

Fitorremediación en la recuperación de suelos: una visión general

Phyto-remediation in soils restoration: a general vision

Fitorremediação na remediação do solo: uma visão geral

Andrea Angélica Bernal Figueroa

Bióloga, Magister en Ingeniería Ambiental Programa de Ingeniería Ambiental.
Facultad de Ciencias e Ingeniería. Universidad de Boyacá,
Carrera 2ª Este No. 64 – 169, Tunja (Boyacá), Colombia.

anbernal@gmail.com

Resumen

En esta investigación se revisan aspectos fundamentales de la fitorremediación como técnica en la recuperación de suelos, la cual se emplea para eliminar o disminuir la contaminación o degradación de los mismos, por medio de la utilización de especies vegetales. Se encontró que técnicas tales como la fitoextracción, rizofiltración, fitoestabilización, fitodegradación, rizodegradación y fitovolatilización, están determinadas principalmente por el tipo de contaminante, diversidad microbiana y propiedades del suelo. Se mencionan algunos aspectos en cuanto a la nutrición mineral y la tolerancia de las plantas, las principales ventajas y desventajas que ofrece esta técnica, algunas especies empleadas para su implementación y unos estudios de caso. Se concluye que el conocimiento de los procesos fisiológicos en la planta y los compuestos tóxicos, permite que se puedan seleccionar especies vegetales con mayores niveles de tolerancia hacia contaminantes específicos; y adicionalmente, por medio de modificaciones genéticas se puede incrementar la biomasa vegetal, su morfología, densidad radicular o penetración en profundidad, así como favorecer la existencia de asociaciones específicas entre microorganismos y raíces.

Palabras clave: suelos, contaminación, recuperación, fitorremediación

Abstract

In this research fundamental aspects of phyto-remediation are examined as the soils restoration technique, which is used to eliminate or decrease their pollution or their degradation, making use of vegetal species. It was found that techniques as phytoremediation, rhizofiltration, phytostabilization, phytodegradation and phytovolatilization, are determined mostly by the type of contaminant, the microbial diversity and soil properties. There are mentioned some aspects about mineral nutrition and the tolerance of the plants, the main advantages and disadvantages that this technique offers, some species used for its implementation and some case studies. It is concluded that the knowledge of these physiological processes in the plant and the toxic compounds, allow that vegetal species can be selected with higher levels of tolerance to specific contaminants, additionally, by means of genetic modifications it can be increased the vegetal biomass, its morphology, its root density and penetration in profundity, as well as it favors the

existence of specific associations between microorganisms and roots.

Key-words: soils, pollution, restoration, phytoremediation

Resumo

Neste artigo de pesquisa foram revisados aspectos fundamentais de fitoremediação, como técnica na recuperação de solos, a qual é utilizada para eliminar o diminuir a contaminação dos mesmos através da utilização de espécies de plantas. Verificou-se que técnicas como a fitoextração, rizofiltração, fitoestabilização, fitodegradação, rizo-degradação e fitovolatilização, são determinados principalmente pelo tipo de poluente, a diversidade microbiana e propriedades do solo. Alguns

aspectos são mencionados sobre a nutrição mineral e tolerância das plantas, as principais vantagens e desvantagens oferecidas por esta técnica, algumas espécies utilizadas para a execução e alguns estudos de caso. Concluiu-se que o conhecimento dos processos fisiológicos da planta e os compostos tóxicos, permite que espécies de plantas possam ser selecionadas com maior tolerância a poluentes específicos; e, adicionalmente, através de modificações genéticas pode ser aumentada a biomassa vegetal, morfologia, densidade de raízes ou profundidade de penetração, e facilitar a existência de associações específicas entre microorganismos e raízes.

Palavras-chave: solos, poluição, recuperação, fitoremediação

Introducción

La supervivencia de la humanidad está inevitablemente ligada al potencial de uso de los suelos, sin embargo, este recurso, en las últimas décadas se ha degradado rápidamente como consecuencia de una serie de acciones derivadas principalmente de la actividad antrópica, tales como la erosión, pérdida de materia orgánica, contaminación, impermeabilización o sellado (construcción de viviendas, carreteras u otras infraestructuras), compactación (derivada de la utilización de maquinaria pesada, intensidad del pastoreo, etc.), disminución de la biodiversidad, salinización, inundaciones y deslizamientos de tierra, por mencionar algunos (Garbisu, Becerril, Epelde & Alkorta, 2007; Prasad, Kumar & Sharma, 2010).

El suelo realiza numerosas funciones de vital importancia, dentro de las cuales se pueden mencionar la producción de biomasa (alimentos, fibra y combustible), descomposición de materia orgánica, reciclaje de nutrientes, depuración del agua, regulación de la calidad del aire, detoxificación de contaminantes, sumidero de gases invernadero y hábitat para numerosos organismos (Garbisu

et al., 2007). Sin embargo, como resultado principalmente de las actividades industrial y agraria, se ha vertido en ellos una gran cantidad de sustancias contaminantes principalmente de naturaleza química, que hoy en día afectan seriamente la funcionalidad y sostenibilidad de este recurso, convirtiéndose en un problema medioambiental de enorme repercusión (Garbisu *et al.*, 2007).

La dimensión de los problemas ambientales involucra a todos los habitantes del planeta, por ello gran parte de los países en los últimos años han tomado medidas que pretenden amortiguar los efectos ambientales negativos, generados por la inadecuada utilización del desarrollo. En este sentido, se han creado conceptos como “desarrollo sostenible” o “indicadores ambientales” para definir los problemas y buscar soluciones, sin embargo, se hace necesario profundizar en el estudio de los mecanismos, causas y consecuencias de dichos problemas, pero aún se está lejos de poder cuantificar la totalidad de parámetros que intervienen en ello y de aportar todas las soluciones ante la problemática (López, 2003).

Actualmente la preocupación por el deterioro causado al medio ambiente ha llegado a ser un fenómeno trascendental en las diferentes culturas a nivel mundial, el cual se refleja en el interés de realizar cambios a nivel legislativo, en la proyección de nuevos mercados, en la descontaminación de áreas y en la búsqueda y aplicación de nuevas tecnologías encaminadas a realizar una producción más limpia (Prasad, Kumar & Sharma, 2010; Aros, 2007), por lo tanto, es esencial estudiar y evaluar procesos de remediación y recuperación de suelos para garantizar su sostenibilidad y los servicios que de forma gratuita ellos proveen al hombre.

En este contexto, la fitorremediación surge como una tecnología que utiliza plantas y microorganismos asociados a ellas, para descontaminar suelos, aire, sedimentos o aguas, está basada en la capacidad de algunas especies vegetales para tolerar, absorber, acumular y/o degradar compuestos contaminantes, a formas menos perjudiciales para el ambiente y la salud (Henry, 2000; Hollerung, 2003; Carpena & Bernal, 2007; Batista & Sánchez, 2009). En los suelos, el objetivo de un proceso fitorremediador no debe ser solamente eliminar el contaminante, sino recuperar la calidad del mismo, entendida como la capacidad de dicho recurso para realizar sus funciones de forma sostenible (Garbisu *et al.*, 2007).

Degradación y contaminación de los suelos

El suelo, la capa más superficial de la corteza terrestre, es uno de los recursos naturales primordiales para el hombre, al ser quien sustenta la vida en el planeta; es un recurso frágil del medio ambiente, no renovable, debido a que su velocidad de formación y restablecimiento es muy lenta, mientras que los procesos que favorecen su degradación y deterioro son mucho más rápidos (Ortiz, Sanz, Dorado & Villar, 2007). La degradación de un suelo se conoce como todo proceso que disminuye su capacidad para producir cuantitativa y cualitativamente bienes y servicios (FAO – PNUMA, 1984); si bien, se puede producir por

causas naturales, está dada principalmente por la utilización del hombre y sus acciones inadecuadas o excesivas, a través de actividades agrícolas, forestales, ganaderas, agroquímicas o riego, o por acciones indirectas como actividades industriales, eliminación de residuos y transporte (FAO – PNUMA, 1984; Sabroso & Pastor, 2004; Sierra, 2006; Estaún, Calvet, Pera, Camprubí & Parladé, 2007; Muñoz, Nevárez, Ballinas & Peralta, 2010).

Por otra parte, cuando se habla de contaminación del suelo se hace referencia a una degradación de tipo químico, que genera la pérdida parcial o total de la productividad, como resultado de la acumulación de sustancias generalmente tóxicas, en concentraciones que superan su poder de atenuación natural y alteran negativamente sus propiedades (Sierra, 2006; Muñoz *et al.*, 2010; Macías, 1993). Dicha acumulación generalmente se produce como consecuencia de actividades antrópicas, aunque también puede generarse de forma natural cuando los procesos de formación liberan elementos químicos contenidos en las rocas y los concentran en el mismo, llegando a niveles tóxicos (Ortiz *et al.*, 2007; Sierra, 2006; Muñoz *et al.*, 2010; Macías, 1993). Desde el punto de vista ambiental, la contaminación está definida como la alteración de las características físicas, químicas o biológicas de los factores medioambientales, en grado tal que supongan riesgo para la salud de las personas o los ecosistemas (Sabroso & Pastor, 2004). Así, la actividad humana, a través de sus diferentes acciones ha llevado a la movilización de toneladas de elementos y compuestos orgánicos e inorgánicos fuera de sus compartimentos geoecológicos (Peña, 2006), lo cual trae como consecuencia negativa problemas ambientales que afectan directamente la salud humana y la diversidad biológica, tanto a países desarrollados, como en vía de desarrollo (Wania & Mackay, 1996; Urzelai, Cagigal, Antepara, Bonilla & Gurtubay, 2001).

Recuperación de suelos

En los últimos años varias investigaciones se han encaminado hacia la búsqueda de técnicas para

la recuperación o tratamiento de los suelos (Ercoli *et al.*, 1999); existe una serie de tecnologías convencionales que son empleadas para tratar la degradación ambiental, sin embargo la mayoría de ellas son costosas y perturban aún más el medio. Actualmente, se cuenta con algunas de aplicación habitual y otras en fase experimental, que se han diseñado con el fin de aislar o destruir sustancias nocivas en el suelo, alterando su estructura mediante procesos generalmente químicos o biológicos, sin embargo, su implementación está sujeta a las características particulares del suelo, a la eficacia esperada, a su viabilidad económica y al tiempo estimado para su tratamiento (Ortiz *et al.*, 2007; Ercoli *et al.*, 1999; Reddy, Admas & Richardson, 1999).

De acuerdo a la forma en la que se empleen las técnicas de recuperación se habla de tratamientos *in situ*, que son los que actúan sobre los contaminantes en el lugar en el que se localizan; y *ex situ*, en los cuales se hace necesaria la excavación del suelo para ser tratado posteriormente (Ortiz *et al.*, 2007; EPA, 1999; Agudelo, Macías & Suárez, 2005). 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 descontaminantes con la totalidad del suelo afectado, los tratamientos *ex situ* suelen ser más costosos, sin embargo son más rápidos y se consigue una recuperación más completa (Ortiz *et al.*, 2007; Ercoli *et al.*, 1999; Vidali, 2001). La fitorremediación puede considerarse entonces, como una técnica *in situ* de biorremediación, como la bioaugmentación, la bioestimulación y la atenuación natural (Prasad, Kumar & Sharma, 2010; Vidali, 2001; Alexander, 1999); y se define como el uso de especies vegetales vivas para eliminar o transformar contaminantes ambientales, con el fin de hacerlos inocuos o menos tóxicos para el ambiente y la salud (Prasad, Kumar & Sharma, 2010; Salt, Smith & Raskin, 1998; EPA, 2000; Núñez, 2002; Brandt, 2003). Esta técnica se ha validado en pruebas de campo exitosas para la remediación tanto orgánica como inorgánica y está evolucionando como una alternativa rentable de alta efectividad en

relación a métodos convencionales de alto costo; se considera una “Revolución verde” en el ámbito de innovación en tecnologías de recuperación (Watanabe, 1997; Fiorenza, Oubre & Ward, 2000; Nedunuri, Govindaraju, Banks, Schwab & Chen., 2000; Van Der Lelie, Schwitzguébel, Glass, Vangronsveld & Baker, 2001).

Fitorremediación

Es un término definido en 1991 por lo cual se puede considerar relativamente nuevo, se deriva de *fito* que en griego significa vegetal o planta y *remediare* que en latín significa poner remedio al daño o enmendar algo; en este sentido, fitorremediación significa remediar un daño por medio de plantas o vegetales (Agudelo, Macías & Suárez, 2005; Núñez, 2002). En un concepto más amplio podría ser definida como el conjunto de tecnologías por medio de las cuales se utilizan varias plantas que tengan la capacidad fisiológica y bioquímica para asimilar, metabolizar, detoxificar o inmovilizar metales pesados (Freire, 2008), compuestos orgánicos, radioactivos y petroderivados, contaminantes del suelo, el agua o el aire, para transformarlos a formas menos nocivas (Aros, 2007; Batista & Sánchez, 2009; Núñez, Meas, Ortega y Olguin, 2004; López, Gallegos, Pérez & Gutierrez, 2005; Ghosh & Singh, 2005; Lumelli, 2006). También se conoce como la capacidad de ciertas plantas (terrestres, acuáticas, leñosas, etc.) para remover, contener, o transformar productos contaminantes del entorno (Lumelli, 2006); así, esta técnica representa una tecnología alternativa, sustentable y de bajo costo para la restauración de ambientes y efluentes contaminados o degradados (Ercoli *et al.*, 1999; Núñez *et al.*, 2004).

La fitorremediación, es una variación de la biorremediación, que aún no se ha aplicado en muchos lugares, ni se han documentado los resultados de su uso plenamente, está clasificada como técnica innovadora y en términos generales consiste en cultivar plantas o árboles en lugares contaminados o degradados para “limpiar” agua, suelo o aire (Freire, 2008). En la actualidad, se intenta aceptar

el uso de métodos alternativos y entre ellos surge como un proceso eficiente para la recuperación de áreas. Es una técnica recomendable debido a que generalmente no altera los ecosistemas a tratar, los cuales ya se han adaptado a sus condiciones de degradación o contaminación, se realiza la recuperación sin atender contra la biota y el paisaje, es una técnica pasiva y amigable con el ambiente que aprovecha la energía solar y puede ser usada junto con métodos mecánicos tradicionales, o en algunos casos en reemplazo de ellos; y su efectividad se ha mejorado inoculando microorganismos en las áreas a recuperar (Barrientos, 2012; Torres & Zuluaga, 2009). Sin embargo, como cualquier técnica en estudio tiene varias ventajas y limitantes, que se describen más adelante.

Tipos de fitorremediación

Se ha generado una terminología basada en el rol que cumplen las plantas durante el proceso de fitorremediación, así como los principales mecanismos involucrados (Carpena & Bernal, 2007; Muñoz *et al.*, 2010; EPA, 1999; Núñez *et al.*, 2004; Mentaberry, 2009), las cuales tienen condiciones particulares que están determinadas principalmente por el tipo de contaminante, la diversidad microbiana y las propiedades del suelo (Ferrera *et al.*, 2007); para los metales pesados, incluidos los metaloides, radionúclidos y ciertos tipos de contaminantes orgánicos, se aplican la fitovolatilización, fitoestabilización, fitoextracción o la rizofiltración; y para contaminantes orgánicos la fitodegradación y fitoestimulación (Núñez *et al.*, 2004). Varios autores han definido o agrupado los tipos de fitorremediación de diferente manera; a continuación se presenta una breve descripción de acuerdo a las técnicas planteadas por la EPA (1999), complementadas con lo expuesto por otros autores (Carpena & Bernal, 2007; Muñoz *et al.*, 2010; EPA, 1999; Vidali, 2001; Brandt, 2003; Núñez *et al.*, 2004; López *et al.*, 2005; Ghosh & Singh, 2005; Lumelli, 2006; Mentaberry, 2009).

Fitoextracción. También llamada fitoacumulación, está basada en la capacidad de algunas

plantas para acumular contaminantes en sus raíces, tallos o follaje. Se utiliza principalmente para metales pesados, aunque también con cierto tipo de contaminantes orgánicos y elementos e isótopos radiactivos. Generalmente se implementan mediante el uso de plantas conocidas como metalofitas o hiperacumuladoras (acumuladoras de metales); y se puede realizar utilizando una o varias plantas, permitiendo su crecimiento durante varias semanas o meses, las cuales pueden ser cosechadas, incineradas o utilizadas en compostaje para reciclar los metales. Si las plantas se incineran las cenizas deben ser tratadas como residuos peligrosos, sin embargo, el volumen de las cenizas será menor al 10% del volumen que generaría el suelo si fuera desenterrado para su tratamiento. Este procedimiento se puede repetir según se considere necesario hasta llegar a niveles manejables.

Rizofiltración. Es la absorción en la raíz de los contaminantes que se encuentran en la zona que la rodea, para lo cual las plantas que se utilizan son producidas en invernaderos y sembradas en la zona contaminada, donde las raíces toman el agua junto con el contaminante. Se basa en hacer crecer en cultivos hidropónicos raíces de plantas terrestres con alta tasa de crecimiento y área superficial, para absorber, concentrar y precipitar metales pesados de aguas residuales contaminadas.

Fitoestabilización. Es el uso de ciertas especies para inmovilizar los contaminantes a través de la acumulación en la raíz. Esta estrategia utiliza plantas que desarrollan un denso sistema radicular para reducir la disponibilidad por medio de mecanismos de secuestro, lignificación o humidificación; este proceso reduce la movilidad del contaminante y evita la migración al agua o el aire y reduce la biodisponibilidad para la entrada en la cadena alimenticia. Se puede utilizar para restablecer sitios donde no hay vegetación debido a las altas concentraciones de metales en sus suelos superficiales o que presentan perturbaciones de tipo físico. Las plantas actúan como una bomba solar que succiona humedad de los suelos debido

a sus altas tasas de evapotranspiración, proceso que mantiene también una humedad constante en la zona de la rizósfera, por lo cual se presentan las condiciones adecuadas para la inmovilización de los metales a través de reacciones químicas o por mecanismos físicos como la adsorción.

Fitodegradación. También es conocida como fitotransformación; es la ruptura de contaminantes absorbidos por las plantas a través de procesos metabólicos dentro de ella y se utiliza para tratar contaminantes orgánicos como hidrocarburos aromáticos polinucleares, hidrocarburos totales del petróleo, plaguicidas, compuestos clorados, explosivos y surfactantes (detergentes). En este proceso los contaminantes son parcial o completamente degradados o transformados a través de reacciones enzimáticas que realizan las plantas y los microorganismos, lo cual permite que sean asimilados por las mismas y retenidos en sus vacuolas, o fijados a estructuras celulares como la lignina. Los contaminantes son degradados e incorporados en los tejidos de las plantas y lo utilizan como nutrientes, o los almacenan o degradan bioquímicamente a productos menos perjudiciales.

Rizodegradación. También conocida como fitoestimulación o biodegradación rizosférica mejorada. Consiste en la descomposición de contaminantes en el suelo a través de la actividad microbiana, los exudados de las raíces estimulan el crecimiento de microorganismos con capacidad para degradar contaminantes de tipo orgánico. Las plantas a través de sus actividades metabólicas y fisiológicas liberan azúcares simples, aminoácidos, compuestos alifáticos y aromáticos, nutrientes, enzimas y oxígeno, los cuales se transportan desde sus partes superiores hacia la raíz, lo que favorece el incremento de hongos y bacterias, quienes a través de sus actividades metabólicas causan la mineralización de los contaminantes. La rizodegradación es un proceso mucho más lento que la fitodegradación.

Fitovolatilización. Consiste en la absorción y transpiración de un contaminante por la planta, algunas tienen la capacidad de volatilizar mercurio o

selenio, contenidos en suelos, sedimentos o agua. Ciertos elementos se transforman en la raíz, pasan a las hojas y pueden volatilizarse en el ambiente en concentraciones comparativamente más bajas. Los contaminantes son absorbidos, metabolizados y transportados desde la raíz a las partes superiores donde se liberan a la atmósfera en formas volátiles menos tóxicas o relativamente menos peligrosas, comparadas con sus formas oxidadas.

Como puede notarse, la fitorremediación está fundamentada en las actividades metabólicas y fisiológicas que realizan las plantas, pero así mismo, en algunos casos también indican su relación con los microorganismos durante el proceso de restauración. En este contexto, se hace evidente que es un proceso complejo que involucra tanto a la planta como a las comunidades microbianas asociadas a su sistema radicular (EPA, 1999; Núñez *et al.*, 2004; López *et al.*, 2005).

Nutrición mineral y tolerancia en las plantas

El suelo es el medio o fuente nutritiva por excelencia de las plantas, por ello se infiere que la determinación de alguna característica del mismo o del nivel de los bioelementos en él existentes, puede definir el posible déficit o exceso de los elementos en la planta sobre él cultivada (Navarro & Navarro, 2003). La absorción de los nutrientes para su incorporación al vegetal está influenciada por la misma especie, la cual determina la superficie radical efectiva y la exploración mayor o menor del suelo, así como también las diferencias metabólicas (Sánchez de la Puente, 1984). Se debe tener en cuenta que la demanda de nutrientes por parte de la planta cambia durante el ciclo de vida y muestra una relación estrecha con la tasa y características de crecimiento, así que sin olvidar la intensa demanda fisiológica impuesta por las hojas y los tallos sobre los minerales, ni la importancia de los procesos de distribución de los mismos por parte de los tejidos vasculares, se puede decir que el proceso de nutrición mineral es fundamentalmente responsabilidad de los sistemas radiculares (Gutiérrez, 1997).

La absorción de los elementos nutritivos se efectúa mayoritariamente por medio de las raíces jóvenes al nivel de los pelos radiculares, que durante el periodo de actividad de la planta se desarrollan de una manera continua y están constantemente renovándose. Debido a que su vida es de tan solo varios días, a medida que la raíz se alarga, se incrementa su número, con lo que se amplía el contacto de la planta con nuevas partes del suelo; en condiciones normales los pelos radiculares pueden llegar a alcanzar una cifra de 200-300 por mm², lo cual representa una gran superficie de captación (Navarro & Navarro, 2003).

El contenido de elementos en los vegetales puede variar dentro de rangos muy amplios, dependiendo de diversos factores como la variedad, grado de madurez, tipo de suelo, intensidad y duración de la luz solar, temperatura y/o pluviosidad (Macías *et al.*, 2003). Navarro & Navarro (2003) también exponen que las plantas difieren unas de otras en su poder de absorción y que especies distintas cultivadas en un mismo suelo pueden tener una alimentación mineral diferente, tanto bajo el punto de vista cualitativo como cuantitativo, e incluso variedades distintas de una misma especie no actúan del mismo modo. Las hojas representan uno de los principales consumidores de minerales del suelo extraídos por los cultivos, sin embargo, el reciclaje de algunos de ellos durante su senectud o la reproducción, es muy reducido, ante lo cual, una proporción importante de los minerales permanece en los tejidos vegetativos no cosechados y su reincorporación en varios casos puede contribuir a mejorar la fertilidad del suelo (Gutiérrez, 1997).

Una particularidad en cualquiera de los tipos de fitorremediación es la tolerancia de las plantas a los contaminantes; este proceso está dado por la capacidad para resistir la acumulación de elevados niveles de compuestos en sus tejidos, basado en estrategias que adoptan para resistir sus efectos tóxicos. Para comprender los procesos

empleados, se describen de forma breve algunos mecanismos utilizados por las plantas para tolerar tanto metales pesados como contaminantes orgánicos (López, 2007).

Tolerancia a los metales pesados. Está definido por los procesos celulares y la resistencia a los metales, una vez han penetrado las células (López, 2007); están relacionadas con mecanismos como el establecimiento de enlaces entre los metales y la pared celular, el nivel de tolerancia de la membrana celular y las enzimas vegetales, la reducción del transporte por la membrana celular, el flujo activo de metales desde las células hacia el exterior, la acumulación del exceso de metales en las vacuolas, la quelación del metal por ligandos orgánicos y/o inorgánicos (fitoquelatos), o por la precipitación del metal al formar compuestos de baja solubilidad (López, 2007; Kamnev, 2009).

Tolerancia a los contaminantes orgánicos. Existen dos mecanismos por los cuales las plantas pueden incrementar su resistencia a los contaminantes orgánicos (Navarro & Navarro, 2003). El primero consiste en la transformación de los elementos tóxicos en la rizósfera; en este proceso la planta libera más del 20% de su fotosintato dentro del suelo en forma de exudado radicular, el cual está constituido por una mezcla de azúcares, alcoholes, fenoles, ácidos orgánicos y proteínas, que son utilizados por las comunidades microbianas en la rizósfera (López, 2007). Estas poblaciones pueden ser de 100 a 10.000 veces mayores que las presentes en la matriz del suelo y se caracterizan por presentar enzimas específicas capaces de metabolizar los contaminantes hacia formas menos tóxicas (López, 2007). El segundo mecanismo, se produce una vez que los contaminantes atraviesan el sistema radicular (López, 2007); allí los elementos tóxicos pueden trasladarse hacia brotes y hojas para posteriormente volatilizarse, o pueden sufrir procesos de metabolización hacia nuevas formas; estos compuestos pueden mineralizarse o acumularse, bien como nutrientes o como nuevos

contaminantes. La inclusión en órganos subcelulares y la formación de otros compuestos representan las principales vías para la desintoxicación de xenobióticos en plantas (López, 2007).

Ventajas y desventajas de la fitorremediación

La Tabla 1 muestra las principales ventajas y desventajas que ofrece la fitorremediación, en relación con otras tecnologías convencionales, de acuerdo a lo planteado por algunos autores (Henry, 2000; Agudelo, Macías & Suárez, 2005; Núñez *et al.*, 2004; Mentaberry, 2009).

Algunas especies empleadas en fitorremediación

Según Saad, Castillo & Rebolledo (2009), de acuerdo con los estudios realizados las sustancias usadas en fitorremediación pueden clasificarse en dos grupos principales: la remediación de sustancias orgánicas recalcitrantes o peligrosas, donde el principal objetivo es degradar los contaminantes hasta obtener un producto menos tóxico; y, la remoción de sustancias tóxicas elementales, donde se encuentran los metales pesados y elementos radioactivos. Teniendo en cuenta esta clasificación, en la Tabla 2 y en la Tabla 3 se muestran las especies empleadas y el tipo de contaminante a tratar, respectivamente.

Tabla 1. Principales ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es una tecnología sustentable. • Es eficiente para tratar diversos tipos de elementos <i>in situ</i>. • Es aplicable en ambientes con degradación de baja, a moderada. • Es de bajo costo, no requiere personal especializado para su manejo, ni consumo de energía. • Es poco perjudicial para el ambiente y genera menor perturbación del lugar. • No produce contaminantes secundarios y por lo mismo no hay necesidad de lugares para desecho. • Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por las comunidades en los alrededores de las áreas afectadas, debido a que es estéticamente agradable. • Evita la excavación y el tráfico pesado. • Tiene una versatilidad potencial para tratar una gama diversa de materiales peligrosos. • Se pueden reciclar recursos (agua, biomasa, metales). • Emplea la energía solar; y los procesos biológicos, químicos y físicos emanados por las plantas para lograr la remediación (absorción, transformación, acumulación, extracción, reserva y degradación rizosférica microbiana). • Las plantas tiene la habilidad de resistir más concentraciones de contaminantes orgánicos que la mayoría de microorganismos. • Es un “biorreactor autónomo”, manejado solarmente. • Es una técnica que actúa en conjunto con la revegetalización y la biodegradación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es un proceso relativamente lento (cuando las especies son de vida larga, como árboles o arbustos). • Comparada con otras tecnologías empleadas esta requiere periodos de tiempo relativamente largos. • Es dependiente de las estaciones. • El crecimiento de la vegetación puede estar limitado por extremos de la toxicidad ambiental. • En algunos casos los elementos acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente durante el otoño (especies perennes). • Los elementos pueden acumularse en maderas para combustión. • No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras. • La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de los mismos. • Se requieren áreas relativamente grandes. • Puede favorecer el desarrollo de mosquitos (en sistemas acuáticos). • Alcanzan únicamente hasta la profundidad a la cual llegan las raíces. • Las raíces de las plantas requieren oxígeno, así que no pueden penetrar bajo condiciones donde la textura del suelo, volumen de agua o proporciones de respiración microbianas son altas. • El suelo está desnudo y sujeto a erosión durante las fases tempranas de establecimiento de la planta. • Soluciones a largo plazo.

Fuente: Modificado de Núñez *et al.* (2004); Barrientos (2012); Torres & Zuluaga (2009).

Tabla 2. Metales pesados y especie vegetal utilizada para su remediación.

Especie vegetal	Compuesto	Especie vegetal	Contaminante
<i>Spartina pectinata</i>	titanium (III)	<i>Athyrium yokoscense</i>	Cu, Pb, Fe, and Zn
<i>Typha</i> (Cattail) and <i>Juncus</i> (Rush)	titanium (III)	<i>Sesbania cannabina</i>	Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Ni
Wetlandplants	nitroaromatics	<i>Arabidopsis</i>	Cu, Zn, PO ₄ Hg, As
<i>C. Presl</i> (Zn hyperaccumulator)	Zn y Cd	<i>Brassica napus</i>	Selenio
<i>Silene vulgaris</i> (Moench) Garcke	Zn y Cd	<i>Sporobolus airoides</i>	Selenio
<i>Lycopersicon esculentum</i> L.	Zn y Cd As, Pb	<i>Festuca arundinacea</i>	Selenio
<i>Thlaspi caerulescens</i> J.	Zn y Cd	<i>Spartina patens</i>	Selenio
<i>Astragalus bisulcatus</i>	Selenio	<i>Arabidopsis</i>	Mercurio
Indian Mustard	Selenio	<i>Pteris cretica</i>	Arsénico
<i>Arabidopsis halleri</i>	As, Cd, Pb, and Zn	<i>Pteris vittata</i>	Arsénico
<i>Chlorella</i> sp.	Pyrite, níquel	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Níquel
<i>Brassica juncea</i> .	Pyrite, níquel	<i>Hordeum vulgare</i>	Níquel
<i>Penisetum purpureum</i> ,	Cromo	<i>Spinacea oleracea</i>	Níquel
<i>Brachiaria decumbens</i>	Cromo	<i>Brassica juncea</i>	Níquel
<i>Phragmites australis</i>	Cromo	<i>Ricinus communis</i>	Níquel
<i>Solanum nigrum</i> L.	Cadmio	<i>Solanum lycopersicum</i>	Níquel
<i>Gentiana pennelliana</i>	Pb, Cu, and Zn	<i>Sorgum vulgare</i>	Níquel
<i>Pteris vittata</i> L.	Arsénico	<i>Hordeum vulgare</i>	Phosphorus uranium
<i>Gigaspora margarita</i>	Arsénico	<i>Myriophyllum aquaticum</i>	Pesticidas
<i>Glomus mosseae</i>	Arsénico	<i>Brassica napus</i>	Selenio
<i>Agropyron elongatum</i>	Níquel	<i>Arabidopsis</i>	Níquel
<i>Chlorella</i> sp.	Mercurio	<i>Bidens maximowicziana</i>	Plomo
<i>Pteris cretica</i>	Arsénico	<i>Arabidopsis</i>	Selenium
<i>Pteris biaurita</i>	Arsénico	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Níquel
<i>Arabidopsis</i>	Mercurio y Arsénico	<i>Nicotiana tabacum</i>	Níquel

Fuente: Saad (2009).

Tabla 3. Compuestos orgánicos y especie vegetal utilizada para su remediación

Especie vegetal	Compuesto
<i>Salix exigua</i>	Atrazine and metolachlor
<i>Myriophyllum aquaticum</i>	2,4,6-trinitrotoluene
<i>Juncus effusus</i>	Atrazine and lambda-cyhalothrin
<i>Ludwigia peploides</i>	Atrazine and lambda-cyhalothrin
<i>Salix babylonica</i> L.	Methyl tert-butyl ether
<i>Lolium perenne</i> L.	Pentachlorophenol
<i>Raphanus sativus</i>	Pentachlorophenol
<i>Pisum sativum</i>	2,4-dichlorophenoxyacetic acid
<i>Cichorium intybus</i>	1,1,1-trichloro-2,2-bis-(4'-chlorophenyl ethane)
<i>Brassica juncea</i>	1,1,1-trichloro-2,2-bis-(4'-chlorophenyl ethane)
<i>Lupinus arboreus</i>	Solventes orgánicos tolueno
<i>Oryza sativa</i> L.	Metolachlor
<i>Cyperus aggregatus</i>	Petróleo
<i>Brachiaria brizantha</i>	Petróleo
Tabaco	2,3-dihydroxybiphenyl (2,3-DHB)
<i>Zea mays</i>	Herbicidas
<i>Nicotiana tabacum</i>	Herbicidas

Fuente: Saad (2009).

Estudios de caso

Son muchos los estudios de investigación desarrollados en el campo de la fitorremediación, algunos de los más relevantes se registran en la Tabla 4, incluyendo conclusión principal y referencia.

Tabla 4. Estudios de caso en el campo de la fitorremediación

Investigación	Conclusión principal	Autor(es)
“Comportamiento de la vetiveria (<i>Chrysopogon zizanioides</i> L. Roberty) como extractora de metales pesados en suelos contaminados”	La especie presentó dificultades para sobrevivir en suelos altamente contaminados por metales pesados como los de La Unión y Bustraviejo, sin embargo presentó un buen desarrollo en el suelo del Cuadrón cuya actividad minera se había abandonado hace más de 100 años.	Vargas <i>et al.</i> (2013)
“Proteínas queladoras de metales pesados en plantas hiperacumuladoras”	Las proteínas queladoras de metales pesados como: Yellow Stripe Like (YSL), Zinc Transporter (ZIP), ubiquitinas, Multidrug and Toxin Efflux (MATE), transportadoras de metales pesados dependientes de ATP (HMA), han sido estudiadas y reportadas como claves en el secuestro de estos metales.	Loyola & Aguilar (2012)
“Aislamiento de microorganismos inocuos productores de sideróforos para sistemas de fitorremediación”	Mediante la interacción planta -microorganismo se logra acrecentar la potencialidad de las plantas para acumular metales y hacer más eficiente el proceso.	Carrillo, Juárez y Tijerina (2011)
“Investigación de la biotransformación de Se en tejidos de <i>Phaseolus vulgaris</i> L. mediante espectroscopia de absorción de rayos X”	La variedad flor de mayo de <i>P. vulgaris</i> puede ser clasificada como una acumuladora secundaria de selenio; y se comprobó la biotransformación del selenato usando espectroscopia de absorción de rayos X (EAX).	Cruz <i>et al.</i> (2011)
“Uso potencial del huizache (<i>Acacia farnesiana</i> L. Will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo”	La interacción dosis de nitrógeno y concentración de plomo causó diferencias significativas en la acumulación de plomo de hoja, tallo y raíz. Hubo una tendencia a mayor acumulación del metal en la parte aérea de la planta, comparada con la acumulación registrada en la raíz.	Landeros <i>et al.</i> (2011)
“Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (<i>Gynerium sagittatum</i>) (Aubl) Beauv. <i>in vitro</i> ”	Esta especie acumula Hg en sus tejidos, siendo la raíz la parte de la planta que presenta mayor concentración, seguida de los tallos-hojas.	Ortega, Beltrán & Marrugo (2011)
“Aislamiento de hongos endófitos para su potencial uso en fitorremediación de suelos contaminados con plomo”	Se aislaron cuatro cepas fúngicas que favorecen significativamente el crecimiento de <i>D. viscosa</i> , una planta potencialmente fitorremediadora de Pb, que pueden ser usadas para mejorar dicho proceso.	Velázquez <i>et al.</i> (2011)
“Evaluación de <i>Raphanus sativus</i> como bioacumulador de cadmio”	Es posible concluir que <i>Raphanus sativus</i> (rábano) tuvo la capacidad de acumular cadmio en tallo, raíz y hojas. En las tres concentraciones se observó crecimiento y bioacumulación de este elemento por la planta.	Morales & García (2011)
“Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (<i>Cecropia peltata</i>)”	La especie acumula una cantidad considerable de Hg en sus tejidos; y la raíz es la parte que presenta mayor concentración seguida de las hojas y finalmente tallos.	Vidal <i>et al.</i> (2010)
“Efectos de rizosfera, microorganismos y fertilización en la biorremediación y fitorremediación de suelos con petróleos crudo nuevo e intemperizado”	La leguminosa guaje inoculada con consorcio y fertilizante tiene un amplio potencial de uso en la fitorremediación de un suelo con 50.000 mg·kg ⁻¹ de HTP de PN, se promovió la degradación de HTP hasta un 81 %, 9% más respecto a la rizósfera del pasto Egipto, pero en suelo con PI el mejor fue en pasto Egipto con un 44% de degradación	Maldonado <i>et al.</i> (2010)
“Evaluación de la capacidad fitorremediadora de <i>Cyperus laxus</i> Lam. en suelo contaminado con hidrocarburos”	En cuanto a la capacidad fitorremediadora, el sistema planta- microorganismos modificó la composición de los contaminantes; aun cuando no se detectó una remoción significativa de los hidrocarburos, en el tiempo del ensayo, posiblemente debido a la baja biodisponibilidad de éstos.	Escalante <i>et al.</i> (2009)
“Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (<i>Amaranthus hybridus</i> L.) y micorrizas”	Los resultados indican que la adición de micorrizas incrementó significativamente ($P<0.05$) la concentración de Pb y Cd en raíz, tallo y hoja de quelite. Las concentraciones de estos metales se incrementaron significativamente conforme la edad de la planta.	Ortiz <i>et al.</i> (2009)

Conclusiones

La implementación de técnicas de fitorremediación es recomendable, debido a que generalmente no altera los ecosistemas, se realiza sin atender contra ellos, es una técnica pasiva, amigable y sostenible con el medio ambiente; y se puede usar junto con métodos mecánicos tradicionales o en algunos casos en reemplazo de ellos, sin embargo, debe realizarse de forma controlada para evitar el paso de elementos en exceso a la cadena trófica.

El conocimiento de los procesos fisiológicos en la planta y los compuestos tóxicos, permite que se puedan seleccionar especies vegetales con mayores niveles de tolerancia hacia contaminantes específicos; y adicionalmente, por medio de modificaciones genéticas se puede incrementar la biomasa vegetal, su morfología, densidad radicular o penetración en profundidad, así como favorecer la existencia de asociaciones específicas entre microorganismos y raíces.

Literatura citada

- Agudelo, L., Macías, K. & Suárez, A. (2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de investigación*, 2(001), 57-60.
- Alexander, M. (1999). *Biodegradation and bioremediation*. (2ed.). Burlington, MA, USA: Academic Press.
- Aros, E. (2007). *Aplicación y alcances de la fitorremediación como una alternativa de saneamiento ambiental*. Chile: Resumen. Universidad de Talca. Recuperado de: <http://goo.gl/qEEsWw>
- Barrientos, T. (2012). Fitorremediación. Estado del Arte. Trabajo de grado Especialista en Ingeniería Ambiental, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Batista, R. & Sánchez, A. (2009). Fitorremediación de metales pesados y microorganismos. *Revista electrónica de la Agencia de Medio Ambiente*, (16), 1- 6.
- Brandt, R. (2003). Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash) for the use in phytoremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils in Venezuela. Tesis Curso Ecología del Paisaje. Münster. Westfälische Wilhelms-Universität Münster. Institut für Landschaftsökologie, Alemania.
- Carpena, R. & Bernal, M. (2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, 16 (2), 1-3.
- Carrillo, G., J. Juárez, J. & Tijerina, G. (2011). Aislamiento de microorganismos inocuos productores de sideróforos para sistemas de fitorremediación. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 501-509.
- Cruz, G., Yáñez, E., Gutiérrez, G., Bernal, J., Durán, E., Figueroa, S., Gardea, J. & De la Rosa, M. (2011). Investigación de la biotransformación de Se en tejidos de *Phaseolus vulgaris* L. mediante espectroscopia de absorción de rayos X. *Acta universitaria*, 21(4), 48-54.
- EPA – U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Phytoremediation resource guide, Introduction to Phytoremediation*. Cincinnati, Ohio: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development.
- EPA – U.S. Environmental Protection Agency. (1999). *Phytoremediation resource guide*. U.S. Washington, D.C. U.S. Environmental Protection Agency Office of Solid Waste and Emergency Response Technology Innovation Office.
- Ercoli, E., Gálvez, J., Di Paola, M., Cantero, J., Videla, S. & Medaura, C. (1999). Biorremediación de suelos altamente contaminados. Ingepet. Expl-8-EE-03.
- Escalante, E., Gallegos, M., Favela, E. & Gutierrez, M. (2009). Evaluación de la capacidad fitorremediadora de *Cyperus laxus* Lam. en suelo contaminado con hidrocarburos, XI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
- Estaún, V., Calvet, C., Pera, J., Camprubí, A. & Parladé, X. (2007). Metales pesados y la simbiosis micorriza: Estrategias de fitorremediación. *Afinidad LXIV*, (528), 167-169.
- FAO – PNUMA. (1984). *Directrices para el control de la degradación de suelos*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Ferrera, R., Alarcón, A., Mendoza, M., Sangabriel, W., Trejo, D., Cruz, S., López, C. & Delgadillo, J. (2007). Fitorremediación de un suelo contaminado con combustóleo utilizando *Phaseolus coccineus* y fertilización orgánica e inorgánica. *Agrociencia*, 41, 817-826.
- Fiorenza, S., Oubre, C. & Ward, C. (Edt). (2000). *Phytoremediation of hydrocarbon contaminated soil*. Boca Ratón, Florida, USA: Lewis Publishers.
- Freire, F. (2008). Técnicas de remediación ambiental de suelos contaminados con hidrocarburos en el área de influencia de operaciones de petroproducción del nororiente ecuatoriano de la piscina Shushufindi 17-1 (PEPDA). Tesis de pregrado Tecnólogo en petróleos. Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.
- Garbisu, C., Becerril, J., Epelde, L. & Alkorta, I. (2007). Bioindicadores de la calidad del suelo: herramienta metodológica para la evaluación de la eficacia de un proceso fitorremediador. *Ecosistemas*, 16 (2) 44-49.

20. Ghosh, M. & Singh, S. (2005). A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its byproducts. *Applied ecology and environmental research*, 3(1), 1-18.
21. Gutiérrez, M. (1997). Nutrición mineral de las plantas: avances y aplicaciones. *Agronomía Costarricense*, 21(1), 127-137.
22. Henry, J. (2000). *An Overview of the Phytoremediation of Lead and Mercury*. Washington, D.C.: National Network of Environmental Management Studies (NNEMS). Fellow U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response. Technology Innovation office.
23. Hollerung, J. (2003). *Phytoremediation: A General Overview*. Term Paper. Recuperado de: <http://goo.gl/YiiPRw>
24. Kamnev, A. (2009). Phytoremediation of heavy metals: an overview. *Marine Biotechnology*, 269 – 317.
25. Landeros, O., Trejo, R., Reveles, M., Valdez, R., Arreola, J., Predoza, A. & Ruíz, J. (2011). Uso potencial del hui-zache (*Acacia farnesiana* L. Will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente XVII*, 11-20.
26. López, A. (2007). *Capítulo II. Biorremediación y fitorremediación en suelos contaminados*. España: Publicaciones Real Academia Nacional de Farmacia. Recuperado de: <http://goo.gl/8TVfMe>
27. López, A. (2003). *El suelo en la biosfera y su repercusión en la salud ambiental*. Recuperado de: <http://goo.gl/Mw1ADe>
28. López, S., Gallegos, M., Pérez, L. & Gutierrez, M. (2005). Mecanismos de fitorremediación de suelos contaminados con moléculas orgánicas xenobióticas. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 21 (2), 91-100.
29. Loyola, C. & Aguilar, J. (2012). Proteínas queladoras de metales pesados en plantas hiperacumuladoras. *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ 10*, 21-30.
30. Lumelli, M. (2006). *Fitorremediación: otro regalo del reino vegetal*. Recuperado de: <http://goo.gl/cPmYDE>
31. Macías, S., Montenegro, M., Arregui, T., Sánchez, I., Nazareno, M. & López, M. (2003). Caracterización de acelga fresca de Santiago del Estero (Argentina). Comparación del contenido de nutrientes en hoja y tallo. Evaluación de los carotenoides presentes. *Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas.*, 23(1), 33-37.
32. Macías, F. (1993). Contaminación de suelos: algunos hechos y perspectivas, p. 53-74. En: Ortiz, R. (1993). Problemática geoambiental y desarrollo, Murcia: V Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio.
33. Maldonado, E., Rivera, M., Izquierdo, F. & Palma, D. (2010). Efectos de rizosfera, microorganismos y fertilización en la biorremediación y fitorremediación de suelos con petróleos crudo nuevo e intemperizado. *Universidad y Ciencia, Trópico húmedo*, 26(2), 121-136.
34. Mentaberry, A. (2009). Fitorremediación, [diapositivas] Buenos Aires: Curso de Agrobiotecnología, Departamento de Fisiología, Biología Molecular y Celular, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 67 diapositivas.
35. Morales, M. & García, I. (2011). Evaluación de *Raphanus sativus* como bioacumulador de cadmio, XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
36. Muñoz, L., Nevárez, G., Ballinas, M. & Peralta, M. (2010). Fitorremediación como una alternativa para el tratamiento de suelos contaminados. *Revista Internacional de ciencia y tecnología biomédica, Toctli*, 1(3), 1-9.
37. Navarro, S. & Navarro, G. (2003). *Química Agrícola*. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. (Segunda ed.). España: Ediciones Mundiprensa.
38. Nedunuri, V., Govindaraju, R., Banks, M., Schwab, A. & Chen, Z. (2000). Evaluation of phytoremediation for field-scale degradation of total petroleum hydrocarbons. *Environ. Eng.*, 126, pp. 483-490.
39. Núñez, F. (2002). Evaluación a escala piloto de la fitorremediación de cuerpos de agua empleando caña glauca, XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental Cancún, México.
40. Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R. & Olguín, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones, Biotecnología y Biología Molecular. *Ciencia, Julio-septiembre*, 69-82.
41. Ortega, R.; Beltrán, J. & Marrugo, J. (2011). Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (*Gynerium sagittatum*) (Aubl) Beauv. in vitro. *Revista Colombiana de Biotecnología*.
42. Ortiz, H., Trejo, R., Valdez, R., Arreola, J., Flores, A. & López, B. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 15(2), 161-168.
43. Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. & Villar, S. (2007). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados*. España: Elecé Industria Gráfica, Informe de vigilancia tecnológica. Elacé Industria Gráfica.
44. Peña, J. (2006). Bases moleculares de la fitorremediación de hidrocarburos totales del petróleo. *Terra Latinoamericana*, 24(4), 529-539.
45. Prasad, S., Kumar, N. & Sharma, S. (2010). Bioremediation: Developments, Current Practices and Perspectives Genetic Engineering and Biotechnology. *Journal* 3, 1-20.
46. Reddy, K., Admas, J. & Richardson, C. (1999). Potential technologies for remediation of Brownfields. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 3 (2), 61-68.
47. Saad, I., Castillo, J. & Rebolledo, D. (2009). Fitorremediación: estudio de inteligencia tecnológica competitiva. *Sinnco*, 1-15.
48. Sabroso, M. & Pastor, A. (2004). *Guía sobre suelos contaminados*. Zaragoza: CEPYME ARAGON y Gobierno de Aragón.
49. Salt, E., Smith, R. & Raskin, I. (1998). Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 49, 643-668.

50. Sánchez de la Puente, L. (1984). La alimentación mineral de las plantas. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología. *Temas de divulgación*.
51. Sierra, R. (2006). Fitorremediación de un suelo contaminado con plomo por actividad industrial. tesis de pregrado Ingeniero Agrícola y Ambiental. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", Buenavista, México.
52. Torres, K. & Zuluaga, T. (2009). Biorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. tesis de pregrado Ingeniería Química. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
53. Urzelai, A., Cagigal, E., Antepará, M., Bonilla, A. & Gurtubay, K. (2001). Potencial de fitorremediación de especies vegetales. Tratamiento de suelos contaminados con metales. *Ingeniería química*, 205-210.
54. Van Der Lelie, D., Schwitzguébel, J., Glass, D., Vangronsveld, J. & Baker, A. (2001). Assessing phytoremediation's progress in the United States and Europe. *Environ. Sci. Technol.*, 35, 446A-452A.
55. Vargas, C., Pérez, J., Masaguer, A. & Moliner, A. (2013). Comportamiento de la vetiveria (*Chrysopogon zizanioides* L. Roberty) como extractora de metales pesados en suelos contaminados, Ref. N° C0556, VII Congreso Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas, Madrid.
56. Velázquez, D., Rojas, C., Peralta, M. & Volke, T. (2011). Aislamiento de hongos endófitos para su potencial uso en fitorremediación de suelos contaminados con plomo, XIV Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería.
57. Vidal, J., Marrugo, J., Jaramillo, B. & Perez, L. (2010). Remediación de suelos contaminados con mercurio utilizando guarumo (*Cecropia peltata*). *Ingeniería & Desarrollo* 27, 113-129.
58. Vidali, M. (2001). Bioremediation an overview. *Pure Appl. Chem.*, 73(7), 1163–1172.
59. Wania, F. & Mackay, D. (1996). Tracking the distribution of persistent organic pollutants. *Environ. Sci. Technol.* 30, 390A-396A.
60. Watanabe, E. (1997). Phytoremediation on the brink of commercialization. *Environ. Sci. Technol.*, 31, 182-186.