FITORREMEDIACIÓN
ESTADO DEL ARTE

ANA TERESA BARRIENTOS RINCÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2012

FITORREMEDIACIÓN
ESTADO DEL ARTE

ANA TERESA BARRIENTOS RINCÓN

Monografía para optar al título de:
Especialista en Ingeniería Ambiental

Director
Biólogo MARLON SERRANO GOMEZ
Especialista en Ingeniería Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2012

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 11
1. CONTAMINACIÓN EN COLOMBIA 12
1.1. RECURSO HÍDRICO 12
1.2. BOSQUES Y SUELOS 13
2. FITORREMEDIACCIÓN 15
2.1. DEFINICIÓN 15
2.2. TIPOS DE CONTAMINANTES QUE SE PUEDEN ELIMINAR CON LA FITORREMEDIACIÓN 16
2.3 LAS PLANTAS 16
3. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN POR TRATAMIENTO “ex – Situ” (fuera del sitio contaminado). 21
3.1. Tratamiento térmico. 21
3.2. Biodegradación 21
4. TECNOLOGÍAS DE BIODEGRADACIÓN 'in Situ'. 23
4.1. Extracción in-Situ. (Landfarming). 23
4.2. Ventilación del suelo (extracción vaporosa del suelo). 23
4.3. Bioestimulación. 23
4.4. Bioaumentación. 24
4.5. Fitoestabilización. 24
4.6. Fitodescontaminación. 24
5. PROCESOS DEL SUELO QUE BENEFICIAN LA DESTRUCCIÓN DEL CONTAMINANTE Y / O EXTRACCIÓN. 29
6. REQUISITOS PARA INICIAR EL PROCESO DE FITORREMEDIACIÓN. 30
7. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN 32
7.1. Ventajas. 32
7.2. Desventajas. 33

8. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN 34
9. EJEMPLO DE FITORREMEDIACIÓN CON MANGLARES 37
MEXICO.....37
9.1. GENERALIDADES:.....37
9.2. Área de estudio. 38
9.3. Metodología.....39
9.4. Resultados y discusión.....40
9.5. Conclusiones.....41
9.6. Resumen.....41
10. EJEMPLO DE FITORREMEDIACIÓN EN HIDROCARBUROS.....43
COLOMBIA ECP 43
10.1. GENERALIDADES.....43
10.2. ÁREA DE ESTUDIOX:.....44
10.4. RESULTADOSX: 45
10.5. CONCLUSIONES.....45
11. CONCLUSIONES.....47
12. RECOMENDACIONES 48
BIBLIOGRAFÍA.....49

LISTADO DE TABLAS

Pág.

Tabla No. 1 Reforestación en Colombia 2002-2012 14
Tabla No. 2 Mecanismos de fitorremediación 28
Tabla No. 3 Fitorremediación. Usos y Demostraciones en el Campo 35
Tabla No. 4 Casos de Importancia en México 38
Tabla No. 5 Parámetros de Crecimiento de Especies en Ecosistema de Manglar del Golfo de México. 39
Tabla No. 6 Concentración de Algunos Metales Pesados (ppm) en Diferentes Componentes de un Manglar del L. Racemosa en la Laguna la Costa, Tampico, Tamaulipas, México. 41
Tabla No. 7 Concentración de Plomo en Hojas y Ramas, y Capacidad Depuradora del Manglar de L. Racemosa en la Laguna la Costa, Tampico, Tamaulipas, México 42

LISTADO DE FIGURAS

Pág.

Figura No. 1 Reforestación en Colombia 2002-2012 14
Figura No. 2 Zonas de la planta donde ocurre el proceso de fitorremediación. ... 27
Figura No. 3. Ubicación de Manglares a nivel mundial 38
Figura No. 4. Mecanismos principales de la fitorremediación de hidrocarburos. .. 44
Figura No. 5. Desarrollo del proceso de fitorremediación en Campo Palagua 46

TÍTULO[*]: FITORREMEDIACIÓN ESTADO DEL ARTE[*]

AUTOR[**]: Ana Teresa Barrientos Rincón[**]

PALABRAS CLAVES: fitorremediación**, plantas, contaminación.**

CONTENIDO

La Fitorremediación es la recuperación de áreas contaminadas mediante el uso de plantas. Hoy cuando el ser humano se da cuenta que ha afectado la tierra con su estilo de vida y que ella no es capaz de recuperarse en estos tiempos, intenta aceptar el uso de métodos alternativos.

Este proceso es eficiente para recuperar ciertos contaminantes a bajo costo, pero tiene varios limitantes: los tiempos de recuperación son en la mayoría de los casos a mediano o largo plazo, las profundidades de las áreas por recuperar deben ser alcanzadas por las raíces de las plantas, y las concentraciones de los contaminantes no deben superar el porcentaje de adaptabilidad de los vegetales.

Se deben analizar las plantas usadas en el proceso antes de disponerlas, ya que ellas acumulan algunos contaminantes y es conveniente revisar la afectación que estos tendrían en la salud de los seres vivos.

Buscando reducir los tiempos y aumentar la eficiencia de esta técnica, los investigadores han usado mecanismos adicionales entre los cuales se encuentran la inclusión de bacterias y el uso de métodos mecánicos.

El hombre ha usado la fitorremediación en la recuperación de las aguas de los vertimientos domésticos e industriales y en la de suelos contaminados con hidrocarburos, entre otros. Obteniendo con este método la reducción efectiva de algunos contaminantes.

---

[*] Trabajo de grado

[**] Facultad de Ingeniería Físico-Química. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Marlon Serrano Gómez.

TITLE: PHYTOREMEDIATION - STATE OF THE ART

AUTHOR: Ana Teresa Barrientos Rincón**

KEYWORDS: phytoremediation, plants, contamination.

CONTENT

Phytoremediation is the recovery of contaminated areas through the use of plants. Today when we realize that we've affected the earth with our lifestyle and that it's unable to recover in our time, we try to accept the use of alternative methods.

This process is efficient to recover certain pollutant sat low cost, but it has several limitations :the time of recovery are in most cases medium to long term, the depths of the areas to be recovered must be reached by plant roots, and concentrations of pollutants should not exceed the percentage of adaptability of the vegetables.

The plants used in the process must be analyzed before arranging them, because they tend to accumulate some pollutants and it is convenient to review the effects that these would have on the health of living beings.

Seeking to reduce the times and increase the efficiency of this technique, researchers have used additional mechanisms among which are the inclusion of bacteria and the use of mechanical methods.

Man has used phytoremediation in the recovery of water recovery of the domestic and industrial discharges and in the contaminated soil with hydrocarbons, among others. Getting with this method, the effective reduction of some contaminants.

---

*Grade Project.

**Chemical Physique Engineering´s Faculty. Chemical Engineering School. Specialization in Environmental Engineering. Director: Marlon Serrano Gómez

INTRODUCCIÓN

Hoy cuando el hombre se da cuenta que ha afectado con su estilo de vida la tierra, empieza a aplicar alternativas de recuperación de las que hace algunos años los soñadores empezaron a hablar: métodos alternativos de recuperación de áreas contaminadas. Las actividades antrópicas que han generado estos residuos contaminantes provienen de los hidrocarburos, las aguas residuales domésticas, las aguas industriales, los insumos agrícolas, la minería, etc.

La fitorremediación tiene un enemigo fuerte típico de la época: la inmediatez, todo se espera con rapidez, y este programa funciona, pero a largo plazo y con algunos limitantes.

Las técnicas que se usan actualmente, consisten en procedimientos que disminuyen las concentraciones de los contaminantes y aumentan los volúmenes contaminados, y la mayoría de los procesos desplazan la contaminación ya sea en volúmenes, lugares, o tipos.

1. CONTAMINACIÓN EN COLOMBIA

1.1. RECURSO HÍDRICO

El agua subterránea ¨Recurso invisible¨[1] es importante para mantener la humedad del suelo, el caudal de los ríos y las zonas húmedas. Cerca de la mitad de la población se abastece de las aguas subterráneas, que son vulnerables a la contaminación y a la sobreexplotación, y que son contaminadas por la industria, la agricultura, los residuos sólidos y líquidos urbanos, la actividad minería, etc.

Colombia cuenta con una oferta hídrica superficial de 2.084 km3 y 36% del territorio con agua subterránea, con marcadas diferencias en cuanto su disponibilidad y uso. De acuerdo con el IDEAM, el 40% de las principales cuencas son vulnerables al deterioro, atribuible entre otros, al clima, la erosión, a una pobre cobertura vegetal y a la presión antrópica[2]. (Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014,VI. Sostenibilidad ambiental y prevención del riesgo).

Se estima que la demanda total por el recurso es de 12,5 km3/año, representada en un 54% por el sector agrícola, seguido por la actividad doméstica 29%, industrial 13%, pecuaria 3% (IDEAM, 2010b:13). A pesar de ello, los sectores no registran información y las redes de monitoreo no permiten contar con información oportuna, de calidad y a una escala adecuada por cuenca, que permita anticipar potenciales conflictos por uso (MAVDT, 2010a:43).

[1] Término usado por la UNESCO
[2] Datos del Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014,VI. Sostenibilidad ambiental y prevención del riesgo.

Asimismo, preocupa que las inversiones se hayan concentrado en la infraestructura para satisfacer la demanda y no para asegurar la oferta (DNP, 2007:66).

En cuanto a la calidad del recurso, en las áreas donde se concentra el mayor desarrollo económico, se presenta un fuerte deterioro como consecuencia de la recepción de vertimientos puntuales y difusos con una alta carga contaminante que supera la capacidad de resiliencia y autodepuración de los mismos, como es el caso de los ríos Bogotá, Medellín, Chicamocha, alto Cauca, Lebrija. Los principales contaminantes son: por su volumen la materia orgánica originada por vertimientos domésticos, algunas industrias, los sedimentos, los generados en procesos erosivos de zonas agrícolas.

En Bogotá la autoridad ambiental mostró cómo la carga orgánica del sector industrial se redujo entre 1995 y el año 2000 en el 81%, sin ningún efecto en la calidad del río Bogotá (según datos del DAMA en 2002), por lo que concluye la Contraloría General de la República: el mayor impacto de los vertimientos en aguas superficiales lo causan los centro urbanos[3].

Cabe resaltar que en Colombia el Estado ha participado en la recuperación del recurso hídrico, es así como se adelanta la actualización de la norma nacional de vertimientos.

1.2. BOSQUES Y SUELOS

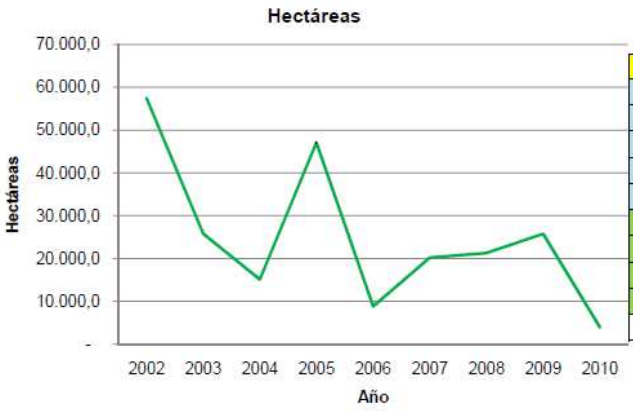
Los páramos, bosques, humedales y sabanas naturales son altamente vulnerables a las demandas generadas por macro proyectos agrícolas, viales y minero-

[3] Contraloría General de la República. Estado de los Recursos Naturales y del Ambiente. 2007-2008. Bogotá, Contraloría General de la República, mayo de 2007. pp. 228

energéticos, entre otros, ocasionando la transformación y fragmentación de ecosistemas, exacerbando la deforestación, aumentando el número de especies en condiciones de amenaza, alterando el recurso hídrico y degradando el suelo[4].

Los suelos además de las contaminaciones que reciben, también son amenazados por la deforestación que se presenta en el país, y como con el pasar de los años las reforestaciones con fines protectores han disminuido como se observa en la tabla 1 y figura 1.

TABLA NO. 1 y FIGURA NO. 1 Reforestación en Colombia 2002-2012



Año	Hectáreas
2002	57.469,5
2003	25.804,2
2004	15.150,9
2005	47.109,8
2006	8.849,0
2007	20.225,0
2008	21.285,5
2009	25.756,0
2010	3.941,4
Total	**225.591,3**

Fuente: SIGOB

Los bosques son afectados por el cambio en el uso del suelo, la agricultura, la ganadería, introducción de especies, contaminación, aprovechamiento ilegal, cambio climático, incendios forestales y todos estos a su vez afectan el suelo.

[4] Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014, VI. Sostenibilidad ambiental y prevención del riesgo.

2. FITORREMEDIACCIÓN

2.1. DEFINICIÓN

La Fitorremediación constituye una variación de las técnicas de biorremediación; está definida como una técnica de tratamiento innovadora, que consiste en la aplicación de procesos químicos, biológicos o físicos a desechos peligrosos o materiales contaminados. Usa las plantas y árboles para limpiar agua y suelo contaminados. La técnica consiste en cultivar plantas en un lugar contaminado, y en algunos casos cosecharlas, controlando su participación en la cadena trófica, ya que su consumo puede causar bioacumulación en los seres vivos que los consuman.

Como todavía es un proceso que no se ha aplicado en muchos lugares, ni se han documentado plenamente los resultados de su uso, está clasificada como una técnica innovadora. Esta empezó a usarse desde 1990.

Existe la posibilidad de que esta técnica de tratamiento, cuando comienza a aplicarse en gran escala, no sea tan efectiva, dado que se deben tener en cuenta las condiciones óptimas para su buen desarrollo, y se trabaja en condiciones naturales y estas son impredecibles.

Con el pasar de los tiempos y a medida que se obtengan más datos de los usos de este programa, que se conozcan sus costos y sus tiempos de recuperación, se reconocerá la eficacia de estas técnicas de tratamiento.

Es recomendable, porque generalmente no altera los ecosistemas que se han adaptado a los medios contaminados, y se realiza la recuperación sin atentar contra ellos y el paisaje, es una técnica pasiva, amigable, que aprovecha la

energía solar y se puede usar junto con métodos mecánicos o en algunos casos en reemplazo de estos.

Según las investigaciones en el medio natural existen microorganismos que degradan los contaminantes, estos deben estar en un porcentaje máximo para que los microorganismos sean eficientes, los cuales aumentan la actividad y el crecimiento al suministrarles las condiciones adecuadas de nutrientes, aireación, mezcla, pH, temperatura y humedad; la fitorremediación se ha mejorado inoculando microorganismos a las áreas por recuperar.

2.2. TIPOS DE CONTAMINANTES QUE SE PUEDEN ELIMINAR CON LA FITORREMEDIACIÓN

- Metales pesados (cromo, arsénico, cadmio, plomo, zinc, cobre, mercurio).
- Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX).
- Bifenilos policlorados (PCB)
- Hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH)
- Tricloroetileno (TCE) y otros compuestos organoclorados
- Residuos de pesticidas.

2.3 LAS PLANTAS

Al usar la fitorremediación como alternativa de recuperación se debe tener en cuenta:

- El usar especies vegetales de mayor resistencia a la contaminación, que aporten una mayor cobertura y biomasa.

- Incrementar en el suelo material energético que sinteticen las plantas para aumentar los microorganismos autóctonos que degradan las toxinas a cadenas menos tóxicas y en algunos casos a CO2 más agua.

- Dentro de las características que favorecen la fitorremediación se destaca las funciones que cumple el **Sistema radicular** de las plantas, como son que:

  - Absorben nutrientes, agua y contaminantes del suelo.
  - Transportan estos elementos a las partes aéreas de la planta.
  - Producen fitohormonas.
  - Actúan como órganos de almacenamiento.
  - Sirven para anclar la planta en el suelo.
  - Mantiene una alta población bacteriana en la rizosfera por medio de la presencia de compuestos solubles e insolubles que se liberan de las células vivas (excreciones) y células muertas de la raíz (componentes químicos), que constituye una de las funciones más importantes respecto a la depuración.

- **La Rizosfera:** es el volumen de suelo inmediato a la raíz, donde tiene lugar la interacción de los microorganismos. Es una zona de actividad biológica intensa, con una transferencia importante de agua y nutrientes. En ella se estimula la multiplicación de las bacterias, hongos, de una manera fuerte pero selectiva, por medio de sus exudados.

- **Los Exudados.** Son compuestos de bajo peso molecular, que varían de planta a planta, escapan de las células por los espacios intercelulares y pasan al suelo gracias a las uniones entre células o directamente por las paredes celulares epidérmicas. Estas sustancias normalmente refuerzan la actividad microbiana.

- **La función de las plantas como estructuras de remediación de suelos contaminados:**

Las raíces de las plantas captan rápidamente contaminantes de cada una de las siguientes fases del suelo:

- ✓ Fase gaseosa. La captación de los contaminantes volátiles encontrados en la fase gaseosa del suelo, por medio de las raíces de las plantas, es un mecanismo importante para algunos compuestos, incluso para aquéllos con presión de vapor relativamente baja.
- ✓ Fase líquida. Los contaminantes encontrados en la fase líquida del suelo, son captados por las raíces de las plantas por difusión y flujo de masa.
- ✓ Fase sólida. Las raicillas y pelos están, en muchos casos, en íntimo contacto con las superficies coloidales del suelo.

- **Transporte de los contaminantes dentro de la Planta:**

La solución contaminante disuelta en la fase liquida del suelo con valores muy pequeños, es transportada a células porosas del espacio libre de la raíz, por medio del flujo de masa. Este movimiento de la solución contaminante en el suelo es resultado de un déficit de agua en la raíz inducido por la transpiración. Si la planta realiza una absorción de la solución del suelo mayor que el flujo de ésta hacia la raíz, se desarrolla un gradiente de concentración, obteniéndose un movimiento por difusión.

- **Metabolismo dentro de la Planta:**

Las enzimas de las plantas pueden metabolizar una amplia variedad de contaminantes xenobióticos. Estas se encuentran y son activas en el interior de la raíz, tallos, y hojas o también pueden encontrarse en suelos y en sedimentos.

Algunas enzimas provenientes de los exudados radiculares o de raíces muertas, son activas en el exterior de la raíz y están localizadas en el suelo. Entre ellas están:

- ✓ Dehalogenasa degrada subproductos del etileno o productos clorados.
- ✓ Nitrilasa Quita el grupo cianuro de los pesticidas y otros compuestos.
- ✓ Fosfatasa. Enzima de crecimiento que degrada grupos fosfato de los organofosforados.
- ✓ Peroxidasa. Interviene en la degradación de fenoles y otros compuestos químicos que ocurren naturalmente.
- ✓ Nitrorreductasa. Se localiza en la membrana de la célula, reduce los grupos nitrato de los compuestos nitroaromáticos, para obtener nitrógeno utilizado en el crecimiento celular.

- **Selección de plantas:**

Los siguientes factores se deben tener en cuenta en el momento de seleccionar las especies vegetales:

- ✓ Plantas con alta capacidad reproductora, gran poder de adaptación a diferentes condiciones de clima y suelo, alta capacidad para soportar condiciones adversas de humedad, temperatura, contaminación; buena capacidad de propagación vegetativa por semillas, tallos, rizomas, bulbos y raíces; desarrollo rápido de raíces y partes aéreas.
- ✓ Plantas que no sean de consumo humano.
- ✓ Plantas diferentes a la maleza.

- **Procesos de las plantas que benefician la destrucción del contaminante y / o la extracción.**

Los principales se enumeran a continuación:

- ✓ Bioactividad microbiana alrededor de las raíces de la planta (Rizosfera).
- ✓ Las plantas y los microorganismos producen quelatos y agentes activos en la superficie del suelo.
- ✓ Las micorrizas aumentan el área de superficie del suelo y proporcionan una capacidad enzimática adicional.
- ✓ La raíz, el tallo y las hojas poseen actividades metabólicas enzimáticas para la detoxificación.
- ✓ Captación de cationes y algunos aniones en la raíz.
- ✓ Translocación de iones absorbidos por las raíces a los retoños.
- ✓ Evapotranspiración a través de las raíces hacia los retoños de la planta.
- ✓ División de las moléculas orgánicas hidrofóbicas en las raíces.

3. TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN POR TRATAMIENTO “ex – Situ” (fuera del sitio contaminado).

La utilización de estas técnicas a veces puede provocar alteraciones posteriores a la remediación que impiden recuperar el uso anterior del suelo, con ellas se generan costos adicionales por la extracción - transporte de los suelos contaminados, las técnicas se pueden clasificar como:

3.1. Tratamiento térmico.

El suelo contaminado se lleva a incineración a elevadas temperaturas, mediante una combustión controlada.

3.2. Biodegradación.

Es el tratamiento de suelos contaminados mediante la acción microbiana.

Existen tres principales técnicas biológicas disponibles:

- **Landfarming.** Consiste en extender el suelo contaminado sobre una geomembrana para evitar el escape de lixiviados; se airea mediante el volteo o arado y se le proporcionan microorganismos y nutrientes.

  Se emplea para reducir niveles tóxicos en suelos altamente contaminados. La efectividad de estas metodologías depende de innumerables factores, entre ellos están, las condiciones climáticas, las características agronómicas, topográficas y microbianas del suelo receptor, entre otras.

- **Biorreactores.** Se toma un suelo altamente contaminado y se pasa a un sistema reactor compacto el cual provee oxígeno y nutrientes. El suelo contaminado se mezcla para promover un mejor contacto entre los microorganismos, los contaminantes, el oxígeno y los nutrientes, controlando los factores bióticos y abióticos.

- **Tecnologías de biodegradación "on Situ".** El suelo se coloca en piscinas de suelo arcilloso, con el fondo recubierto de una capa de plástico de polietileno, que dispone de drenaje para tratar el agua de percolación. Por encima de la capa de polietileno se coloca arena limpia para proteger la capa de plástico y para ajustar el drenaje. El sistema dispone de rociadores, con los que se va añadiendo agua, nutrientes y microorganismos.

4. TECNOLOGÍAS DE BIODEGRADACIÓN 'in Situ'.

Las técnicas se pueden clasificar como:

4.1. Extracción in-Situ. (Landfarming).

Consiste en la percolación de la extracción de agentes acuosos dentro del sitio contaminado. Los contaminantes solubles del suelo se disuelven en la percolación, por medio de un sistema especial de separación donde la percolación es bombeada y tratada. Después del reacondicionamiento, los agentes extractores son reutilizados. El proceso continúa hasta que la concentración de residuos en el suelo satisface los estándares de limpieza.

4.2. Ventilación del suelo (extracción vaporosa del suelo).

La extracción por vapor es aplicable a tratamientos in - Situ de suelos contaminados con compuestos orgánicos volátiles, como el tricloroetileno y percloroetileno. Solamente se puede aplicar a suelos arenosos.

4.3. Bioestimulación.

Con este método se introducen nutrientes al sistema para que los microorganismos activen su metabolismo.

Esta técnica puede ser aplicada en combinación con la bioaumentación. Los procesos que conducen de una manera natural a la biodegradación son bastante lentos, por este motivo se suele aumentar la temperatura, añadir oxígeno, agua o

nutrientes, ajustar el pH, brindándole a los microorganismos las condiciones adecuadas para acelerar considerablemente la biodegradación.

4.4. Bioaumentación.

Consiste en añadir al suelo otro tipo específico de microorganismos o aumentar la concentración de los existentes, en aquellas condiciones en las que los procesos biológicos naturales no son suficientes para llevar a cabo la depuración, con el fin de favorecer los procesos de biodegradación.

Los microorganismos que se utilizan en el proceso pueden ser obtenidos por aislamiento a partir del suelo a rehabilitar y pueden ser 'autóctonos' o exógenos, es decir, son traídos de otro ecosistema y se adaptan a las nuevas condiciones.

4.5. Fitoestabilización.

Son procesos que estabilizan y retienen los contaminantes en el suelo, que buscan reducir el daño medio ambiental, disminuyendo la movilidad y la disponibilidad del contaminante, estos ocurren naturalmente, son lentos y difíciles de cuantificar.

4.6. Fitodescontaminación.

Es un subconjunto de la Fitorremediación. En este proceso se reduce la concentración de contaminantes en el suelo a un nivel aceptable a través de las técnicas agronómicas, la acción de las plantas y de su microbiota asociada. En la figura XXX y tabla XX se observan los distintos procesos naturales como las plantas pueden incorporan los contaminantes, y corresponden a:

- **Fitoextracción.** Conocida también como Fitoacumulación. Se captan los metales contaminantes por las raíces de la biomasa vegetal - extractiva y su acumulación en tallos y hojas.

  Algunas plantas absorben cantidades extraordinarias de metales en comparación con otras. Se selecciona una o varias de este tipo de plantas y de acuerdo a los metales presentes y a las características del lugar se plantan en un sitio. Después de un tiempo, cuando las plantas han crecido, se cortan y este tejido fino, rico en contaminantes acumulados es procesado fácilmente y con seguridad, secándose, incinerándose o dejando que se transformen en abono vegetal para reciclar los metales.

  Este procedimiento se puede repetir la cantidad de veces que sea necesario para reducir a límites aceptables la concentración de contaminantes en el suelo. Si se incineran las plantas, las cenizas deben colocarse en un vertedero para desechos peligrosos; el volumen de basura tóxica producida por la cantidad de ceniza será solo alrededor del 10% del volumen de los desechos que habría que eliminar si se excavara el suelo contaminado para tratarlo.

  El producto de los procesos que acompañan a la Fitoextracción en suelos y aguas contaminadas es una eliminación de tóxicos, cualidad que permanece en el tiempo.

- **Fitovolatilización** .Las plantas y su actividad microbiana, a través de enzimas especializadas, pueden transformar, degradar y finalmente volatilizar los contaminantes desde el suelo. La volatilización puede reducirse tanto desde el sistema radicular como desde la parte superficial del suelo. La volatilización ocurre tanto desde los retoños de la planta o

raíces, como desde la superficie del suelo. La Fitovolatilización se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos. Cuando las plantas toman los contaminantes tienen dos vías para la degradación, a) los acumula porque no le son tóxicos b) los elimina porque le son tóxicos; estos contaminantes pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera como un gas no tóxico.

- **Bombeo orgánico**. Una planta se puede comparar a una bomba dirigida por energía solar. Los árboles pueden realizar una acción de bombeo orgánico cuando sus raíces bajan hacia la capa freática, formando una masa densa de raíces que absorben gran cantidad de agua.

  La acción de bombeo de las raíces disminuye la tendencia de los contaminantes superficiales a descender hacia el agua subterránea y el agua potable, reduciendo el escurrimiento, la corrosión de la superficie y las proporciones de flujo de tierra - agua, controlando la pendiente hidráulica y previniendo la migración lateral de los contaminantes. Así mismo, los árboles plantados en vertederos como sustitutos orgánicos de la tradicional capa de arcilla o de plástico absorben agua de lluvia que, de lo contrario, se filtraría por el vertedero y llegaría al fondo en forma de 'lixiviado' contaminado.

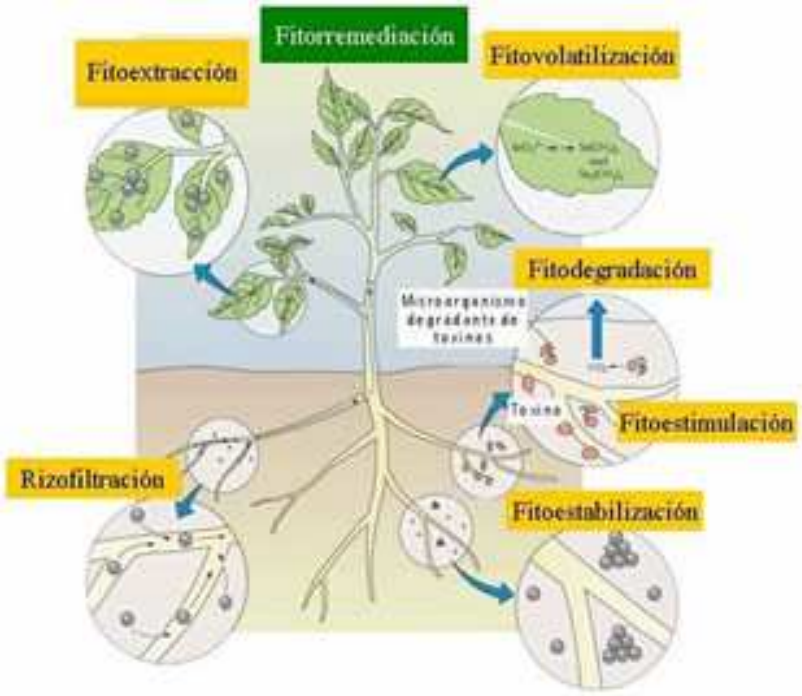
- **Fitodegradación.** Es el proceso mediante el cual las plantas toman el contaminante y lo metabolizan transformándolo en un material sin riesgos para el medio natural.

- **Biodegradación intensificada de la rizosfera o Rizodegradación.** Es un proceso mucho más lento, donde las raíces de las plantas, su microbiota

asociada y / o los productos excretados, destruyen el contaminante en la zona de la raíz mediante el proceso denominado biodegradación.

Las sustancias naturales liberadas por las raíces de las plantas estimulan la degradación de compuestos químicos orgánicos en la rizosfera por medio de exudados de la raíz, aumentando las comunidades microbianas y a su vez la actividad biodegradativa de los microorganismos. Se puede añadir al suelo otro tipo específico de microorganismos o aumentar la concentración de los existentes con el fin de acelerar los procesos de degradación en la rizosfera.

FIGURA NO. 2 ZONAS DE LA PLANTA EN DONDE OCURRE EL PROCESO DE FITORREMEDIACIÓN.



Fuente: Uso de la fitorremediación para disminuir la contaminación del plomo en la región de Pasco.

TABLA NO. 2 MECANISMOS DE FITORREMEDIACIÓN

Tipo	Proceso involucrado	Contaminación Tratada
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (principalmente, la parte aérea).	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercúrio, plomo, selenio, zinc.
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, selenio, zinc, isótopos radiactivos, compuestos fenólicos.
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a los metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje de napas subterráneas o al aire.	Lagunas de desechos de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc.
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DTN, RDX, nitrobenceno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

Fuente: EPA542-F-96-025. Medidas Fitocorrectivas Septiembre, EUA, 1996.

5. PROCESOS DEL SUELO QUE BENEFICIAN LA DESTRUCCIÓN DEL CONTAMINANTE Y / O EXTRACCIÓN.

- ✓ Prácticas agronómicas que proporcionen aire, nutrientes, rupturas de área de superficie, flujos químicos y estímulo microbiano.

- ✓ Volumen de suelo: tanto para la degradación microbiana como para la química.

- ✓ Procesos de reducción y oxigenación en las estaciones secas y estaciones húmedas.

- ✓ Procesos químicos y bioquímicos como: hidrólisis, sustitución y eliminación.

6. REQUISITOS PARA INICIAR EL PROCESO DE FITORREMEDIACIÓN.

- ✓ La selección final de las plantas está basada en la absorción/degradación de los contaminantes orgánicos.

- ✓ Deben usarse prácticas agronómicas: cultivos de las semillas y/o trasplantes a profundidades apropiadas, y tener un control de la mala hierba.

- ✓ El espaciamiento de las plantas debe ser el ajustado a la máxima densidad de la raíz, para alcanzar el más alto rendimiento.

- ✓ Dependiendo del porcentaje de contaminantes que posean los suelos se deben disminuir para crear un ambiente favorable a las plantas antes de sembrarlas.

- ✓ Deben supervisarse los nutrientes y aplicarse tanto los que se necesiten. Generalmente se requerirá agregar a las plantas mucho más nitrógeno y fósforo de los necesarios.

- ✓ Se seleccionaran plantas que soporten suelos contaminados, que su germinación y crecimiento en dicho suelo sean buenos, se busca que material vegetal que presente mayor germinación, crecimiento y cobertura frente al sustrato contaminado.

- ✓ Las plantas seleccionadas necesitan ser manipuladas para asegurar su máximo crecimiento. Los niveles de humedad deben ser óptimos y se pueden establecer a la necesidad de ciertas rutinas de corte.

- ✓ En el caso de suelos contaminados con hidrocarburos se debe tener en cuenta que la germinación disminuye debido a la toxicidad producida por los hidrocarburos volátiles.

- ✓ Se deben determinar las ventajas de las monocotiledóneas y dicotiledóneas antes de iniciar el proceso Fitocorrectivo. En las estructuras fibrosas de la raíz en las gramíneas pueden explorar suelos a profundidades de hasta 3 m, mantener un área de superficie más grande de colonización y un mejor contacto suelo / raíz.

Algunas plantas dicotiledóneas poseen raíces más profundas y tienen mayor capacidad para pasar grandes cantidades de solución contaminante de la tierra al cuerpo de la planta a través de las raíces y evaporarlas por medio de la Fitovolatilización.

7. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FITORREMEDIACIÓN

7.1. Ventajas.

Las más sobresalientes se mencionan a continuación:

- ✓ La efectividad del costo es uno de las más grandes y claras ventajas de la Fitorremediación. Las técnicas agronómicas son considerablemente más económicas. Los costos de cultivo son menores que el tratamiento ‘ex Situ’.
- ✓ Es una tecnología ‘in Situ’ que incluye menor perturbación del lugar.
- ✓ Emplea la energía solar y los procesos biológicos, químicos y físicos emanados de las plantas para lograr la remediación, entre ellos, la absorción, la transformación, la acumulación, la extracción, la reserva y la degradación rizosférica microbiana.
- ✓ Su capacidad extractiva se mantiene debido al crecimiento vegetal, es capaz de ser modificada para aumentar su capacidad.
- ✓ Las plantas tienen la habilidad de resistir más concentraciones de contaminantes orgánicos que la mayoría de los microorganismos.
- ✓ Es aceptada por las comunidades aledañas como una tecnología no invasiva. Son procesos amigables con las comunidades ubicadas en los alrededores de las áreas por recuperar.
- ✓ Efectiva contra una gran variedad de contaminantes.
- ✓ Es un “birreactor autónomo”, manejado solarmente.

- ✓ Es una técnica que actúa en conjunto con el proceso de revegetalización - biodegradación.

- ✓ La presencia y condición de las plantas son fácilmente monitoreados.

7.2. Desventajas.

Se pueden mencionar las siguientes:

- ✓ Alcanzan únicamente la profundidad hasta la cual llegan las raíces y pueden usar suelos, cursos de agua y agua subterránea poco profundos.

- ✓ Todas las raíces de las plantas requieren oxígeno para la respiración, así, las raíces no pueden penetrar bajo condiciones, donde la textura del suelo, el volumen del agua o las proporciones de la respiración microbianas son altas.

- ✓ Los compuestos presentes en concentraciones fitotóxicas no pueden tratarse a menos que una especie resistente sea seleccionada o que el suelo sea pre-tratado para reducir la fitotoxicidad.

- ✓ Comparada con otras tecnologías empleadas para eliminar residuos peligrosos, esta requiere períodos de tiempo relativamente largos.

- ✓ El suelo está desnudo y sujeto a erosión durante las fases tempranas de establecimiento de la planta.

- ✓ Soluciones a largo plazo.

- ✓ Se debe buscar la manera de asegurar la lixiviación de los contaminantes a través de las aguas subterráneas.

8. EJEMPLOS DE APLICACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN

En varios lugares del mundo se han realizado ensayos en laboratorio y de campo, tales como:

1. El Estudio con plantas silvestres de girasol, geranio y mostaza de la India, comprobándose que el geranio tolera más la contaminación por níquel y por plomo mientras que la mostaza es más tolerante al cadmio.

2. Rizofiltración a nivel de cultivo in vitro para detoxificar compuestos fenólicos en aguas contaminadas (tales como los derivados de los herbicidas tradicionales y contaminantes como el 2,4D) en la Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba por el grupo de investigación de la Dra. Elizabeth Agostini.

3. Rizofiltración para la extracción de Uranio de aguas subterráneas en Asthabula, Ohio, EEUU: El Helianthus annus (girasol) es una especie de demostrada capacidad de captación de Uranio (U) en sistemas hidropónicos y fue ampliamente utilizada en el modelo de rizofiltración de extracción de U de aguas subterráneas en Asthabula, Ohio, EEUU (Lopez et al., 2005, Dushenkov et al., 1997; Dushenkov. et al., 2003).

4. Fitovolatilización de mercurio (Hg) por medio de plantas transgénicas (Arabidopsis thaliana) que fueron transformadas con dos genes provenientes de microorganismos que pueden transformar el mercurio iónico en mercurio más estable.

5. Ensayos de eliminación de arsénico de aguas de bebida y otras aplicaciones de la fitorremediación en la UCA.

TABLA NO. 3 FITORREMEDIACIÓN. USOS Y DEMOSTRACIONES EN EL CAMPO

LUGAR	APLICACIÓN	PLANTAS	CONTAMINANTES	FUNCIONAMIENTO	CONTACTO
Chernobil, Ucrania	Rizofiltración, piscina cerca del desastre nuclear	Girasoles (Helianthus annuus)	Cs, Sr	Reducción del 90% en 2 semanas. Las raíces concentraron 8,000	
Ashtabula, OH	Rizofiltración, demostración desechos de energía de GAMA	Girasoles(Helianthus annuus)	U	Retiro del 95 % en 24 horas de 350 ppb a <5 ppb de Uranio de aguas subterráneas.	B. Ensley.
Trenton, NJ	Fitoextracción, demostración en locación de 200 ft x 300 ft	Mostaza india (Brassica juncea)	Pb	Pb limpiado por debajo del nivel en una estación.	B. Ensley.
Rocky Flats, CO	Rizofiltración, lixiviados de terraplén.	Girasoles y mostaza	U y nitrato	Solo comenzando el programa.	Rock, 1997
Dearing, KS	Fitoestabilización, demostración en un acre de tierra estéril de una fundición abandonada.	Álamos (Populus spp)	Pb, Zn, Cd.	Supervivencia del 50 % después de 3 años, el sitio fue de nuevo.	G. Pierzynski, Kansas St.
Whitewood Cr., SD	Fitoestabilización, demonstración en un acre con los residuos de una mina.	Álamos (Populus spp)	As, Cd	El 95 % de árboles muertos, la toxicidad causó la extinción.	J. Shnoor, U. of Iowa
Pennsylvania	Fitoextracción, piloto desechos de una mina.	Thlaspi caerulescens	Zn, Cd	La respuesta es rápida, pero el suelo difícil de descontaminar.	R. Chaney, USDA Beltsville, MD Brown 1995
San Francisco, CA	Fitovolatilización, desechos de refinería y suelos agrícolas.	Brassica sp.	Se	El selenio en parte es subido y volatilizado, pero difícil de descontaminar el suelo.	G. Banuelos, USDA Salinity Lab, Riverside, CA
Aberdeen, MD	Fitotransformación, aguas subterráneas capturadas en 1 argumeacre.	Álamos híbridos (Populus spp).	TCE, PCA (1,1,2,2-tetrachloroethane)	Solo en el segundo año se demuestra que el proyecto funciona.	H. Compton, EPA/ERT, Edison, NJ
Milan, TN	Fitotransformación, pantano,	Elodeia, Bullrush, Hierba de	TNT, RDX	Remoción > 90%	D. Bader, U.S. Army Aberdeen

	municiones del ejército.	Canario			Proving Ground, MD
Martell, IA Clarence, IA Amana, IA	Fitotransformación, sitios agrícolas.	Álamo Híbrido	atrazine, nitratos	Reducción atrazine .	Licht, Ecolotree Paterson and Schnoor (1992)

Fuente: Jerald L. Schnoor, Ph. D., P.E., DEE, Phytoremediation, The University of Iowa Department of Civil and Environmental Engineering and Center for Global and Regional Environmental Research, Pag 14-15.

9. EJEMPLO DE FITORREMEDIACIÓN CON MANGLARES MEXICO

9.1. GENERALIDADES:

Un manglar es un grupo de especies de árboles o arbustos que poseen adaptaciones morfológicas y fisiológicas que les permiten crecer terrenos anegados (inestables) que están sujetos a intrusiones de agua salada. El término manglar incluye varias especies que poseen adaptaciones similares, pero que pertenecen a familias diferentes.

Algunas de estas adaptaciones son:

- ✓ Tolerancia a altos niveles de salinidad.
- ✓ Raíces aéreas que estabilizan el árbol en terrenos blandos.
- ✓ Semillas flotantes (plántulas)
- ✓ Estructuras especializadas que permiten la entrada de oxígeno y la salida de bióxido de carbono (lenticelas y neumatóforos)
- ✓ La palabra mangle tiene su origen en el vocablo guaraní “mangle”, que significa árbol torcido, y hace referencia a las raíces en forma de zanco del mangle rojo.
- ✓ En el mundo existen aproximadamente 15 millones de hectáreas de manglar, de las cuales se pierden el 1 por ciento al año, es decir, cerca de 150 mil hectáreas.
- ✓ 69 especies de manglar se conocen en el mundo.

FIGURA NO. 3. UBICACIÓN DE MANGLARES A NIVEL MUNDIAL

Fuente: Visibleearth NASA

9.2. Área de estudio.

Laguna de San Andrés, el Estero Garrapatas, la Laguna del Carpintero, Laguna La Costa, y en el norte de Veracruz la Laguna Pueblo Viejo, comprendiendo los manglares del sureste de Tamaulipas, incluyendo de norte a sur.

TABLA NO. 4 Casos de Importancia en México

Características de sitios de manglar en el límite tropical del Golfo de México	Régimen / hidráulico		Extensión (km2)	Rasgos socioeconómicos
Sitio / coordenadas	Agua dulce	Agua marina		
Laguna San Andrés22°45' LN, 97°40' LO	Barberena ChaverríaTigre (II, VO)	Boca	130.0	Pc. Po. Am. Pm
Estero Garrapatas22°28 ' LN, 97°53' LO	Cuenca (VO) Interrumpida	Río	5.0	Am. Fh. Ca.
Laguna del Carpintero22°14' LN, 97°51' LO	Cuenca (VO)Pánuco(I)	Río	86	Fh. Ca.
Laguna La Costa23°18' LN, 97°51' LO	Ríos Pánuco y Pánuco (I)Tamesí (II)	Río	36.4	Pc. Po.Am. Pm. Fh. Ca.
Laguna Pueblo Viejo23°13' LN, 98°03' LO	Estero Tamacuil, Pánuco (I)	Río	95.3	Pc. Po.Am. Pm. Fh. Ca.

Pc. Pesca comercial, Po. Pesca ostión, Am: Zonas de alimentación de aves migratorias, Pm Pastizales marinos, Fh. Fragmentación del hábitat, Ca. Contaminación acuática.
(I) Permanente, (II) Intermitente
Presencia del mayor Flujo: (IP) Invierno-primavera, (VO) Verano –otoño

Fuente: Aspectos ecológicos de los manglares y su potencial como fitorremediadores en el Golfo de México.

9.3. Metodología

Se seleccionaron diez sitios, en los que se efectuó un inventario sobre las especies existentes: R. mangle, A. germinans, L. racemosa, C. erectus.

En cada sitio se registraron los parámetros de crecimiento y la densidad vegetal en los estratos herbáceo, arbustivo y arbóreo, utilizando un muestreo sistemático uniforme en cuadrantes de 100 m2, perpendiculares al gradiente mareal.

TABLA NO. 5 Parámetros de Crecimiento de Especies en Ecosistema de Manglar del Golfo de México.

Tabla 5. Parámetros de crecimiento de especies en ecosistema de manglar del Golfo de México						
Sitio/especie	Abundancia	Altura (m)	Diámetro (cm)	Dominancia	Frecuencia %	V.I.%
Laguna San Andrés						
A. germians	5	3.5	12.0	62.3	50	63.2
R. mangle	2	2.8	3.2	52.4	45	42.3
C. erectus	1ª	2.3	4.3	43.7	50	36.8
Estero Garrapatas						
R. mangle	5	5.3	12.1	66.7	60.2	66.6
C. erectus	2	4.2	6.6	33.7	39.8	33.4
Laguna del Carpintero						
L. Racemosa	5	5.9	5.3	30.6	30	38.6
A. germinans	2	6.2	4.5	26.1	30	30.4
Laguna La Costa						
L. racemosa	5	4.9	4.9	75.4	66.6	71.2
A. germinans	2	8.9	8.6			
R. mangle	2	10.6	10.6	24.5	33.3	28.7

Fuente: Aspectos ecológicos de los manglares y su potencial como fitorremediadores en el Golfo de México.

Para conocer la fitoextracción de metales pesados por los diferentes órganos vegetales del mangle, se consideró la producción forestal (volumen de madera y densidad de individuos/ha). Con base en la información sobre la biomasa anual en un sitio dado sujeto a descargas del río Tamesí, se calculó el volumen de descarga tomando en cuenta el registro diario de los aforos, 10 especialmente los que estuvieron por encima de la cota de los 1.20 msnm, debido a que es la altura del dique a la cual el canal descarga sus aguas sobre el manglar.

Por espectrofotometría de absorción atómica se determinó el contenido de metales pesados en el agua, en los sedimentos a la entrada del manglar y en el follaje y la madera de los mangles cosechados para determinar biomasa utilizando el modelo de Mitsch y Goselink.

9.4. Resultados y discusión

En los sitios de estudio se determinaron cuatro agrupaciones botánicas en función de sus afinidades con el hábitat, siendo estas: cuatro especies de mangle (Rhizophora mangle, Avicenia germinans, Laguncularia racemosa y Conocarpus erectus), ocho especies halófitas, cuatro halotolerantes y dos glicófitas.

Las concentraciones observadas de los metales analizados pusieron en evidencia que el plomo es el metal con mayor concentración en diferentes componentes del ecosistema del manglar (tabla III). Los metales plomo, cromo y cadmio presentan una alta concentración en el sedimento, el cual actúa como una trampa que facilita el depósito de metales pesados en el manglar cuando se precipita en las inmediaciones de la raíz. Las raíces de especies de mangle, principalmente *Laguncularia racemosa y A. germinans,* desempeñan un papel principal como biofiltros naturales en la absorción de metales pesados, seguidas por los troncos y las hojas.

TABLA NO. 6 Concentración de Algunos Metales Pesados (ppm) en Diferentes Componentes de un Manglar del L. Racemosa en la Laguna la Costa, Tampico, Tamaulipas, México.

Tabla 6. Concentración de algunos metales pesados (ppm) en diferentes componentes de un manglar de L. racemosa en la Laguna La Costa, Tampico, Tamaulipas, México

	Sedimento	Agua	Raíces	Tronco	Ramas	Hojas
Plomo (ppm)	28.57	0.021	13.84	7.28	3.72	5.77
Cromo (ppm)	40.27	0.110	5.15	1.36	0.38	0.99
Cadmio (ppm)	2.82	0.090	0.97	0.44	0.32	0.66

Fuente: Aspectos ecológicos de los manglares y su potencial como fitorremediadores en el Golfo de México.

9.5. Conclusiones

De las cuatro especies de mangle, *L. racemosa* es la más importante económica y ecológicamente, debido a que es la que ocupa mayor extensión y alcanza mayor fijación de contaminantes (metales pesados), seguida por *A. germinans, R. mangle* y *C.erectus*.

Los manglares sin duda pueden utilizarse como agentes de remediación, son biofiltros naturales en sitios contaminados con metales pesados, especialmente porque estos compuestos quedan fijados en la biomasa de las raíces y la madera, manteniendo una baja recirculación, en comparación con otras especies herbáceas.

9.6. Resumen

El propósito de la presente investigación fue determinar la capacidad de descontaminación de las especies de mangle en las localidades de las lagunas de San Andrés, del Carpintero, La Costa, Pueblo Viejo y Estero Garrapatas, en Tampico, Tamaulipas. Se determinó el contenido de algunos metales pesados en cada uno de los sitios.

Los metales pesados obtenidos en los sedimentos fueron cadmio (2.82 ppm), plomo (28.57 ppm), y cromo (40.27 ppm). El contenido de plomo en base seca encontrado en hojas y ramas de *L. racemosa* fue de 5.77 y 3.72 ppm respectivamente. Estos resultados indican que es posible utilizar los manglares como agentes biorremediadores en cuerpos de agua, ya que los contaminantes son absorbidos por Las plantas y fijados en las porciones leñosas.

Considerando los valores de crecimiento del bosque y el desarrollo del volumen diamétrico, existen relaciones entre los metales pesados y el volumen de la madera.

La estimación de la capacidad depuradora del plomo por especies de mangle pone en evidencia que el volumen total de la descarga del canal en el período de estudio fue aproximadamente de 351 x 10^6 m3 y la concentración encontrada de plomo es de 0.021 mg/L, entonces el vertido de este metal puede ascender a 7.38 kg disueltos en esa descarga sobre el manglar, parte del cual es fijado por esta especie en las raíces, la madera y las hojas de las especies del mangle (tabla 7).

TABLA NO. 7 Concentración de Plomo en Hojas y Ramas, y Capacidad Depuradora del Manglar de L. Racemosa en la Laguna la Costa, Tampico, Tamaulipas, México

Tabla 7. Concentración de plomo en hojas y ramas, y capacidad depuradora del manglar de L. racemosa en la Laguna La Costa, Tampico, Tamaulipas, México.	
D.A.P. promedio basal (cm)	8.73
Peso estimado del D.A.P. promedio (Kg)	28.29
Biomasa total acumulada (kg/ha)	2.82
Concentración Pb en hojas (ppm, base seca)	5.77
Concentración Pb en ramas (ppm, base seca)	3.72
Concentración Pb total (mg/kg)	9.54

Fuente: Aspectos ecológicos de los manglares y su potencial como fitorremediadores en el Golfo de México.

10. EJEMPLO DE FITORREMEDIACIÓN EN HIDROCARBUROS COLOMBIA ECP

10.1. GENERALIDADES.

La industria petrolera está catalogada como una de las que más genera contaminación al medio. Según la literatura son responsables del 80% de la contaminación mundial.

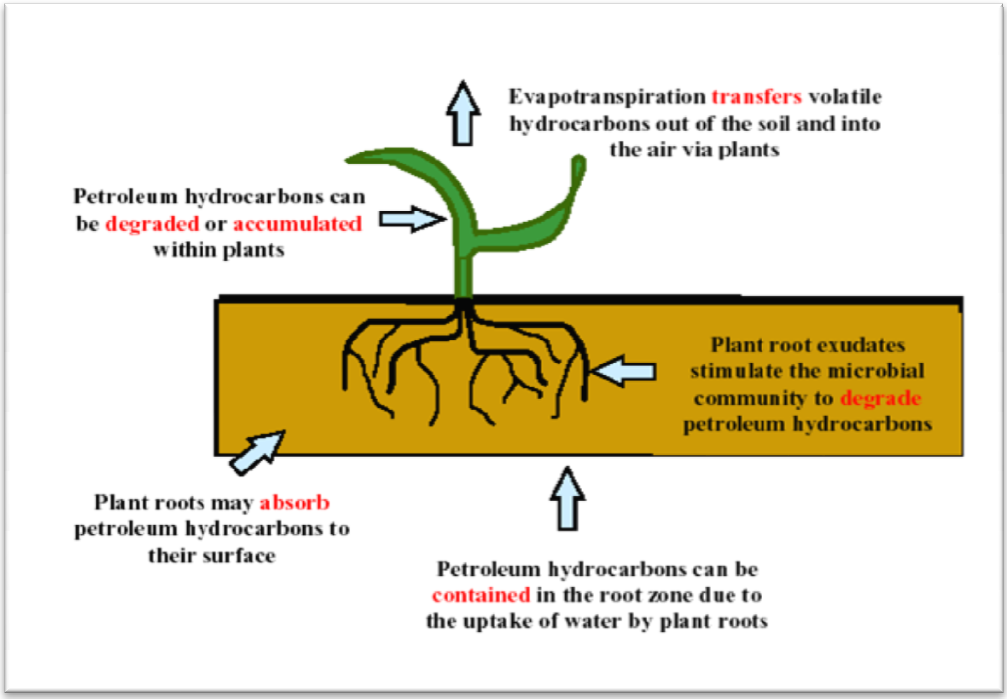
Esta actividad contamina los recursos del aire, suelo y agua; durante sus diferentes etapas como son la exploración, extracción, transporte, refinación e incluso durante la comercialización.

El medio de manera natural elimina los hidrocarburos del suelo mediante los procesos de: biodegradación, emisión, percolación y drenaje superficial.

En la actualidad los métodos de recuperación de sitios contaminados corresponden a los métodos biológicos, a los cuales pertenecen los procesos de biorremediación y tienen como objetivo el aprovechamiento y optimización de las capacidades biodegradadoras naturales.

El mecanismo principal para la fitorremediación de hidrocarburos es el estímulo de los microorganismos de la rizosfera de la planta (Figura 4).

FIGURA NO. 4. MECANISMOS PRINCIPALES DE LA FITORREMEDIACIÓN DE HIDROCARBUROS.



Fuente: C.M. Frick, R.E. Farrell and J.J. Germida. Department of Soil Science. University of Saskatchewan. Saskatoon, SK Canada. December, 1999.

10.2. ÁREA DE ESTUDIOX: Campo Palagua, ubicado en Boyacá.

10.3. METODOLOGÍAX: La novedad, desarrollada por Ecopetrol, consiste en la bioestimulación o bioaumentación, agregando a la zona radicular de estas especies vegetales bacterias degradadoras de hidrocarburos, las que aceleran y mejoran el resultado.

El aporte de las bacterias —desarrolladas en el ICP (Instituto Colombiano del Petróleo) — consiste en degradar los hidrocarburos en diferentes fracciones, lo que le permite a la planta absorberlos y "digerirlos" más fácilmente.

Periódicamente hay que cosechar para asegurar la extracción de los contaminantes del suelo y llevar este material a tratamiento. Una de las especies vegetales que ha mostrado mayores resultados es el vetiver, un pasto de dos metros de altura, con zona radicular (raíces) de 80 centímetros y que crece en zonas anegadas. El tamaño de las raíces es importante, ya que más profundidad implica mayor eficiencia y alcance.

10.4. RESULTADOSX: Una prueba piloto realizada en el Campo, permitió reducir la concentración de hidrocarburos del 7% al 1% en cuatro años.

10.5. CONCLUSIONES[x]:

- La inversión tradicional para un proceso de este tipo por medio de la tecnología actual podría llegar a ser 10 o 15 veces mayor que con la técnica de fitorremediación.

- El método mejora las condiciones generales de los suelos y el paisaje donde se aplica.

- Es un sistema limpio, ya que no usa maquinaria, no maneja gases de efecto invernadero, ni camiones, ni retroexcavadoras. Solamente el pasto y las bacterias. Un dúo dinámico para descontaminar el ambiente.

FIGURA NO. 5. DESARROLLO DEL PROCESO DE FITORREMEDIACIÓN EN CAMPO PALAGUA

Fuente: Informe Ecopretrol Fitorremediación en Palagua

11. CONCLUSIONES

La fitorremediación es un proceso amigable con el medio ambiente y con las comunidades.

Se debe considerar su uso en áreas contaminadas con poca profundidad ya que las raíces de las plantas resistentes a los contaminantes no alcanzan grandes profundidades.

Se debe tener en cuenta la disposición final de las plantas sembradas en áreas contaminadas, ya que si ellas no transforman y evaporan los tóxicos los retienen dentro de sus partes.

Es una técnica que puede ser combinada con métodos mecánicos para aumentar su eficiencia.

Se puede usar para descontaminar vertimientos de aguas residuales industriales y domésticas.

Se usa para la recuperación de suelos contaminados con hidrocarburos, sin embargo se debe revisar la profundidades que se manejan en estas recuperaciones ya que tiene limitantes en cuanto a la profundidad de actuación.

Al trabajar con suelos contaminados con hidrocarburos se debe dejar que sus componentes volátiles se evaporen para que las plantas resistentes a sus contaminantes puedan germinar.

12. RECOMENDACIONES

Sería interesante la inclusión de un agrónomo dentro del equipo de trabajo, ya que con este se podría tomar la inclusión de las plantas de manera programada y trabajarían dentro del programa como un cultivo.

Se deben incluir las plantas utilizadas en la fitorremediación en el Programa Integral de residuos sólidos, analizando los contaminantes con que estos saldrían en el momento del corte y cosecha y los riesgos que podría tener su manipulación y uso.

Incluir dentro de los lugares a recuperar sistemas de control para evitar la migración de los contaminantes (barreras físicas, drenes, etc.)

BIBLIOGRAFÍA

C.M. FRICCK, R.E. Farrell and J.J. Germida, Assessment of Phytoremediation as an In-Situ Technique for Cleaning Oil-Contaminated Sites(December 29, 1999), Department of Soil Science University of Saskatchewan Saskatoon, SK Canada.

FAJARDO MANTILLA, MILTON OLGA LUCIA, SANMIGUEL ARISMENDY, Fitobactorremediacion de suelos contaminados por derrames de crudo, Universidad Industrial de Santander Facultad de Ciencias Escuela de Biología Bucaramanga, [disponible en internet], Colombia [2012/mayo/02], http://es.scribd.com/doc/33686647/tesis-fitobactorremediacion#download

HERRERA, Carlos Manuel (2009) El sector empresarial y la contaminación urbana en Colombia - The business sector and urban pollution in Colombia.

Jerald L. Schnoor, Ph. D., P.E., DEE, (October 1997), Phytoremediation, The University of Iowa Department of Civil and Environmental Engineering and Center for Global and Regional Environmental Research, Pag 14-15.

Organismo para la Desechos Sólidos y Protección del Medio Ambiente(Abril de 1996), Guía del ciudadano: Técnicas de tratamiento innovadoras Para suelos contaminados, fango residual, sedimentos y detritos, EPA 542-F-96-017.

Organismo para la Desechos Sólidos y Protección del Medio Ambiente(Septiembre de 1996), Guía del ciudadano: Medidas fitocorrectivas, EPA 542-F-96-025.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, AGUA SUBTERRÁNEA(1992).

RAHIM FOROUGHBAKHCH P., ABIMAEL E. CÉSPEDES C., MARCO A. ALVARADO V, ADRIANA NÚÑEZ G., MOHAMMAD H. BADII (Abril -Junio 2004), aspectos ecológicos de los manglares y su potencial como fitorremediadores en el Golfo de México, Ciencia UANL/ vol. VII, No. 2.

SERRANO GOMEZ, MARLON (2006), FITORREMEDIACION: Una alternativa para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Química.

TORRES DELGADO KATERINE y ZULUAGA MONTOYA TATIANA, Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos (2009), Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Ingeniería Química, [Disponible en internet], Colombia-.[2012/mayo/02], http://es.scribd.com/doc/29031696/36/Fitodescontaminacion-y-fitoestabilizacion

Tsao, D. T. 2003. Phytoremediation. Springer, Berlin.