecosyst* Vol.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. *Rev. Biol. Trop.* Vol. 61 (3): 1039-1052.
- Fatima, K., Imran, A., Amin, I., Khan, Q.M. & Afzal, M. (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- Valverde, 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*. Vol. 48, No. 2. pp. 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.
- Gerhardt, K., E., Gerwing, P. D. & Greenberg, B. M. (2017) Opinion: Taking phytoremediation from proven technology to accepted practice. *Plant Science*. 256, 170-185.

19. Harvey, P., Campanella, B. F., Castro, P., Harms, H., Lichtfouse, E., Schaffner, A., Smrcek, S. & Weck-Reichhart, D. W. (2002). Phytoremediation of Polyaromatic Hydrocarbons, Anilines and Phenols. *Environmental Science and Pollutant Restoration*. 9, 29-47.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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 pregrado). Ingeniería Ambiental Sanitaria. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia.
25. 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.
26. Lewis. 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.
27. Lin, Y. & Kunli, B. (2016). Removal of pharmaceuticals and personal care products by *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes*. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 58, 318-323.
28. 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.
29. Maldonado, E., Chávez-Rivera, M C., Izquierdo, F. & Palma, D. J. (2010). Efectos de rizosfera, microorganismos y fertilización en la biorremediación de suelos con petróleos crudo nuevo e intemperizado. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*. 26(2):121-136.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. Moreno, V. M. (2006). Derrames de hidrocarburos. Grupo Evaluación Ambiental de Proyectos Subdirección Técnica Parques Nacionales Naturales.
35. Nustez, D. C. (2012). Biorremediación para la degradación de hidrocarburos totales presentes en los sedimentos de una estación de servicio de combustible. *Revista tecnológica de ingeniería*. Vol 37, 1.
36. 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
37. 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.
38. 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.
39. Petro, P. H. & Mercado, G. (2014). Biorremediación de suelos contaminados por derrames de hidrocarburos derivados del petróleo en Colombia. (tesis de pregrado). Facultad de ingeniería, Arquitectura, Artes y Diseño. Universidad de San Buenaventura.
40. Rajtor, M. & Piotrowska-Seget, Z. (2016). Prospects for arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) to assist in phytoremediation of soil hydrocarbon contaminants. *Chemosphere*. 162, 105-116.
41. 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.
42. Rezaia, S., Ponraj, M., Talaiekhozani, A., Mohamad, S., Md Din, M., Taib, S., Sabbagh, F. & 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, 1125-1133.
43. 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.
44. 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.
  45. Sangabriel, W., Delgadillo, J. & Alarcón, A. (2006). Tolerancia y capacidad de fitorremediación de combústo- leo en el suelo por seis especies vegetales. *Contami- nación Ambiental*. 22, 63-73.
  46. Siciliano, S., Germida, J., Banks, G. K. & Green, C. (2003). Changes in Microbial Community Composi- tion and Function during a Polyaromatic Hydrocarbon Phytoremediation Field Trial. *Applied and Environmen- tal Microbiology*. 69, 483-489.
  47. Serrano, M.F., Torrado, L.M. & Pérez, D.D. (2013). Im- pacto de los derrames de crudo en las propiedades mecánicas de suelos arenosos. *Ciencia y Tecnología*. 11, 233-244.
  48. Shen, Mi., Liu, L., Li, D-W., Zhou, W., Zhou, Z-P., Zhang, C., Luo, Y. & Li, H. (2013). The effect of endo- phytic *Peyronellaea* from heavy metal-contaminated and uncontaminated sites on maize growth, heavy metal absorption and accumulation. *Fungal Ecology*. 6, 539-545
  49. Shin, E.C. & Das, B.M. (2001). Bearing Capacity of Un- saturated Oil-Contaminated Sand. *International Jour- nal Offshore Polar Engineering* 11, 220-227.
  50. Soleimani, M., Afyuni, M., Hajabbasi, M., Nourbakhsh, F., Sabzalian, M. & Christensen, J.H. (2010). Phyto- remediation of an aged petroleum contaminated soil using endophyte infected and non-infected grasses. *Chemosphere*. 81, 1084-1090.
  51. Spier, C., Stringfellow, W. T., Hazen, T. & Conrad, M. (2013). Distribution of hydrocarbons released during the 2010 MC252 oil spill in deep offshore waters. *Envi- ronmental pollution*. 173, 224-230.
  52. Techer, D., Martínez-Chois, C., Laval-Gilly, P., Hen- ry, S., Bennasroune, A., D'Innocenzo, M. & Falla, J. (2012). Assessment of *Miscanthus xgiganteus* for rhi- zoremediation of long term PAH contaminated soils. *Applied Soil Ecology*. 62, 42-49.
  53. Thakur, S., Singh, L., Wahid, Z., Siddiqui, M., Atnaw, S. & Din, M. (2016). Plant-driven removal of heavy metals from soil: uptake,translocation, tolerance mechanism, challenges, and future perspectives. *Environmental Monitor Assessment*. 188-206.
  54. Trujillo-García, A., Rivera-Cruz, M., Lagunes, L., Pal- ma- López, D. J., Sánchez, S. & Ramírez- Valverde, G. (2014). Parámetros biológicos de la restauración de suelos contaminados por petróleo crudo. *Ecosistemas y recursos. Agropecuarios Vol.1 n.2* Villahermosa. ISSN 2007-901X.
  55. Weyens, N., Thijs, S., Witters, N., Przybysz, A., Espens- hade 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.
  56. Wiszniewska, A., Hanus-Fajerska, W., Muszynska, W. & Ciarkowska, K. (2016). Natural Organic Amendments for Improved Phytoremediation of Polluted Soils: A Re- view of Recent Progress. *Pedosphere*, 26, 1-12.
  57. Yavari, K., Yeganeh, E. & Abolghasemi, H. (2015). Pro- duction and characterization of Ho polylactic acid mi- crospheres. *Journal of labelled compounds*. 59, 24-29.
  58. Yu, Y., Liu, Y. & Wu, L. (2013). Sorption and degrada- tion of pharmaceuticals and personal care products (PP- cPs) in soils. *Environmental Science Pollution Restora- tion*. 20, 4261-4267.
  59. 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 phytoremedia- tion. *Environmental Science and Pollution Restoration*. 22, 17151-17160.

**Conflicto de Intereses**

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

**Recibido:** octubre 13 de 2016  
**Aceptado:** octubre 31 de 2016

