



REVISIÓN [REVIEW]

FITORREMEDIACIÓN: UNA ALTERNATIVA PARA ELIMINAR LA CONTAMINACIÓN

[PHYTOREMEDIATION: AN ALTERNATIVE TO ELIMINATE POLLUTION]

Angélica Evelin Delgadillo-López^{1*}, César Abelardo González-Ramírez¹,
Francisco Prieto-García¹, José Roberto Villagómez-Ibarra¹
and Otilio Acevedo-Sandoval²

¹Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Centro de Investigaciones Químicas. Carr. Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184.

Email: ange121930@yahoo.com.mx.

²Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Centro de Investigaciones en Ciencias de la Tierra. Carr. Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184.

*Corresponding Author

RESUMEN

La fitorremediación aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo. Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo. En esta revisión se presenta un panorama de las diversas técnicas fitocorrectivas empleadas para restaurar suelos y efluentes contaminados; así como del potencial que ofrece el uso de plantas transgénicas.

Palabras clave: transporte, fitotecnologías, plantas transgénicas, metales pesados, contaminantes orgánicos.

INTRODUCCIÓN

Uno de los rasgos característicos de la sociedad moderna es la creciente emisión al ambiente de sustancias contaminantes, destacando aquellas que proceden de las actividades industriales, mineras, agropecuarias, artesanales y domésticas. Estos compuestos representan una amenaza para los seres vivos, por lo que se han desarrollado una serie de métodos para enmendar el impacto causado. Los métodos convencionales suelen ser costosos (Tabla 1) y pueden afectar de manera irreversible las propiedades del suelo, agua y de los seres vivos que en ellos habitan (Padmavathiamma y Li, 2007).

SUMMARY

Phytoremediation consists of a set of technologies that exploit the ability of some plants to absorb, accumulate, metabolize, volatilize or stabilize pollutants that are present in soil, air, water or sediments such as: heavy metals, radioactive metals, organic compounds, and compounds derived from petroleum. Phytoremediation offers numerous advantages in relation to the physicochemical methods that are used nowadays, for example, its wide applicability and low cost. This review provides an overview of the various phytocorrective techniques employed for remediation of polluted soil and water; as well as the potential that offers the use of transgenic plants.

Key words: transport, phytotechnologies, transgenic plants, heavy metals, organic pollutants.

El aumento de los costos y la limitada eficacia de los tratamientos fisicoquímicos han estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías. Por lo que, la fitorremediación representa una alternativa sustentable y de bajo costo para la rehabilitación de ambientes afectados por contaminantes naturales y antropogénicos (Singh y Jain, 2003; Reichenauer y Germida, 2008).

La fitorremediación es un conjunto de tecnologías que reducen *in situ* o *ex situ* la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por las plantas y microorganismos asociados a ellas.

La fitorremediación utiliza las plantas para remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar contaminantes (Kelley *et al.*, 2000; Miretzky *et al.*, 2004; Cherian y Oliveira, 2005; Eapen *et al.*, 2007; Cho *et al.*, 2008). Se han identificado una amplia diversidad de especies que se emplean para este fin. Algunas de ellas, debido a su gran capacidad para acumular metales pesados, reciben el nombre de hiperacumuladoras. Por definición, estas plantas deben acumular al menos 100 µg/g (0.01 % peso seco) de Cd y As; 1000 µg/g (0.1 % peso seco) de Co, Cu, Cr, Ni y Pb; y 10 000 µg/g (1.0 % peso seco) de Mn (Watanabe, 1997; Reeves *et al.*, 1999; McGrath *et al.*, 2001; Kamal *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2004; Reeves, 2006; Padmavathiamma y Li, 2007).

Esta tecnología se hace más efectiva a través de la manipulación genética, lo que mejora la capacidad de remediación de las plantas (Cherian y Oliveira; 2005). Se han diseñado especies vegetales con una mayor capacidad de degradación de contaminantes orgánicos o de acumulación de metales pesados.

Algunas plantas genéticamente modificadas (GM) están adaptadas específicamente para la fitorremediación de Cd, Hg o bifenilos policlorados (PCB's) (Raskin, 1996; Meagher, 2000; Pilon-Smith y Pilon 2002; Eapen *et al.*, 2007; Macek *et al.*, 2007).

En esta revisión se hace un análisis de las diversas tecnologías de fitorremediación, así como del papel que juega la próxima generación de plantas GM para la remediación, prevención y reducción de la contaminación en los diferentes sectores del ambiente.

Tipos de contaminantes

La contaminación del ambiente se produce por la incorporación de cualquier tipo de energía, organismo o sustancia, que afecta las características de los ecosistemas, modificando negativamente sus

propiedades y su capacidad para asimilarlas o degradarlas. Su entrada se realiza como consecuencia de las actividades antropogénicas, aunque también se puede producir de forma natural. De manera general, los contaminantes se clasifican en:

Contaminantes orgánicos: incluyen hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH's), PCB's, dioxinas, hidrocarburos de petróleo, disolventes clorados, compuestos aromáticos que se emplean en la producción de colorantes, explosivos, productos farmacéuticos, plaguicidas (herbicidas, insecticidas y fungicidas), surfactantes, entre otros. En comparación con los compuestos inorgánicos, estos contaminantes son menos tóxicos para las plantas, ya que son menos reactivos y se acumulan en menor proporción (Cherian y Oliveira; 2005).

Contaminantes inorgánicos: incluyen a los metales pesados como Co, Cr o Cu, elementos no metálicos como el As y B (Navarro-Aviñó *et al.*, 2007), y radionúclidos como ⁶⁰Co y ¹³⁷Cs (Peles *et al.*, 2002; Popa *et al.*, 2004). Algunos elementos traza son esenciales para la nutrición y crecimiento de plantas (B, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn) y animales (As, Cu, Co, Fe, Mn, Mo, Zn, Cr, F, Ni, Se, Sn y V). La toxicidad de estos elementos depende de la concentración, la forma química y su persistencia. (Adriano *et al.*, 2004; Navarro-Aviñó *et al.*, 2007).

En general, los mecanismos involucrados en la remoción de contaminantes son de tres tipos: físicos (sedimentación, filtración, adsorción, volatilización), químicos (precipitación, hidrólisis, reacciones de óxido-reducción o fotoquímicas) y biológicos (resultado del metabolismo microbiano, del metabolismo de plantas o de procesos de bioabsorción).

Tabla 1. Ejemplo de métodos de remediación. Comparación de costos.

Caso	Tratamiento con fitorremediación	Costo (miles de pesos)	Tratamiento convencional	Costo (miles de pesos)	Ahorro proyectado
Pb en suelo, 0.405 ha	Extracción, recolección, disposición	\$150-200	Excavación y disposición	\$500	50-65%
Solventes en agua subterránea, 1.012 ha	Degradación y control hidráulico	\$200 de instalación y mantenimiento inicial	Bombeo y tratamiento	\$700 costo de funcionamiento anual	50% de ahorro por tres años
Hidrocarburos en suelo, 0.405 ha	Degradación <i>in situ</i>	\$50-100	Excavación, incineración y disposición	\$500	80%

(Movahed y Maeiyat, 2009)

Transporte de contaminantes orgánicos

Algunas plantas tienen la capacidad para metabolizar o acumular compuestos orgánicos como el 1,1,1-tricloro-2,2-bis(4-clorofenil)-etano (DDT), tricloroetileno (TCE), 2,4-diclorofenol, PCB's, explosivos como el trinitrotolueno (TNT) o dinitrotolueno, PAH's y detergentes (Tabla 2).

Los microorganismos que habitan en la rizósfera juegan un papel importante en la degradación de la materia orgánica. Los metabolitos generados de esta degradación son absorbidos por las plantas junto con nitrógeno, fósforo y otros minerales (Garbisu *et al.*, 2007).

Algunos compuestos orgánicos son utilizados por los microorganismos como fuente de carbono (Viñas, 2005). Los compuestos alifáticos se degradan fácilmente por oxidaciones sucesivas. Cuando se incluyen como sustituyentes alcanos de cadena larga, se forman estructuras ramificadas estéricamente inaccesibles a la degradación. Los compuestos aromáticos o cíclicos se degradan a partir de la ruptura del anillo. La incorporación de halógenos disminuye la degradabilidad por estabilización del anillo aromático. El orden decreciente de biodegradación es, generalmente, n-alcanos > isoprenoides > aromáticos de bajo peso molecular > cicloalcanos > poliaromáticos > moléculas polares (Leahy y Colwell, 1990).

Otro fenómeno importante es el relacionado con la atracción electrostática entre las cargas eléctricas de las raíces de las plantas con las cargas opuestas de partículas coloidales, las cuales se adhieren a la superficie de la raíz donde son absorbidas y transportadas a las partes aéreas donde se metabolizan o volatilizan. El tipo de planta y las propiedades físicas y químicas de estos compuestos son parámetros importantes que determinan el destino de los contaminantes (Eapen *et al.*, 2007).

Para la fitorremediación de contaminantes orgánicos se toma en cuenta los siguientes aspectos: 1) el metabolismo de los contaminantes al interior y al exterior de la planta (rizósfera), 2) los procesos que conducen a la completa degradación de los contaminantes (mineralización), y 3) la absorción de los contaminantes (Reichenauer y Germida, 2008).

Las plantas metabolizan los compuestos orgánicos a través de tres pasos secuenciales:

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

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

Tabla 2. Ejemplos de plantas que fitodegradan contaminantes orgánicos.

Contaminante orgánico	Planta	Efecto	Referencia
Benzotriazoles	<i>Helianthus annuus</i>	Metabolismo	Castro <i>et al.</i> , 2003
4-Clorofenol	<i>Carex gracilis</i>	Remediación	Wand <i>et al.</i> , 2002
2,6-dimetilfenol naftaleno			
2,4-Diclorofenol	<i>Brassica napus</i>	Remediación	Agostini <i>et al.</i> , 2003
DDT	<i>Brassica juncea</i> , <i>Cichorium intybus</i>	Metabolismo	Suresh <i>et al.</i> , 2005
2,4-Dinitrotolueno	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Metabolismo	Yoon <i>et al.</i> , 2006
Metilterbutiléter	<i>Populus spp.</i>	Volatilización	Ma <i>et al.</i> , 2004
Perclorato	<i>Nicotiana tabacum</i>	Metabolismo	Sundberg <i>et al.</i> , 2003
Hidrocarburos de petróleo	<i>Vetiveria zizanioides</i>	Remediación	Brandt <i>et al.</i> , 2006
Fenol	<i>Brassica juncea</i> , <i>Raphanus sativus</i> , <i>Azadirachta indica</i> , <i>Beta vulgaris</i>	Remediación	Singh <i>et al.</i> , 2006
Fenol y clorofenoles	<i>Daucus carota</i>	Metabolismo	Araujo <i>et al.</i> , 2002
Hexahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazina	<i>Populus spp.</i>	Metabolismo	Van <i>et al.</i> 2004
TCE	<i>Populus spp.</i>	Metabolismo	Ma y Burken, 2003
TNT	<i>Myriophyllum aquaticum</i> , <i>Helianthus annuus</i>	Metabolismo	Sung <i>et al.</i> , 2003; Adamia <i>et al.</i> , 2006

Fase III. Promueve la compartimentalización de los compuestos orgánicos modificados en las vacuolas o formación de enlaces con los componentes de la pared celular como la lignina y la hemicelulosa.

Las enzimas, en la planta, que catalizan la primera fase de las reacciones son las monoxigenasas P450 y las carboxilesterasas. De la segunda fase, en la que ocurre la conjugación por enzimas como la glutatión S-transferasa, resulta la formación de compuestos solubles y polares. La tercera fase del metabolismo de la planta es la compartimentalización y almacenamiento de los metabolitos solubles en las vacuolas o en la matriz de la pared celular. La glutatión S-conjugasa es la encargada de este proceso (Cherian y Oliveira, 2005).

Transporte de contaminantes inorgánicos

Los metales pesados son aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g/cm^3 cuando están en forma elemental o cuyo número atómico es superior a 20 (Vardanyan y Ingole, 2006). Muestran una elevada tendencia a bioacumularse y a biomagnificarse a través de su paso por los distintos eslabones de las cadenas tróficas. En concentraciones elevadas, ocasionan graves problemas en el desarrollo, crecimiento y reproducción de los seres vivos (Roy *et al.*, 2005).

Los mecanismos de tolerancia varían entre las distintas especies de plantas y están determinados por el tipo de metal, eficiencia de absorción, traslocación y secuestro. Las fases del proceso por el cual las plantas incorporan y acumulan metales pesados son las siguientes (Navarro-Aviñó, 2007):

Fase I. Implica el transporte de los metales pesados al interior de la planta y, después, al interior de la célula. La raíz constituye el tejido de entrada principal de los metales, los cuales llegan por difusión en el medio, mediante flujo masivo o por intercambio catiónico. La raíz posee cargas negativas en sus células, debido a la presencia de grupos carboxilo, que interaccionan con las positivas de los metales pesados, creando un equilibrio dinámico que facilita la entrada hacia el interior celular, ya sea por vía apoplástica o simplástica (Navarro-Aviñó, 2007).

Fase II. Una vez dentro de la planta, las especies metálicas son secuestradas o acomplexadas mediante la unión a ligandos específicos. Entre los quelantes producidos por las plantas se encuentran los ácidos orgánicos (ácidos cítrico, oxálico y málico), algunos aminoácidos (histidina y cisteína) y dos clases de péptidos: fitoquelatinas y metaloteínas.

Las fitoquelatinas son ligandos de alta afinidad que tienen como sustrato al glutatión. Están constituidas básicamente por 3 aminoácidos: ácido glutámico, cisteína y glicina, unidos por enlaces peptídicos.

Las metalotioneínas son polipéptidos de unos 70-75 aminoácidos con un alto contenido en cisteína, aminoácido capaz de formar complejos con cationes mediante el grupo sulfhidrilo. Tienen una marcada afinidad por las formas iónicas de Zn, Cd, Hg y Cu.

Fase III. Involucra la compartimentalización y detoxificación, proceso por el cual, el complejo ligando-metal queda retenido en la vacuola.

Tecnologías de fitorremediación

Las fitotecnologías se basan en los mecanismos fisiológicos básicos que tienen lugar en las plantas y en los microorganismos asociados a ellas, tales como: transpiración, fotosíntesis, metabolismo y nutrición (Tabla 3).

Según Thangavel y Subhuram (2004), dependiendo del tipo de contaminante, las condiciones del sitio y el nivel de limpieza requerido; las tecnologías de fitorremediación se pueden utilizar como medio de contención (rizofiltración, fitoestabilización y fitoinmovilización) o eliminación (fitodegradación, fitoextracción y fitovolatilización).

La fitoestabilización permite inmovilizar contaminantes en el suelo a través de su absorción y acumulación en las raíces o bien, por precipitación en la zona de la rizosfera. Este proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas o al aire (Barton *et al.*, 2005; Mendez y Maier, 2008.). La fitoestabilización es efectiva en suelos de textura fina con alto contenido de materia orgánica (Padmavathiamma y Li, 2007). Se aplica principalmente en terrenos extensos en donde existe contaminación superficial. Esta tecnología tiene como ventajas, sobre otros métodos de remediación de suelos, que es de menor costo, fácil de aplicar y estéticamente agradable. Algunas plantas empleadas con fines de fitoestabilización son: *Hyparrhenia hirta* (Pb); *Zygophyllum fabago* (Zn); *Lupinus albus* (Cd, As); *Anthyllis vulneraria* (Zn, Pb, Cd); *Deschampsia cespitosa* (Pb, Cd, Zn); *Cardaminopsis arenosa* (Cd, Zn); *Horedeum vulgare*, *Lupinus angustifolius* y *Secale cereale* (As); *Lolium italicum* y *Festuca arundinaceae* (Pb, Zn); y *Brassica juncea* (Cd, Zn, Cu, Mn, Fe, Pb) (Bolan *et al.*, 2003; Clemente *et al.*, 2003; Rizzi *et al.*, 2004; Kucharski *et al.*, 2005; Clemente *et al.*, 2006; Frérot *et al.*, 2006; Mains *et al.*, 2006; Vázquez *et al.*, 2006; Conesa *et al.*, 2007).

Tabla 3. Mecanismos de fitorremediación

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

(Ghosh y Singh, 2005)

La rizofiltración utiliza las plantas para eliminar del medio hídrico contaminantes a través de la raíz (Dushenkov *et al.*, 1995). En la rizofiltración estas plantas se cultivan de manera hidropónica. Cuando el sistema radicular está bien desarrollado, las plantas se introducen en el agua contaminada con metales, en donde las raíces los absorben y acumulan. A medida que las raíces se van saturando, las plantas se cosechan y se disponen para su uso final (Nedelkoska y Doran, 2000; Eapen *et al.*, 2003; Cherian y Oliveira, 2005). Existe una gran cantidad de estudios relacionados con la capacidad de acumulación de contaminantes de diversas plantas acuáticas, algunos ejemplos de ellas son: *Scirpus lacustris* (Cd, Cu, Pb, Mg, Fe, Se, Cr), *Lemna gibba* (Pb, As, Cu, Cd, Ni, Cr, Al, Fe, Zn, Mn), *Azolla caroliniana* (Hg, Cr Sr, Cu, Cd, Zn, Ni, Pb, Au, Pt), *Elatine trianda* (As), *Wolffia papulifera* (Cd), *Polygonum punctatum* (Cu, Cd, Pb, Se, As, Hg, Cr, Mn) y *Myriophyllum aquaticum*, *Ludwigina palustris* y *Mentha aquatic* (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni) (Zhao y Duncan, 1998; Boniardi *et al.*, 1999; Fogarty *et al.*, 1999; Antunes *et al.*, 2001; Groudeva *et al.*, 2001; Cohen-Shoel *et al.*, 2002; Suseela *et al.*, 2002; Quin y Terry, 2003; Zheng *et al.*, 2003; Bennicelli *et al.*, 2004; Chandra y Kulshreshtha, 2004; Kamal *et al.*, 2004; Maleva *et al.*, 2004; Weis y Weis, 2004; Mkandawire *et al.*, 2005; Vardanyan y Ingole, 2006; Dilek, 2007; Li *et al.*, 2007).

La fitoextracción o fitoacumulación consiste en la absorción de metales contaminantes mediante las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y

hojas. El primer paso para la aplicación de esta técnica es la selección de las especies de planta más adecuada para los metales presentes y las características del emplazamiento. Una vez completado el desarrollo vegetativo de la planta el siguiente paso es cortarlas y proceder a su incineración y traslado de las cenizas a un vertedero de seguridad. La fitoacumulación se puede repetir ilimitadamente hasta que la concentración remanente de metales en el suelo esté dentro de los límites considerados como aceptables (Kumar *et al.*, 1995). Algunas plantas empleadas para esta técnica fitocorrectiva son: *Thlaspi caerulescens* (Cd); *Sedum alfredii*, *Viola baoshanensis* y *Vertiveria zizanioides* (Zn, Cd, Pb); *Alyssum murale*, *Trifolium nigrescens*, *Psychotria douarrei*, *Geissois pruinoso*, *Homalium guillainii*, *Hybanthus floribundus*, *Sebertia acuminata*, *Stackhousia tryonii*, *Pimelea leptospermoides*, *Aeollanthus biformifolius* y *Haumaniastrum robertii* (Ni); *Brassica juncea*, *Helianthus annuus*, *Sesbania drummondii* (Pb); *Brassica napus* (Cu, Pb, Zn); y *Pistia stratiotes* (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) (Begonia *et al.*, 1998; Reeves, 2003; Schwartz *et al.*, 2003; Wenzel *et al.*, 2003; Odjegba y Fasidi, 2004; Sharma *et al.*, 2004; Boonyapookana *et al.*, 2005; Chandra *et al.*, 2005; Zhuang *et al.*, 2005; Bani *et al.*, 2007; Wu *et al.*, 2007; Zhuang *et al.*, 2007).

La fitovolatilización se produce a medida que los árboles y otras plantas en crecimiento absorben agua junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos. Algunos de estos pueden llegar hasta las hojas y evaporarse o volatilizarse en la atmósfera (Prasad y Freitas, 2003). Mediante este proceso se han eliminado contaminantes como: compuestos orgánicos volátiles (benceno, nitrobenceno, tolueno, etilbenceno y *m*-xileno), As, Se y Hg (Burken y Ma, 2006; Padmavathiamma y Li, 2007). Las plantas *Salicornia bigelovii*, *Brassica juncea*, *Astragalus bisulcatus* y *Chara canescens* se han empleado para la remediación de sitios contaminados con Se (Lin *et al.*, 2002; Shrestha *et al.*, 2006) y la *Arabidopsis thaliana* para el Hg (Cherian y Oliveira, 2005).

En la fitodegradación las plantas y los microorganismos asociados a ellas degradan los contaminantes orgánicos en productos inofensivos, o bien, mineralizarlos hasta CO₂ y H₂O. En este proceso los contaminantes son metabolizados dentro de los tejidos vegetales y las plantas producen enzimas como la dehalogenasa y la oxigenasa, que ayudan a catalizar la degradación (Singh y Jain, 2003). La fitodegradación se ha empleado para la remoción de explosivos como el TNT, hidrocarburos halogenados, Bisfenol A, PAHs y pesticidas organoclorados y organofosforados (Hannink *et al.*, 2001; Chaudhry *et al.*, 2002; Denys *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2007).

La fitoinmovilización provoca la sujeción y reducción de la biodisponibilidad de los contaminantes mediante la producción de compuestos químicos en la interfaz suelo-raíz, los que inactivan las sustancias tóxicas, ya sea por procesos de absorción, adsorción o precipitación (Carpena y Bernal, 2007).

Plantas transgénicas y fitorremediación

Los organismos genéticamente modificados (OGM), comúnmente conocidos como transgénicos, juegan un papel importante en diversos ámbitos de la vida actual. Las plantas transgénicas se han diseñado para producir una gran variedad de productos. Una prueba de ello son las plantas comestibles utilizadas como vehículos de reparto de medicamentos en lugares donde los fármacos son demasiados costosos o no están disponibles. Por ejemplo, las papas con vacuna antidiarreica o los plátanos y alfalfa con vacuna del cólera (Raskin, 1996; Saleh-Lakha y Glick, 2005). Otro uso importante de las plantas GM es para la prevención y remoción de la contaminación medioambiental.

Prevención de la contaminación. Las plantas GM empleadas con este propósito reducen significativamente la cantidad de agroquímicos necesarios para los cultivos (Montagu, 2005, Vain, 2006). Un ejemplo de estas plantas es el maíz Bt. La denominación Bt deriva de *Bacillus thuringiensis*, una bacteria que habita en el suelo y cuyas esporas contienen proteínas tóxicas para ciertos insectos, como el gusano barrenador (*Diatraea saccharalis*). El maíz Bt se produce al insertar a la planta, el gen *cry* extraído de la bacteria Bt. Este gen codifica para la síntesis de proteínas Cry, las cuales se activan en el sistema digestivo del insecto alterando su equilibrio osmótico y provocando su parálisis, por lo que el insecto deja de alimentarse y muere a los pocos días (Macek *et al.*, 2007).

El nuevo enfoque para el manejo de plagas se basa en la desarrollo de plantas que producen y emiten feromonas de insectos. Por ejemplo, se ha insertado en las plantas de tabaco, el gen que codifica la acil-CoA-delta¹¹-(z)-desaturasa, que es responsable de la producción de feromonas sexuales femeninas en la polilla de la col. Estas plantas se siembran cerca o alrededor de los campos de cultivo alimenticios que requieren protección y atraen a las polillas del sexo opuesto, con lo que se reduce la efectividad del apareamiento y la disminución de la población de la polilla. Este enfoque no erradica totalmente la plaga,

pero reduce las pérdidas de plantas que necesitan ser protegidas (Nesnerova, 2004).

Remoción de la contaminación. Las plantas GM diseñadas para este fin, son capaces de metabolizar compuestos orgánicos (Tabla 4) o bien de acumular mayor cantidad de contaminantes inorgánicos (Tabla 5). Generalmente, la fitorremediación es una función conjunta entre la planta y los microorganismos de la rizósfera (Rittmann, 2006). Algunas especies de bacterias degradan, de manera selectiva, ciertos compuestos que son tóxicos para las plantas. Los productos metabólicos del proceso microbiano son asimilados y convertidos, por las especies vegetales, en compuestos menos tóxicos. Por lo tanto, las modificaciones genéticas de los microorganismos presentes en la rizósfera representan una posibilidad en el mejoramiento de las técnicas fitocorrectivas, además, la introducción de microorganismos GM asegura que los cambios se limiten a los consorcios bacterianos presentes en la raíz y que estos no se encuentren en el suelo circundante (Macek *et al.*, 2007).

Un ejemplo de ello, es la rizoremediación, por la *Pseudomonas fluorescens*, de PCB's. Este proceso se regula mediante un sistema que responde a las señales de las raíces de la alfalfa (Villaceros, 2005). Otro enfoque prometedor, involucra el uso de bacterias edáficas GM que son capaces de remediar compuestos orgánicos volátiles solubles en agua (Barac, 2004). Un ejemplo de ello son las bacterias que degradan el tricloroetileno, las cuales protegen a la planta huésped en contra de su fitotoxicidad y contribuyen a la disminución de su evapotranspiración (Macek *et al.*, 2007).

La fitoextracción es una solución para la remoción de contaminantes que no pueden ser degradados. Se deben considerar dos factores importantes para que una planta sea un buen fitoextractor: su biomasa y su eficiencia de bioconcentración. A pesar de que existen plantas hiperacumuladoras que son buenas candidatas para la fitorremediación, muchas de ellas poseen poca biomasa, por lo que el uso de la ingeniería genética permite transferir y sobreexpresar los genes de bacterias, levaduras o animales que promueven la hiperacumulación en ciertas plantas que tienen una gran biomasa.

Tabla 4. Plantas transgénicas para remediación de metales

Gen	Fuente	Planta modificada	Efecto	Referencia
<i>CUPI</i>	Levadura de metaloteína	<i>Nicotiana tabacum</i>	Elevada eficiencia de extracción de Cu	Thomas <i>et al.</i> , 2003
<i>gshI</i> , <i>gshII</i> y <i>APS1</i>	<i>Escherichia coli</i> y <i>Arabidopsis thaliana</i>	<i>Brassica juncea</i>	Mayor capacidad de remoción de Zn y Cd del suelo	Bennett <i>et al.</i> 2003
<i>SAT</i>	<i>Thlaspi goesingense</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Incremento de la tolerancia al Ni	Freeman <i>et al.</i> , 2004
<i>TaPCSI</i>	<i>Triticum aestivum</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	Mayor tolerancia a Pb y Cd	Gisbert <i>et al.</i> , 2003
<i>ASTL</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Incremento de la tolerancia al Cd	Dominguez-Solis <i>et al.</i> , 2001
<i>APS</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	<i>Brassica juncea</i>	Mayor acumulación de Se	Pilon-Smits <i>et al.</i> , 1999
<i>NtCBP4</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	Mayor tolerancia al Pb	Sunkar <i>et al.</i> , 2000

Se han caracterizado y funcionalizado, a nivel molecular, un gran número de sistemas de descontaminación de elementos traza en levaduras y bacterias. La introducción de tales genes en las plantas ha cosechado resultados prometedores (Rugh *et al.*, 1998; Kramer y Chardonnens, 2001). Un ejemplo de ello, es la sobreexpresión de los genes involucrados en la síntesis de metaloteínas (MT), lo que mejora la capacidad de quelación o traslocación de metales (Pilon-Smits, 2005; De la Fuente *et al.*, 1997; Higuchi *et al.*, 1999). Por ejemplo, la sobreexpresión de genes MT en la planta de tabaco promueve una mayor tolerancia al Cd (Misra y Gedamu, 1989). La sobreexpresión del gen *CUPI* en la coliflor, promueve la acumulación de Cd hasta en 16 veces más que en la planta sin modificación genética (Hesegawa *et al.*, 1997). Se ha reportado una mayor acumulación de Cu en *Arabidopsis thaliana* por la sobreexpresión del gen MT del chícharo (Pan *et al.*, 1994).

El ejemplo más representativo del uso de las plantas GM con fines de remediación, es aplicado a la eliminación de mercurio. El mercurio entra en los cuerpos de agua como consecuencia de actividades industriales como la fabricación de papel, textiles, productos químicos y como subproducto de la minería. El mercurio al ser líquido a temperatura ambiente es fácilmente volatilizado, sin embargo, debido a su alta reactividad, existe en el ambiente principalmente como catión divalente Hg^{2+} .

Con base a lo anterior, se ha propuesto el uso de la reductasa de origen bacteriano, MerA, que cataliza la reducción del ion mercuríco a mercurio elemental, con el uso de NADPH como donador de electrones. Para garantizar la traducción en las plantas, se sintetizó el gen *merApe9* y se introdujo a la planta *Arabidopsis thaliana* mediante una transformación con *Agrobacterium tumefaciens*. Estudios posteriores demostraron una mejor resistencia en la germinación y crecimiento en un medio contaminado con $HgCl_2$ en concentraciones de 25-100 μM (niveles tóxicos para la mayoría de las plantas). El uso de *Arabidopsis thaliana* modificada genéticamente, sirve como modelo para la reducción de otros metales a través de procesos enzimáticos que pueden ayudar a remediar metales tóxicos como Cu, Pb y Cr (Raskin, 1996).

Ventajas y limitaciones de la fitorremediación

La fitorremediación, por sí misma, muestra una serie de ventajas y limitaciones en comparación con otras tecnologías convencionales, las cuales se presentan en la tabla 6. Las fitotecnologías son especialmente útiles para su aplicación en grandes superficies, con contaminantes relativamente inmóviles o con niveles de contaminación bajo, y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo.

Tabla 5. Plantas transgénicas para degradación de contaminantes orgánicos

Gen	Fuente	Planta modificada	Efecto	Referencia
<i>CYP1A1</i> , <i>CYP2B6</i> y <i>CYP2C19</i>	<i>Homo sapiens</i>	<i>Oryza sativa</i>	Mejora el metabolismo del clorotoluron; fitorremediación de atrazina y metolaclor	Kawagashi <i>et al.</i> , 2006, Kawagashi <i>et al.</i> , 2007
<i>CYP105A1</i>	<i>Streptomyces griseus</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	Resistencia a la sulfonilurea	O'Keefe <i>et al.</i> , 1994
<i>CYP2C9</i>	<i>Homo sapiens</i>	<i>Oryza sativa</i>	Tolerancia a la sulfonilurea	Hirose <i>et al.</i> , 2005
<i>CYP76B1</i>	<i>Helianthus tuberosus</i>	<i>Nicotiana tabacum</i> , <i>Arabidopsis thaliana</i>	Tolerancia a herbicidas	Didierjean <i>et al.</i> , 2002
<i>CYP2B22</i> <i>CYP2C49</i>	<i>Sus scrofa</i>	<i>Oryza sativa</i>	Tolerancia a diversos pesticidas	Kawagashi <i>et al.</i> , 2005
γ -Glutamilcisteína sintetasa (ECS)	<i>Brassica juncea</i>	<i>Brassica juncea</i>	Tolerancia a la atrazina, 1-cloro-2,4-dinitrobenceno, fenantreno y metolaclor	Flocco <i>et al.</i> , 2004
Laccasa	<i>Coriolus versicolor</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	Remediación de Bisfenol A y pentaclorofenol	Sonoki <i>et al.</i> , 2005
Mn-peroxidasa	<i>Coriolus versicolor</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	Remediación de pentaclorofenol	Limura <i>et al.</i> , 2002
Nitroductasa	<i>Escherichia coli</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Degradación de TNT	Kurumata <i>et al.</i> , 2005
Nitroreductasa	<i>Enterobacter cloacae</i>	<i>Nicotiana tabacum</i>	Remediación de TNT	Hannink <i>et al.</i> , 2001
Peroxidasa	<i>Lycopersicon esculentum</i>	<i>Lycopersicon esculentum</i>	Remediación de fenol	Oller <i>et al.</i> , 2005
Oxofitodienoato reductasas (<i>OPR1</i> , <i>OPR2</i> , <i>OPR3</i>)	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	<i>Arabidopsis thaliana</i>	Detoxificación de TNT	Beynon <i>et al.</i> , 2009
Haloalcano dehalogenasa (Dh1A) y haloácido dehalogenasa (Dh1B)	<i>Xanthobacter autotrophicus</i> GJ10	<i>Nicotiana tabacum</i>	Degradación de 1,2-dicloroetano	Mena-Benitez <i>et al.</i> , 2008
<i>CYP2E1</i>	<i>Agrobacterium tumefaciens</i>	<i>Populus tremula</i> y <i>Populus alba</i>	Incremento del metabolismo y remoción de hidrocarburos volátiles: TCE, cloruro de vinilo, tetracloruro de carbono, benceno y cloroformo	Doty <i>et al.</i> , 2007

Tabla 6. Ventajas y desventajas de la fitorremediación

Ventajas	Desventajas
1. Se puede realizar <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> .	1. En especies como los árboles o arbustos, la fitorremediación es un proceso relativamente lento.
2. Se realiza sin necesidad de trasportar el sustrato contaminado, con lo que se disminuye la diseminación de contaminantes a través del aire o del agua.	2. Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta.
3. Es una tecnología sustentable.	3. El crecimiento de las plantas está limitado por concentraciones toxicas de contaminantes, por lo tanto, es aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminantes.
4. Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos.	4. En el caso de la fitovolatilización, los contaminantes acumulados en las hojas pueden ser liberados nuevamente al ambiente.
5. Es de bajo costo.	5. Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión.
6. No requiere personal especializado para su manejo.	6. No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.
7. No requiere consumo de energía.	7. La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.
8. Sólo requiere de prácticas agronómicas convencionales.	8. Se requieren áreas relativamente grandes.
9. Es poco perjudicial para el ambiente.	9. En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.
10. Actúa positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, debido a la formación de una cubierta vegetal.	
11. Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable.	
12. Evita la excavación y el tráfico pesado.	
13. Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos.	
14. Permite el reciclado de recursos (agua, biomasa, metales).	

DISCUSIÓN

Durante los últimos años se han desarrollado tecnologías que permiten remediar la contaminación del ambiente a través del uso de plantas y sus organismos relacionados. La fitorremediación es una tecnología cuyo objetivo principal es la eliminación de metales tóxicos y contaminantes orgánicos (en suelo, aire, agua y sedimentos) que afectan a los seres vivos, sin embargo, es necesario seguir investigando sobre los procesos que determinan la disponibilidad de los contaminantes, su absorción, traslocación, quelación, degradación y volatilización en la planta, con el fin de transmitir a la sociedad de manera clara, este conocimiento para su aceptación y comercialización. Hasta ahora, la mayoría de los trabajos relacionados con la fitocorrección se han llevado a cabo a escala de laboratorio, con plantas cultivadas en condiciones ideales. Es primordial realizar las gestiones necesarias para aplicar este conocimiento en casos reales que permitan demostrar la eficiencia de esta técnica. Es importante resaltar que los conocimientos hasta el momento adquiridos han contribuido a la mejora de la capacidad de fitorremediación de un gran número de plantas. Por ejemplo, las nuevas plantas GM han desarrollado una amplia capacidad de absorción, transporte, acumulación y degradación, tanto de contaminantes orgánicos como inorgánicos.

CONCLUSIONES

Los problemas de contaminación que existen actualmente requieren de tecnologías costo-efectivas, ambientalmente amigables y que puedan aplicarse a gran escala, tal es el caso de la fitorremediación. La capacidad de las plantas para absorber, adsorber, metabolizar, acumular, estabilizar o volatilizar contaminantes orgánicos y/o inorgánicos; aunada a las complejas interacciones que establecen con la rizósfera, así como la generación de plantas GM, confieren a esta tecnología importantes ventajas sobre otros métodos convencionales de remediación de la contaminación. Sin embargo, se requiere más información sobre las interacciones planta-microorganismos rizosféricos, sobre los metabolitos responsables del fenómeno de quelación de metales pesados al interior de la plantas, así como del papel que juegan ciertas enzimas en el proceso de fitorremediación. En la medida en que este conocimiento se incremente, será posible una aplicación más eficiente y a gran escala de esta tecnología.

REFERENCIAS

Adamia, G., Ghogheridze, M., Graves, D., Khatisashvili, G., Kvesitadze, G., Lomidze,

- E. 2006. Absorption distribution and transformation of TNT in higher plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 64:136-145.
- Adriano, D. C., Wenzel, W. W., Vangronsveld, J., Bolan, N. S. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma*. 122:121-142.
- Agostini, E., Coniglio, M. S., Milrad, S. R., Tigier, H. A., Giulietti, A. M. 2003. Phytoremediation of 2, 4-dichlorophenol by *Brassica napus* hairy root cultures. *Biotechnology and Applied Biochemistry*. 37:139-44.
- Antunes, A. P. M., Watkins, G. M., Duncan, J. R. 2001. Batch studies on the removal of gold (III) from aqueous solution by *Azolla filiculoides*. *Biotechnology Letters*. 23: 249-251.
- Araujo, B. S., Charlwood, B. V., Pletsch, M. 2002. Tolerance and metabolism of phenol and chloro derivatives by hairy root cultures of *Daucus carota* L. *Environmental Pollution*. 117: 329-335.
- Bani, A., Echevarria, G., Sulçe, S., Morel, J. L., Mullai, A. 2007. In-situ phytoextraction of Ni by a native population of *Alyssum murale* on an ultramaWc site (Albania). *Plant and Soil*. 293:79-89.
- Barac, T. 2004. Engineered endophytic bacteria improve phytoremediation of water soluble, volatile, organic pollutants. *Nat. Biotechnol.* 22:583-588.
- Barton, C., Marx, D., Adriano, D., Jun-Koo, B., Newman, L., Czapka, S., Blake, J. 2005. Phytostabilization of a landfill containing coal combustion waste. *Environmental Geosciences*. 12: 251-265.
- Begonia, G. B., Davis, C.D., Begonia, M. F. T., Gray, C. N. 1998. Growth Responses of Indian Mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern.] and Its Phytoextraction of Lead from a Contaminated Soil Bull. *Environmental Contamination and Toxicology*. 61:38-43.
- Bennett, L. S., Burkhead, J. L., Hale, K. L., Terry, N., Pilon, M., Pilon-Smits, E. A. H. 2003. Analysis of transgenic indian mustard plants for phytoremediation of metal-contaminated mine tailings. *Journal of Environmental Quality*. 32: 432-440.
- Bennicelli, R., Stepniewska, Z., Banach, A., Szajnocha, K., Ostrowski, J. 2004. The ability of *Azolla caroliniana* to remove heavy metals (Hg(II), Cr(III), Cr (VI)) from municipal waste water. *Chemosphere*. 55:141-146.
- Beynon, E. R., Symons, Z. C., Jackson, R. G., Lorenz, A., Rylott, E. L., Bruce, N. C. 2009. The Role of Oxophytodienoate Reductases in the Detoxification of the Explosive 2,4,6-Trinitrotoluene by *Arabidopsis*. *Plant Physiology*. 151:253-261.
- Bolan, N. S., Adriano, D. C., Naidu, R. 2003. Role of phosphorus in immobilization and bioavailability of heavy metals in the soil-plant system. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. 177:1-44.
- Boniardi, N., Rota, R., Nano, G. 1999. Effect of dissolved metals on the organic load removal efficiency of *Lemna gibba*. *Water Research*. 33: 530-538.
- Boonyapookana, B., Parkplan, P., Techapinyawat, S., DeLaune, RD., Jugsujinda, A. 2005. Phytoaccumulation of lead by sunflower (*Helianthus annuus*), tobacco (*Nicotiana tabacum*), and vetiver (*Vetiveria zizanioides*). *Journal of Environmental Science and Health A*. 40:117-137.
- Brandt, R., Merkl, N., Schultze-Kraft, R., Infante, C. 2006. Potential of vetiver (*Vetiveria zizanioides* L. Nash) for phytoremediation of hydrocarbon contaminated soils in Venezuela. *International Journal of Phytoremediation*. 8:273-284.
- Burken, J. G., Ma, X. 2006. Phytoremediation of volatile organic compounds. En: *Phytoremediation Rhizoremediation*. Springer Netherlands (ed). ISBN 978-1-4020-4952-1. 199-216.
- Carpena, R. O., Bernal, M. P. 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*. 16: 1-3.
- Castro, S., Davis, L. C., Erickson, L. E. 2003. Phytotransformation of benzotriazoles. *International Journal of Phytoremediation*. 5:245-265.
- Chandra, P., Kulshreshtha, K. 2004. Chromium accumulation and toxicity in aquatic vascular plants. *The Botanical Review*. 70:313-327.

- Chandra, S. K., Kamala, C. T., Chary, N. S., Balaram, V., Garcia, G. 2005. Potential of *Hemidesmus indicus* for phytoextraction of lead from industrially contaminated soils. *Chemosphere*. 58:507-514.
- Chaudhry, Q., Schröder, P., Werck-Reichhart, D., Grajek, W., Marecik, R. 2002. Prospects and limitations of phytoremediation for the removal of persistent pesticides in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*. 9: 4-17.
- Cherian, S., Oliveira, M. 2005. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities. *Environmental Science & Technology*. 39: 9377-9390.
- Cho, C., Yavuz-Corapcioglu, M., Park, S., Sung, K. 2008. Effects of Grasses on the Fate of VOCs in Contaminated Soil and Air. *Water, Air, & Soil Pollution*. 187:243-250.
- Clemente, R., Almela, C., Bernal, P. M. 2006. A remediation strategy based on active phytoremediation followed by natural attenuation in a soil contaminated by pyrite waste. *Environmental Pollution*. 143: 397-406.
- Clemente, R., Walker, J. D., Roig, A., Bernal, P. M. 2003. Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at Aznalcóllar (Spain). *Biodegradation*. 14:199-205.
- Cohen-Shoel, Z., Barkay, N., Ilzyer, D., Gilath, L., Tel-Or, E. 2002. Biofiltration of toxic elements by *Azolla* biomass. *Water, Air, & Soil Pollution*. 135:93-104.
- Conesa, H. M., Faz, A., Arnaldos, R. 2007. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Cartagena-La Union Mining District (SE Spain). *Chemosphere*. 66: 38-44.
- De la Fuente, J. M., Ramirez-Rodriguez, V., Cabrera-Ponce, J. L., Herrera-Estrella, L. 1997. Aluminium tolerance in transgenic plants by alteration of citrate synthesis. *Science*. 276: 1566-1568.
- Denys, S., Rollin, C., Guillot, F., Baroudi, H. 2006. *In-Situ* Phytoremediation of Pests Contaminated Soils Following a Bioremediation Treatment. *Water, Air, & Soil Pollution*. 6: 299-315.
- Didierjean, L., Gondet, L., Perkins, R., Lau, S. M., Schaller, H. 2002. Engineering herbicide metabolism in tobacco and *Arabidopsis* with CYP76B1, a cytochrome P450 enzyme from Jerusalem artichoke. *Journal of Plant Physiology*. 130:179-189.
- Dietz, A. C., Schnoor, J. L. 2001. Advances in phytoremediation. *Environmental Health Perspectives*. 109:163-168.
- Dilek, D. 2007. Effects of salinity on growth and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (Lemnaceae). *Journal of Hazardous Materials*. 147: 74-77.
- Dominguez-Solis, J. R., Gutierrez-Alcala, G., Vega, J. M., Romero, L. C., Gotor, C. 2001. The cytosolic O-acetylserine(thiol)lyase gene is regulated by heavy metals and can function in cadmium tolerance. *Journal of Biological Chemistry*. 276: 9297-9302.
- Doty, S. L., James, C. A., Moore, A. L., Vajzovic, A., Singleton, G. L., Ma, C., Khan, Z., Xin, G., Kang, J. W., Park, J. Y., Mellan, R., Strauss, S. H., Wilkerson J., Farin, F., Strand, S. E. 2007. Enhanced Phytoremediation of Volatile Environmental Pollutants with Transgenic Trees. *Applied Biological Sciences*. 104: 16816-16821.
- Dushenkov, V., Kumar, P. B., Motto, H., Raskin, I. 1995. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science & Technology*. 29:1239-1245.
- Eapen, S., Singh, S., D'Souza, S. F. 2007. Advances in development of transgenic plants for remediation of xenobiotic pollutants. *Biotechnology Advances*. 25:442-451.
- Eapen, S., Suseelan, K., Tivarekar, S., Kotwal, S., Mitra, R. 2003. Potential for rhizofiltration of uranium using hairy root cultures of *Brassica juncea* and *Chenopodium amaranticolor*. *Environmental Research*. 91:127-133.
- Flocco, C. G., Lindblom, S. D., Smits, E. A. H. P. 2004. Overexpression of enzymes involved in glutathione synthesis enhances tolerance to organic pollutants in *Brassica juncea*. *International Journal of Phytoremediation*. 6:289-304.
- Fogarty, R. V., Dostalek, P., Patzak, M., Votruba, J., Tel-Or, E., Tobin, J. M. 1999. Metal removal by immobilised and non-immobilised *Azolla filiculoides*. *Biotechnology Technology*. 13:530-538.

- Freeman, J. L., Persans, M.W., Nieman, K., Albrecht, C., Peer, W., Pickering, I. J., Salt, D. E. 2004. Increased glutathione biosynthesis plays a role in nickel tolerance in *Thalassia nickel* hyperaccumulators. *Plant Cell*. 16:2176-2191.
- Frérot, H., Lefévre, C., Gruber, W., Collin, C., Dos-Santos, A., Escarré, J. 2006. Specific interactions between local metallicolous plants improve the phytostabilization of mine soils. *Plant and Soil*. 282:53-65.
- Garbisu, C., Becerril, J. M., 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: 44-49.
- Ghosh, M., Singh, S. P. 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products. *Applied Ecology and Environmental Research*. 3: 1-18.
- Gisbert, C., Ros, R., Haro, A. D., Walker, D. J., Bernal, M. P., Serrano, R., Avino, J. N. 2003. A plant genetically modified that accumulates Pb is especially promising for phytoremediation. *Biochem Biophys Res Commun*. 303:440-445.
- Glass, D. J. 1999. U.S. and international markets for phytoremediation. Needham, MA: D. Glass Associates. 266 pp.
- Groudeva, VI., Groudev, S. N., Doycheva, A. S. 2001. Bioremediation of waters contaminated with crude oil and toxic heavy metals. *International Journal of Mineral Processing*. 62: 293-299.
- Hannink, N., Rosser, S. J., French, C. E., Basran, A., Murray, J. A. H., Nicklin, S., Bruce, N. C. 2001. Phytoremediation of TNT by transgenic plants expressing a bacterial nitroreductase. *Nature Biotechnology*. 19:1168-1172.
- Hesegawa, I. E., Terada, M., Sunairi, H., Wakita, F., Shinmachi, A., Noguchi, M., Nakajima & J. 1997. Genetic improvement of heavy metal tolerance in plants by transfer of the yeast metallothionein gene (CUP1). *Plant Soil*. 196:277-281.
- Higuchi, K. 1999. Cloning of nicotianamine synthase genes, novel genes involved in the synthesis of phytosiderophores. *Plant Physiol*. 119: 471-479.
- Hirose, S., Kawahigashi, H., Inoue, T., Inui, H., Ohkawa, H., Ohkawa, Y. 2005. Enhanced expression of CYP2C9 and tolerance to sulfonylurea herbicides in transgenic rice plants. *Plant Biotechnology*. 22:89-96.
- Kamal, M., Ghaly, A. E., Mahmoud, N., Cote, R. 2004. Phytoaccumulation of heavy metals by aquatic plants. *Environment International*. 29:1029-1039.
- Kawagashi, H., Hirose, S., Ohkawa, H., Ohkawa, Y. 2007. Herbicide resistance of transgenic rice plants expressing human CYP1A1. *Biotechnol Adv*. 25:75-85.
- Kawahigashi, H., Hirose, S., Ohkawa, H., Ohkawa, Y. 2006. Phytoremediation of herbicide atrazine and metolachlor by transgenic rice plants expressing human CYP1A1, CYP2B6 and CYP2C19. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54:2985-2991.
- Kawahigashi, H., Hirose, S., Ozawa, K., Ido, Y., Kojima, M., Ohkawa, H. 2005. Analysis of substrate specificity of pig CYP2B22 and CYP2C49 towards herbicides by transgenic rice plants. *Transgenic Research*. 14:907-917.
- Kelley, C., Gaither, K. K., Baca-Spry, A., Cruickshank, B. J. 2000. Incorporation of phytoremediation strategies into the introductory chemistry laboratory. *Chem Educator*. 5:140-143.
- Komives, T., Gullner, G. 2005. Phase I xenobiotic metabolic systems in plants. *Z Naturforsch*. 60:179-185.
- Kramer, U., Chardonens, A. 2001. The use of transgenic plants in the bioremediation of soils contaminated with trace elements. *Appl. Microbiol. Biotechnol*. 55: 661-672.
- Kucharski, R., Sas-Nowosielska, A., Małkowski, E., Japenga, J., Kuperberg, J. M., Pogrzeba, M., Krzyzak, J. 2005. The use of indigenous plant species and calcium phosphate for the stabilization of highly metal-polluted sites in southern Poland. *Plant and Soil*. 273: 291-305.
- Kumar, P. B. A. N., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, I. 1995. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils. *Environmental Science & Technology*. 29: 1239-1245.

- Kurumata, M., Takahashi, M., Sakamotoa, A., Ramos, J. L., Nepovim, A., Vanek, T. 2005. Tolerance to and uptake and degradation of 2,4,6- trinitrotoluene (TNT) are enhanced by the expression of a bacterial nitroreductase gene in *Arabidopsis thaliana*. *Z Naturforsch.* 60: 272-278.
- Leahy, J.G., Colwell, R. R. 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiological Reviews.* 305-315. 54 pp.
- Li, M. S., Luo, Y. P., Su, Z. Y. 2007. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China. *Environmental Pollution.* 147: 168-175.
- Limura, Y., Ikeda, S., Sonoki, T., Hayakawa, T., Kajita, S., Kimbara, K. 2005. Expression of a gene for Mn-peroxidase from *Coriolus versicolor* in transgenic tobacco generates potential tools for phytoremediation. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 59: 246-451.
- Lin Z. Q., de-Souza, M., Pickering, I. J., Terry, N. 2002. Evaluation of the macroalga, *Chara canescens*, for the remediation of selenium-contaminated agricultural drainage by microcosms. *Journal of Environmental Quality.* 31: 2104-2110.
- Ma, X., Burken, J. G. 2003. TCE diffusion to the atmosphere in phytoremediation applications. *Environmental Science & Technology.* 37: 2534-2539.
- Ma, X., Richter, A. R., Albers, S., Burken, J. G. 2004. Phytoremediation of MTBE with hybrid poplar trees. *International Journal of Phytoremediation.* 6: 157-167.
- Macek, T., Kotrba, P., Svatos, A., Novakova, M., Demnerova, K., Mackova, M. 2007. Novel roles for genetically modified plants in environmental protection. *Trends in Biotechnology.* 26: 146-152.
- Mains, D., Craw, D., Rufaut, C. G., Smith, C. M. S. 2006. Phytostabilization of gold mine tailings, New Zealand. Part 1: Plant establishment in alkaline saline substrate. *International Journal of Phytoremediation.* 8: 131-147.
- Maleva, M. G., Nekrasova, G. F., Bezel, V. S. 2004. The Response of Hydrophytes to Environmental Pollution with Heavy Metals. *Russian Journal of Ecology.* 35: 230-235.
- McGrath, S. P., Zhao, F. J., Lombi, E. 2001. Plant and rhizosphere processes involved in phytoremediation of metal-contaminated soils. *Plant and Soil.* 232: 207-214.
- Meagher, R. B. 2000. Phytoremediation of toxic elemental and organic pollutants. *Current Opinion in Plant Biology.* 3: 153-162.
- Mena-Benitez, G. L., Gandia-Herrero, F., Graham, S., Larson, T. R., McQueen-Mason, S. J., French, C. E., Rylott, E. L., Bruce, N. C. 2008. Engineering a Catabolic Pathway in Plants for the Degradation of 1,2-Dichloroethane. *Plant Physiology.* 147: 1192-1198.
- Mendez, M. O., Maier, R. M. 2008. Phytostabilization of Mine Tailings in Arid and Semiarid Environments-An Emerging Remediation Technology. *Environ Health Perspect.* 116: 278-283.
- Miretzky, P., Saralegui, A., Fernández-Cirelli, A. 2004. Aquatic macrophytes potential for the simultaneous removal of heavy metals (Buenos Aires, Argentina). *Chemosphere.* 57: 997-1005.
- Misra, S., Gedamu, L. 1989. Heavy metal tolerant transgenic *Brassica napus* and *Nicotiana tabacum* L. plants. *Theor. App. Gen.* 78: 161-168.
- Mkandawire, M., Taubert, B., Dude, E.G. 2005. Resource manipulation in uranium and arsenic attenuation by *Lemna gibba* L. (duckweed) in tailing water of a former uranium mine. *Water, Air, & Soil Pollution.* 166: 83-101.
- Montagu, M.V. 2005. Technological milestones from plant science to agricultural biotechnology. *Trends Plant Sci.* 10: 559-560.
- Movahed, N. M., Mohammad, M. 2009. Phytoremediation and sustainable urban design methods (Low Carbon Cities through Phytoremediation). 45th ISOCARP Congress. Disponible en: <http://www.isocarp.net>. Fecha de consulta 04 Septiembre del 2009.
- Navarro-Aviñó, J. P., Aguilar-Alonso, I., López-Moya, J. R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas.* 16: 10-25.

- Nedelkoska, T. V., Doran, P. M. 2000. Hyperaccumulation of cadmium by hairy roots of *Thlaspi caerulescens*. *Biotechnology and Bioengineering*. 67: 607-615.
- Nesnerova, P. 2004. First semi-synthetic preparation of sex pheromones. *Green Chem.* 6:305–307.
- Odjegba, V. J., Fasidi, I. O. 2004. Accumulation of trace elements by *Pistia stratiotes*: Implications for phytoremediation. *Ecotoxicology*. 13: 637-646.
- O'Keefe, D. P., Tepperman, J. M., Dean, C., Leto, K. J., Erbes D. L., Odell, J.T. 1994. Plant expression of a bacterial cytochrome P450 that catalyzes activation of a sulfonylurea pro-herbicide. *Journal of Plant Physiology*. 105: 473-824.
- Oller, A. L. W., Agostini, E., Talano, M. A., Capozucca, C., Milrad, S. R., Tigier, A. 2005. Overexpression of a basic peroxidase in transgenic tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill cv Pera) hairy roots increases phytoremediation of phenol. *Plant Science*. 169: 1102-1111.
- Padmavathiamma, P. K., Li, L. Y. 2007. Phytoremediation Technology: Hyperaccumulation Metals in Plants. *Water, Air, & Soil Pollution*. 184: 105-126.
- Pan, A., Yang, M., Tie, F., Li, L., Chen, Z., Ru, B. 1994. Expression of mouse metallothionein-I gene confers cadmium resistance in transgenic tobacco plants. *Plant Mol. Biol.* 24: 341-351.
- Peles, J. D., Smith, M. H., Brisbin, I. 2002. Ecological half-life of ¹³⁷Cs in plants associated with a contaminated stream. *Journal of Environmental Radioactivity*. 59: 169-178.
- Pilon-Smith, E. A., Pilon, M. 2002. Phytoremediation of metals using transgenic plants. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 21: 439-456.
- Pilon-Smiths, E. A., Hwang, S., Mel-Lytle, C., Zhu, Y., Tai, J. C., Bravo, R. C., Chen, Y., Leustek, T., Terry, N. 1999. Overexpression of ATP sulfurylase in indian mustard leads to increased selenate uptake, reduction, and tolerance. *Journal of Plant Physiology*. 119: 123-132.
- Popa, K., Cecal, A., Humelnicu, D., Caraus, L., Draghici, C. L., 2004. Removal of ⁶⁰Co²⁺ and ¹³⁷Cs⁺ ions from low radioactive solutions using *Azolla caroliniana* willd. water fern. *Central European Journal of Chemistry*. 2: 434-445.
- Prasad, M. N. V., Freitas, H. M. O. 2003. Metal hyperaccumulation in plants- biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Journal of Molecular Biology & Genetics*. 6: 276-312.
- Quin, G., Terry, N. 2003. Selenium Removal by Constructed Wetlands: Quantitative Importance of Biological Volatilization in the Treatment of Selenium-Laden Agricultural Drainage Water. *Environmental Science & Technology*. 37: 606-615.
- Raskin, I. 1996. Plant genetic engineering may help with environmental cleanup. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*. 93: 3164-3166.
- Reeves, R. D. 2006. Hyperaccumulation of trace elements by plants. En: *Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils*. Springer Netherlands (ed). ISBN 978-1-4020-4686-5. 25-52.
- Reeves, R. D. 2003. Tropical hyperaccumulators of metals and their potential for phytoextraction. *Plant and Soil*. 249: 57-65.
- Reeves, R. D., Baker, A. J. M., Borhidi, A., Berazain, R. 1999. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba. *Annals of Botany*. 83: 29-38.
- Reichenauer, T.G., Germida, J. J. 2008. Phytoremediation of organic contaminants in soil and groundwater. *ChemSusChem*. 1: 708-717.
- Rittmann, B. E. 2006. Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology. *Trends Biotechnol.* 24: 261-266.
- Rizzi, L., Petruzzelli, G., Poggio, G., Vigna, G. 2004. Soil physical changes and plant availability of Zn and Pb in a treatability test of phytostabilization. *Chemosphere*. 57: 1039-1046.
- Roy, S., Labelle, S., Mehta, P., Mihoc, A., Fortin, N., Masson, C., Leblan, R., Cha, G., Sura, C., Gallipeau, C., Olsen, C., Delisle, S., Labrecque, M., Greer, C. W. 2005. Phytoremediation of heavy metal and PAH-contaminated brownfield sites. *Plant and Soil*. 272: 277-290.

- Rugh, C. L., Senecoff, J. F., Meagher, R. B., Merkle, S. A. 1998. Development of transgenic yellow poplar for mercury phytoremediation. *Nat. Biotechnol.* 16 : 925-928.
- Saleh-Lakha, S., Glick, B. R. 2005. Is the battle over genetically modified foods finally over. *Biotechnol Adv.* 23:93-96.
- Schwartz, C., Echevarria, G., Morel, J. L. 2003. Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil.* 249: 27-35.
- Sharma, N. C., Gardea-Torresdey, J. L., Parsons, J., Sahi, S. V. 2004. Chemical speciation and cellular deposition of lead in *Sesbania drummondii*. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 23: 2068-2073.
- Shrestha, B., Lipe, S., Johnson, K.A., Zhan, T.Q., Retzlaff, W., Lin, Q. 2006. Soil hydraulic manipulation and organic amendment for the enhancement of selenium volatilization in a soil-pickleweed system. *Plant and Soil.* 288: 189-196.
- Singh, S., Melo, J. S. , Eapen, S., D'Souza, S. F. 2006. Phenol removal by *Brassica juncea* hairy roots: role of inherent peroxidase and H₂O₂. *Journal of Biotechnology.* 123: 43-49.
- Singh, O.V., Jain, R. K. 2003. Phytoremediation of toxic aromatic pollutants from soil. *Applied and Microbiology Biotechnology.* 63: 128-135.
- Sonoki, T., Kajita, S., Ikeda, S., Uesugi, M., Tatsumi, K., Katayama, Y. 2005. Transgenic tobacco expressing fungal laccase promotes the detoxification of environmental pollutants. *Applied Microbiology and Biotechnology.* 67: 138-142.
- Sundberg, S. E., Ellington, J. J., Evans, J. J., Keys, D. A., Fisher, J. W. 2003. Accumulation of perchlorate in tobacco plants: development of a plant kinetic model. *Journal of Environmental Monitoring.* 5: 505-512.
- Sung, K., Munster, C. L., Rhykerd, R., Drew, M. C., Corapcioglu, M. Y. 2003. The use of vegetation to remediate soil freshly contaminated by recalcitrant contaminants. *Water Research.* 37: 2408-2418.
- Sunkar, R., Kaplan, B., Bouche, N., Arazi, T., Dolev, D., Talke, I. N., Frans, J. M., Maathuis, F. J. M., Sanders, D., Bouchez, D., Fromm, H. 2000. Expression of a truncated tobacco NtCBP4 channelin transgenic plants and disruption of the homologous *Arabidopsis* CNGC1 gene confer Pb²⁺ tolerance. *Plant Journal.* 24: 533-542.
- Suresh, B., Sherkhane, P. D., Kale, S., Eapen, S., Ravishankar, G. A. 2005. Uptake and degradation of DDT by hairy root cultures of *Cichorium intybus* and *Brassica juncea*. *Chemosphere.* 61: 1288-1292.
- Suseela, M. R., Sinha, S., Singh, S., Saxena, R. 2002. Accumulation of chromium and scanning electron microscopic studies in *Scirpus lacustris* L. Treated with metal and tannery effluent. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.* 68: 540-548.
- Thangavel, P., Subhram, C. V. 2004. Phytoextraction – Role of hyper accumulators in metal contaminated soils. *Proceedings of the Indian National Science Academy. Part B.* 70(1):109-130.
- Thomas, J. C., Davies, E.C., Malick, F.K., Endresz, C., Williams, C. R., Abbas, M., Petrella, S., Swisher, K., Perron, M., Edwards, R., Ostenskowski, P., Urbanczyk, N., Wiesend, W.N., Murray, K. S. 2003. Yeast metallothionein in transgenic tobacco promotes copper uptake from contaminated soils. *Biotechnology Progress.* 19: 273-280.
- Vain, P. 2006. Global trends in plant transgenic science and technology. *Trends Biotechnol.* 24:206-211.
- Van, A., Yoon, B., Schnoor, J. M. 2004. Biodegradation of nitro-substituted explosives 2,4,6-trinitrotoluene, hexahydro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazine and octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5-tetrazocine by photosymbiotic *Methylbacterium* sp. associated with poplar tissues (*Populus deltoids*×*nigra* DN-34). *Applied and Environmental Microbiology.* 70: 508-517.
- Vardanyan, L. G., Ingole, B. S. 2006. Studies on heavy metal accumulation in aquatic macrophytes from Sevan (Armenia) and Carambolim (India) lake systems. *Environment International.* 32: 208-218.
- Vázquez, S., Agha, R., Granado, A., Sarro, M. J., Esteban, E., Peñalosa, J. M., Carpena, R. O. 2006. Use of White Lupin Plant for Phytostabilization of Cd and As Polluted Acid Soil. *Water, Air, & Soil Pollution.* 177: 349-365.

- Villacieros, M. 2005. PCB rhizoremediation by *Pseudomonas fluorescens* F113 derivatives using a *Sinorhizobium meliloti* nod system to drive bph gene expression. *Appl. Environ. Microbiol.* 71: 2687-2694.
- Viñas, M. 2005. Biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos: caracterización, microbiología, química y ecotoxicológica. Facultad de biología. Universidad de Barcelona.
- Wand, H., Kuschik, P., Soltmann, U., Stottmeister, U. 2002. Enhanced removal of xenobiotics by helophytes. *Acta Biotechnol.* 22: 175-181.
- Watanabe, M. E. 1997. Phytoremediation on the brink of commercialization. *Environmental Science & Technology.* 31: 182-186.
- Weis, J. S., Weis, P. 2004. Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environment International.* 30: 685-700.
- Wenzel, W. W., Unterbrunner, R., Sommer, P., Sacco, P. 2003. Chelate-assisted phytoextraction using canola (*Brassica napus* L.) in outdoors pot and lysimeter experiments. *Plant and Soil.* 249: 83-96.
- Wu, Q. T., Wei, Z. B., Ouyang, Y. 2007. Phytoextraction of Metal-Contaminated Soil by *Sedum alfredii* H: Effects of Chelator and Co-planting. *Water, Air, & Soil Pollut.* 180: 131-139.
- Yang, X. E., Long, X. X., Ye, H. B., He, Z. L., Calvert, D. V., Stoffella, P. J. 2004. Cadmium tolerance and hyperaccumulation in a new Zn-hyperaccumulating plant species (*Sedum alfredii* Hance). *Plant and Soil.* 259: 181-189.
- Yoon, J. M., Oliver, D. J., Shanks, J. V. 2006. Phytoremediation of 2,4-dinitrotoluene in *Arabidopsis thaliana*: toxicity, fate and gene expression studies in vitro. *Biotechnology Progress.* 22: 1524-1531.
- Zhang, B., Wu, Z., Cheng, S., He, F., Wang, Y., Gao, Y. 2007. Primary study on phytodegradation of Bisphenol A by *Elodea nuttallii*. *Wuhan University Journal of Natural Sciences.* 12: 1118-1124.
- Zhao, M., Duncan, J. R. 1998. Removal and recovery of nickel from aqueous solution and electroplating rinse effluent using *Azolla filiculoides*. *Process Biochemistry.* 33: 249-255.
- Zheng, J., Hintelmann, H., Dimock, B., Dzurko, M. S. 2003. Speciation of arsenic in water, sediment, and plants of the Moira watershed, Canada, using HPLC coupled to high resolution ICP-MS. *Analytical and Bioanalytical Chemistry.* 377: 14-24.
- Zhuang, P., Yang, Q. W., Wang, H. B., Shu, W. S. 2007. Phytoextraction of Heavy Metals by Eight Plant Species in the Field. *Water, Air, & Soil Pollution.* 184: 235-242.
- Zhuang, P., Ye, Z. H., Lan, C. Y., Xie, Z. W., Shu, W. S. 2005. Chemically assisted phytoextraction of heavy metal contaminated soils using three plant species. *Plant and Soil.* 276: 153-162.

*Submitted August 31, 2010– Accepted December 01, 2010
Revised received January 10, 2011*