

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR- JOSÉ MIGUEL CARRERA

**La Fitorremediación como proceso de recuperación de suelos y agua
contaminadas por hidrocarburos**

Trabajo de Titulación para optar al
Título Profesional de Técnico
Universitario en CONTROL DEL
MEDIO AMBIENTE

Alumna:

Alissa Belén Henríquez Cueto

Profesora Guía:

McS. María Elisa Escobar Peña

Resumen

Keywords: Fitorremediación, Hidrocarburos, Biodegradación, Contaminación, Fitotecnologías y Rizosfera.

Los problemas de contaminación de suelo y aguas cada vez se están expandiendo más por las acciones antropogénicas. En este caso hablaremos de los derrames de hidrocarburo que se produce por su liberación accidental o intencionada en el ambiente, provocando efectos fatales que afectaran a la salud humana, a los animales y al medio ambiente. De modo que se necesitan tecnologías que ayuden a recuperar y eliminar este contaminante de los suelos y aguas y que a la vez no generen más contaminación. Por este motivo en esta investigación bibliográfica, se da a conocer en que consiste la Fitorremediación que corresponde a una técnica de descontaminación que se emplea para eliminar o disminuir la contaminación a base de plantas principalmente, esta técnica ofrece una gran variedad de ventajas entre ellas que es una tecnología de bajo costo y amigable con el ambiente. Además, se indica lo que las fitotecnologías ofrecen para restaurar suelos y aguas contaminadas, igualmente se analiza el potencial de las plantas transgénicas, y los microorganismos trabajando en conjunto con las plantas, para mostrar si esta biotecnología es eficiente para combatir con este problema.

Índice

OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
HIPÓTESIS.....	8
JUSTIFICACIÓN.....	8
CAPÍTULO 1: HIDROCARBUROS.....	9
1. ¿QUÉ SON LOS HIDROCARBUROS?	11
1.1 PROPIEDADES DEL HIDROCARBURO	13
1.2 TIPOS DE HIDROCARBUROS	14
1.2.1 <i>Hidrocarburos Alifáticos</i>	14
1.2.2 <i>Hidrocarburos Aromáticos</i>	15
1.3 BIODEGRADACIÓN DE LOS HIDROCARBUROS	15
1.3.1 <i>Biodegradación hidrocarburos Alifáticos</i>	16
1.3.2 <i>Biodegradación de hidrocarburos Aromáticos</i>	16
1.4 Toxicidad del hidrocarburo	16
1.4.1 <i>Efectos de los hidrocarburos en la salud humana</i>	17
1.4.2 <i>Efectos de los hidrocarburos en la naturaleza</i>	18
2. CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBURO.....	19
2.1 DERRAMES Y SU PROBLEMÁTICA AMBIENTAL.....	20
2.2 CONTAMINACIÓN DEL SUELO POR HIDROCARBUROS	20
2.2.1 <i>Biodegradación en el suelo</i>	21
2.3 CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR HIDROCARBURO	21
2.3.1 <i>Biodegradación en el agua</i>	22
3. CONTAMINACIÓN DE HIDROCARBUROS EN CHILE Y EL MUNDO	22
4. TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE CONTAMINACIÓN	24
CAPÍTULO 2: LA FITORREMEDIACIÓN.....	25
1. FITORREMEDIACIÓN	27
1.2 TIPOS DE FITOTECNOLOGÍAS:	29
2. FITORREMEDIACIÓN EN EL SUELO.....	32
2.1 BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO.....	33
2.2 METODOLOGÍA DEL SUELO	35
3. FITORREMEDIACIÓN EN EL AGUA.....	36
3.1 BIOINDICADORES DE LA CALIDAD DEL AGUA	36
3.2 METODOLOGÍA DEL AGUA	37
3.3 PLANTAS ACUÁTICAS	38
4. FITORREMEDIACIÓN EN CHILE.....	38
5. PLANTAS	40
5.1 ¿LAS PLANTAS PUEDEN SER TOLERANTES A LOS HIDROCARBUROS?	41
5.2 <i>Plantas Fitorremediadoras</i>	42
5.2.1 <i>Plantas Transgénica</i>	45

6 FITORREMEDIACIÓN Y BIORREMEDIACIÓN ¿PUEDEN TRABAJAR EN CONJUNTO?..... 46

6.1 MICROORGANISMOS QUE CONSIENTEN A LAS PLANTAS..... 48

6.2 MICROORGANISMOS HIDROCARBONOCLASTAS 50

6.2.1 Bacterias 51

6.2.2 Hongos..... 52

7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN 54

CAPÍTULO 3: RESULTADOS..... 55

DISCUSIÓN 57

CONCLUSIÓN 58

REFERENCIAS 59

Índice de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1..... 12

ILUSTRACIÓN 2..... 12

ILUSTRACIÓN 3 TIPOS DE FITOTECNOLOGÍAS 29

ILUSTRACIÓN 4 ESQUEMA DE UNA MEMBRANA PLASMÁTICA 44

ILUSTRACIÓN 5 FITOHORMONAS O HORMONAS VEGETAL DE LAS PLANTAS..... 49

Índice de Tablas

TABLA N°1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES CONTAMINANTES ORGÁNICOS.....17

TABLA 2: TIPO DE FITOTECNOLOGÍA Y SU MECANISMO.....31

TABLA 3: PASOS A SEGUIR Y TENER EN CUENTA A LA HORA DE PLANEAR UN ESQUEMA DE FITORREMEDIACIÓN.....32

TABLA 4: VENTAJAS Y DESVENTAJAS 53

Introducción

La contaminación por hidrocarburos en suelos y aguas “son una de las principales fuentes de contaminación, ya que ocasionan perturbaciones en los ecosistemas al afectar su estructura y bioprocesos. Este tipo de contingencias ambientales originan efectos directos sobre la biota, ya que el petróleo contiene compuestos químicos tóxicos que producen daños a plantas, animales y humanos, pero principalmente sobre las poblaciones de microorganismos, los cuales representan parte importante del ecosistema y son claves para los procesos biogeoquímicos” (Vasudevan y Rajaram, 2001). Los derivados de hidrocarburos, ya sea gasolina, queroseno, aceites, combustibles, parafinas, entre 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 incrementando 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 (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.

Los problemas de contaminación tanto en suelos como en agua se deben principalmente a acciones antropogénicas, puesto que el agua se utiliza para multitud de procesos y la devuelve al medio, alterada o sucia. La sociedad industrial ha convertido ríos, lagos y mares, en canal y depósito de desechos, esto abarca otro problema más, que es la escasez del agua, que implica la instalación de plantas procesadoras que permitan la reutilización, reciclándola a través de complejos y costosos sistemas de purificación y potabilización, aumentando considerablemente los costos, y sin agua de buena calidad es imposible garantizar el bienestar del medio ambiente, de la especie humana, de los animales y de las plantas.

El suelo está relacionado con varios tipos de productos que se vierten a él, productos que han sido utilizados y que constituyen los desechos de distintos procesos de uso, que van desde los domésticos hasta los industriales y agrícolas. Los residuos industriales se originan en la extracción, beneficio y transformación de los productos en la industria, mismo que, por sus características particulares, contienen distintos niveles de peligrosidad. Al ser un recurso no renovable, su pérdida y degradación no es recuperable en el transcurso de una vida humana. Los suelos afectan a los alimentos que comemos, al agua que bebemos, al aire que respiramos, a nuestra salud y la de todos los organismos del planeta, haciendo que se altere la biodiversidad del suelo, reduciendo la materia orgánica que contiene y su capacidad para actuar como filtro. También se contamina el agua almacenada en el suelo y el agua subterránea, provocando un desequilibrio en sus nutrientes.

Objetivo general

Describir la efectividad de los procesos de la fitorremediación sobre la contaminación de hidrocarburos sobre el suelo y el agua, a través de una investigación bibliográfica.

Objetivos específicos

- Exponer sobre este proceso para saber si es útil en la eliminación de contaminantes derivados de productos de hidrocarburos en suelos y de aguas.
- Advertir sobre la problemática que causa este contaminante y lo peligroso que puede llegar a ser, si no se elimina.

Hipótesis

Las plantas fitorremediadoras son bastante rápidas en absorber y eliminar contaminantes derivados de hidrocarburos en suelos y aguas.

Justificación

Los derrames de hidrocarburos accidentales a gran escala presentan un volumen significativo de contaminantes, son muy comunes durante los procesos de producción de petróleo, así como también durante su comercialización, transporte y almacenamiento en sitios de acopio y su distribución. La contaminación por petróleo se produce por su liberación accidental o intencionada en el ambiente, provocando efectos adversos sobre el hombre o sobre el medio, directa o indirectamente. Afectando directamente al suelo, agua, aire, a la flora y fauna.

Capítulo 1: Hidrocarburos

1. ¿Qué son los Hidrocarburos?

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos de hidrógeno y carbono que se generan en la naturaleza a través de diferentes procesos geológicos. Son los compuestos más simples y pueden ser considerados como las sustancias principales de las que se derivan todos los demás compuestos orgánicos. Son una fuente de energía y materia prima que el hombre ha sabido aprovechar para su beneficio, ya que son los principales componentes del petróleo y del gas natural, que sirven como combustibles y lubricantes, y son materia prima para la producción de plásticos, fibras, hules, disolventes, explosivos y muchos otros productos químicos utilizados en la industria (Carey, 2018).

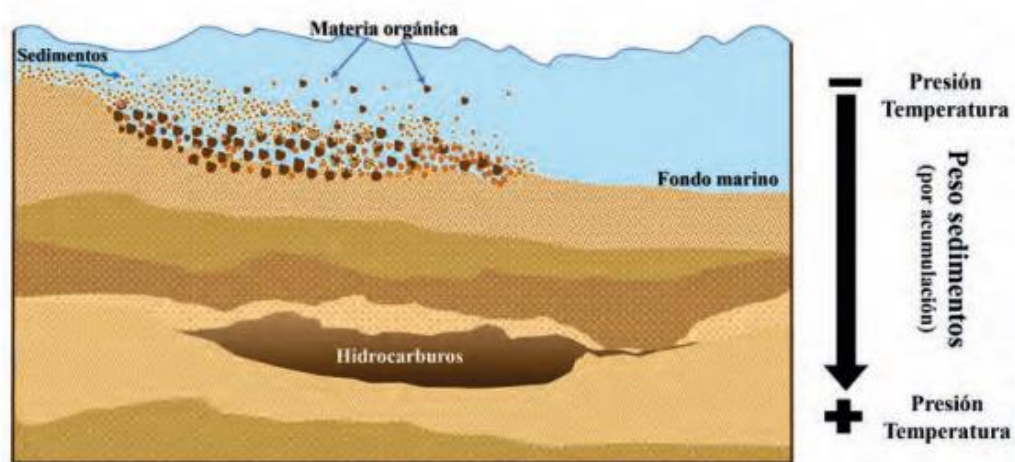
Es muy difícil saber bien el origen de los hidrocarburos, ya que la generación y transformación de compuestos y los procesos involucrados en su evolución son múltiples y complejos. Entre los más importantes se destacan:

- la procedencia de los elementos (hidrógeno y carbón)
- la acumulación de los materiales originarios
- el enterramiento de estos materiales
- la transformación de sólido a líquido y/o gas
- la evolución del petróleo (migración-acumulación) (Rodríguez Chaves et al., 2015).

Estos puntos no pueden darse en un orden cronológico exacto, pues algo puede ocurrir entre las diversas etapas y nadie sabe con seguridad cuando ocurre la transformación; Pero hay varias teorías sobre ellas, la más aceptada hasta ahora es la teoría orgánica-vegetal (de Kramer) y orgánica-animal (de Engler), que dice que los compuestos orgánicos como el petróleo y el gas natural se han formado por la transformación de la materia orgánica vegetal y animal acumuladas en el fondo de los océanos y de los grandes lagos, y al mismo tiempo fue recubierta por sedimentos traídos por los ríos desde los continentes, generando un enterramiento progresivo de las capas. La transformación de la materia orgánica en petróleo se dio a través del tiempo, mediante la intervención de factores fisicoquímicos y quizás otros de carácter biológicos, pero sin lugar a dudas, los que más contribuyeron fueron los efectos de presión y temperatura, producidos por el peso creciente de los sedimentos que poco a poco se acumulaban sobre la materia orgánica y el aumento de la temperatura con la profundidad, lo que hace que se formen yacimientos petroleros (Ruiz, 2014).

Los yacimientos petroleros son el resultado de la transformación por temperatura de la materia orgánica, es decir, restos de plantas y otros organismos que se acumulan en el fondo del mar y que son enterrados por los sedimentos (IMP, 2015). El proceso de transformación de la materia orgánica, la diagénesis, involucra el enterramiento de la materia orgánica y su degradación lenta bajo condiciones de calor y alta presión (Ilustración 1). Sin embargo, para que se produzca un yacimiento petrolero es necesario que las condiciones sedimentarias hayan sido idóneas para evitar la fuga del petróleo y gas que se va acumulando en rocas almacén (IMP, 2015; SGM, 2017a). Para ello, un sistema natural debe cumplir con ciertas condiciones geológico-estructurales que permitan la acumulación del petróleo, generando yacimientos (Embargo, s/f).

Ilustración 1

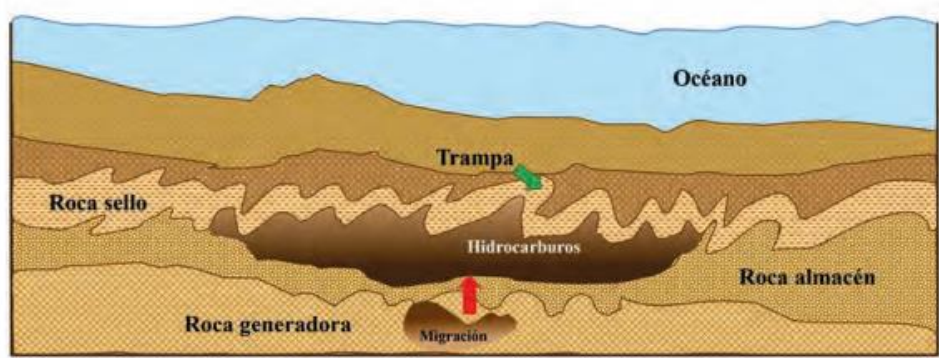


Fuente 1 Embargo, P. D. P. I. (s/f). DE LÍNEA BASE AMBIENTAL

Un sistema petrolero es un sistema natural que incluye ciertos componentes y procesos geológicos que favorecen la formación de un yacimiento de petróleo crudo. Los elementos esenciales de los sistemas petroleros son la roca generadora, roca sello y roca almacén (Ilustración 2). Los procesos geológicos incluyen la formación de la trampa, así como la generación, migración y acumulación de los hidrocarburos (IMP, 2015). Por ende, la formación de hidrocarburos requiere tres condiciones principales:

- a) la existencia de rocas generadoras que den origen a los hidrocarburos
- b) rocas almacenadoras que sean porosas y que deben estar rodeadas por una capa impermeable capaz de retener a los hidrocarburos
- c) la formación de una trampa o roca sello en la capa almacenadora que evite la fuga de los hidrocarburos generados (SGM, 2017b).

Ilustración 2



Fuente 2 Embargo, P. D. P. I. (s/f). DE LÍNEA BASE AMBIENTAL

Los hidrocarburos son contaminantes no sólo por los residuos producidos al entrar en combustión sino también cuando el petróleo se derrama en la tierra o en el agua. A pesar de ser una sustancia orgánica, los hidrocarburos no son habitualmente biodegradables. Es importante resaltar además que los hidrocarburos pueden generar intoxicaciones graves, con

trastornos severos para la respiración. Cuando una persona se intoxica con un hidrocarburo, se le practica una intubación y se le debe realizar ventilación mecánica.

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, la contaminación por estos ha sido de igual forma, significativa. 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 (Díaz-Martínez et al. (2013)), se 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 las poblaciones microbianas del ambiente edáfico.

1.1 Propiedades del hidrocarburo

Los hidrocarburos de origen geológico natural extraídos como líquidos son denominado de forma genérica como petróleo, mientras que los extraídos en forma gaseosa se denomina gas natural. Ambos son las principales fuentes de combustible fósiles, así como material de base de la química orgánica.

El crudo es el componente líquido del petróleo, ya que también existen gases asociados al petróleo como el propano o el butano y firmas sólidas como el asfalto y el betún. Cualquiera de estas combinaciones puede coexistir, dependiendo de la historia de los procesos locales de la geoquímica del yacimiento de petróleo. El crudo es una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos, cuya composición puede variar enormemente de un campo petrolífero a otro, e incluso en un mismo pozo de extracción en función del tiempo o de la profundidad. De esta forma, existe una enorme variedad de crudos, cada uno con una composición y comportamiento reológico bien distintos. (E. Comerma).

Los crudos presentan propiedades físicas y químicas muy diversas. Las propiedades físicas principales afectan el comportamiento y la persistencia de los hidrocarburos derramado, estas son:

- a. La **densidad** en relación al agua pura. La mayoría de los hidrocarburos son más livianos que el agua y tienen una gravedad específica por debajo de la densidad del crudo y los productos de hidrocarburo (García R).
- b. La **viscosidad** de un hidrocarburo es su resistencia al flujo. Los hidrocarburos de alta viscosidad fluyen con dificultad, mientras que aquellos con baja viscosidad son altamente móviles. Las viscosidades disminuyen a temperaturas mayores, de manera que la temperatura del agua de mar y el grado al cual el hidrocarburo puede absorber calor del sol son consideraciones importantes (García R).

- c. **El punto de fluidez** es la temperatura por debajo de la cual el hidrocarburo no fluye. Si la temperatura del ambiente está por debajo del punto de fluidez, el hidrocarburo se comporta esencialmente como un sólido (García R).
- d. **La temperatura y la presión.** Estos parámetros determinan el punto límite superior de la curva de tensión de vapor más allá del cual no se advierte el cambio de fase; este punto crítico corresponde a la identidad perfecta de las propiedades del líquido y del vapor: densidad, índice de refracción, etc. Particularmente, el calor de vaporización se hace nulo en dicho punto.

1.2 Tipos de hidrocarburos

El petróleo crudo y las fracciones que provienen de él están conformados de moléculas denominadas hidrocarburos y por una combinación de átomos de carbono tetravalentes con átomos de hidrógeno monovalentes, estos hidrocarburos se pueden dividir en:

1.2.1 Hidrocarburos Alifáticos

Los hidrocarburos alifáticos son de cadena abierta y se subdividen a su vez en saturados o alcanos, alquenos, y alquinos. Y dentro del grupo de hidrocarburos de cadena cerrada, se tienen a aquellos compuestos que cierran su cadena formando un anillo sin ser derivados del benceno llamados cicloalcanos. Los hidrocarburos alifáticos son utilizados como disolventes de Aceites, Grasas, Caucho y Resinas. Se pueden encontrar unidos por enlaces simples, dobles o triples. Como el carbono es tetravalente, está compartiendo dos electrones en cada enlace, y el hidrógeno, que solamente tiene un electrón, sólo necesita un enlace para poder juntarse con el carbono. Los hidrocarburos alifáticos pueden ser “no saturados”, en los casos de las cadenas unidas con dobles o triples enlaces, o saturados, cuando todos los enlaces que conforman la molécula son de tipo simple.

ALQUENOS u olefinas: son hidrocarburos que contienen menos hidrógenos que los alcanos de igual número de carbonos y que pueden convertirse en estos por adición de hidrógeno. Como tienen menos hidrógenos que el máximo posible se les llama hidrocarburos no saturados.

ALQUINOS: Estos compuestos tienen una proporción de hidrógeno aún menor que los alquenos, por lo que no son saturados.

ALCANOS: Los alcanos o parafinas están formados por átomos de carbono unidos al hidrógeno o a otros átomos de carbono por cuatro enlaces sencillos, es decir son compuestos saturados.

LOS HIDROCARBUROS CICLICOS: son los compuestos orgánicos que se encuentran formando un ciclo, representado con formas geométricas que dependen del número de carbonos que constituyan a la molécula.

1.2.2 Hidrocarburos Aromáticos

Los hidrocarburos aromáticos son aquellos que poseen una estructura cerrada en forma de anillo hexagonal en la cual un carbón satisface sus valencias mediante un doble enlace por un lado y un enlace sencillo por el otro, estos contienen en su molécula uno o varios núcleos de seis carbonos dispuestos hexagonalmente en forma de cadena cerrada, poseen en su estructura tres dobles ligaduras (anillos bencénicos). De este importante grupo, un amplio número de compuestos derivan, principalmente, del petróleo y del alquitrán de hulla. Son, generalmente, muy reactivos y químicamente versátiles. Son la materia prima básica para la elaboración de una extensa variedad de productos químicos. Su nombre procede del fuerte y agradable olor de algunos de estos compuestos, destacando por su importancia el benceno, tolueno y los xilenos a los que se denominan el grupo BTX, así como el antraceno y el naftaleno. Se consideran tóxicos, esencialmente por su nula solubilidad en el agua, lo que prolonga su presencia en el ambiente y su difícil biodegradación (Hawley, 1984).

1.3 Biodegradación de los hidrocarburos

La biodegradación es la disolución química de los materiales por bacterias u otros medios biológicos. El término se utiliza a menudo en relación con la ecología, la gestión de residuos, la biomedicina y el medio ambiente, y es ahora comúnmente asociados con los productos respetuosos del medio ambiente que son capaces de descomponerse nuevamente dentro de los elementos naturales, según este proceso permite la eliminación de compuestos nocivos impidiendo su concentración, y además es indispensable para el reciclaje de los elementos en la biosfera (Gómez Ortega, P. Y. (s. f.)).

La mayoría de los componentes del petróleo son biodegradables, pero su biodegradación es relativamente lenta (Atlas, R, Bartha, 2001), ya que el petróleo es una mezcla compleja de hidrocarburos alifáticos, alicíclicos y aromáticos. También contiene una menor proporción de compuestos que no son hidrocarburos como ácidos nafténicos, fenoles, tioles, compuestos de azufre, etc. Además, cada tipo de crudo tiene varios cientos de componentes diferentes. Por todo ello hay que tener en cuenta que se necesitan muchas vías catabólicas diferentes, por lo tanto, muchas poblaciones diferentes que puedan utilizar estos compuestos como fuente de energía y carbono (Degradación de hidrocarburos s.f.).

La biodegradación de hidrocarburos está condicionada a diferentes variables, por este motivo es necesario controlarlos para que la actividad de los microorganismos sea eficiente, los factores que más intervienen dentro del proceso de degradación son: el pH, humedad, aceptores de electrones y nutrientes, (Ávila, 1999). Los hidrocarburos pueden ser metabolizados por diferentes microorganismos o por consorcios formados por cepas bacterianas pertenecientes al mismo o a diferentes géneros (Varjani.2017). La descomposición puede llevarse a cabo en presencia de oxígeno (aeróbica) o en su ausencia (anaeróbica). La primera es más completa y libera energía, dióxido de carbono y agua, es la de mayor rendimiento energético. Los procesos anaeróbicos son oxidaciones incompletas y liberan menor energía. (Gómez Ortega, P. Y. (s. f.).)

1.3.1 Biodegradación hidrocarburos Alifáticos

Los hidrocarburos alifáticos se pueden clasificar en alcanos, alquenos y alquinos dependiendo de lo saturados que estén sus enlaces. Se puede decir que como más insaturado sea una cadena carbonatada (más dobles y triples enlaces) más difícil o lenta será su degradación. De igual manera los alcanos de cadena larga son más resistentes a la biodegradación a medida que la longitud de su cadena aumenta.

Los microorganismos que utilizan hidrocarburos como sustrato deben de tener enzimas denominada mono oxigenasas que son dependientes de oxígeno. La mayoría de los microorganismos en teoría si son capaces de sobrevivir en ese ambiente y pueden degradar hidrocarburos de cadena larga. Pero para que esto suceda los microorganismos primero deben de oxidar con oxígeno el último carbono de la molécula gracias al complejo multienzimático que no hacen más que incorporar esta molécula de oxígeno. Así se obtiene un hidrocarburo con un grupo alcohol siendo así una molécula más reactiva. Mediante otras enzimas este grupo alcohol se oxida más hasta grupo aldehído y finalmente carboxílico. Así se obtiene una molécula similar a un ácido graso y puede ser degradado a acetil-CoA por b-oxidación. Este proceso de oxidación también puede darse en carbonos no terminales dando lugar a dos ácidos grasos que se procesan por b-oxidación (Degradación de hidrocarburos s.f.).

1.3.2 Biodegradación de hidrocarburos Aromáticos

La ruta de biodegradación en el caso de los hidrocarburos aromáticos se inicia con la oxidación del hidrocarburo a un compuesto “cis-dihydrodiol”, mediante la ruptura del anillo aromático incorporando dos átomos de oxígeno empleando para ello la enzima dioxigenasa; la oxidación del anillo aromático es la etapa limitante del proceso de degradación de estos compuestos. Una vez perdida la aromaticidad, se produce una nueva oxidación a catecol, y de ahí existen dos rutas de degradación que dan lugar a diferentes ácidos junto con aldehído y acetilcoenzima-A, que son empleados por los microorganismos para la síntesis celular de sus constituyentes y la obtención de energía para ello (Juhasz and Naidu, 2000).

1.4 Toxicidad del hidrocarburo

El factor clave que lleva a la necesidad de recuperar terrenos y aguas subterráneas contaminadas es la toxicidad en humanos y en la flora y fauna. La eliminación o vertidos de productos químicos tóxicos en terreno constituye un difícil problema debido a que:

- Las materias tóxicas a menudo son resistentes a la biodegradación.
- Una vez que los compuestos se encuentran en el terreno, existe un menor control sobre el transporte de estos y los procesos que sufren.

El peligro que corren los abastecimientos de agua es muy alto, ya que los límites de concentración máxima de productos tóxicos en aguas destinadas al abastecimiento son extremadamente bajos (EWEIS, 1999).

Casi siempre los investigadores están de acuerdo en admitir que los hidrocarburos aromáticos son los más tóxicos, seguidos en toxicidad por las series olefinicas, nafténicas y parafinicas. Dentro de cada una de las series las moléculas de bajo peso molecular son las más tóxicas. Se ha podido poner de manifiesto que los productos de las refinerías enriquecidos por cracking en moléculas insaturadas son en todos los casos muchísimo más tóxicos que los petróleos brutos de los cuales proceden. La situación de los accidentes respecto de la costa y, sobre todo el tiempo empleado por los vertidos en alcanzar a las comunidades litorales más sensibles, es de extrema importancia, ya que está demostrado que las fracciones más ligeras y más tóxicas se evaporan en algunos días (Lucas y Roux, 1975).

Tabla N°1. Características de los principales contaminantes orgánicos

Compuesto	Toxicidad	Persistencia	Inflamabilidad	Reactividad
<i>Benceno</i>	3	1	3	0
<i>Etilbenceno</i>	2	1	3	0
<i>Petróleo</i>	3	1	2	0
<i>Tolueno</i>	2	1	3	0
<i>Xileno</i>	2	1	3	0

Fuente: SAX, 1976

1.4.1 Efectos de los hidrocarburos en la salud humana

Los efectos de la exposición a los hidrocarburos totales de petróleo (TPH) dependen de muchos factores. Éstos incluyen el tipo de sustancias químicas que los componen, la duración de la exposición y la cantidad de sustancias químicas con las que entra en contacto. Se sabe muy poco acerca de la toxicidad de muchos de los TPH. Algunos de estos tienen una conocida toxicidad para el ser humano, pero, de la mayoría de ellos se desconoce el grado de peligrosidad (Borrás Carnero, G. (2011)). La intoxicación por hidrocarburos se puede dar por la ingesta, aspiración o contacto:

1. Ingesta: La ingestión de hidrocarburos puede afectar a tres sistemas orgánicos fundamentales: pulmón, aparato gastrointestinal y sistema nervioso.
 - Cuando afecta al pulmón, los síntomas respiratorios son tos, ahogo, sibilancias y ronqueras.
 - Cuando afecta al aparato gastrointestinal, generalmente son irritantes de boca, faringe e intestino.
 - Cuando afecta al sistema nervioso central pueden darse los síntomas de letargia, aturdimiento, estupor y coma, pero son inusuales. (Borrás Carnero, G. (2011)).
2. Aspiración: El pulmón es el órgano más vulnerable en la intoxicación por hidrocarburos. Se produce una lesión directa de los capilares y el tejido pulmonar. El riesgo de aspiración depende de las propiedades de viscosidad, volatilidad, y tensión superficial del hidrocarburo.
3. Contacto: El contacto con hidrocarburos produce irritación de la piel y picores, y la piel en este estado facilita la absorción de los componentes del crudo. Se ha

asociado un aumento del riesgo de cáncer de piel con la presencia de hidrocarburos poliaromáticos (PAH) (Borrás Carnero, G. (2011)).

Entre estos compuestos destacan por sus efectos en la salud los hidrocarburos aromáticos simples y los policíclicos. Dependiendo de la composición del crudo estos pueden encontrarse en mayor o menor cantidad. En el caso de los petróleos ligeros, la presencia de los hidrocarburos aromáticos volátiles es mayor. (Borrás Carnero, G. (2011)).

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) demuestran actividad cancerígena en modelos animales. Aunque algunos estudios epidemiológicos han implicado a los PAH como factores de riesgo para el cáncer humano (Nadon et al. 1995).

Los hidrocarburos aromáticos pueden causar efectos agudos y crónicos en el organismo. La intoxicación aguda por estos compuestos produce cefalea, náuseas, mareo, desorientación, confusión e inquietud. La exposición a dosis altas puede incluso provocar pérdida de consciencia y depresión respiratoria. Uno de los efectos agudos más conocidos es la irritación respiratoria (tos y dolor de garganta). También se han observado síntomas cardiovasculares, como palpitaciones y mareos. Los síntomas de la exposición crónica pueden ser: cambios de conducta, depresión, alteraciones del estado de ánimo y cambios de la personalidad y de la función intelectual. También se sabe que la exposición crónica produce o contribuye al desarrollo de una neuropatía distal en algunos pacientes. Otros efectos crónicos son sequedad, irritación y agrietamiento de la piel y dermatitis. La exposición, sobre todo a los compuestos clorados de este grupo, puede causar hepatotoxicidad. El benceno es un carcinógeno humano se ha demostrado que favorece el desarrollo de todo tipo de leucemias y, en particular, de la leucemia no linfocítica aguda. También puede causar anemia aplásica y pancitopenia reversible (INSHT).

1.4.2 Efectos de los hidrocarburos en la naturaleza

Los hidrocarburos en general son compuestos tóxicos que pueden ser acumulados por plantas y animales generando mutaciones e incluso la muerte (Das y Chandran 2011).

- ✓ Efectos físicos en la flora y fauna, que pueden llegar a ser letales.
- ✓ Pérdida de zonas pesqueras o marisqueras.
- ✓ Pérdida de parajes con valor natural, recreativo o vacacional.
- ✓ Suspensión temporal de las actividades industriales o de ocio que en sus procesos requieran agua de mar limpia (piscifactorías, acuarios...).
- ✓ Problemas para la navegación, afectando a sistemas de refrigeración de los motores.
- ✓ El petróleo se deposita sobre los fondos marinos matando o provocando efectos subletales sobre miles de animales y plantas vitales para el ecosistema.
- ✓ Las algas de los fondos y las orillas quedan cubiertas por una fina película aceitosa que dificulta la fotosíntesis y la reproducción.
- ✓ Las especies "oportunistas" más resistentes al vertido ocupan los nichos ecológicos de las que han desaparecido provocando la pérdida de biodiversidad y dificultando la recuperación del ecosistema.
- ✓ Cambios de mayor o menor importancia, según el vertido, en las comunidades y organismos del área afectada.

- ✓ Alteración física y química de los hábitats naturales (las especies más resistentes toman los espacios dejados por otras especies desaparecidas).
- ✓ La fauna puede verse afectada por varios factores: la persistencia de una mancha de crudo limita el paso de la luz y por tanto reduce la actividad fotosintética de muchas plantas, si la mancha las cubre dificulta también su función reproductora y la fijación.
- ✓ Cambios en los hábitos de poblaciones migratorias (aves o peces).
- ✓ Contaminación en especies de la cadena alimenticia humana, peces, moluscos... (aunque sobrevivan pueden estar contaminados y por tanto ser perjudicial su consumo).
- ✓ Las aves que quedan impregnadas de petróleo pierden o ven reducida su capacidad de aislarse del agua pudiendo morir por hipotermia. Al intentar limpiarse el plumaje con el pico ingieren grandes cantidades de hidrocarburos por lo que se envenenan.
- ✓ Los mamíferos marinos pueden sufrir el taponamiento de sus vías respiratorias o daños en el tracto respiratorio y su mucosa por efecto de los contaminantes químicos. También ingieren grandes cantidades de hidrocarburos por alimentarse de animales contaminados.
- ✓ Los efectos subletales sobre los animales marinos pueden abarcar deformaciones, pérdida de fertilidad, reducción del nivel de eclosión de huevos, alteraciones en su comportamiento y gran cantidad de efectos derivados de la toxicidad del vertido. (Borrás Carnero, G. (2011)).

2. Contaminación por hidrocarburos

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 última década los hidrocarburos han dado lugar a una amplia liberación de contaminantes en el medio ambiente (Adams et al. (2008)). Además del acelerado crecimiento de la población mundial ha dado como resultado una mayor demanda de combustibles fósiles (hidrocarburos). Aunque muchos de estos compuestos se utilizan para generar energía, un alto porcentaje se libera al ambiente en los procesos de extracción, refinado, transporte y almacenamiento, lo que representa un riesgo potencial para los ecosistemas (Semple y col., 2001). La creciente necesidad de hidrocarburos y sus productos derivados han impulsado un fuerte desarrollo de la industria petrolera y petroquímica, transformándose en una de las más importantes teniendo en cuenta el volumen de producción, generación de empleos y necesidades que satisface (entre ellas la obtención de combustibles y lubricantes para la industria y el transporte). Al iniciarse el auge de las actividades petroleras, en el manejo y desecho de los hidrocarburos, no se toma en cuenta la repercusión que causarían éstos al infiltrarse en el subsuelo. Por esto, en la actualidad, es común encontrar pasivos ambientales debido a las actividades inadecuadas que han permitido su infiltración en el subsuelo, así como a fugas de hidrocarburos por accidentes o manejo inapropiado en las actividades de refinación, petroquímica, transporte, almacenamiento y comercialización (Madrigal, 1998). La industria petroquímica surge de la necesidad de obtener una serie de derivados del petróleo y básicos para otras industrias. Su importancia deriva de la gran variedad de las industrias a las que abastece, entre ellas la de fertilizantes, fibras sintéticas, plásticos, llantas, jabones y detergentes (Ayllon, 1994).

2.1 Derrames y su problemática ambiental

Los derrames de hidrocarburos constituyen una de las principales fuentes de contaminación de los suelos, aguas superficiales y subterráneas, flora y fauna silvestre. Algunas sustancias peligrosas como los hidrocarburos presentan actividad carcinogénica en detrimento del hombre y los animales, de tal manera que la presencia de estas sustancias químicas en agua subterránea es un enorme peligro para el consumo humano (IMT, 2002). Los derrames de hidrocarburos son causados por accidentes que puede originarse en instalaciones petroleras durante las actividades de explotación, transformación, comercialización o distribución de petróleo y sus derivados. Los derrames de hidrocarburos se pueden presentar en tierra, aguas continentales o en el mar (Pemex, 1999). Los derrames de hidrocarburos son cualquier descarga, liberación, rebose o vaciamiento de hidrocarburos que se presente en suelo (Semarnat, 2003).

Cuando se está ante la presencia de un derrame de un hidrocarburo en el suelo una fracción se evapora, dependiendo de la volatilidad del compuesto vertido. Además, existe un proceso de infiltración en el suelo, muchas veces no apreciable a simple vista, y que involucra un descenso gravitacional por la matriz del suelo pudiendo llegar hasta aguas subterráneas contenidas en acuíferos someros o profundos. Una vez que ha ocurrido un derrame de contaminantes en el suelo, los fenómenos de capilaridad y gravedad los conducen hacia las aguas subterráneas, por ello, se hace necesario entender la forma del transporte. (Gustavo Castro Varela, 2007).

Los derrames en el agua pueden provocar una amplia variedad de impactos en el medio marino y con frecuencia aparecen en los medios de comunicación como “desastres medioambientales”, con predicciones de fatales consecuencias para la supervivencia de la fauna y flora marina. El impacto ambiental a corto plazo puede resultar grave y provocar considerables trastornos a los ecosistemas y las personas que habitan cerca de la franja costera contaminada, afectando la calidad de vida. La infiltración es el proceso de penetración del agua en el suelo. La velocidad a la cual el agua entra en el suelo es la velocidad de infiltración, la que depende del tipo de suelo; de la estructura del suelo, o grado de agregación; y del contenido de agua en el suelo (Lowery et al., 1996).

Los derrames incontrolados de combustibles causan deterioro de la calidad del ambiente, especialmente en lo relacionado a impactos negativos a las propiedades del suelo y agua, como resultado de afectaciones a la estabilidad química intrínseca (Luthy et ál., 1997).

2.2 Contaminación del suelo por hidrocarburos

La contaminación del suelo supone la alteración de la superficie terrestre con sustancias químicas que resultan perjudiciales para la vida en distinta medida, poniendo en peligro los ecosistemas y también nuestra salud. Esta alteración de la calidad de la tierra puede obedecer a muy diferentes causas y, del mismo modo, sus variadas consecuencias provocan serios problemas de salubridad que afectan gravemente a la flora, fauna y a la salud humana. El derrame de hidrocarburos al suelo tiene impactos importantes en la actividad de los microorganismos, y afecta la funcionalidad del ecosistema, además, producen una alteración

del sustrato original en que se implantan las especies vegetales dejando suelos inutilizables durante años.

Como se menciona anteriormente este tipo de contaminación se produce principalmente por el derrame de hidrocarburos, ya que es un hecho frecuente en las estaciones de servicio y parques de almacenamiento, producida principalmente por fugas en los tanques de almacenamiento o durante el proceso de descarga de cisternas.

Los derivados de hidrocarburos (gasolina, queroseno, aceites, combustibles, parafinas, 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, 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).

2.2.1 Biodegradación en el suelo

Cuando existen derrames de hidrocarburos en el suelo se observa una elevada concentración de carbono, y carencia de nitrógeno y fósforo, necesarios para el metabolismo microbiano, por este motivo se opta por la bioestimulación que es suministrar factores limitantes como nutrientes y aceptores de electrones que estimulan el metabolismo y el crecimiento de microorganismos los cuales aceleran las tasas de degradación del contaminante si las condiciones ambientales son favorables (Bartha 2001). La biodegradación en suelos contaminados por hidrocarburos suele ocurrir de manera natural por poblaciones microbianas que pueden sobrevivir a la toxicidad presente en el ambiente siendo capaces de utilizar el hidrocarburo para vivir, este es uno de los principales mecanismos por el cual el petróleo y sus derivados han sido eliminados del ambiente con éxito. Los factores que afectan a los microorganismos son los que requieren mayor control a lo largo del proceso biológico. Entre estos factores están: la aireación, el contenido de humedad, la temperatura, pH, los factores nutricionales.

2.3 Contaminación del agua por hidrocarburo

La contaminación del agua tiene lugar cuando en los cuerpos de agua naturales tienen presencia diversos tipos de sustancias químicas ajenas a su composición original, que modifican sus propiedades haciéndola insalubre, dañina para la vida, y por lo tanto inútil para la pesca, agricultura, recreación y consumo humano.

El agua es la sustancia líquida más abundante del planeta y el solvente universal presente en la mayoría de las sustancias y en todos los seres vivos, que sin ella no podrían existir, pero esto, no ha impedido que numerosas actividades humanas generen un impacto importante en la calidad del agua del planeta, mediante el desecho de sustancias líquidas, sólidas e incluso gaseosas en el ambiente.

los hidrocarburos son un tipo de contaminantes que afectan a la calidad del agua de manera importante. Los derrames de petróleo cada día son más frecuentes en los océanos, dejan estelas de contaminación de efectos a muy largo plazo. La formación de una película impermeable sobre el agua en las zonas de derrame afecta rápida y directamente a las aves y a los mamíferos acuáticos.

La contaminación de las aguas por hidrocarburos en los sistemas de almacenamiento, en las fuentes de abastecimiento subterráneas y superficiales, así como en otros emplazamientos, es un hecho que ha venido en aumento como resultado de la explotación, refinación, distribución y almacenamiento de petróleo crudo y sus derivados. Este tipo de contaminación produce un cambio en las características organolépticas del agua que induce al rechazo de los consumidores, y su ingestión representa un riesgo para la salud; asimismo, el ecosistema puede sufrir afectaciones debidas al impacto negativo de estos contaminantes sobre sus diferentes componentes.

Una gran proporción de la contaminación del mar se debe a los desechos de millones de barcos que recorren diariamente los mares. Es probable que el desecho más importante de todos ellos sea el petróleo.

2.3.1 Biodegradación en el agua

La solubilidad de los hidrocarburos en agua es baja y la degradación biológica de los mismos se produce en una interface entre estos compuestos y el agua. Los dispersantes son tensioactivos que reducen la tensión interracial de dicha interface facilita la dilución de los hidrocarburos y por tanto su biodegradación (Personna et al., 2014; Zhao et al., 2015). Los principales factores que afectan a la velocidad y grado de biodegradación son las características del hidrocarburo, disponibilidad de oxígeno y nutrientes (principalmente compuestos de nitrógenos y fósforos) y temperatura. A medida que los hidrocarburos se descomponen, se generan diversos compuestos intermedios, aunque los productos finales de la biodegradación son dióxido de carbono y agua.

3. Contaminación de hidrocarburos en Chile y el mundo

El acelerado crecimiento de la población mundial ha dado como resultado una mayor demanda de combustibles fósiles (hidrocarburos). Aunque muchos de estos compuestos se utilizan para generar energía, un alto porcentaje se libera al ambiente en los procesos de extracción, refinado, transporte y almacenamiento, lo que representa un riesgo potencial para los ecosistemas. La creciente necesidad de hidrocarburos y sus productos derivados han impulsado un fuerte desarrollo de la industria petrolera y petroquímica, transformándose en una de las más importantes teniendo en cuenta el volumen de producción, generación de empleos y necesidades que satisface. Al iniciarse las actividades petroleras, en el manejo y desecho de los hidrocarburos, no se toma en cuenta la repercusión que causarían éstos al infiltrarse en el suelo y en el agua. Por esto, es común encontrar pasivos ambientales debido a las actividades inadecuadas que han permitido su infiltración, así como a fugas de

hidrocarburo por accidentes de derrames o manejo inapropiado en las actividades de refinación, petroquímica, transporte, almacenamiento y comercialización.

En Chile existen diferentes fuentes generadoras de contaminación de suelos, cuerpos de agua superficiales y acuíferos, dependiendo de las actividades que se desarrollan en cada zona, sin embargo, la contaminación por hidrocarburos está ampliamente distribuida en el país.

La contaminación por petróleo se produce por su liberación accidental o intencionada en el ambiente, provocando efectos adversos sobre el hombre o sobre el medio, directa o indirectamente, también se involucran todas las operaciones relacionadas con la explotación y transporte de hidrocarburos, que conducen inevitablemente al deterioro gradual del ambiente. Afecta en forma directa al suelo, agua, aire, y a la fauna y la flora.

En el agua, los hidrocarburos se esparcen rápidamente, debido a la existencia de una importante diferencia de densidades entre ambos líquidos, llegando a ocupar extensas áreas, y dificultando por lo tanto sus posibilidades de limpieza. Esto imposibilita la interacción entre la flora y la fauna marina con la atmósfera, obstruyendo así el ciclo natural de vida. Si las sustancias contaminantes alcanzan la costa, debido a la alta permeabilidad de la arena, los hidrocarburos pueden penetrar hacia el subsuelo contaminando las napas y dejando rastros irreparables en los reservorios de agua dulce. Otra importante causa de contaminación, la constituyen los vertidos de desechos industriales, que llegan a poseer altas concentraciones de los derivados más peligrosos de los hidrocarburos.

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 los derrames mundiales son los que causan mayores daños ambientales; algunas de estos derrames no se le consideran un derrame ambiental, pero que sí son acumulativas con el paso del tiempo y poco a poco generan 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 (Mendelssohn et al., 2012).

4. Tecnologías de tratamiento de contaminación

Las tecnologías de tratamientos se pueden definir como el conjunto de operaciones realizadas a través de acciones químicas, físicas o biológicas con el objetivo de controlar, disminuir o eliminar la toxicidad, movilidad o volumen de los contaminantes presentes. por eso existen varias tecnologías para la descontaminación de suelo y agua, algunos ejemplos de técnicas de tratamiento biológicos son:

- ✓ Biorremediación
- ✓ Biodegradación asistida
- ✓ Biotransformación de metales
- ✓ Bioventing
- ✓ Biopilas
- ✓ Biodegradación en reactor
- ✓ Landfarming
- ✓ Compostaje
- ✓ Lodos biológicos
- ✓ Fitorremediación

Las tecnologías de remediación representan una alternativa a la disposición en tierra de desechos peligrosos que no han sido tratados, y sus capacidades o posibilidades de éxito, bajo las condiciones específicas de un sitio, pueden variar ampliamente.

Capítulo 2: La Fitorremediación

1. Fitorremediación

La fitorremediación es una alternativa emergente, que representa un menor costo efectivo, posee ventajas estéticas, captura gases efecto invernadero, no requiere de una fuente de energía diferente a la solar y tiene una gran aplicabilidad bajo diferentes rangos de concentración de contaminantes (Schnoor, 1997; Guendy, 2008). Es un proceso que hace referencia a una serie de tecnologías que se basan en el uso de plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes (como los metales pesados, compuestos orgánicos, nucleares, pero en este caso solo se habla de los hidrocarburos) en ambientes adulterados, como aguas, suelos, e incluso aire. La fitorremediación puede definirse como una tecnología sustentable que se basa en el uso de plantas para reducir in situ o ex situ la concentración o peligrosidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos, a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a su sistema de raíz que conducen a la reducción, mineralización, degradación, volatilización y estabilización de los diversos tipos de contaminantes.

Uno de los rasgos característicos de la sociedad moderna es la creciente emisión al ambiente de sustancias contaminantes, destacando aquellas que proceden de las actividades industriales, mineras, agropecuarias, artesanales y domésticas. Estos compuestos representan una amenaza para los seres vivos, por lo que se han desarrollado una serie de métodos para enmendar el impacto causado. Los métodos convencionales suelen ser costosos y pueden afectar de manera irreversible las propiedades del suelo, agua y de los seres vivos que en ellos habitan (Padmavathiamma y Li, 2007). El aumento de los costos y la limitada eficacia de los tratamientos fisicoquímicos han estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías. Por lo que, la fitorremediación representa una alternativa sustentable y de bajo costo para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminantes naturales y antropogénicos (Singh y Jain, 2003; Reichenauer y Germida, 2008).

La fitorremediación ha sido investigada con el fin de entender los procesos de toma y metabolismo de los compuestos orgánicos e inorgánicos por parte de las plantas (Bock et al., 2002), ya que la complejidad del sistema implica una serie de procesos que dependen de los mecanismos que ocurren en su interior, puesto que durante la fotosíntesis, las plantas llevan a cabo la incorporación de la biomasa, la producción de energía en tanto que, se realiza la respiración celular, y la generación de exudados (Janneth Cubillos V. 2011). Para los compuestos orgánicos las plantas los puedes metabolizar a través de los siguientes tres fases:

Fase I. Involucra la conversión/activación (oxidación, reducción e hidrólisis) de los compuestos orgánicos lipofílicos (Komives y Gullner, 2005).

Fase II. Permite la conjugación de los metabolitos de la fase I a una molécula hidrofílica endógena como los azúcares, aminoácidos y glutatona (Diet y Schnoor, 2001).

Fase III. Promueve la compartimentalización de los compuestos orgánicos modificados en las vacuolas o formación de enlaces con los componentes de la pared celular como la lignina y la hemicelulosa. La tercera fase del metabolismo de la planta es la compartimentalización y almacenamiento de los metabolitos solubles en las vacuolas o en la matriz de la pared celular. (Cheriany Oliveira, 2005).

La aplicabilidad de esta tecnología depende del tipo de medio impactado, tipo de contaminante y tipo de proceso que es preferible que ocurra. Según la cooperación interestatal de tecnología y regulación estos procesos incluyen: estabilización, asimilación, reducción, degradación, metabolización y/o mineralización. Dietz and Schnoor (2001) dicen que los procesos en la fitorremediación inician cuando el contaminante se pone en contacto con la raíz de la planta, ya que éste es absorbido o mezclado con la estructura de la raíz y su pared celular; después de esto pueden ocurrir tres pasos, por una parte los contaminantes son tomados vía difusión e incorporados en la pared y membrana celular; por otro lado los contaminantes son tomados y transformados inmediatamente dando paso a la transpiración del mismo, llevándolo desde la raíz hasta las hojas y, finalmente el compuesto es tomado, metabolizado y localizado en las partes de la planta mediante las fases de conversión, conjugación y compartimentación. Dentro de los procesos de fitorremediación, las transpiraciones de las plantas han sido usadas como una medida indirecta para inferir la eficiencia en la toma del contaminante por parte de la misma; siendo esta eficiencia dependiente de la especie de la planta, la edad, estado de salud y propiedades físicoquímicas de la zona de raíces. Así mismo, la tasa de transpiración de las macrófitas varía con el tipo de planta, área foliar, nutrientes, humedad del suelo, temperatura, condiciones de viento y humedad relativa. Los contaminantes son localizados al interior de sus partes, utilizando mecanismos de desintoxicación del compuesto xenobiótico y transformándolo en metabolitos no tóxicos. Existen diferencias entre los procesos ocurridos por parte de los microorganismos y las plantas en un sistema de fitorremediación, ya que en las plantas lo cual es descrito como el efecto del hígado verde; contrario a esto, los microorganismos metabolizan el contaminante pasándolo a dióxido de carbono y agua (Kamath, n.d.). Sin embargo, en la fitorremediación se presenta una simbiosis entre las plantas y los microorganismos de la rizósfera, mediante la pérdida de carbono ocurrida por las raíces (rizodeposición), permitiendo la proliferación de microorganismos en la endorizósfera y ectorizósfera (Jones et al., 2004). Del mismo modo, los microorganismos pueden disminuir la toxicidad para las plantas de algunos compuestos, mediante el uso de enzimas hasta transformarlos en ácidos, alcoholes, CO₂ y agua. La zona de raíces juega un papel importante en la remediación de hidrocarburos, ya que la generación de exudados proporciona una conexión entre los microorganismos y las plantas generando el efecto rizósfera, sin embargo, el tipo de exudado generado depende de planta y otros factores como tipo de suelo, cantidad de nutrientes, pH, disponibilidad de agua, oxígeno, temperatura y otros. Así mismo, la liberación de enzimas por parte de las raíces permite la transformación orgánica de los compuestos mediante reacciones químicas catalizadas (Frick et al., 1999).

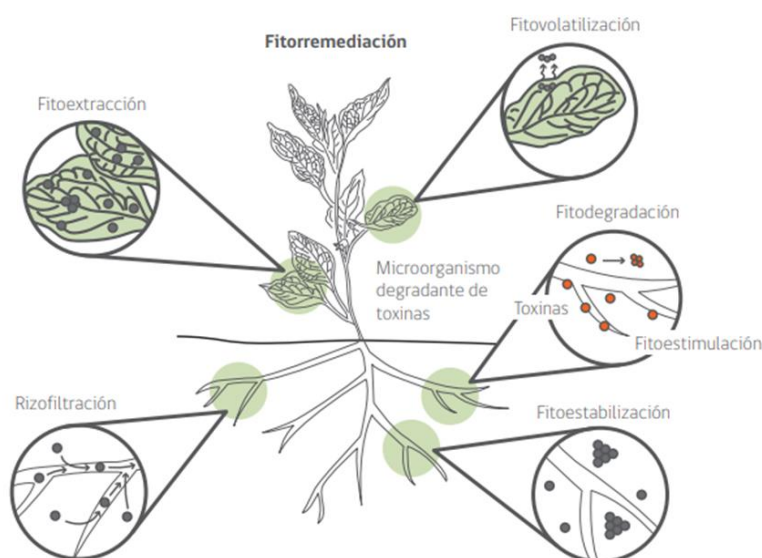
Para la fitorremediación de contaminantes orgánicos se toma en cuenta los siguientes aspectos:

1. el metabolismo de los contaminantes al interior y al exterior de la planta (rizósfera).
2. los procesos que conducen a la completa degradación de los contaminantes (mineralización).
3. la absorción de los contaminantes (Reichenauer y Germida, 2008).

La Fitorremediación engloba una serie de Fitotecnologías, que, dependiendo del tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido se elige el tipo de tecnología se debe utilizar (Thangavel y Subhram (2004)), la cuales son rizofiltración,

fitoestabilización y fitoinmovilización, fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización, actuando como filtros naturales de gran eficacia contra contaminación orgánica e inorgánica. Estas se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen las plantas y los microorganismos asociados a ellas, tales como: la transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición.

Ilustración 3 Tipos de Fitotecnologías



1.2 Tipos de Fitotecnologías:

- **Fitoestabilización:** se fundamenta en plantas que absorben los contaminantes y los inmovilizan en su interior, utiliza plantas que desarrollan un denso sistema de raíz, para reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el ambiente a través de la producción y excreción por las raíces de compuestos químicos que inactivan a las sustancias tóxicas mediante mecanismos de absorción, adsorción o precipitación (solidificación). Las plantas ejercen un control hidráulico en el área contaminada, es decir actúan como una bomba solar que succiona humedad de los suelos debido a sus altas tasas de evapotranspiración. Puesto que este proceso mantiene también una humedad constante en la zona de la rizósfera. Esto ocurre a través de reacciones químicas como la precipitación o formación de complejos insolubles o por mecanismos físicos, como la adsorción. En esta zona, los contaminantes se fijan fuertemente en las raíces de las plantas o en la materia orgánica de los suelos, limitando así su biodisponibilidad y su migración vertical hacia los mantos freáticos. Este mecanismo es principalmente aplicable a contaminantes inorgánicos, ya que en ocasiones es recomendable inmovilizar el compuesto, debido a su incompleta o difícil biodegradación.
- **Rizofiltración:** se basa exclusivamente en hacer crecer plantas en cultivos hidropónicos (que son cultivos sin tierra, sólo con un suero enriquecido que incorpora todos los nutrientes necesarios para la planta) raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial para absorber, concentrar y precipitar los contaminantes. Esta estrategia toma del contaminante dentro de la zona de raíces de

las plantas, debido a la actividad microbiana asociada a la rizósfera. Esta actividad se ve favorecida debido a las proteínas y enzimas que producen los exudados de carbono, energía, nutrientes, azúcares, aminoácidos y otros compuestos que garantizan las condiciones apropiadas para el crecimiento microbiano (Van Deeps, 2006). Del mismo modo, las raíces proporcionan un medio de soporte para las bacterias, contienen una fuente de carbono y transfieren el oxígeno desde el ambiente, estimulando la degradación aerobia. Para propiciar este tipo de mecanismo dentro de la fitorremediación, las plantas a usar deben proveer un gran sistema de raíces que sea largas y ramificadas (Janneth Cubillos V. 2011).

- **Fitoestimulación o rizodegradación:** Se utiliza plantas que estimulen el crecimiento de microorganismos capaces de degradar contaminantes orgánicos y que viven en las raíces de estas. Como parte de sus actividades metabólicas y fisiológicas, las plantas liberan azúcares simples, aminoácidos, compuestos alifáticos y aromáticos, nutrientes, enzimas y oxígeno, y los transportan desde sus partes superiores hasta sus raíces, favoreciendo el desarrollo de comunidades microbianas en el suelo circundante; particularmente hongos y bacterias, cuyas actividades metabólicas causan la mineralización de los contaminantes.
- **Fitoextracción o Fitoacumulación:** En esta fitotecnología se explota la capacidad de algunas plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje, las cuales pueden ser fácilmente cosechadas. Los contaminantes extraídos son principalmente metales pesados, aunque también puede extraerse cierto tipo de contaminantes orgánicos y elementos e isótopos radiactivos. Generalmente los sistemas de fitoextracción se implementan para extraer metales de suelos contaminados, por medio de plantas conocidas como metalofitas, es decir acumuladoras de metales; sin embargo, también pueden implementarse para tratar aguas residuales. En este proceso la planta absorbe y/o concentra el compuesto contaminante en sus partes cosechables, tejidos de hojas y tallos (Carpena y Bernal, 2007)
- **Fitodegradación o Fiotransformación:** se basa en el uso de plantas para degradar o transformar en sustancias menos tóxicas diversos tipos de contaminantes orgánicos, a través de reacciones enzimáticas que llevan a cabo plantas y microorganismos en la rizósfera, es decir, la zona del suelo estrechamente asociada con las raíces de las plantas, dichos contaminantes son parcial o completamente degradados o transformados. De esta manera son asimilados por las plantas y secuestrados en sus vacuolas o fijados a estructuras celulares insolubles, como la lignina. Las plantas Fitodegradadoras poseen enzimas especiales que son la dehalogenasa y la oxigenasa; la primera favorece la remoción de halógenos de compuestos químicos y la segunda oxida sustancias, estas enzimas provocan la ruptura de las moléculas de los compuestos contaminantes, transformándolas en moléculas más pequeñas, no tóxicas o menos tóxicas, y también pueden mineralizar los contaminantes hasta compuestos sencillos, asimilables, como dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). En este proceso las enzimas y proteínas de las plantas dan paso a reacciones químicas que generan un rompimiento de las moléculas de los contaminantes, según Dietz and Schnoor (2001), la Fitodegradación se da bajo tres fases: conversión (reacciones oxido- reducción, hidrólisis), conjugación (con azúcares y aminoácidos) e incorporación a la planta (vacuola, pared celular), los cuales son usados por estas para su propia desintoxicación. Durante la fase I y II, los productos de las reacciones oxido-

reducción son conectados con azúcares y aminoácidos, alterando la solubilidad y toxicidad del contaminante por parte de la planta. En la fase III, una vez la conjugación está dada, los compuestos xenobióticos pueden ser removidos como residuos, siendo segregados dentro de las vacuolas o pared celular (Kamath, n.d.).

- **Fitovolatilización:** algunas plantas son capaces de volatilizar ciertos contaminantes, contenidos en suelos, sedimentos o agua. Tales contaminantes son absorbidos, metabolizados, trasportados desde su raíz a sus partes superiores y liberados a la atmósfera en formas volátiles, menos tóxicas o relativamente menos peligrosas en comparación con sus formas oxidadas. La transformación de dichos elementos se efectúa básicamente en la raíz, y su liberación se lleva a cabo durante la transpiración.

Tabla 2: Tipo de fitotecnología y su mecanismo.

Proceso	Mecanismo	Contaminantes
Fitoestabilización	Complejación	Orgánicos e inorgánicos
Fitoextracción	Hiperacumulación	Inorgánicos
Fitovolatilización	Volatilización a través de las hojas	Orgánicos e inorgánicos
Fitoinmovilización	Acumulación en la rizosfera	Orgánicos e inorgánicos
Fitodegradación	Uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes	Orgánicos
Rizofiltración	Uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua	Orgánicos e inorgánicos

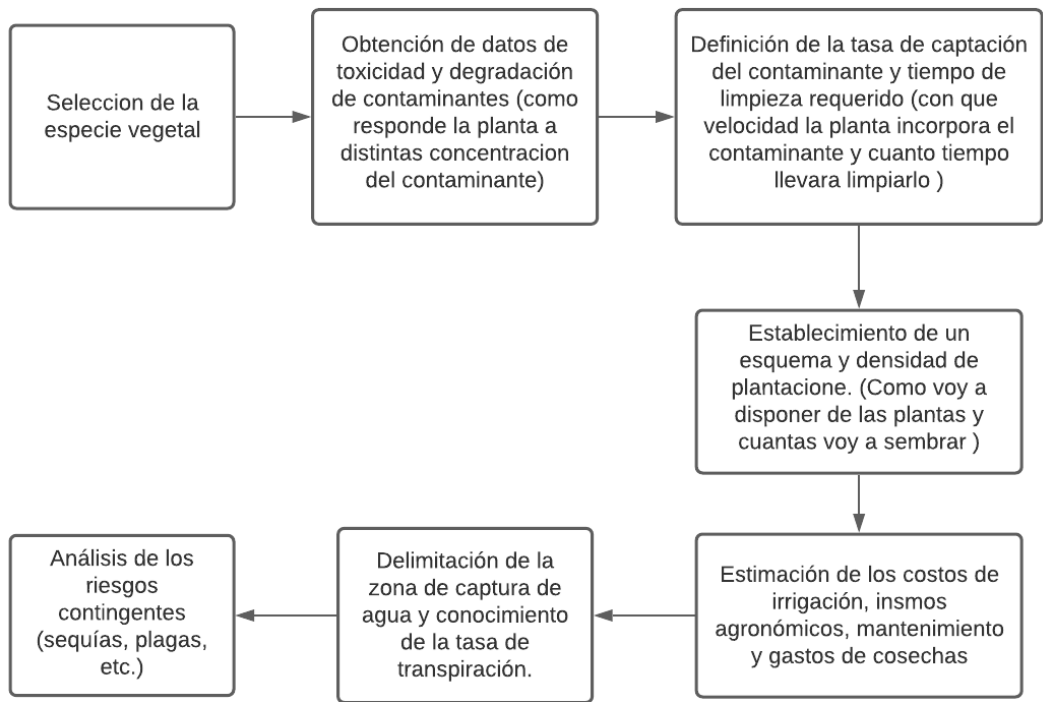
Fuente: Ghosh y Singh, 2005

Además, el éxito de la fitorremediación depende:

- La selección juiciosa de las especies.
- Su capacidad de sobrevivir.
- El clima en la región geográfica.
- Las plantas elegidas tengan tolerancia a Concentraciones relevantes del contaminante.

Para poder diseñar un sistema de fitorremediación se debe tener en cuenta los siguientes pasos:

Tabla 3: Pasos a seguir y tener en cuenta a la hora de planear un esquema de fitorremediación.



Fuente: Zimicz, Carolina. (s. f.)

2. Fitorremediación en el suelo

El suelo es un recurso natural de enorme importancia cuya salud está ligada a la supervivencia de nuestra especie. Por desgracia, derrame de hidrocarburos es un asunto cada vez más común, ya que es un hecho frecuente en las estaciones de servicio y parques de almacenamiento, producida principalmente por fugas en los tanques de almacenamiento. Como alternativa de recuperación 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 se puede integrar con la bioaumentación, por medio de las bacterias y hongos promotoras del crecimiento vegetal. En esta situación las integraciones de ambas técnicas promueven el crecimiento, desarrollo y efectividad de las plantas durante la absorción de contaminantes (Balderas-León & Sánchez-Yáñez. 2015), ya que la bioaumentación consiste en la inoculación de microorganismos o consorcios microbianos con el objetivo de aumentar la degradación del contaminante en sitios con bajos recuentos de microorganismos degradadores o cuando el contaminante es recalcitrante y tóxico (Tyagi,2011; Wu, 2016; Ortiz,2018) para los suelos contaminado los consorcios mixtos entre bacterias y hongos tienen la capacidad de degradar eficientemente los HCs del petróleo debido al crecimiento hifal de los hongos, el cual actúa como vector para la movilización de bacterias (Zhang, 2008; Ghorbannezhada, 2018).

Cabe destacar que la función de la fitorremediación no solo es eliminar, disminuir o reducir la concentración del contaminante del suelo, sino que tiene otra función importante que es recuperar y mejorar la calidad de suelo. Los indicadores biológicos de la calidad del suelo, en especial aquellos relacionados con la biomasa, actividad y biodiversidad de las comunidades microbianas, presentan un enorme potencial como herramienta monitorizadora de la eficacia de un proceso fitorremediador. (C. Garbisu, J.M. Becerril, L. Epelde, I. Alkorta, 2007).

2.1 Bioindicadores de la calidad del suelo

Los bioindicadores son organismos o sistemas que son especialmente sensibles a la calidad de distintos factores ambientales y a los cambios de estos. Esto quiere decir que la presencia o no de una especie puede indicarnos que existe una alta calidad de suelo, agua o, todo lo contrario. Además, cuando se produce alguna alteración del entorno ya sea natural o no, algunos organismos desarrollan una respuesta determinada, incluso pueden acumular el agente contaminante que sirve para detectarlo (Sara N.A, 2018). Y son muy útiles en los estudios de contaminación; estos indicadores deberían permitir:

1. Analizar la situación actual e identificar los puntos críticos con respecto al desarrollo sostenible.
2. Analizar los posibles impactos antes de una intervención.
3. Monitorear el impacto de las intervenciones antrópicas.
4. Ayudar a determinar si el uso del recurso es sostenible.

Las especies tienen requerimientos físicos, químicos, de estructura del hábitat y de relaciones con otras especies. A cada especie o población le corresponden determinados límites de estas condiciones ambientales entre las cuales los organismos pueden sobrevivir (límites máximos), crecer (intermedios) y reproducirse (límites más estrechos). En general, cuando más estenoica sea la especie en cuestión, es decir, cuando más estrechos sean sus límites de tolerancia, mayor será su utilidad como indicador ecológico. Las especies bioindicadoras deben ser, en general, abundantes, muy sensibles al medio de vida, fáciles y rápidas de identificar, bien estudiadas en su ecología y ciclo biológico, y con poca movilidad (Puig, A). Además, debe cumplir con las siguientes condiciones (Masera et al., 1999):

- Ser integradores.
- Ser fáciles de medir, basados en información objetiva y fácil de reconocer.
- Ser adecuados al nivel de análisis y al sistema estudiado.
- Ser preferentemente aplicables a un rango de ecosistemas y condiciones.
- Reflejar el atributo de sostenibilidad que se quiere evaluar.
- Ser fáciles de entender.
- Permitir cambios y diferencias entre los sistemas.
- Centrarse en aspectos prácticos y claros.

- Deben ser sensibles a los cambios que sufre el suelo, tanto en los procesos de degradación como en los de recuperación.
- Debe haber una alta correlación con los procesos del ecosistema.
- Deben integrar los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo.
- Deben ser relativamente fáciles de medir en condiciones de campo, tanto por los productores como por los especialistas ((García et al., s/f)).

El uso de organismos indicadores de contaminación requiere conocer las tolerancias ecológicas y los requerimientos de las especies, así como sus adaptaciones para resistir contaminantes agudos y crónicos. Las investigaciones sobre organismos indicadores de polución comprenden el estudio autoecológico, en el laboratorio, para establecer los límites de tolerancia de una especie a una sustancia o a una mezcla de ellas mediante ensayos de toxicidad; y el sinecológico, que se basa en la observación y análisis de las características ambientales de los sitios en los cuales se detectan con más frecuencia poblaciones de organismos de cierta especie. La mayoría de los estudios estiman características estructurales a diferentes niveles de organización, como cambios en la estructura celular, o en la diversidad de especies, pero, más recientemente, se han incluido características funcionales, como producción y respiración (Puig, A).

Recientemente, los indicadores biológicos o bioindicadores de la salud del suelo han surgido con fuerza en este campo debido al hecho de su mayor sensibilidad y rapidez de respuesta frente a las perturbaciones variables introducidas en el ecosistema del suelo y, sobre todo, por su carácter integrador (Alkorta et al., 2003). Algunos de los parámetros biológicos con potencial indicador de la salud del suelo más utilizados son: biomasa microbiana, respiración basal, nitrógeno mineralizarle, actividades enzimáticas, grupos funcionales de la microflora, composición y diversidad de las comunidades microbianas, abundancia y diversidad de macro-, meso- y micro-fauna, patógenos de raíces, crecimiento y diversidad de plantas, etc. (Pankhurst et al., 1997). Sin duda, los indicadores biológicos de la salud del suelo, en especial aquellos relacionados con la biomasa, actividad y biodiversidad de las comunidades microbianas, presentan un enorme potencial como herramienta monitorizadora de la eficacia de un proceso fitorremediador. (C. Garbisu, J.M. Becerril, L. Epelde, I. Alkorta).

Aunque la biomasa microbiana del suelo puede representar una fracción relativamente pequeña del total de la biomasa en los ecosistemas terrestres, que según algunas estimaciones representa del 1 al 5% de la fracción orgánica del suelo, la actividad de la misma es de la máxima importancia para la biodegradación, la mineralización y la inmovilización de los constituyentes orgánicos (Jenkinson, 1992; Labrador, 2001).

Como se menciona anteriormente uno de los bioindicadores más utilizados para la calidad del suelo es la biomasa puesto que es muy sensible a los cambios y siendo esta una fuente de energía renovable, es de todo tipo de materia orgánica que tiene origen en un proceso biológico (Kumar et al., 2015). Y se puede dividir en:

Biomasa Microbiana

La biomasa microbiana constituye el componente vivo de la materia orgánica del suelo y por lo tanto responde rápidamente al efecto de perturbación o recuperación del suelo (Rice & al., 1996; Ross & al., 2001). Los microorganismos juegan un papel importante en el desarrollo y

conservación del suelo. Las alteraciones en la biomasa microbiana, como el descenso de la misma, parece estar determinado por propiedades de las comunidades microbianas, su tipología y actividad, así como por las condiciones climáticas a las que se ve sometido el suelo, más que a sus características edáficas (Van Gestel & al., 1991).

El carbono de la biomasa microbiana ha demostrado ser un indicador sensible a cambio en el manejo del suelo, contaminación, cobertura vegetal, adición de enmienda, etc (Liaoy Xiao, 2007). Se han demostrado que los suelos con hidrocarburo que contienen este carbono de biomasa han tenido mejores resultados que los que no la contienen. Ya que los hidrocarburos actúan como una fuente carbonada para los microorganismos, lo que junto con las condiciones óptimas (oxigenada y humedad) para la degradación de los hidrocarburos que se han establecidos durante la incubación, favorece considerablemente el desarrollo de la biomasa microbiana del suelo (Rodríguez Alhama, I. (2013)). El incremento del carbón de la biomasa es consecuencia tanto de la estimulación de las poblaciones autóctonas del suelo, debido a los nutrientes y fuentes de carbono biodegradable que estos materiales incorporan al suelo, como de la propia biomasa microbiana también existen en ellos y que pasa a engrosar la que ya habita en el suelo (Rodríguez Alhama, I. (2013)).

Biomasa Vegetal

Es el resultado directo de la actividad fotosintética de los vegetales, la biomasa vegetal se utiliza como alimento para el hombre y los animales, o como materia prima en la fabricación y obtención de diversas sustancias industriales. Es producida espontáneamente en las tierras no cultivadas y sin intervención humana durante la fotosíntesis donde se absorbe la energía solar en la clorofila y se transforma el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el agua del suelo en carbohidratos que almacenan energía química, mediante el proceso de conversión fotoelectroquímica de la fotosíntesis (Bustamante-García et al., 2013). Los carbohidratos se componen, principalmente, de hidratos de carbono, lípidos y proteínas, los cuales están en una proporción variable, en función de la naturaleza de la biomasa. La unidad estructural de todo organismo vegetal es la célula, la cual está compuesta de una pared celular que es una capa resistente, pero generalmente flexible, aunque en ocasiones es rígida y proporciona soporte estructural a las plantas. Además, le da protección a las tensiones mecánicas y térmicas. Sus principales constituyentes son hemicelulosa, celulosa, lignina y componentes extraíbles (Montoya-Arbeláez et al. 2014). Para que la biomasa vegetal funcione mejor es recomendable agregarles enmiendas orgánicas como los biosólidos y compost de biosólido, ya que estos incrementan el rendimiento de la biomasa en las plantas y el suelo contaminado y así obtener mejores resultados.

2.2 Metodología del suelo

- *Fertilizar*: Compuestos que se añaden al suelo para mejorar sus propiedades físicas, químicas y/o biológicas, favoreciendo el crecimiento de las plantas, ya que éstas requieren una serie de nutrientes para desarrollarse bien, florecer en cantidad y con calidad, dar buenos frutos y resistir sequías y heladas.
- *Bioaumentación*: Consiste en la inoculación de plantas con microorganismos que puedan potenciar el crecimiento vegetal o la tolerancia a los contaminantes, o influir en la acumulación de metales traza o la degradación de contaminantes orgánicos.

- *Cultivos Agrícolas*: se escoge la planta a cultivar (se debe saber el tipo de contaminante y la Fitotecnología que se utilizará).
- *Sistemas Agroforestales*: Para potenciar la eficiencia de la fitorremediación se intercalan plantaciones forestales con cultivos agrícolas, o se establecen policultivos de especies arbóreas, que incluyen leguminosas, o plantas que forman asociaciones con microorganismos fijadores de nitrógeno.

3. Fitorremediación en el 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 se refieren a aguas contaminadas con hidrocarburos la cantidad de publicaciones disminuyen drásticamente.

Además de la fitorremediación, se han buscado otras alternativas que permitan controlar la contaminación. Una de estas alternativas consiste en usar los residuos de biomasa, aprovechando las fibras de esta planta como materia prima en la elaboración de productos artesanales. Los materiales obtenidos posibilitan el crecimiento de una actividad económica alternativa, generando un impacto ambiental.

La Biomasa es la fracción biodegradable de los productos y residuos de la agricultura, la forestación y sus industrias asociadas. Dicha biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede, en última instancia, de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta materia orgánica es renovable cuando se produce a la misma velocidad de consumo, evitando la sobreexplotación de los recursos naturales. (Arturo Orgaz 1279). La biomasa de algunas plantas acuáticas representa una buena opción como adsorbente, dado que sus características fisicoquímicas la hacen un excelente adsorbente no sólo de hidrocarburos sino también de iones metálicos (Olguín E.J, Hernández. M y Sánchez. G 2007).

La degradación de hidrocarburos en sistemas de humedales puede ocurrir no solo por asimilación por parte de las plantas sino también de la actividad aerobio o anaerobia de los microorganismos que en estos se encuentre, siendo esta última, la que mayor aporte realiza en la descomposición de estos complejos compuestos. (Janneth Cubillos V. 2011).

3.1 Bioindicadores de la calidad del agua

La calidad del agua es un factor importante para asegurar la salud y la vida de las especies; Muchos organismos, sumamente sensibles a su medio ambiente, cambian aspectos de su forma, desaparecen o, por el contrario, prosperan cuando su medio se contamina. Cada etapa de autodepuración en un río que sufre una descarga de materia orgánica se caracteriza por la presencia de determinados indicadores. Según su sensibilidad a la polución orgánica se clasifican especies como intolerantes, facultativas, o tolerantes. (Puig, A (s.f)).

Un organismo se considera bioindicador siempre y cuando se conozca el grado de tolerancia del mismo, no todos pueden darnos información debido a sus hábitos alimentarios o a su ciclo de vida (Odum (1972)), define a los organismos indicadores como la presencia de una especie

en particular, que demuestra la existencia de ciertas condiciones en el medio, mientras que su ausencia es la consecuencia de la alteración de tales condiciones. Para que un organismo sea un bioindicador se requiere de un conocimiento previo respecto a su composición comunitaria bajo condiciones normales, incluyendo el ciclo de vida de las especies, su estacionalidad y sus variaciones naturales, de manera que sea posible comparar las condiciones antes y después de una perturbación ambiental (Raz-Guzmán, 2000).

Los macroinvertebrados acuáticos se consideran actualmente como los mejores bioindicadores de la calidad del agua, debido a su tamaño, a su amplia distribución y a su adaptación a diferentes variables fisicobióticas. En los últimos años el concepto de la calidad de las aguas ha ido cambiando de un enfoque fisicoquímico a otro que integre todos los componentes del ecosistema (Lozano Ortiz, L. (2005)). Se considera que un organismo es buen indicador de calidad de agua, cuando se encuentra invariablemente en un ecosistema de características definidas y cuando su población es superior al resto de los organismos con los que comparte el mismo hábitat (Pérez. Roldán, 1992). Usualmente los biólogos emplean bioindicadores de contaminación debido a su especificidad y fácil monitoreo (Washington, 1984). Aunque estos también presentan limitaciones tales como: el ajuste de índices bióticos para distintas regiones, el muestreo implica mayor tiempo, la información de cada bioindicador es cualitativa y para la identificación taxonómica que se requiere experiencia. Para obtener una evaluación integral será necesario realizar conjuntamente análisis fisicoquímicos o pruebas de toxicidad (Saldaña et al., 2001). Las bacterias, los fitoplanctos, los peces y los macroinvertebrados Bentónicos son algunos ejemplos de organismos que se pueden utilizar como bioindicadores.

3.2 Metodología del agua

Los sistemas de fitorremediación acuática se han perfeccionado, y su aceptación y aplicación cada vez es mayor. Este sistema tiene la ventaja de que se pueden remover, in situ, diferentes tipos de contaminantes que se hallen con bajas concentraciones en grandes volúmenes de agua.

Los sistemas de fitorremediación acuática pueden ser de cuatro tipos:

- *Humedales contruidos*: se definen como un complejo de sustratos saturados, vegetación emergente y sub-emergente, animales y agua que simula los humedales naturales, diseñado y hecho por el hombre para poder controlar los mecanismos de eliminación de contaminantes presentes en aguas residuales, que se dan en los humedales naturales mediante procesos físicos, biológicos y químicos.
- *Sistema de tratamiento con plantas acuáticas flotantes*: pueden ser estanques semiconstruidos o naturales, donde se mantienen plantas flotantes para tratar aguas residuales.
- *Sistema de tratamiento integral*: es una combinación de los dos sistemas anteriores. La recuperación del agua es una actividad estratégica fundamental con una triple dimensión: ecológica, económica y profesional.
- *Sistema de rizofiltración*: Se ha demostrado que estos sistemas pueden remover eficientemente fosfatos, nitratos, fenoles, pesticidas, metales pesados, elementos

radiactivos e Hidrocarburos., de aguas residuales municipales, agrícolas e industriales. (Núñez. R. A, Meas Vong. Y, Ortega. R y Olguín. E. J (2004)).

El papel de las plantas en los humedales flotantes está enfocado principalmente a permitir el paso del agua a través de sus raíces, facilitando la toma de nutrientes y metales, y al mismo tiempo promover los procesos de sedimentación y filtración directa de compuestos (White et al., 2009).

3.3 Plantas Acuáticas

Antes las plantas acuáticas se consideraban como una plaga en sistemas enriquecidos con nutrientes. Sin embargo, en la actualidad se considera que estas plantas, también pueden ser manejadas adecuadamente y volverse útiles, debido a su capacidad para remover y acumular diversos tipos de contaminantes. Además, su biomasa puede ser aprovechada como fuente de energía, forraje y fibra. Las plantas utilizadas en los sistemas de fitorremediación acuática se clasifican en tres grupos:

- **Emergentes:** son plantas que viven en aguas poco profundas, arraigadas en el suelo, donde la raíz de estas plantas está enterrada en los sedimentos y su parte superior se extiende hacia arriba de la superficie de agua, pudiendo llegar hasta alturas de dos y tres metros.
- **Flotantes:** se subdividen en dos grupos.
 - a) *Plantas de libre flotación (no fijas):* sus tallos y hojas se desarrollan sobre la superficie del agua. Sin embargo, sus raíces no están fijas en ningún sustrato y cuelgan en la columna de agua.
 - b) *Plantas de hoja flotante (fijas):* tienen sus hojas flotando sobre la superficie del agua, pero sus raíces están fijas en los sedimentos.
- **Sumergidas:** se desarrollan debajo de la superficie del agua o completamente sumergidas. Sus órganos reproductores pueden presentarse sumergidos, emerger o quedar por encima de la superficie de agua. (Núñez. R. A, Meas Vong. Y, Ortega .R y Olguín. E. J (2004)).

4. Fitorremediación en Chile

En Chile, las experiencias de remediación han sido, en su mayoría experimentales, a nivel académico. Las Universidades, principalmente en las ramas de ciencia e ingenierías.

El proyecto Fondef parte en 2007, en el salar de la India, que es propiedad de Codelco Norte, fue utilizada como depósito de desechos de minería en los últimos 50 años.

2011 el Ministerio de Minería promulga la Ley 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones del rubro. Ahí se establece que, una vez finalizada la actividad extractiva minera, se debe asegurar la estabilidad física y química del lugar. Y eso hace que, en el año 2012, el CIMM, Centro de Investigación Minera y Metalúrgica específicamente su área de

Cobre y Medio Ambiente, quien lleva la delantera en proyectos de fitorremediación, específicamente de fitoestabilización.

En el 2013 se realiza otro proyecto que pretende recuperar las aguas contaminadas para utilizarlas en riego y así aumentar la productividad de la Región de Arica y Parinacota. Este plan es cofinanciado por la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) y ejecutado por la Universidad de Tarapacá.

En Chile la planta Vetiver es la más utilizada para estos proyectos, ya que son una de las plantas más importantes y más útiles a nivel mundial, ya que lucha contra la erosión y en la conservación del agua, tienen una alta resistencia a ambientes extremos. Se ha identificado como la planta con mayores capacidades fitorremediadoras de suelos y aguas. Su rango fitorremediador abarca a todos los contaminantes.

5. Plantas

Las plantas son los organismos vivos pluricelulares que habitan el planeta Tierra y que se diferencian de los animales y los seres humanos porque, a pesar de que no tienen movilidad ni pueden desplazarse grandes distancias, poseen la capacidad de elaborar su propio alimento a través del proceso de fotosíntesis. Ellas captan la energía de la luz del sol a través de la clorofila y convierten el dióxido de carbono y el agua en azúcares que utilizan como fuente de energía. Una planta se compone por:

- Raíz: Es la parte de la planta que se encuentra por debajo de la tierra. Su función principal consiste en absorber minerales y agua del suelo, así como de mantener sujeta la planta.
- Tallo: Es el que le da soporte a la planta; algunos tallos son delgados y flexibles. Las funciones principales son: sostener los órganos del vegetal (flores, hojas y frutos) y, conducir a través de su interior la savia, de la raíz a las hojas y flores.
- Hoja: Es la estructura donde se realiza la fotosíntesis y la respiración. Las hojas pueden nacer a diferentes alturas de la planta, generalmente, las que se encuentran más arriba suelen tener un color más claro.
- Flor: Es el órgano reproductor, ya que en su interior posee todos los órganos que necesita para fabricar el fruto y la semilla.

Las plantas verdes pueblan toda la tierra, y son los únicos seres vivos capaces de captar la energía del sol para fabricar materia orgánica y liberar oxígeno. Por esta razón, son indispensables para la vida de otros organismos. De hecho, como todos los seres vivos, las plantas cumplen unas funciones bastante significativas que podemos enumerar a continuación:

1. Son las principales productoras de oxígeno: Las plantas absorben el dióxido de carbono emanado por los seres vivos, y con ayuda de la energía solar, llevan a cabo el proceso de fotosíntesis para producir su alimento. Afortunadamente para todos, uno de los subproductos de este proceso es el oxígeno que es devuelto al medio ambiente.
2. Contribuyen en el equilibrio de los ecosistemas: Estos seres vivos contribuyen en la regulación de las temperaturas extremas, pues en invierno pueden emitir calor, elevando la temperatura de algunos de sus órganos como las flores, los frutos e incluso las hojas; y en verano aportan humedad en forma de vapor de agua.
3. Son la base de la cadena alimentaria o cadena trófica: Al ser el alimento de los demás seres vivos, los animales y los seres humanos, dan inicio al ciclo de la vida del planeta.

Existe una inmensa variedad de plantas, algunas muy simples, otras muy evolucionadas. Forman parte de todos los ecosistemas y se han adaptado a diversos climas y condiciones del suelo. Algunas pueden vivir en sitios muy secos, otras necesitan agua abundante.

5.1 ¿Las plantas pueden ser tolerantes a los hidrocarburos?

Los Hidrocarburos son tóxicos para las plantas y la tolerancia a ellos es muy variable en el reino vegetal (Adam y Duncan, 2002; Quiñones-Aguilar et al., 2003). Esto puede provocar la germinación retardada de las semillas, el decremento en la producción de pigmentos fotosintéticos, la reducción del tamaño de la parte aérea y de la raíz son efectos tóxicos que se observan comúnmente (Chaîneau et al., 1997; Adam y Duncan, 2002; Flocco et al., 2002).

Algunos autores han observado que la formación de una capa de Hidrocarburos en la raíz de plantas que crecen en presencia de estos contaminantes, tengan algún daño por la disolución de membranas y el consiguiente gasto energético para mantener la arquitectura de la raíz. Además, esta capa podría evitar el contacto adecuado de la raíz con la fase acuosa y, por ende, el abasto de nutrimentos al resto de las plantas (Udo y Fayemi, 1975; Chaîneau et al., 1997). Otra característica agronómica que recientemente ha llamado la atención es la de las relaciones suelo-agua en los suelos contaminados, se ha observado que el agua no queda retenida en estos suelos, debido a su alta hidrofobicidad; en consecuencia, las plantas que se siembran en estos suelos tienen una baja eficiencia en el uso de agua, siendo ésta tan severa que puede llegar a disminuir marcadamente su crecimiento (Li et al., 1997) y germinación, aun en especies reportadas en casos exitosos de fitorremediación (Adam y Duncan, 2002). De esta forma, se ha propuesto que la tolerancia a la sequía puede permitir a las plantas ser también tolerantes a los Hidrocarburos y se recomienda como una característica agronómica deseable en plantas empleadas en la fitorremediación de compuestos orgánicos (USEPA, 2000). Otras investigaciones indican que la alta demanda biológica de oxígeno que exigiría la degradación de hidrocarburo, aun en concentraciones relativamente pequeñas como 1.5 [g] de hidrocarburo [kg-1] de suelo, agotaría el oxígeno en la columna de suelo, creando fuertes condiciones anaerobias que afectan negativamente el desarrollo de las raíces y de los microorganismos (Rentz et al., 2003). En adición, el estrés por carencia de oxígeno también puede crearse por las pobres condiciones agronómicas que provoca la contaminación por hidrocarburo en el suelo y por la formación de capas hidrofóbicas alrededor de las raíces, pues, al igual que en el caso del agua, la difusión de oxígeno del aire puede verse impedida. Lo anterior se ha señalado como la principal causa en el retraso de la germinación de semillas en presencia de hidrocarburo (Chaîneau et al., 1997; Adam y Duncan, 2002).

Para poder evitar que esto ocurra se pueden utilizar bioestimulante para que promuevan y aceleren los procesos fisiológicos de las plantas y ayuden a que estas puedan sobrevivir a cualquier condición extrema. Los bioestimulantes son sustancias orgánicas que se utilizan para potenciar el crecimiento y desarrollo de las plantas y entregar mayor resistencia a las condiciones de estrés bióticos y abióticos, tales como temperaturas extremas, estrés hídrico por déficit o exceso de humedad, salinidad, toxicidad, incidencia de plagas y/o enfermedades. Su composición puede incluir auxinas, giberelinas, citoquininas, ácido abscísico, ácido jasmónico u otra fitohormona (Morales A, C. G. (s.f.)); durante este proceso se suministran factores limitantes como nutrientes y aceptores de electrones que estimulan el metabolismo y la velocidad de crecimiento de los degradadores, lo cual acelera las tasas de biodegradación si las condiciones ambientales son favorables (Marguesin y Schinner, 1997; Marguesin et al., 2000; Kaplan y Kitts, 2004). La adición de nutrientes en ambientes contaminados permite una degradación más rápida y eficaz de los hidrocarburos por parte de los microorganismos

nativos (Hamme et ál., 2003; Margesin et ál., 2003a, b), estudios previos reportan que la bioestimulación acelera las tasas de biodegradación en suelos contaminados con TPHs, controlando factores como pH, porcentajes de humedad, concentración de TPHs (fracciones de difícil degradación), aceptores de electrones y temperatura. Sin embargo, en la mayoría de estos estudios se logra incrementar la actividad de biodegradación únicamente con la adición de nutrientes en forma de fertilizantes inorgánicos compuestos y sales inorgánicas simples (Dibble y Bartha, 1979; Song y Bartha, 1990; Song et ál., 1990; Margesin et ál., 2000; Margesin y Schinner, 2001; Broock et ál., 2001; Coulon y Delille, 2003; Yerushalmi et ál., 2003).

La bioestimulación es el método más empleado para reducir la concentración de contaminantes (Cunningham C. Y Philip J, 2000). En la bioestimulación la actividad natural de los microorganismos es estimulada por la circulación de soluciones a través del suelo contaminado con nutrientes y oxígeno u otro aceptor de electrones (Gómez, W., Gaviria, J., & Cardona, S. (s/f)).

Algunas plantas que pueden crecer en suelos contaminados por hidrocarburos son las gramíneas *Cynodon dactylon* y *Festuca arundinacea* (Banks, 1997), *Echinochloa polystachya* y *Paspalum virgatum* (Rivera-Cruz et al., 2002) y las leguminosas *Phaseolus vulgaris* y *Trifolium repens* (Banks, 1997; Chaîneau et al., 1997).

5.2 Plantas Fitorremediadoras

Estas plantas deben tener una habilidad notable para extraer y concentrar contaminantes a partir del aire a través de las estomas, y del agua y suelo por medio de su rizósfera, también deben ser tolerantes y resistentes a la presencia del contaminante; Por otro lado, dada la particularidad de que las plantas carecen de la habilidad de desplazarse, éstas han creado sistemas bioquímicos únicos para la adquisición de nutrientes, control y detoxificación en la rizósfera (Jagadeesan, G., y Kavitha, A. 2006). Además de estas adaptaciones fisiológicas, el sistema de raíces de las plantas puede hacer infiltraciones en grandes volúmenes de suelo (Xia, H. 2004). Como resultado de estas ventajas surge el interés de usar a las plantas como medio para enfrentar la contaminación ambiental y recuperar sitios contaminados. Por tal razón la fitorremediación se considera ahora una tecnología prometedora, de bajo costo y amigable con el ambiente, con la cual, de manera integral, se podrán recuperar distintos sitios contaminados (Moreno, F., et al. 2008). El crecimiento de estas 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. Como existen una variedad de plantas que son utilizadas para la fitorremediación y todas comparten una serie de características que las hacen favorable para esta técnica (Zimicz, Carolina. (s. f.)) y además las hacen óptimas para lograr buenos resultados; estas características son:

- Capacidad para crecer en lugares contaminados.
- Ser tolerantes a altas concentraciones del contaminante.
- La habilidad de degradarlo y/o acumularlo en su biomasa.
- Tener una rápida tasa de crecimiento y alta productividad.
- Tener alta producción de tejido vegetal.

- Ser fácilmente cosechables.
- Raíces profundas.
- Buena competitividad.

Una planta fitorremediadora puede realizar cualquier fitotecnología siguiendo estas tres fases:

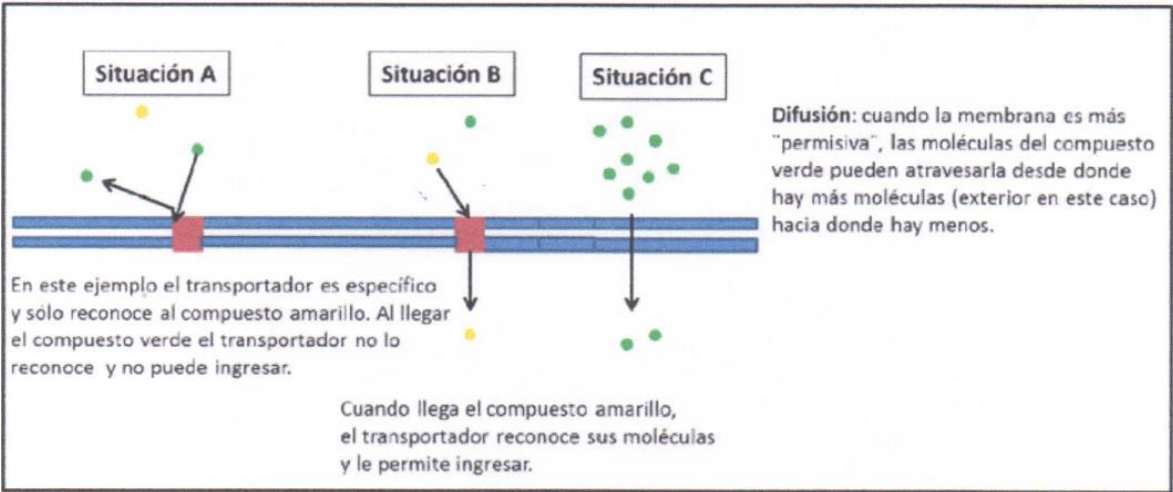
- La absorción de contaminantes se realiza a través de las raíces y las hojas mediante las estomas y la cutícula de la epidermis (Watt y Evans 1999). Esta absorción ocurre en la rizo dermis de las raíces jóvenes, que absorben los compuestos por ósmosis dependiendo de factores externos como la temperatura y el pH del suelo. (Harvey et al. 2002).
- Los contaminantes que se absorben por las raíces se excretan vía hojas (fitovolatilización). Cuando las concentraciones de los contaminantes son elevadas, solo pequeñas fracciones (menos del 5 %) se excretan sin cambios en su estructura química.
- La desintoxicación de los compuestos orgánicos se lleva a cabo por la vía de la mineralización hasta dióxido de carbono.

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 este proceso 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, para que una planta tenga estas características se pueden modificar genéticamente.

Existe una serie de factores que inciden sobre la velocidad y efectividad del proceso de fitorremediación en sí:

- 1) **Tipo de contaminante:** dependiendo si el contaminante es orgánico o inorgánico, es la dificultad de la captación de la planta. Ya que las células de las plantas poseen una membrana plasmática que posee estructuras conocidas como transportadores específicos, que cuando reconocen un compuesto en el exterior de la célula permiten ingreso al interior, pero cuando no lo hacen, el compuesto no puede ingresar. Por tanto, los contaminantes orgánicos no tienen transportadores específicos en plantas e ingresan por difusión, ya que son menos tóxicos y no se acumulan en altos niveles. En cambio, los contaminantes inorgánicos son incorporados mediante las fitotecnologías mencionadas anteriormente, puesto que no son nutrientes o similares y las plantas no los reconocen como tal y no los deja pasar por la membrana, pues causan daños tóxicos en la estructura de la planta. (Zimicz, Carolina. (s. f.)).

Ilustración 4 Esquema de una membrana plasmática, representando el transporte de molécula mediante transportadores específicos y por difusión. Los círculos verdes, que no tienen un transportador específico en la membrana estarían representando a los contaminantes



Fuente: Zimicz, Carolina. (s. f.)

2) **Biodisponibilidad del contaminante:** este aspecto depende fuertemente de:

- Características físico-químicas: los contaminantes que no se disuelven en agua se unen fuertemente a la materia orgánica, con lo cual ya no pueden ser absorbido por plantas. Los contaminantes que se evaporan fácilmente pueden liberarse a la atmósfera sin transformaciones, mientras que los que no, son degradados o secuestrados por las plantas (Zimicz, Carolina. (s. f.)).
- Propiedades del suelo: los rasgos más importantes a tener en cuenta es su textura, la conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico (+) y estado nutricional (observar si el suelo posee los nutrientes que las plantas van a necesitar para crecer) (Braddock et al., 1997). La biodisponibilidad de los contaminantes iónicos está fuertemente influenciada por el pH del suelo (Zimicz, Carolina. (s. f.)).
- Condiciones medioambientales: la temperatura y humedad son los parámetros más importantes, por ejemplo, para la humedad, algunos componentes que se encuentran fuertemente retenidos cuando el suelo está seco (porque llevan mucho tiempo en el lugar), por ende, cuando llueve se disuelven y es más fácil que sean absorbidos por las plantas (Zimicz, Carolina. (s. f.)). Por esto, el proceso de fitorremediación es más fácil cuando la contaminación haya sucedido recientemente, a que ya llevé mucho tiempo contaminado.

3) **Interacciones planta-microorganismo:** las plantas pueden estimular (a través de la producción y liberación de sustancias) el crecimiento de la población microbiana capaz de remediar y, por otro, mediante la liberación de metabolitos secundarios (compuestos que produce la planta y que no son vitales para su crecimiento y supervivencia, es decir si la planta dejara de producirlos no pasaría nada), activar la expresión de genes vinculados a la degradación de contaminantes o actuar como co-metabolitos (compuestos que ayudan al metabolito a cumplir su función) en dicha degradación. Por su parte, los microorganismos que viven en la zona de las raíces pueden estimular el crecimiento de las mismas e inhibir la proliferación de

organismos patógenos. Tanto las plantas como microorganismos pueden, al liberar sustancias al medio, modificar la biodisponibilidad del contaminante (Zimicz, Carolina. (s. f.)).

Algunas plantas fitorremediadora para los hidrocarburos son:

- ✓ *Chrysopogon zizanioides* (El vetiver).
- ✓ *Megathyrsus maximus* (Agrosavia Sabanera).
- ✓ *Phaseolus coccineus* (Ayocote o Ayecote, judía escarlata, o Poroto pallar).

5.2.1 Plantas Transgénica

Las plantas transgénicas (PT) forman parte del grupo de los llamados organismos modificados genéticamente (OGM) y son el resultado del avance de las técnicas de la biotecnología experimental, donde el material genético es alterado o se inserta de forma artificial, en las plantas se transforman los genomas mediante la ingeniería genética para este proceso aporta una serie de características que pueden resultar en algunos casos beneficiosas, por ejemplo: la resistencia a químicos, a condiciones ambientales, insectos, etc. Estas plantas juegan un papel importante en diversos ámbitos de la vida actual. Las plantas usan la energía del sol (mediante la fotosíntesis) para extraer sustancias químicas del suelo y depositarlas en sus raíces o parte aérea (tallos y hojas), para convertirlas en sustancias menos tóxicas al interior de la planta, o en gases no tóxicos que se liberan al ambiente. De esta forma, las plantas pueden ser entonces cosechadas y tratadas, eliminando finalmente los contaminantes del suelo. Las sustancias pueden ser inorgánicas como los metales pesados (cadmio, mercurio, plomo...), arsénico y residuos nucleares radiactivos, así como orgánicas (petróleo, solventes, compuestos fenólicos, explosivos, fertilizantes, herbicidas y pesticidas).

Las plantas transgénicas poseen genes de todas las procedencias ya sea de otras plantas, de animales, de bacterias, de virus y de hongos, y muchas veces poseen combinaciones de ellos, ya que se necesitan armar complejos sistemas moleculares para garantizar la expresión de los genes foráneos. En las plantas transgénicas se han usado genes de plantas, animales y bacterias para conferirles características puntuales como resistencia a químicos, a condiciones ambientales adversas, a insectos, etc. a los cuales se añaden genes promotores y regulares de elevada expresión provenientes de virus, puesto que éstos tienen mayor capacidad de expresión que los celulares (por las características infecciosas de los virus, que hacen que el sistema de expresión tenga prioridad con su genoma antes que con el de la célula) y de esta forma de garantiza que el material introducido se transcriba y se traduzca.

Para lograr una planta transgénica deben ocurrir los siguientes pasos:

- El transgén debe ser transferido al interior de la célula e integrarse al ADN celular, dando origen a una célula transgénica.
- Se debe regenerar una planta completa a partir de la célula transgénica. Una vez introducido el gen de interés en la célula, se induce el desarrollo de plantas mediante distintas técnicas de cultivo de tejidos.
- Las plantas regeneradas in vitro son analizadas por técnicas moleculares para identificar aquellas que porten y expresen el o los transgenes en los niveles deseados.

- Las plantas transgénicas obtenidas son incorporadas a procesos de mejoramiento convencional para introducir los nuevos genes en otras variedades (cultivares) de interés, lo que dependerá de la especie y del tipo de cultivo a obtener. La cruce inicial con la variedad mejorada debe ser seguida de varios ciclos de cruzamientos repetidos con el progenitor mejorado, proceso conocido como retro cruzamiento, de modo de recuperar tanto como sea posible el genoma del progenitor mejorado, con el agregado del transgén del progenitor transformado.
- El próximo paso son los ensayos en invernadero y en el campo para comprobar los efectos del transgén y el desempeño general de la planta. Esta fase incluye también la evaluación de los efectos ambientales y la inocuidad alimentaria.

Las plantas OGM empleadas para la prevención de la contaminación deben reducir significativamente la cantidad de agroquímicos necesarios para los cultivos (Montagu, 2005, Vain, 2006), también deben ser capaces de metabolizar compuestos orgánicos o bien de acumular mayor cantidad de contaminantes inorgánicos. Generalmente, la fitorremediación es una función conjunta entre la planta y los microorganismos de la rizósfera (Rittmann, 2006). Algunas especies de bacterias degradan, de manera selectiva, ciertos compuestos que son tóxicos para las plantas. Los productos metabólicos del proceso microbiano son asimilados y convertidos, por las especies vegetales, en compuestos menos tóxicos. Por lo tanto, las modificaciones genéticas de los microorganismos presentes en la rizósfera representan una posibilidad en el mejoramiento de las técnicas fitocorrectivas, además, la introducción de microorganismos GM asegura que los cambios se limiten a los consorcios bacterianos presentes en la raíz y que estos no se encuentren en el suelo circundante (Macek et al, 2007).

6 Fitorremediación y Biorremediación ¿Pueden trabajar en conjunto?

Cuando la planta se encuentra presente en suelos contaminados con petróleo, se crea un hábitat ideal para los microorganismos que utilizan al compuesto como fuente de carbono, necesario para sus funciones metabólicas. Las poblaciones microbianas se multiplican rápidamente en la zona rizosférica, aumentando las posibilidades de remoción del contaminante (Hernández-Acosta, E.; Ferrera-Cerrato, R.;(...) (2003)). Esta interacción ocurre en la rizósfera, que es una zona de interacción única y dinámica entre raíces de plantas y microorganismos del suelo, que consiste en una microbiota (bacterias, hongos y algas) y una micro y mesofauna (protozoos, nematodos, insectos y ácaros). El efecto rizosfera involucra al enriquecimiento de la diversidad microbiana en el suelo, influido por la raíz (Grayston et al., 1998), cuyo resultado inmediato sería una mayor actividad en la degradación del contaminante por los múltiples sistemas enzimáticos que poseen los microorganismos (Mishra et al., 2001). La comunicación específica planta-bacteria involucraría sistemas complejos de comunicación, en los cuales la planta, al estar sometida a un estrés por un contaminante orgánico, cambiaría sus patrones de exudación de compuestos para promover el crecimiento de microorganismos con las capacidades degradadoras adecuadas (siciliano y Germida, 1998). El entendimiento de la interacción entre plantas y comunidades microbianas, facilitan el empleo exitoso de la vegetación para remediar químicamente los suelos contaminados. La micro y mesofauna en procesos de descomposición en ecosistemas, contribuyen significativamente con el catabolismo de sustancias nocivas en la rizósfera. Esta

región especializada, está caracterizada por el aumento de la biomasa microbiana y de su actividad. La detoxificación puede resultar en la degradación, mineralización o polimerización de los tóxicos en la rizósfera. Estos procesos de detoxificación dependen no sólo de la microbiota de la rizósfera, sino también de las características de la planta huésped, propiedades del suelo y condiciones ambientales. En la zona rizosférica se presentan múltiples fenómenos de comunicación que inducen o inhiben el crecimiento de microorganismos, así como otros factores nutrimentales, e incluso espaciales, que ocurren en función del tiempo (Walker et al., 2003).

Los suelos rizosféricos aun altamente contaminados con hidrocarburos son capaces de sustentar una gran diversidad microbiana y, de ellos, es posible aislar múltiples organismos hidrocarbonoclastas (Rivera-Cruz et al., 2002). La capacidad de esa microflora para metabolizar múltiples sustratos es mayor cuando el suelo contaminado con hidrocarburo se cultiva con gramíneas, que en ausencia de plantas creciendo en él (Banks et al., 1997). En adición, el efecto de enriquecimiento microbiano en la rizosfera es notorio, aun cuando la concentración de hidrocarburo disminuye hasta 50% o más, por efecto de la fitorremediación (Hutchinson et al., 2001). Así, por ejemplo, la comunidad microbiana de la rizósfera ha mostrado el aumento de la asociación de los hidrocarburos policíclicos aromáticos con los ácidos húmicos y fúlvicos del suelo, por lo que la biodisponibilidad de estos compuestos se reduce, así como la potencial fitotoxicidad (Mónica Steciow). Los exudados radiculares y las enzimas secretadas en la rizosfera de las plantas determinan el crecimiento y actividad de los microorganismos asociados a las raíces, los cuales están implicados en la degradación de los hidrocarburos (Gaskin y Bertham, 2010). Estas exudadas enzimas, varían en función de las especies vegetal, lo que explica el diferente efecto fitorremediador de las especies vegetales ensayadas.

La concentración de estos microorganismos es mayor en la rizósfera porque algunas de las secreciones de las raíces los atraen y les proporcionan condiciones adecuadas para su multiplicación. Los tipos de microorganismos más relevantes para el cultivo de plantas se llaman micorrizas, rizobacterias y rizobios.

Los tipos de microorganismos más relevantes para el cultivo de plantas son:

- **Micorriza:** Son hongos que se asocian a las raíces de la gran mayoría de las plantas, siendo difícil encontrar alguna que no tenga micorrizas. Ayudan a la planta con la absorción de agua, de micronutrientes y el potasio. En su propio beneficio, se alimentan de algunas secreciones de las raíces ricas en Carbono; Las plantas sólo pueden absorber los nutrientes que están en su forma básicamente mineral. La función principal de la micorriza es tomar los nutrientes que se encuentran en moléculas complejas o poco solubles, y las transforman a un estado sencillo utilizable por las raíces. Estos hongos son de gran importancia para lograr un proceso exitoso de remediación, ya que los tratamientos de fitorremediación en los cuales se establecen asociaciones micorrícicas son más eficientes en la remoción de hidrocarburos y en la disminución de la toxicidad del suelo remediado (Joner et al., 2001).
- **Rizobacterias:** son bacterias que viven asociadas a las raíces y liberan una serie de sustancias que promueven el crecimiento de la planta, principalmente hormonas vegetales, también producen antibióticos que controlan la población de

microorganismos patógenos y además son capaces de transformar nutrientes desde sus formas no disponibles a sus formas disponibles para la planta.

- Rizobios: son bacterias que tienen la capacidad de fijar el nitrógeno de manera rápida y eficiente, ya que este proceso es extremadamente lento en ambientes estériles. Por esto, se dice que son responsables de casi toda la presencia de Nitrógeno que se encuentra en el suelo.

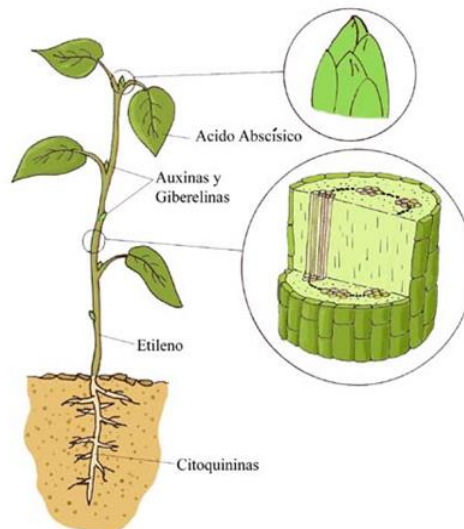
Una característica importante de los rizobios es que las plantas los incorporan dentro de ellas mismas, dentro de nódulos cubiertos por las paredes de las raíces. Esto les resulta muy favorable pues no tienen que competir con otros microorganismos de la rizósfera. Estas bacterias son especializadas, es decir, Sólo interactúan con ciertas plantas, como las leguminosas, la alfalfa y el trébol. Por eso, dichas plantas son valiosas como mejoradores del suelo, pues enriquecen el sustrato con Nitrógeno utilizándose en cultivos de rotación y barbecho.

6.1 Microorganismos que consienten a las plantas

En la planta habitan microorganismos de vida libre trabajando para su beneficio. Bacterias como las *Bacillus* que incrementan el nitrógeno en el suelo transformando el nitrógeno del aire, mientras que los hongos *Ascomycota* y *Basidiomycota* degradan hidrocarburos. Otras bacterias pueden sintetizar y degradar los reguladores del crecimiento vegetal (fitohormonas). Por ejemplo, algunos *Bacillus* secretan auxinas que estimulan el crecimiento de las plantas. Hoy en día estos microorganismos son una alternativa biotecnológica para reducir el uso de fertilizantes sintéticos, con el fin de establecer una agricultura amigable al ambiente. La eficiencia de biodegradación se incrementa regulando parámetros físicos, químicos o biológicos para mejorar el desarrollo y actividad de los microorganismos degradadores.

Las fitohormonas o hormonas vegetales son compuestos químicos empleados por las plantas para generar respuestas fisiológicas a largas distancias, también son responsables de una amplia gama de procesos fisiológicos en las plantas, como el crecimiento de las raíces y el tallo, la floración, la maduración de los frutos o la caída de las hojas. Como controlan muchos tipos de funciones de las plantas y por ende existen varios tipos de fitohormonas, aunque la mayoría de ellas controlan de diversas formas el crecimiento y desarrollo de la planta (José Miguel. (s. f.)), algunas de ellas son:

Ilustración 5 Fitohormonas o Hormonas Vegetal de las Plantas



Fuente 3 La Nutrición Vegetal, n.d.

- **ÁCIDO ABCSÍICO:** tiene importantes funciones, como puede ser la regulación del crecimiento de la planta, la dormición de la semilla, la maduración del embrión. Esta molécula se encuentra tanto en animales, como en plantas, en hongos y algas. Se encuentra en toda la estructura de la planta, sin embargo, tiene mayor concentración en semillas y frutos jóvenes. Una de las funciones que hemos nombrado es la dormición de la semilla, esto se explica debido a que en ocasiones es necesario retrasar la germinación hasta que lleguen condiciones más favorables (José Miguel. (s. f.)).
- **AUXINAS:** regulan el crecimiento vegetal. Pero en este caso las auxinas son un promotor del crecimiento, no un inhibidor. Trabaja en conjunto con otras hormonas vegetales que promueven el crecimiento. Las auxinas se sintetizan en regiones meristemáticas y en el ápice del tallo de las plantas, desplazándose desde allí a otras áreas. Su transporte se lleva a cabo de célula a célula (José Miguel. (s. f.)).
- **GIBERELINA:** interrumpe el período de latencia de las semillas, haciendo que germinen. Además de esto, regulan el crecimiento longitudinal del tallo y la elongación celular, estimulando su desarrollo. Esta hormona es indispensable para la transición de la planta de su fase juvenil a su fase adulta. Esto lo hacen mediante una alteración de la distribución del calcio en el organismo vegetal. También desarrollan una importante función en el crecimiento embrionario y la germinación de la semilla. En general, esta hormona vegetal contribuye a todos los procesos, incluida la formación del fruto (José Miguel. (s. f.)).
- **ETILENO:** Es una de las hormonas de estructura más simple. Se presenta en estado gaseoso y es muy diferente a otras fitohormonas por ser un hidrocarburo. Provoca respuestas como el geotropismo que son tropismo de los órganos de las plantas, que obedece a la influencia de la gravedad. Es producido por todas las partes vivas de las plantas superiores, sin embargo, su concentración varía según el tejido y su estado de crecimiento (José Miguel. (s. f.)). Sus efectos son los siguientes:
 - Maduración de frutos.

- Senescencia de órganos.
 - Exudación de resinas, látex y gomas.
 - Inducción de raíces.
 - Inhibición del crecimiento longitudinal.
 - Incremento del diámetro caulinar.
- CITOCININAS O CITOQUININAS: En este caso las fitohormonas actúan promoviendo la división celular, así como su diferenciación. Intervienen en distintos procesos fisiológicos vegetales como la fotosíntesis, también contribuyen a la regulación del crecimiento. Se pensaba que eran producidas en las raíces, puesto que allí se encuentran con mayor cantidad. No obstante, se sabe a día de hoy que su producción es en cualquier tejido. El tallo, la raíz, las hojas, las flores, los frutos y las semillas producen citocinas. En cualquier caso, la producción de esta fitohormona varía en función del sitio y momento que la planta tenga un proceso de desarrollo y diferenciación. Pueden movilizarse también a otros tejidos, y su movimiento puede ser bidireccional, sus efectos son:
- Controlan la diferenciación y ciclo celular.
 - Controlan el desarrollo de los cloroplastos.
 - Regulan la producción de defensas, tanto para ataques patógenos, como contra herbívoros.

6.2 Microorganismos Hidrocarbonoclastas

Los microorganismos hidrocarbonoclastas o mejor conocidos como microorganismos degradadores de hidrocarburos pueden incluir procariontes y eucariontes. Las bacterias y levaduras son los organismos dominantes en la degradación de compuestos del petróleo en ecosistemas acuáticos, mientras que bacterias y hongos son los que dominan en muestras de suelo. Los microorganismos más comunes que son responsables de la degradación del petróleo comprenden principalmente géneros bacterianos como: *Bacillus*, *Nocardia*, *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Flavobacterium*, *Micrococcus*, *Arthobacter*, *Corynebacterium*, *Achromobacter*, *Rhodococcus*, *Alcaligenes*, *Mycobacterium*. Mientras que los géneros más comunes de hongos son: *Aspergillus*, *Mucor*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Rhodotorula*, *Candida* y *Sporobolomyces* (Atlas, 1981; Bossert y Bartha, 1984). Durante la biodegradación, los microorganismos están equipados con la maquinaria metabólica para utilizar al contaminante como fuente de carbono y energía para su crecimiento, produciendo biomasa, subproductos, dióxido de carbono y agua (Eweis, 1999). Pueden tener diferentes metabolismos como quimioorganotrófico, fotolitótrofo, quimiolitotrofo, organótrofo y heterótrofo (Atlas y Bartha 1998).

El grado de eficiencia de los procesos de degradación se encuentra íntimamente relacionado con factores ambientales que rodean al sistema microorganismo contaminante, entre los más importantes se encuentra el pH, la concentración de nutrientes, la temperatura, el tamaño y características de las partículas de suelo, la biodisponibilidad y concentración del contaminante, la toxicidad, la presencia de otros nutrientes, etc. La persistencia de un contaminante en el ambiente depende de las características físicas y químicas del compuesto químico, como la baja solubilidad y la toxicidad que presenta hacia los microorganismos

degradadores (Alexander, 1994). La mayoría de los microorganismos que oxidan hidrocarburos llevan a cabo por vía aerobia las reacciones de óxido-reducción, teniendo como último aceptor de electrones al oxígeno, aunque también se encuentran microorganismos que requieren condiciones anaerobias para la oxidación de estos compuestos. Sin embargo, para la mayoría de los compuestos, la degradación más rápida y completa ocurre en condiciones aerobias (Cookson, 1995).

6.2.1 Bacterias

Las bacterias son imprescindibles en los procesos naturales de degradación en el medio ambiente. Las bacterias son consideradas los seres más abundantes del planeta. Su trabajo es tan importante que pueden dar o quitar vida. Las bacterias hidrocarbonoclasticas o degradadoras de hidrocarburos, poseen una característica común: son capaces de descomponer las cadenas de los hidrocarburos (formadas por carbono e hidrógeno) para formar agua y dióxido de carbono en un proceso bioquímico conocido como mineralización (Melchor, F. 2006).

La habilidad de las poblaciones nativas de bacterias para degradar hidrocarburos constituye uno de los mecanismos principales con el que cuentan determinados ambientes para mitigar el impacto causado por la presencia del petróleo crudo y sus derivados y es el principal mecanismo y natural por el cual son removidos de ciertos ambientes dependiendo de sus características (Leahy & Colwell, 1990; Head et al., 2006). Es esta capacidad metabólica de consumir los hidrocarburos que se aprovecha para la biorremediación de ambientes terrestres y acuáticos. Entre los métodos utilizados están: la aplicación de enzimas, nutrientes y el uso de microorganismos previamente adaptados al consumo de petróleo entre otros (Salleh et al., 2003; Das & Chandran, 2011). La biodegradación natural por parte de las bacterias nativas puede ser estimulada por el agregado de fertilizantes y oxígeno (Atlas 1991, Swalnnel 1996). La velocidad de degradación suele depender de la complejidad de la molécula a degradar (el petróleo es diferente en cada zona). Creo que es fácil ver, que una molécula de hidrocarburo lineal es más fácil y rápido de degradar que un compuesto ramificado. Una de las bacterias conocida para degradar hidrocarburo y además puede ayudar a las plantas en este proceso de descontaminación son los *Bacillus*.

6.2.1.1. *Bacillus*

Este género comprende una amplia diversidad de tipos fisiológicos, donde se destacan características como la degradación de la mayoría de los sustratos derivados de plantas y animales, incluyendo celulosa, almidón, pectina, proteínas, agar, hidrocarburos y otros; además su capacidad para la producción de antibióticos, la nitrificación, la desnitrificación, la fijación de nitrógeno, la litotrofia facultativa, la acidofilia, la alcalofilia, la psicrofilia, la termofilia y el parasitismo, ejemplifican su capacidad de sobrevivir en diversos ambientes (Claus D, Berkeley RCW. 1872). Los miembros de este género se caracterizan por ser Gram positivos, de forma bacilar, catalasa positiva, aerobios estrictos o anaerobios facultativos y formadores de endosporas (Wang LT, Lee FL, Tai CJ, Kasai H). Su ciclo de vida se divide en dos fases: crecimiento vegetativo y esporulación. Durante el primer estado, la bacteria crece de forma exponencial cuando se encuentra en un medio donde las condiciones son favorables.

Las especies del género de *Bacillus* se encuentran ampliamente distribuidas a nivel mundial debido a su habilidad para formar endosporas, característica que les confiere resistencia y potencia su aislamiento en diversos hábitats, tanto ecosistemas acuáticos como terrestres, e incluso en ambientes bajo condiciones extremas (Tejera-Hernández et al., 2011). Sin embargo, el suelo es considerado el principal reservorio de este género bacteriano, debido a que la mayoría de especies del género de *Bacillus* son saprófitas pudiendo utilizar la gran diversidad de sustratos orgánicos presentes en el suelo, siendo ésta una matriz compleja para el establecimiento de una gran diversidad genética y funcional de especies microbianas (McSpadden, 2004). Por lo cual, múltiples especies de *Bacillus* pueden desarrollarse en los suelos, cuyos recuentos cultivables se encuentra en el intervalo de log 3 a log 6 por gramo de peso fresco de suelo, esencialmente en especies similares genéticamente al grupo de *Bacillus subtilis* y *Bacillus cereus*.

La promoción del crecimiento vegetal por parte de las especies del género *Bacillus* puede ocurrir de forma directa o indirecta. Un efecto directo sobre la promoción del crecimiento vegetal se observa en bacterias rizosféricas que tienen la capacidad de llevar a cabo la fijación biológica del nitrógeno, la solubilización de minerales como el fósforo y la producción de hormonas reguladoras del crecimiento vegetal. Por su parte, la forma indirecta de promoción del crecimiento vegetal está relacionada con la producción de sustancias que actúan como antagonistas de patógenos o induciendo resistencia en las plantas (Choudhary DK, Bhavdish NJ). Algunos estudios demuestran que algunas especies pertenecientes al género *Bacillus* poseen la capacidad de degradar hidrocarburos. Estas bacterias presentan capacidad adaptativa y fisiológica para sobrevivir en ambientes y medios ricos en petróleo crudo y pueden por tanto en mayor o menor medida utilizarlo como fuente de carbono y energía (Montenegro. F; 2007). Por ejemplo, se han reportado que la bacteria *Bacillus subtilis* tiene capacidad de emplear el petróleo como fuente de carbono (Das & Mukherjee, 2007).

6.2.2 Hongos

Los hongos como microorganismos remediadores presentan características importantes: soportan la acción tóxica de los hidrocarburos, son aptos para crecer en ambientes con bajas concentraciones de nutrientes, poca humedad y pH ácido. Producen enzimas que rompen, por hidrólisis, las cadenas de los hidrocarburos convirtiéndolos en CO₂ o en sustancias inocuas para el ambiente (Martínez et al, 2011).

Los hongos se presentan como mejores degradadores de hidrocarburos de cadena larga que las bacterias de acuerdo con Martínez-Vázquez et al. (2011) quienes mencionan a *Aspergillus* y *Penicillium* como los géneros que se encuentran en mayor proporción en suelos contaminados con hidrocarburos, utilizándolos para estudios de biorremediación de petróleo crudo y sus derivados, así como la mineralización de aromáticos policíclicos. Estos hongos se aíslan con mayor frecuencia en ambientes marinos y terrestres con este contaminante en él. Pernía et al. (2012) consideran entre otros a *Aspergillus* en el grupo de hongos con mayor capacidad (52%) para reducir los niveles de hidrocarburos totales de petróleo, *Penicillium* y *Paecilomyces* en el grupo de capacidad intermedia (27%) y *Cunninghamella* en el grupo con menor capacidad de degradar (13%).

6.2.2.1 *Aspergillus*

Las diversas especies de género *Aspergillus* pertenecen a la familia *Trichocomaceae*; del *Phylum Ascomycota*; Reino Fungi, Dominio *Eukaria*. El género *Aspergillus* es capaz de utilizar las diversas fracciones de los hidrocarburos desde los hidrocarburos totales de petróleo hasta las fracciones de resinas y asfáltenos. Este género constituye un complejo de especies (Samson, R. A. 2007) de las cuales se han probado sus propiedades para utilizar a los hidrocarburos como fuente de carbono y energía (Pernína, B. 2012). El género *Aspergillus* es capaz de degradar compuestos derivados del petróleo, como el diésel, gasolina, y kerosén del cual extrae carbono y energía (Pernína, B. 2012, Salmanov, M. 2008, Saratale, G. 2007, Gaylarde, C.C. 1999). De igual manera, ha probado estar presente como un agente degradador en refinerías y en los sistemas de distribución de diésel (Bento, F.M. 2001). El género posee altas propiedades para la degradación de crudo y sus fracciones SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos) (Oudot, J. 1984). Frente a la fracción de saturados son capaces de generar conversiones en los n-alcanos, 70-84 % en poco tiempo (Sánchez, O., Ferrera. I. 2006).

Algunos estudios muestran que el género *Aspergillus* es capaz de generar mayores degradaciones con hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPAs) de alto peso molecular, de 4-7 anillos (Silva, I. S., Santos EDA. 2010). Los hongos de este género poseen propiedades catalíticas con las que es posible degradar compuestos como los HPAs degradando los anillos que constituyen a estos compuestos por medio de enzimas. Este género ha sido encontrado en las primeras fases de extracción y manipulación de petróleo como un microorganismo oportunista capaz de degradar HPAs. Esta capacidad de degradación de HPAs presenta porcentajes de eficiencia que varían entre el 60 y 83 %, en especial para degradar antraceno, las investigaciones sobre la degradación de los HPAs por hongos del género *Aspergillus* muestran que es un proceso dinámico que incluye adsorción extracelular con implicaciones de compuestos intracelulares, y los productos transformados no muestran aparente toxicidad (Guiraud, P. 2008, Sánchez, O. 2006, Qiang, J. 2009, Ye, J.S. 2011). El género *Aspergillus*, es capaz de utilizar activamente crudo (Chaillan, F. 2004, Salmanov, M. 2008) y se encuentra dentro del grupo con mayor capacidad de degradarlo (Pernína, B. 2012, Sánchez, O., Ferrera. I. 2006, Naranjo, L. 2007). Una de las especies más conocidas de este género por ser uno de los mejores degradadores es el *Aspergillus Niger*.

7 Ventajas y desventajas de la Fitorremediación

La fitorremediación, por sí misma, muestra una serie de ventajas y desventajas en comparación con otras tecnologías, las cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4: Ventajas y Desventajas.

Ventajas	Desventajas
Se puede realizar in situ y ex situ.	El proceso se limita a la profundidad de las raíces a aguas profundas o poco profundas.
Es apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la contaminación de áreas restringidas.	Es un método lento de descontaminación, puesto que requieren un tiempo de espera para el crecimiento de las plantas y microorganismos asociadas a estas.
Es el método más económico de descontaminación.	No es totalmente eficiente en impedir la lixiviación o percolados de contaminantes a las aguas subterráneas.
No consume energía eléctrica ni producen emisiones contaminación de gases de efecto invernadero.	Se corre un riesgo para la cadena alimenticia, si se eligen especies utilizadas como fuente de alimento.
Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos e inorgánico.	No todas las plantas son resistentes a crecer en presencia de contaminantes.
Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras para depurar suelos y aguas contaminantes.	La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.
No produce contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares para desecho.	No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.
Tiene una versatilidad potencial para tratar una gama diversa de materiales peligrosos.	Los contaminantes pueden acumularse en maderas para combustión.
Se pueden reciclar recursos (agua, biomasa, metales).	Es dependiente de las estaciones.

Capítulo 3: Resultados

Resultados

La fitorremediación es una tecnología bastante óptima, puesto que, si elimina el contaminante, pero a su vez es bastante lenta, aproximadamente tarda 1 año en degradar el 50% de hidrocarburo, aunque esto puede variar dependiendo de cuando haya ocurrido el derrame, entre más rápido se controle la contaminación más rápido será el proceso de limpieza, de la cantidad de contaminación, el tamaño del lugar y la concentración del contaminante. Además esto igual depende de si el proceso se realiza in situ o ex situ, ya que, los tratamientos in situ demandan menos manejo, pero generalmente son más lentos y más difíciles de realizar debido a la dificultad de poner en contacto directo a los agentes contaminantes con la totalidad del suelo afectado, los tratamientos ex situ suelen ser más costoso, sin embargo, son más rápidos y se consigue una recuperación más completa, ya que las plantas se encuentran en buenas condiciones (Ortiz et al., 2007; EPA, 1999; Agudelo, Macías & Suárez). Aunque en todas las fitotecnologías hay diferencias significativas entre el tiempo estimado, ya que todas tienen diferentes procesos, y también depende de la planta que se utilice ya que hay plantas que son mejor tolerantes a hidrocarburo que otras. Además, que el tiempo y la eficacia también depende del tipo de fitorremediación que se escoge a utilizar. Las fitotecnologías son especialmente útiles para su aplicación en grandes superficies, con contaminantes relativamente inmóviles o con niveles de contaminación bajo, y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo. En cambio, en el caso de derrames con hidrocarburos, no es fácil aplicar tecnologías de fitorremediación utilizando plantas, dado que éstas también son sensibles a estos compuestos tóxicos. Sin embargo, al agregar a las plantas, biomasa seca los efectos tóxicos disminuyen, ya que ciertas propiedades de la biomasa seca que pueden utilizarse como bioadsorbentes de hidrocarburos. Además, mediante las plantas genéticamente modificadas se puede incrementar la biomasa vegetal que ayuda bastante a que este proceso sea más eficiente y un poco más rápido ya que favorece las interacciones de los microorganismos y las raíces y además como el nombre lo dice se pueden modificar para que más plantas sean tolerantes al hidrocarburo o a los diferentes contaminantes, esto ayuda mucho a la fitorremediación. La fitorremediación dirigida a la absorción de hidrocarburos disueltos en la columna de agua o adheridos a partículas suspendidas en el agua, utilizan biomasa muerta no sensible a los efectos tóxicos de estos compuestos para ayudar en este proceso. La biomasa de algunas plantas acuáticas representa una buena opción como adsorbente, dado que sus características físicoquímicas la hacen un excelente adsorbente no sólo de hidrocarburos sino también de iones metálicos. Con respecto a los microorganismos de la rizósfera, trabajando en conjunto con las plantas se puede decir que las interacciones de ambos factores tienen efectos positivos, puesto que los microorganismos ayudan a la planta a crecer y también a degradar, ya que estos dos factores se complementan bien y se pueden obtener mejores resultados en menor tiempo que trabajando individualmente.

Discusión

La fitorremediación es un proceso que aún se está investigando, pero que ha tenido buenos resultados, pero es necesario que se realicen más pruebas fuera del laboratorio con casos reales para realmente comprobar la eficiencia de este proceso. Analizando la información obtenida hasta ahora se puede creer que la fitodregadación es la tecnología óptima para degradar los hidrocarburos ya que ésta trabaja en conjunto con la biorremediación, esto ayuda a que este proceso sea un poco más rápido que cualquiera de las otras fitotecnologías trabajando solas. Además de que la fitodegradación es específicamente para la degradación de materiales orgánicos. En la fitorremediación de agua contaminada por hidrocarburo casi no se encuentra información ya que este proceso no es muy común, puesto que en casos de derrames en cuerpos de agua estos pueden ser retirados de forma manual, por medio de adición de químico que son más rápidos, pero a la vez pueden llegar a ser más tóxicos que los mismos hidrocarburo, aunque esto depende de si el derrame ocurre en el mar o no, ya que si es en el mar es mucho más complicado por el movimiento de éste; en cambio en lagunas o humedales el agua se encuentra estancada o con poco movimiento y esto facilita mucho el proceso de descontaminación. También se puede estimar que las plantas transgénicas son una buena opción en este proceso ya que las plantas naturales son poco resistentes a este químico, pero si se modifica genéticamente estas pueden tolerar mejor este contaminante y a su vez pueden absorberlo o eliminarlo más rápido, ya que la planta se debe acostumbrar a vivir en un lugar saturado y esto puede afectar en el tiempo de descontaminación.

Conclusión

La contaminación de hidrocarburo en suelos y en agua se produce principalmente durante la exploración, extracción y transporte de estos. Por ende, esta problemática necesita de procesos de bajo costo, efectivas y a la vez que sean amigables con el medio ambiente y así evitar que este problema se siga agrandando. Por este motivo la fitorremediación que es una estrategia biotecnológica es recomendada, ya que cumple con las características definidas anteriormente, puesto que es un proceso eficiente, pero a largo plazo, esto quiere decir que la hipótesis que se plantea al principio de este trabajo es incorrecta ya que es un proceso de larga duración.

En este proceso se utilizan plantas, en algunos casos necesita ayuda de microorganismos, para absolver o eliminar el contaminante, y no necesita que se le agregue ninguna sustancia química para llevar a cabo este proceso.

Mediante las plantas genéticamente modificadas se pueden incrementar la biomasa vegetal que ayuda bastante a que este proceso sea más eficiente y un poco más rápido ya que favorece las internaciones de los microorganismos y las raíces, y además como el nombre lo dice se pueden modificar para que más planta sea tolerante al hidrocarburo o a los diferentes contaminantes, esto ayuda mucho a la fitorremediación.

Aún falta mucho por conocer de esta biotecnología, pero mientras se amplía la información se puede seguir utilizando ya que al menos se ha comprobado que no daña al ambiente, pero eso sí, se debe tener cuidado con las plantas a utilizar ya que algunas pueden afectar a la cadena trófica.

Referencias

1. Ávila M. 1999, la biorremediación procesos y aplicaciones, Instituto de Investigaciones Tecnológicas, EPN, Ecuador, pp 1 – 33.
2. Ayllon T. T. & Chávez J. F., 1994. México: Sus Recursos Naturales y su Población. Segunda Edición. Limusa, México.
3. Atlas, R, Bartha, 2001, Ecología microbiana y ambiental, Quinta Edición, California, The Benjamin Publishing Company Inc. Pp 559 – 610.
4. Atlas, R, Bartha, 2001, Ecología microbiana y ambiental, Cuarta Edición, California, The Benjamin Publishing Company Inc. Pp 522.
5. Atlas, R.M. 1981. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: An environmental perspective. Microbiological Reviews 45: 180 – 209.
6. Atlas R. 1991. Microbial hydrocarbon degradation-bioremediation of oil spills. Chem Technol Biotechnol 52: 149-156.
7. Alexander, M. 1994. Biodegradation and Bioremediation 2nd ed. Academic Press, London.
8. Atlas, M.R., A. Horowitz, M. Krichevsky y K.A. Bej. 1991. Response of microbial population to environmental disturbance. Microbiol. Ecol. 22: 249-256.
9. Alkorta, I., Aizpurua, A., Riga, P., Albizu, I., Amezcua, I., Garbisu, C. 2003. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health. Rev. Environ. Health 18: 65-73.
10. Adam, G. y H. Duncan. 2002. Influence of diesel fuel on seed germination. Environ. Poll. 120: 363-370.
11. 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.
12. Borrás Carnero, Gonzalo. (2011, 27 julio). *Efectos de los hidrocarburos en la salud humana*. Por Gonzalo Borrás Carnero - CETMAR. ECO Natural. <http://econatural-sva.blogspot.com/2011/05/efectos-de-los-hidrocarburos-en-la.html>
13. Bustamante-García, V., A. Carrillo-Parra, H. González-Rodríguez, R. G. Ramírez-Lozano, J. J. Corral-Rivas and F. Garza-Ocañas. 2013. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxyla*. Humb., & Bonpl. in Brazilian beehive kiln. Industrial Crops and Products 42: 169-174.
14. Bento, F.M., Gaylarde, C.C., "Biodeterioration of stored diesel oil: Studies in Brazil", Int Biodeter Biodegr., 2001, (47), 107–112.
15. Banks, M. K., S. Pekarek, K. Rathbone y A. P. Schwab. 1997. Phytoremediation of petroleum contaminated soils: field assessment. pp. 305-308. In: B. C. Alleman y A. Leeson (eds.). In situ and On-site bioremediation (Volume 3). Battelle Press. Columbus, OH, USA.
16. Comerma, E. (s. f.). Capítulo III Comportamiento de los hidrocarburos derramados en el medio marino. vertidos del mar. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6404/TECP3de4.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
17. Garcia, R. (s. f.). Teoría de Hidrocarburos. Ingeniero Marino. https://ingenieromarinero.com/hidrocarburos/#2-Propiedades_Fisicas_de_los_Hidrocarburos_Teoria_de_Hidrocarburos
18. Castro Varela, G. (2007). INFORME FINAL DISEÑO MONITOREO FRENTE DERRAMES DE HIDROCARBUROS. SAG. https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/INFORME_FINAL_ASESORIA_SAG_HCS2.pdf

19. Castro Varela, G. (2007). INFORME FINAL DISEÑO MONITOREO FRENTE DERRAMES DE HIDROCARBUROS. SAG. https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/INFORME_FINAL_ASESORIA_SAG_HCS2.pdf
20. CUBILLOS VARGAS, J. (2011, octubre). Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. tesis. <https://core.ac.uk/download/pdf/71396864.pdf>
21. Carpena R. y Bernal M. 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. Ecosistemas, revista científica y técnica de ecología y medio ambiente-http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=490&Id_Categoria=9&tipo=portada
22. Claus D, Berkeley RCW. Genus Bacillus Cohn 1872. In Bergey's Manual of Systematic Bacteriology, vol.2. Edited by P.H.A. Sneath, N.S. Mair, M.E. Sharpe and J.G. Holt. Baltimore: William and Wilkins. 1986: p.1105-39. C. Garbisu, J.M. Becerril, L. Epelde, I. Alkorta. (2007, mayo). Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador (Ecosistemas 16). Asociación española de ecología terrestre. <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=485>.
23. Cherian, S., Oliveira, M. 2005. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. Environmental Science & Technology. 39: 9377-9390.
24. Cookson. JR, John T. (1995) Bioremediation Engineering: Design and Application.
25. Choudhary DK and Johri BN. 2009. Interactions of Bacillus spp. and plants with special reference to induced systemic resistance (ISR). Microbiological Research. 164:493-513. <http://dx.doi.org/10.1016/j.micres.2008.08.007>.
26. Chaîneau, C. H., J. L. Morel y J. Oudot. 1997. Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. J. Environ. Qual. 26: 1478-1483.
27. Chaillan, F., Lefleche, A., Bury, E., Grimont, P., Saliot, A., Oudot, J., "Identification and biodegradation potential of tropical aerobic hydrocarbon-degrading microorganisms", Research in Microbiology, 2004, (155), 587-595.
28. Dietz, A. & Schnoor, J. (2001) Advances in Phytoremediation. Environmental Health Perspectives, 109 (1), 163-168
29. DeLaune R.D., Pezeshki S.R., Jugsujinda A. y Lindau C.W. (2003). Sensitivity of US Gulf of Mexico coastal marsh vegetation to crude oil: Comparison of greenhouse and field responses. Aquat. Ecol. 37, 351-360.
30. Delgadillo-López, Angélica Evelin, González-Ramírez, César Abelardo, Prieto-García, Francisco, Villagómez-Ibarra, José Roberto, & Acevedo-Sandoval, Otilio. (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. Tropical and subtropical agroecosystems, http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002&lng=es&tlng=es.
31. Das, N., & P. Chandran, 2011. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An Overview. Biotechnol. Reserch. Internal. Vol. 2011.
32. Das, K., & Mukherjee, A. K. (2007). Crude petroleum-oil biodegradation efficiency of Bacillus subtilis and Pseudomonas aeruginosa strains isolated from a petroleum-oil contaminated soil from North-East India. Bioresource Technology, 98(7), 1339-1345.
33. Das N. y Chandran P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: An overview. Biotechnol. Res. Int. 2011, Article ID 941810, 13 pp. DOI: 10.4061/2011/941810.
34. EWEIS, J.B.; Ergas, S.J.; Chang, D.P. & Schroeder, E.D., 1999. Principios de Biorremediación (Bioremediation). 1ra Ed., Editorial WCB/McGraw-Hill, España, 2-4P. Lucas y Roux, 1975.
35. EWEIS, J et al. Principios de biorrecuperación. Ed. Mac Graw Hill. (1999).

36. El cuaderno de porque biotecnología (Las plantas transgénicas). (s. f.). EDICIÓN No 26. https://www.porquebiotecnologia.com.ar/Cuadernos/El_Cuaderno_26.pdf
37. Frick C., Farrell R. and Germida J., 1999. Assessment of Phytoremediation as an In-Situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites. Department of Soil Science University of Saskatchewan Saskatoon, SK Canada.
38. 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. Vol. 48, No. 2. pp. 179 – 187.
39. Flocco, C. G., A. Lo Balbo, M. P. Carranza y A. M. Giuliatti. 2002. Removal of phenol by alfalfa plants (*Medicago sativa* L.) grown in hydroponics and its effects on some physiological parameters. *Acta Biotechnol.* 10: 43-54.
40. Gomez Ortega, P. Y. (s. f.). Velocidad de degradación de hidrocarburos en el suelo. dinamicas de sistemas. <http://www.dinamica-de-sistemas.com/revista/0913b-dinamica-de-sistemas.pdf>.
41. Ghosh, M, Singh, S. P. 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products. *Applied Ecology and Environmental Research.* 3: 1-18.
42. Gabriela Vázquez Silva, Germán Castro Mejía, Ignacio González Mora, Roberto Pérez Rodríguez y Thalía Castro Barrera. (2006, 4 mayo). Bioindicadores como herramientas para determinar la calidad del agua. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/Bioindicadores-como-herramientas-para-determinar-la-calidad-del-agua.pdf>.
43. Grayston, S. J., S. Wang, C. D. Campbell y A. C. Edwards. 1998. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere. *Soil Biol. Biochem.* 30: 369-378.
44. Gaylarde, C.C., Bento, F.M., Kelley, J., "Microbial contamination of stored hydrocarbon fuels and its control", *Rev Microbiol.*, 1999, (30), 1-10.
45. Guiraud, P., Bonnet, J. L., Boumendjel, A., Kadri-Dakir, M., Dusser, M., Bohatier, J., Steimman, R., "Involvement of *Tetrahymenapyriformis* and selected fungi in the elimination of anthracene, and toxicity assessment of the biotransformation products", *Ecotoxicol Environ Saf.*, 2008, 69(2), 296-305.
46. Gaskin, S.E., Bentham, R.H., 2010. Rhizoremediation of hydrocarbon contaminated soil using Australian native grasses. *Science Total Environmental*, 408: 3683-8.
47. Harvey P., Campanela B., Castro P., Harms H., Lichtfouse E., Schäffner A., Smrcek S., y Werck D. (2002). Phytoremediation of polyaromatic hydrocarbons, anilines and phenols. *Environ.*
48. Hawley, 1984, op. cit.; Wingrove, Alan S. & Caret, Robert., 1984. Química Orgánica, Editorial Harla S.A. de C.V., México.
49. Hernández-Acosta, E.; Ferrera-Cerrato, Ronald; Gutiérrez-Castorena, M.C.; Rodríguez-Vázquez, R.; Rubiños-Panta, J.E.; Fernández-Linares, L. (2003, 4 diciembre). BACTERIAS Y HONGOS HIDROCARBONOCLASTAS DE RIZÓSFERA FRIJOL Y MAÍZ, EN UN SUELO CONTAMINADO CON PETRÓLEO. [redalyc.org. https://www.redalyc.org/pdf/573/57321405.pdf](https://www.redalyc.org/pdf/573/57321405.pdf).
50. Hutchinson, S.L., M.K. Banks y A.P. Schwab. 2001. Phytoremediation of aged petroleum sludge: effect of inorganic fertilizer. *J. Environ. Qual.* 30: 395-403.
51. Head, I.M., D.M. Jones, & W.F. M. Röling, 2006. Marine microorganisms make a meal of oil. *Nature Microbiology*, 4: 173-182.
52. IMT, 2002. La Permeabilidad de los Suelos en los Problemas de Transporte de Contaminantes: Aplicación en la Infraestructura del Transporte. Sanfandila, México, Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 195, 23P.

53. Indicators of Soil Health (eds. Pankhurst, C. E., Doube, B. M. y Gupta, V. V. S. R.), pp. 419-435, CAB International, New York, USA.
54. INSHT: Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo[Internet].Madrid: INSHT.Fichas Internacionales de Seguridad Química; Ficha Benceno. Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/FISQ/Ficheros/0a100/nspn0015.pdf>
55. Jagadeesan, G., y Kavitha, A. (2006). Recovery of phosphatase and transaminase activity of mercury intoxicated *Mus musculus* (Linn.) liver tissue by *Tribulus terrestris* (Linn.) (Zygophyllaceae) extract. *Tropical Biomedicine*.
56. Juhasz, A. L. and Naidu, R., (2000). Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo[a]pyrene. *International Biodeterioration and Biodegradation*.
57. Jeanne MS, Debra O, Pia M. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo[Internet]. VolumenIV.4a ed. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Subdirección General de Publicaciones; 199.Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo4/sumario.pdf>
58. 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.
59. Jones D., Hodge A. and Kuzyakov Y., 2004. Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *Tansley review. New phytologist*. Vol. 163. Pag. 459 – 480.
60. José Miguel. (s. f.). TIPOS DE FITOHORMONAS Y SUS FUNCIONES. ELBLOGVERDE.COM. <https://elblogverde.com/fitohormonas-y-sus-funcionesTIPOS%20DE%20FITOHORMONAS%20Y%20SUS%20FUNCIONES>
61. Joner, E.J., A. Johansen, A.P. Loibner, M.A. de la Cruz, O.H.J Szolar, J.M. Portal y C. Leyval. 2001. Rhizosphere effects on microbial community structure and dissipation and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in spiked soil. *Environ. Sci. Technol*. 35: 2773-2777.
62. Jenkinson, D.S., Powlson, D.S., 1976 The effect of biocidal treatments on metabolism in soil. I. Fumigation with chloroform. *Soil Biology and Biochemistry*, 8: 167-177.
63. Kamath R., Rentz J., Schnoor J. and Alvarez P., n.d. Phytoremediation of hydrocarboncontaminated soils: principles and applications Department of Civil and Environmental Engineering, Seamans Center, University of Iowa, Iowa City, Iowa, U.S.A. – 52242.
64. Kumar, A., N. Kumar, P. Baredar and A. Shukla. 2015. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45: 530-539.
65. Komives, T., Gullner, G. 2005. Phase I xenobiotic metabolic systems in plants. *Z Naturforsch*. 60:179-185.
66. LOWERY, B., M.A. Arshad, R. Lal, and W. J. Hickey. 1996. Soil water parameters and soil quality. P.143-157. En: J.W. Doran and A. J. Jones (eds.) *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ. 49. SSSA, Madison, WI. EE.UU.
67. Luthy, R.G., Aiken, G.R., Brusseau, M.L., Cunningham, S.D., Gschwend, P.M., Pignatello, J.J., Reinhard, M., Traina, S.J., Weber Jr., W.J., Westall, J.C., 1997. Sequestration of hydrophobic organic contaminants by geosorbents. *Environmental Science and Technology* 31, 3341–3347.
68. Lozano Ortiz, L. (2005, 7 diciembre). LA BIOINDICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA: IMPORTANCIA DE LOS MACROINVERTEBRADOS EN LA CUENCA ALTA

- DEL RIO JUAN AMARILLO, CERROS ORIENTALES DE BOGOTA. Umbral Científico.
<https://www.redalyc.org/pdf/304/30400702.pdf>
69. Li, X., Y. Feng y N. Sawatsky. 1997. Importance of soil-water relations in assessing the endpoint of bioremediated soils. *Plant Soil* 192: 219-226.
 70. Leahy, J.G., & R.R. Colwell, 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiological Reviews* 54(3): 305-315.
 71. Moreno, F., et al. (2008). Phytofiltration of mercury-contaminated water: Volatilisation and plant-accumulation aspects. *Environmental and experimental Botany*.
 72. Mc Spadden GBB. 2004 Ecology of *Bacillus* and *Paenibacillus* spp. in Agricultural Systems. *Phytopathology*. 94:1252-1258. <http://dx.doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.11.1252>
 73. Mysore D., Viraraghavan T. y Jin Y.C. (2005). Treatment of oily waters using vermiculite. *Water Res.* 39, 2643–2653.
 74. Melchor, F. (2006). *El Periódico de los Universitarios - Universidad Veracruzana - No. 224. UniVerso*. <https://www.uv.mx/universo/228/infgral/infgral13.htm>
 75. Martínez-Vázquez, J. G., M. A. Hernández-Rivera, M. E. Ojeda-Morales, y M. J. García-Marín. 2011. Condiciones ambientales y de nutrientes óptimos para el desarrollo del microorganismo hidrocarbonoclasta *Penicillium* sp. in vitro. *Akadémeia* 9: 97-112.
 76. Mishra, V., R. Lal y Srinivasan. 2001. Enzymes and operons mediating xenobiotic degradation in bacteria. *Crit. Rev. Microbiol.* 27: 133-166.
 77. Macek, T., Kotrba, P., Svatos, A., Novakova, M., Demnerova, K., Mackova, M. 2007. Novel roles for genetically modified plants in environmental protection. *Trends in Biotechnology*. 26: 146-152.
 78. Montagu, M.V. 2005. Technological milestones from plant science to agricultural biotechnology.
 79. Montoya-Arbeláez, J. I., F. Chejne-Janna, E. F. Castillo-Montolla J. R. Acero-Reyes, C. A. Gómez-Gutiérrez, J. A. Sarmiento-Chaparro, C. F. Valdez-Rentería, L. L. Garzón-Fuentes, J. O. Osorio-Velasco, D. F. Tirado, L. A. Blanco, N. Moreno-Safra, G. Marrugo y E. Y. Ospina-Aguirre. 2014. Pirolisis rápida de la biomasa. *Ecopretrol. Medellín, Colombia* 173 p.
 80. Montenegro Gallargo, F. (2007). *AISLAMIENTO Y SELECCIÓN DE CEPAS BACTERIANAS NATIVAS DE SUELOS DE LA XII REGIÓN DE CHILE, PARA LA DEGRADACIÓN DE CRUDOS DE PETRÓLEO*. cybertesis. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2007/fam777a/doc/fam777a.pdf>
 81. Núñez.R. A, Meas Vong. Y, Ortega. R y Olguín. E. J (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. revista ciencia México. https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf
 82. Naranjo, L.; Urbina, H.; De Sisto, A.; Leon, V., "Isolation of autochthonous non-white rot fungi with potential for enzymatic upgrading of Venezuelan extra-heavy crude oil". *Biocatal Biotransfor*, 2007, 25, 1-9.
 83. Nadon L., Siemiatycki J., Dewar R., Krewski D. y Guerin M. (1995). Cancer risk due to occupational exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. *Am. J. Ind. Med.* 28 (3), 303-324. DOI: 10.1002/ajim.4700280302.
 84. Odum, E. P. 1972. *Ecología*. Interamericana. Mexico. 639 p.
 85. Olguín, Eugenia J., HERNÁNDEZ, María Elizabeth, & SÁNCHEZ-GALVÁN, Gloria. (2007). Contaminación de manglares por hidrocarburos y estrategias de biorremediación, fitorremediación y restauración. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 23(3), 139-154. Recuperado en 07 de agosto de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992007000300004&lng=es&tlng=es.
 86. Ortiz Ribeiro, T.H., Rubio J. y Smith R.W. (2003). A dried hydrophobic aquaphyte as an oil filter for oil/water emulsions. *Spill Sci. & Tech. B.* 8, 483–489.

87. Oudot, J., "Rates of microbial degradation of petroleum components as determined by computerized capillary gas-chromatography and computerized mass-spectrometry", *Mar. Environ. Res.*, 1984, (13), 277-302.
88. PEMEX. 1999. *Diccionario de Términos de Pemex Refinación*. 1ra Ed., México, Petróleos Mexicanos, 36,70,110,138,172, 184P. Castro et al., 2014.
89. Padmavathiamma, P. K., Li, L. Y. 2007. *Phytoremediation Technology: Hyperaccumulation Metals in Plants*. Water, Air, & Soil Pollution. 184: 105-126.
90. Pernía, B., Demey, R., Inojosa, Y., y Naranjo Briseño, L. (2012). Biodiversidad y potencial hidrocarbonoclastico de hongos aislados de crudo y sus derivados: Un metaanálisis. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 3(1), 1-40.
91. Pernía, B., Demey, J., Inojosa, Y., Naranjo, L., "Biodiversidad y potencial hidrocarbonoclastico de hongos aislados de crudo y sus derivados: Un meta-análisis", *Rev. Latinoam. Biotecnol. Amb. Algal.*, 2012, 3(1), 1-40.
92. Pankhurst, C. E., Doube, B. M., Gupta, V. V. S. R. 1997. Biological indicators of soil health: synthesis. En *Biological*.
93. Puig, A. (s. f.). Bioindicadores (= indicadores biológicos). Mendoza.conicet. <https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Bioindic.htm>
94. Quiñones-Aguilar, E. E., R. Ferrera-Cerrato, F. Gavi-Reyes, L. Fernández-Linares, R. Rodríguez-Vázquez y A. Alarcón. 2003. Emergence and growth of maize in a crude oil polluted soil. *Agrociencia* 37: 585-594.
95. Qiang, J., Yin, H., Peng, H., Ye, J.S., Qin, H.M., He, B.Y., Zhang, N., "Aspergillus fumigatus A10 and its degradation characteristics", *KeHuanJingXue*, 2009, 30(5), 1298305.
96. Raz-Guzmán, A. 2000. "Crustáceos y Poliquetos" En: *Organismos indicadores de la calidad del agua y de la contaminación: (Bioindicadores)*, editado por Lanza Espino, G., HernándezPulido, S. y Carbajal-Pérez, L., 265-308. México: Editorial Plaza y Valdés.
97. ROLDAN PÉREZ, Gabriel. *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Ciencia y Tecnología. Universidad de Antioquia, 1992.
98. Rodríguez Alhama, I. (2013). *Reciclado en suelos de lodos de refinería: nuevas aproximaciones para la biodegradación de hidrocarburos mediante el manejo de enmiendas orgánicas*. [tesisenred.net. https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/128510/TIRA.pdf?sequence=1](https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/128510/TIRA.pdf?sequence=1)
99. Rice, C.W., Moorman, T.B. & Beare, M. —1996— Role of Microbial biomass C and N in soil quality — In: Doran, J.W. & Jones, A.J. (Eds). *Methods for assessing soil quality SSSA*, Madison, Wisconsin. Special Publication 49: 203-216
100. Ross, U., Joergensen, K. & Chandler, K. —2001— Effects of Zn enriched sewage sludge on microbial activities and biomass in soil — *Soil Biol. Bioch.* 33: 633-638.
101. Rentz, J. A., B. Chapman, P. J. J. Álvarez y J. L. Schnoor. 2003. Stimulation of hybrid poplar growth in petroleum-contaminated soils through oxygen addition and soil nutrient amendments. *Int. J. Phytorem.* 5: 57-72
102. Rivera-Cruz, M. C., R. Ferrera-Cerrato, V. Volke-Haller, R. Rodríguez-Vázquez y L. Fernández-Linares. 2002. Adaptación y selección de microorganismos autóctonos en medios de cultivo enriquecidos con petróleo crudo. *Terra* 20: 423-434.
103. Rittmann, B. E. 2006. Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology. *Trends Biotechnol.* 24: 261-266.
104. SAX, N. L., 1976. *Dangerous Properties of Industrial Materials*, 4th ed. Van Nostrand Rheinhold, Co., Nueva Cork, E.E.U.U.
105. SEMPLE, K.T. y col., 2001. Impact of Composting Strategies on the Treatment of Soils Contaminated with Organic Pollutants. *EE.UU.*, 112, 269-283P. Madrigal, 1998

106. SERMANAT, 2003. NOM-138-SERMANAT/SS-2003. Límites Permisibles de Hidrocarburos en Suelos as Especificaciones para su Caracterización y Remediación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 4-5P.
107. Spier, C., Stringfellow, W. T., Hazen, T. & Conrad, M. (2013). Distribution of hydrocarbons released during the 2010 MC252 oil spill in deep offshore waters. *Environmental pollution*. 173, 224-230.
108. Schnoor, J.L. (1997) Phytoremediation, GroundWater Remediation Technologies Analysis Center Technology Evaluation Report, TE-98-01, October 1997, [http:// www.clu-in.org/download/ toolkit/phyto_e.pdf](http://www.clu-in.org/download/toolkit/phyto_e.pdf)
109. Singh, O.V., Jain, R. K. 2003. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied and Microbiology Biotechnology*. 63: 128-135.
110. Saldaña, F. P., Sandoval, M. J. C., López, L. R. y Salcedo, S. E. 2001. Utilización de un Índice de Diversidad para determinar la calidad del agua en sistemas lóticos. *Ingeniería Hidráulica en México* 16(2):57-66.
111. Sara N.A (2018, 20 octubre). ¿QUÉ SON LOS BIOINDICADORES? BRUTAL. <https://www.brutal.org.es/que-son-los-bioindicadores/#:%7E:text=Los%20bioindicadores%20son%20organismos,y%20a%20los%20cambios%20de%20estos.&text=Entre%20los%20organismos%20que%20suelen,resultar%20muy%20%C3%BAtil%20la%20herpetofauna>.
112. Siciliano, S. D. y J. J. Germida. 1998. Mechanisms of phytoremediation: biochemical and ecological interactions between plants and bacteria. *Environ. Rev.* 6: 65-79.
113. Samson, R. A., Varga, J. *Aspergillus systematics in the genomic era*, CBS Fungal Utrecht: Biodiversity Centre, 2007, ISBN: 978-90-70351-69-4.
114. Salmanov, M., Aliyeva, S., Veliyev, M., Bekrashi, N., "The study of degradation ability of oil products and oil hydrocarbons by microscopic fungi isolated from polluted coastal areas of Absheron Peninsula of Caspian Sea", *Ekoloji*, 2008, 59-64.
115. Saratale, G., Kalme, S., Bhosale, S., Govindwar, S., "Biodegradation of kerosene by *Aspergillus ochraceus* ", *J Basic Microb.*, 2007, (47), 400-405.
116. Sánchez, O., Ferrera, I., Vigués, N., García de Oteyza, T., Grimalt, J.O., Mas, J., "Presence of opportunistic oil-degrading microorganisms operating at the initial steps of oil extraction and handling", *IntMicrobiol*, 2006, 9(2), 119-24.
117. Silva, I. S., Santos EDA, C., Menezes, C. R., Faria, A. F., Franciscon, E., Grossman, M., Durrant, L. R., "Bioremediation of a polyaromatic hydrocarbon contaminated soil by native soil microbiota and bioaugmentation with isolated microbial consortia", *Bioresour Technol.*, 2010, 100(20), 4669-75.
118. Swalnnel R., K. Lee, M. McDonagh. 1996. Field Evaluation of Marine Oil Spill Bioremediation. *Microbiol Review* 60: 342-365.
119. Salleh, A.B., F.M. Ghazali, R.N.A. Rahman, & M. Basri.,2003. Bioremediation of petroleum hydrocarbon pollution. *Indian Journal of Biotechnology*, 2: 411- 425.
120. Thangavel, P., Subhram, C. V. 2004. Phytoextraction - Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part B.* 70(1):109-130.
121. Tejera-Hernández B, Rojas-Badía MM y Heydrich-Pérez M. 2011. Potencialidades del género *Bacillus* en la promoción del crecimiento vegetal y el control de hongos fitopatógenos. *Revista CENIC Ciencias Biológicas*. 42:131-138. Disponible en línea: <http://www.redalyc.org/pdf/1812/181222321004.pdf>
122. Udo, E. J. y A. A. A. Fayemi. 1975. The effect of oil pollution of soil on germination, growth and nutrient uptake of corn. *J. Environ. Qual.* 4: 537-540.
123. USEPA (US Environmental Protection Agency). 2000. Introduction to phytoremediation. Cincinnati, OH, USA.

124. Van Hamme, J. D., Singh, A., and Ward, O. P. (2003). Recent advances in petroleum microbiology. *Microbiol. Mol. Biol. R.*
125. Van Gestel, M., Ladd, J.N. & Amato, M. —1991— Carbon and Nitrogen mineralization from two soils of contrasting texture and micro aggregate stability: influence of sequential fumigation, drying and storage — *Soil Biol. Biochem* 23: 313-322.
126. Vain, P. 2006. Global trends in plant transgenic science and technology. *Trends Biotechnol.* 24:206-211. *Trends Plant Sci.* 10: 559-560.
127. Watt M. y Evans J. (1999). Proteoid roots physiology and development. *Plant Physiol.*
128. Widdel F, Rabus R (2001) Anaerobic biodegradation of saturated and aromatic hydrocarbons. – *Current Opinion in Biotechnology.*
129. White S., Seda B., Cousins M., Klaine S. and Whitwell T., 2009. Nutrient Remediation Using Vegetated Floating Mats. *Water Management Section 1. In: SNA Research Conference Vol. 54.*
130. Wang LT, Lee FL, Tai CJ, Kasai H. Comparison of *gyrB* gene sequences, 16S rRNA gene sequences and DNA–DNA hybridization in the *Bacillus subtilis* group. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology.* 2007; 57:1846-50.
131. Washington, H. G. 1984. Diversity, biotic and similarity indices. A review with special relevance to aquatic ecosystems. *Water Research.* 18(6):653-694.
132. Walker, T. S., H. P. Bais, E. Grotewold y J. M. Vivanco. 2003. Root exudation and rhizosphere biology. *Plant Physiol.* 132: 44-51.
133. Xia, H. (2004). Ecological rehabilitation and phytoremediation with four grasses in oil shale mined land. *Chemosphere.*
134. Ye, J.S., et al., "Biodegradation of anthracene by *Aspergillus fumigatus*", *J Hazard Mater.*, 2011, 185(1), 174-181.
135. Zimicz, Carolina. (s. f.). Las plantas y su capacidad para remediar sitios contaminados. IBIGEO, CONICET.
<https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/48535/Las%20Plantas%20y%20su%20capacidad%20para%20remediar%20sitios%20contaminados.pdf?sequence=5&isAllowed=y;Untitled>
136. Braddock, J. F., M. L. Ruth, P. H. Catterall, J. L. Walworth y K. A. McCarthy. 1997. Enhancement and inhibition of microbial activity in hydrocarbon-contaminated arctic soils: implications for nutrient-amended bioremediation. *Environ. Sci. Technol.* 31:2078-2084.
137. Cunningham C. Y Philip J. Comparison of bioaugmentation and biostimulation in ex situ treatment of diesel contaminated soil. *Land Contamination and Reclamation.* 8, pp 261 – 269, 2000.
138. Gómez, W., Gaviria, J., & Cardona, S. (s/f). EVALUACIÓN DE LA BIOESTIMULACIÓN FRENTE A LA ATENUACIÓN NATURAL Y LA BIOAUMENTACIÓN EN UN SUELO CONTAMINADO CON UNA MEZCLA DE GASOLINA -DIESEL ASSESSMENT OF THE BIOSTIMULATION AGAINST BIOAUGMENTATION AND NATURAL ATTENUATION ON CONTAMINATED SOIL WITH DIESEL-GASOLINE MIXING. *Org.co.* Recuperado el 26 de junio de 2023, de <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n160/a08v76n160.pdf>
139. Morales A, C. G. (s.f.). USO DE BIOESTIMULANTES. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6673/Capitulo%206.pdf?sequence=11&isAllowed=y>
140. García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (s/f). Pastos y Forrajes. *Redalyc.org.* Recuperado el 26 de junio de 2023, de <https://www.redalyc.org/pdf/2691/269125071001.pdf>
141. Garbisu, C.; Becerril, J.M.; Epelde, L.; Alkorta, I. Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso

- fitorremediador Ecosistemas, vol. 16, núm. 2, 2007, pp. 1-6 Asociación Española de Ecología Terrestre Alicante, España
142. DEGRADACIÓN DE HIDROCARBUROS. (s.f.). MSc in Bioinformatics Master in Bioinformatics Faculty Biosciences, University Autònoma Barcelona (UAB) <http://MScBioinformatics.uab.cat> Home. http://bioinformatica.uab.es/biocomputacio/treballs02-03/RBurgos/dades/degradaci%C3%B3n_de_hidrocarburos.htm#arriba
 143. Embargo, P. D. P. I. (s/f). DE LÍNEA BASE AMBIENTAL. Cicese.mx. Recuperado el 26 de junio de 2023, de https://atlascigom.cicese.mx/map_data/T004/ATLAS-TOMO-04.pdf
 144. Ruiz, M. A. (2014). TRABAJO DEL ORIGEN DEL PETROLEO. https://www.academia.edu/7841831/TRABAJO_DEL_ORIGEN_DEL_PETROLEO
 145. La Nutrición Vegetal. (n.d.). Scribd. Retrieved June 27, 2023, from <https://es.scribd.com/document/433749500/La-Nutricion-Vegetal>

