

ALTERNATIVAS DE FITORREMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS CON ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

PHYTOREMEDIATION ALTERNATIVES FOR SITES POLLUTED BY POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS

González-Chávez M.C.A.¹, Carrillo González R.¹, Sánchez-López A.S.¹, Ruiz-Olivares A.¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km 36.5. Carretera México-Texcoco, Texcoco Edo. de México 56230.

*Autor de correspondencia: crogelio@colpos.mx

RESUMEN

El presente trabajo describe las principales alternativas prácticas de remediación, fundamentadas científicamente y con mayor aceptación pública. Aunque la información se enfoca a elementos potencialmente tóxicos (EPT), el conocimiento científico básico que se tiene se puede aplicar para la remediación de sitios con otros problemas de contaminación y a sitios degradados o marginales.

Palabras clave: Fitoestabilización, fitoextracción, fitominería, hiperacumulación.

ABSTRACT

This review describes the existing phytoremediation alternatives that rely on strong scientific basis and at the same time are accepted by the public in general. Although the information is focused on potentially toxic elements (PTE), the basic scientific knowledge available can be applied to the remediation of sites with other contamination problems and to deteriorated or marginal sites.

Keywords: phytostabilization, phytoextraction, phytomining, hyperaccumulation.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la fitorremediación se considera la única alternativa eco-sustentable para el tratamiento *in situ* de suelos contaminados con EPT (Barbafieri *et al.*, 2013; Vamerali *et al.*, 2010). Esta es una tecnología amigable con el ambiente, no invasiva y permite recuperar la estructura y la función del suelo. Se estima que su costo es de 10 a 100 veces más barato en comparación con los métodos físicos y químicos que se usan tradicionalmente, cuyo costo varía de 0.27 a 1.6 millones de dólares por hectárea (Kidd *et al.*, 2009). No obstante, esta tecnología depende de variables específicas del sitio a restaurar, como características del suelo, niveles de contaminación, tipo de vegetación y clima (Barbafieri *et al.*, 2013). Muchas de éstas hacen que el éxito de la fitorremediación, y por tanto, el establecimiento de cubiertas vegetales no sea siempre fácil de alcanzar (Mendez y Maier, 2008).

Alternativas de remediación

En general existen tres principales métodos de remediación de suelos: 1) físicos, que consisten en restringir el riesgo de los contaminantes por medio de la remoción o contención, 2) químicos, que intentan alterar la especiación del contaminante para aumentar su movilidad y extracción o para disminuir los riesgos de exposición (Adriano, 2001) y; 3) biológicos, que involucran el uso de plantas, microorganismos o sus productos para remover o contener contaminantes ambientales.

Físicos

Vitrificación. Consiste en calentar el suelo contaminado o residuos hasta que el contaminante se funde (2,000 °C), produciendo un material parecido al vidrio. Durante el calentamiento se presentan emisiones, por lo que se necesita un control de estos gases.

Encapsulación. Consiste en aislar el suelo contaminado o residuos, cubriéndolos con una capa de algún material impermeable, como plástico de alta densidad o en recipientes de acero o concreto.

Lavado. Involucra la mezcla y contacto del suelo contaminado o residuos con una solución acuosa (ácidos o bases diluidas, quelatos) para solubilizar los EPT y removerlos. Este proceso se repite varias veces. Después de cada lavado puede ser necesario sedimentar, centrifugar o filtrar los contaminantes. Este proceso generalmente se hace *ex situ*, aunque puede llevarse a cabo *in situ*, lo cual requiere de trabajo previo de ingeniería.

Electroquímica. Consiste en el uso de un ánodo y un cátodo separados uno del otro insertados en el suelo a tratar. A través de éstos se hace pasar corriente eléctrica que induce el movimiento de iones a su electrodo respectivo. Se necesita de un acondicionador de fluidos y de una fuente poderosa de energía eléctrica.

Químicos

Neutralización. Está técnica se basa en que la mayoría de los metales son móviles en pH bajos. Consiste en elevar el pH o, en ocasiones, disminuirlo, dependiendo del contaminante que se desea inmovilizar. Por lo general, los elementos catiónicos precipitan en medio alcalino y los que tienen varios estados de oxidación son más móviles a pH extremos.

Solidificación. Se trata de la adición de un agente cementante al suelo contaminado o residuos para producir un material endurecido, no lixiviable y no poroso.

Estos métodos, neutralización y solidificación, son llamados el alto impacto. Son de costo elevado, destructivos, generan productos, presentan riesgo de exposición del personal durante la remediación y, en varios casos, el problema de contaminación no se soluciona (González-Chávez, 2005) u ocurre solo parcialmente cuando se trata de residuos con una mezcla de contaminantes.

Estabilización. Es la adición de materiales (cal, hidroxapatita, zeolitas, arcillas) que induce la adsorción o precipitación de contaminantes. Este método ha recibido mucha atención por las ventajas que ofrece para disminuir la concentración disponible de EPT. La combinación de este método con la fitorremediación se aborda más adelante.

Es común encontrar suelos contaminados con EPT y con afectación también por sales. Ruiz-Olivares (2016) analizó un suelo altamente contaminado por Pb y conductividad eléctrica de hasta 26 dS m⁻¹. Las sales involucradas fueron sulfatos y cloruros. En relación con técnicas convencionales de remediación, la presencia de sales es factor limitante, no solo para el establecimiento de la planta, sino también debido a la interferencia de la abundancia de sales en reacciones químicas que pueden tener con los compuestos correctivos, como enmiendas, aplicados para la fitorremediación (EPA/OERR/ORD, 1997).

sario corroborar que a largo plazo la remediación sea exitosa.

El término fitotecnología se define como la aplicación de la ciencia e ingeniería para estudiar problemas y proveer soluciones donde se involucran plantas (UNEP, 2003) o como el grupo de tecnologías en las que se usa plantas para remediar o confinar la contaminación en suelos, agua superficial y mantos freáticos o sedimentos (ITRC, 2009). Más recientemente, las fitotecnologías se aplican al fitomanejo de sitios contaminados para la producción económica (Robinson *et al.*, 2009). Por tanto, las fitotecnologías no tienen como meta única la remediación del suelo (Carrillo González y González-Chávez, 2012). En este nuevo esquema la remediación se percibe como un sistema dinámico que mantiene en nivel seguro el riesgo de los contaminantes y genera ganancia económica (cultivos energéticos, pastos, productos fortificados, etcétera). Las necesidades de investigación se dirigen hacia aspectos más aplicados (González-Chávez y Carrillo González, 2013a) y, por tanto, la remediación debe manejarse como una estrategia integral.

Fitoextracción

La fitoextracción se basa en la particularidad de que algunas plantas poseen mecanismos para absorber, acumular y tolerar altas cantidades de EPT en la parte aérea. Los EPT se remueven del sitio y se considera la posterior cosecha y recuperación de los mismos (Arthur *et al.*, 2005). La concentración en las hojas se considera como la única propiedad para establecer la capacidad de las plantas para acumular EPT. Sin embargo, es necesario enfatizar que dicha concentración es de tipo estructural, dentro de las hojas, y que

Biológicos

Se basan en procesos bioquímicos naturales presentes en plantas y microorganismos, ya sea para reducir la movilidad de los contaminantes o extraerlos (Shukla *et al.*, 2010), por lo que su impacto ambiental es mínimo. Al uso de plantas para remediar sitios contaminados se le llama fitorremediación, mientras que al de microorganismos o consorcios de microorganismos, sus procesos o productos metabólicos se le ha denominado biorremediación (Juwarkar *et al.*, 2010); recientemente también se propuso el término de microrremediación (Wu *et al.*, 2010). A la combinación del uso de plantas y microorganismos se le nombra fitorremediación asistida por microorganismos. En términos estrictos, biorremediación debe ser un vocablo genérico que incluya a la fitorremediación y la microrremediación.

Fitorremediación y fitotecnologías para suelos contaminados

Las plantas participan por diferentes vías en la remediación de sitios alterados o contaminados. La fitorremediación de EPT tiene dos modalidades principales: 1) estabilización (fitoestabilización), que se refiere a mantener los EPT en la rizósfera de una planta sin translocarlos a su parte aérea. 2) extracción (fitoextracción), que implica acumulación de EPT mayormente en la parte aérea de la planta. Aunque en algunos casos, como con Hg y Se, se puede inducir la fitovolatilización, que consiste en la absorción del EPT; su conversión a una forma volátil y su posterior liberación a la atmósfera (Ali *et al.*, 2013). Poco se conoce de los riesgos que este proceso puede ocasionar al ambiente. Actualmente existe gran diversidad de términos científicos empleados en la fitorremediación y en los mecanismos involucrados. Solo por ejemplificar, la fitoexclusión se define como el uso de plantas exclusoras, es decir, con bajos valores de bioacumulación de EPT en sus tejidos (Dickinson *et al.*, 2009). Este término puede ser considerado como fitoestabilización. Otro es la fitorremoción (Campos y Pires, 2003), que puede ser sinónimo de fitoextracción. De igual modo, los de remediación y restauración son manejados indistintamente. Hay autores que sugieren que la restauración implica que el sitio en tratamiento recupere las condiciones originales antes de que fuera contaminado (Peer *et al.*, 2006). Otros investigadores lo manejan como el uso de plantas nativas (Conesa *et al.*, 2012) y el término que se plantea es de fitorestauración. Sin embargo, recuperar a las condiciones naturales es casi imposible, así que es preferible prevenir que remediar la contaminación. La fitorremediación es una alternativa no destructiva que además tiene alto valor estético; se considera una tecnología solar y tiene alta aceptación social. Se menciona que una de sus principales ventajas respecto a otras es su bajo costo. Sin embargo, en la literatura no existen estudios económicos que lo demuestren. Este aspecto representa una relevante necesidad en conocimiento que debe considerarse para confirmarla como una alternativa económica (Conesa *et al.*, 2012). Algunos sugieren que es más barata que otras alternativas fisicoquímicas (Tordoff *et al.*, 2000). Como toda tecnología, la fitorremediación también presenta algunas desventajas que deben considerarse. A pesar de que se seleccionen especies adaptadas a las condiciones del sitio contaminado, es necesario procurar mejorar las condiciones que propicien el crecimiento de las plantas (González-Chávez, 2005). Otra desventaja puede ser que el tiempo requerido para remediar resultará largo (Ali *et al.*, 2013) y es nece-

no debe considerarse aquella proveniente de partículas de polvo depositadas en la superficie de dichas hojas. No obstante, algunos autores ya consideran la función de la parte aérea de las plantas como barrera física para atrapar EPT y le han denominado fitotrampas (Sánchez-López *et al.*, 2015). La concentración de EPT presentes en la superficie de las hojas de las plantas varía con respecto a su morfología, topografía y aún es dependiente del elemento (Sánchez-López *et al.*, 2012b). Por tanto, la minuciosa preparación de las muestras para la cuantificación de EPT es de suma importancia para la correcta designación de la capacidad de acumulación en las plantas (Sánchez-López *et al.*, 2012a). El protocolo de lavado de material vegetal en la mayor parte de las investigaciones ha consistido en enjuagues con agua corriente y agua destilada. Algunos incluyen el uso de surfactantes o quelatantes. Sin embargo, se ha demostrado que a pesar de un protocolo de lavado exhaustivo que incluye todos los agentes mencionados las partículas que contienen EPT permanecen en la superficie de las hojas, lo que sobreestima la concentración de dichos elementos (Sánchez-López *et al.*, 2012a; Sánchez-López *et al.*, 2015). Al final de la década de los ochenta, el auge de la fitoextracción produjo avances importantes en el entendimiento de la fisiología e incluso en el mejoramiento genético de plantas extractoras de EPT (Garbisu y Alkorta, 2001). Los investigadores se centraron en la búsqueda continua de especies vegetales que, aunque no fueran hiperacumuladoras (ver más adelante), tuvieran cierta capacidad acumuladora que, aunada al rápido crecimiento vegetal y abundante producción de biomasa, representaran ser alternativa

económica y factible. Varios investigadores han planteado que las plantas transgénicas pueden ser una opción para cultivar plantas con mayor capacidad acumuladora de EPT; sin embargo, el costo económico y el tiempo involucrados para este fin pueden ser incosteables. El pleno conocimiento de los umbrales de concentración interna de EPT en la parte aérea de las plantas también es relevante para establecer dicha capacidad de acumulación de EPT (Cuadro 1 del artículo anterior dentro de este número).

Para incrementar la extracción también se sugirió el uso de diversas sustancias. Por ejemplo, agentes quelatantes (DTPA, EDTA, etc.) y ácidos orgánicos (Nascimento y Xing, 2006). El efecto de éstas consiste en aumentar la movilidad y disponibilidad de EPT. Sin embargo, de este modo, su mayor disponibilidad se convierte en un riesgo ambiental (Ernst, 2005) si las plantas no los absorben a la misma velocidad en la que se incrementa su disponibilidad. Lo anterior representa mayor riesgo de contaminación de aguas superficiales y mantos freáticos por arrastre superficial o lixiviación de la solución del suelo hacia los cuerpos de agua. La fitoextracción exitosa requiere la limpieza (descontaminación) del suelo a una concentración que cumpla con la regulación ambiental, siguiendo prácticas normales de cultivo sucesivo (Koopmans *et al.*, 2008). En teoría, esto se logra con el cultivo repetido de plantas de ciclo corto, con rápida y alta producción de biomasa (Garbisu y Alkorta, 2001). Sin embargo, la práctica demuestra que en suelo con altas concentraciones de EPT este proceso puede requerir numerosos años para lograr la descontaminación a niveles aceptables. También se requiere de prácticas de manejo agronómico para incrementar la producción de biomasa. Por ejemplo, la fitoextracción estaría limitada en sitios contaminados con residuos de mina con concentraciones altas de EPT, debido a su alta toxicidad al acumularse en la parte aérea. Otro factor limitante es que la mayoría de las plantas no muestran tolerancia a diversos EPT (Miransari, 2011). Usualmente son tolerantes a uno o dos elementos, por lo que su crecimiento se dificulta en medios contaminados por varios de éstos.

Existen muy pocos ejemplos que demuestren el éxito de la fitoextracción en ensayos de campo o en operaciones comerciales. Una muestra de ello es el uso de plantas genéticamente modificadas de *Brassica juncea* L. Este es uno de los pocos casos de la aplicación en campo de la fitoextracción de Se (Bañuelos *et al.*, 2005). Sin embargo, al igual que los alimentos genéticamente modificados, el principio de precaución, los aspectos legales, éticos y de seguridad ecológica deben considerarse, así como aceptación pública, antes de su amplia implementación. El desarrollo de la fitoextracción debe considerar algunos aspectos para llevarse a la práctica: 1) tratamiento de la biomasa vegetal para recuperar los EPT acumulados (Arthur *et al.*, 2005). En este proceso, el EPT se transfiere del suelo a la planta para posteriormente recuperarlo de ésta. Finalmente, los EPT pueden reutilizarse; de lo contrario, éstos tienen que confinarse en otro sitio (Ernst, 2005) lo cual, de no hacerse adecuadamente, mantiene el riesgo de exposición (Ghosh y Singh, 2005); 2) falta de conocimiento de prácticas agronómicas para plantas tolerantes y acumuladoras; 3) riesgos de acumulación de contaminantes en la cadena alimenticia; 4) aceptación social e institucional por el uso de plantas transgénicas.



Hiperacumulación

El término hiperacumulación ha sido excesivamente utilizado con diversos grados de precisión, propiedad y entendimiento (van der Ent *et al.*, 2013). Inicialmente se aplicó para especies vegetales que tenían la habilidad de acumular y tolerar altas concentraciones de EPT, entre 10 y 100 veces más que cultivos normales (plantas hiperacumuladoras). La primera publicación se reportó en especies de *Thlaspi* en 1885, con acumulación excesiva de Zn y en *Alyssum bertolonii* en 1948, con más de 10,000 mg kg⁻¹ (1 %) de Ni de peso seco aéreo. A partir de entonces, numerosas investigaciones se han dirigido para la identificación de especies vegetales hiperacumuladoras. Para la definición de especies hiperacumuladoras se deben estudiar las poblaciones vegetales naturales (en campo) y corroborar los hallazgos en invernadero, utilizando los mismos suelos contaminados, ya que estudios independientes en hidroponía y con suelos artificialmente contaminados con EPT (usualmente adicionando sales de EPT) no reflejan condiciones reales que pueden influir en la hiperacumulación. Además, la adición de EPT usualmente implica que el elemento esté en mayores concentraciones a las observadas en suelos. La información que se tiene de la confirmación experimental de plantas hiperacumuladoras solo involucra elementos como: Ni, Zn, Cd, Mn, As y Se, pero no se ha confirmado para el caso de Pb, Cu, Co, Cr y Tl. Finalmente, se requiere de evaluación crítica para los elementos raros (van der Ent *et al.*, 2013), los cuales están considerados en estudios muy recientes. El mecanismo de hiperacumulación implica alta tolerancia específica a EPT. Las plantas hiperacumuladoras, también llamadas metalofitas, generalmente son endémicas de áreas contaminadas, presentan lento crecimiento y poca producción de materia vegetal (Arthur *et al.*, 2005), lo cual en cierta manera restringe su amplio uso y aplicación.

Fitominería

Un caso específico de la fitoextracción, pero visto con fines económicos, es la fitominería. En años recientes se ha planteado el potencial de dicha tecnología para ciertos elementos de valor económico, como lo es el oro (Au) (Anderson *et al.*, 2011, Wilson-Corral *et al.*, 2012). También se ha utilizado comercialmente para la fitominería de Ni. El incremento de su precio en el mercado, los reportes de acumulación y el rendimiento en biomasa de diferentes plantas son la base para sugerir que la fitominería de Au es una tecnología económicamente viable. Si tan solo 100 mg de Au se extraen por kg de materia seca, esto sería suficiente para hacer esta tecno-

logía redituable (Wilson-Corral *et al.*, 2011). La fitominería también puede ser aplicable a Ag, Tl y Ni. Sin embargo, la tecnología permanece limitada a ciertos factores ambientales y fisiológicos de las plantas. Presenta también una problemática similar expuesta anteriormente en la fitoextracción, el manejo de residuos y posible daño al suelo tratado con sustancias que favorezcan la solubilización de elementos para su mayor absorción por las plantas. Como mencionado anteriormente, hay una aceptación y cambio progresivo del uso de la fitoextracción por la fitoestabilización. También, porque la mayoría de las plantas que crecen en sitios contaminados no son acumuladoras, mucho menos hiperacumuladoras, sino más bien la mayoría de las plantas se comportan como exclusoras de EPT.

Fitoestabilización

La fitoestabilización involucra la retención o inmovilización de EPT por especies vegetales. La anterior definición involucra el uso o no de enmiendas (Czupryna *et al.*, 1989, ver más adelante en este número). La concentración de EPT no disminuye, sino que su movilidad y disponibilidad se controlan, previniendo así los riesgos a la salud humana, así como los ambientales (Arthur *et al.*, 2005). Las plantas pueden inmovilizar EPT en su rizósfera, precipitándolos o formando complejos, absorberlos en el interior y adsorbiéndolos en la superficie de la raíz (Vangronsveld *et al.*, 2009). La disponibilidad de los EPT se restringe a niveles aceptables (Arthur *et al.*, 2005). La accesibilidad de los EPT se mantiene en el suelo a menos que se formen capas superiores de suelo o materia orgánica. Debido a que la fitoestabilización no remueve EPT del suelo, es imperativo implementar un programa de monitoreo a largo plazo para asegurar que se mantiene reducción en la movilidad y disponibilidad del EPT. Recientemente, algunos autores llaman a esto monitoreo ecológico a largo plazo y debe ser analizado al menos durante diez años (Lindenmayer y Likens 2010). Lo anterior es necesario para conducir un análisis de riesgo ambiental para predecir riesgo potencial a la salud humana o al ambiente; sin duda, el costo económico asociado a este programa de monitoreo debe considerarse cuando se calcule la efectividad del proceso de fitoestabilización. La adsorción en la materia orgánica implica un proceso de liberación cuando ésta se oxide. Asimismo, el uso de plantas exclusoras es la base de la fitoestabilización. Recientes revisiones y estudios muestran que la fitoestabilización tiene mayor aplicación que la fitoextracción en sitios altamente contaminados. El establecimiento de una cubierta vegetal, a

través de la fitoestabilización, bien desarrollada, reduce la dispersión de EPT (Vangronsveld *et al.*, 2009). Sin embargo, se menciona que es una solución temporal (Ali *et al.*, 2013). Las condiciones ambientales pueden alterar las características físicas, químicas y biológicas del suelo o residuos y liberar los contaminantes nuevamente. No se tiene información respecto al tiempo que los EPT pueden permanecer estables en la rizósfera o en la raíz de la planta.

Fitorremediación multipropósito

Durante mucho tiempo, el único objetivo de la remediación ha sido la eliminación o inmovilización de los contaminantes. Poco se ha pensado acerca de la posible utilidad de los sitios contaminados. El aprovechamiento de los sitios contaminados, así como los suelos marginales, infértiles y degradados, representan una opción no solo de fitorremediación, sino un aprovechamiento multipropósito. Para que la fitorremediación pase de ser una tecnología prometedora a una con amplia aplicación debe vincularse a la obtención de algún producto de valor económico y social, además del ambiental; por ejemplo, la producción de materia prima con aplicación en la bioenergía, productos biofortificados, cultivos de aplicación industrial, servicios ambientales y áreas de esparcimiento, etcétera (González-Chávez y Carrillo González, 2013b; Ruiz-Olivares *et al.*, 2016; Conesa *et al.*, 2012). Probablemente, tomando en cuenta las alternativas mencionadas, se podrá lograr que la fitorremediación sea vista como una verdadera opción por parte de las autoridades y de la sociedad. Una investigación pionera muestra que en sitios altamente contaminados, donde se desarrolla la remediación natural, es posible obtener productos de interés bioenergético. En diferentes áreas con problemas de contaminación con residuos mineros conteniendo altas concentraciones de EPT se observó la producción de semillas de *Ricinus communis* (ricino o higuera), con alta producción de aceite (40-64%) (Ruiz-Olivares *et al.*, 2013), el cual podría emplearse en la elaboración de biocombustibles. La investigación futura debe plantear las directrices prioritarias para obtener el mayor beneficio ambiental, social y económico por la combinación de la fitorremediación con servicios ambientales y manejo multipropósito de los sitios contaminados.

CONCLUSIÓN

La fitorremediación es una tecnología aplicable en el tratamiento de suelos contaminados con EPT. Por ello, es necesario estudiar las propiedades

físicas y químicas específicas del suelo a tratar, para así elegir el procedimiento más adecuado a usar. En la fitoextracción pueden utilizarse plantas que acumulen concentraciones altas de un EPT de interés para que éste se aproveche posteriormente. La fitoestabilización es una de las alternativas de mayor uso el tratamiento de suelos contaminados. Los EPT se mantienen en el sitio tratado, pero su riesgo ambiental disminuye al estar en formas químicas menos disponibles. La fitominería es útil para extraer metales preciosos a través de plantas. Así, la fitorremediación es una alternativa que puede utilizarse también para agua y lixiviados contaminados. Además, puede vincularse con los servicios ambientales, tales como la captura de carbono, producción de biomasa y prevención de la erosión, entre otros.

LITERATURA CITADA

- Adriano D. C., 2001. Trace Elements in Terrestrial Environments. Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals (2° ed). Springer Verlag. USA. 866 p.
- Ali H., Khan E., Anwar M. 2013. Phytoremediation of heavy metals: Concepts and applications. Chemosphere 91: 869-881.
- Anderson C., Brooks R.R., Stewart R.B., Simcock R. 1998. Harvesting a crop of gold in plants. Nature 395: 553-554.
- Arthur E.L., Rice P.J., Rice P.J., Anderson T.A., Baladi S.M., Henderson K.L., Coats J.R. 2005. Phytoremediation: an overview. Critical Reviews in Plant Sciences 24: 109-122.
- Bañuelos G., Terry N., Leduc D.L., Pilon-Smits E.A.H., Mackey B. 2005. Field trial of transgenic Indian mustard plants shows enhanced phytoremediation of selenium-contaminated sediment. Environmental Science and Technology 39: 1771-1777.
- Barbafieri M., Dadea C., Tassi E., Bretzel F., Fanfani L. 2011. Uptake of heavy metals by native species growing in a mining area in Sardinia, Italy: discovering native flora for phytoremediation. International Journal of Phytoremediation 13: 985-997.
- Campos V., Pires M.A.F. 2003. Phytoremoval of arsenic from soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 358: 2137-2146.
- Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A. 2012. Aplicación de fitotecnologías en suelos. XXXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Zacatecas, Zacatecas. 11-16 nov 2012.
- Conesa H.M., Evangelou M.W.H., Robinson B.H., Schulin R. 2012. A critical view of current state of phytotechnologies to remediate soils: still a promising tool? The Scientific World Journal. Article ID 173829.
- Czupryna G., MacLean A.I., Levy R.D., Gold H. 1989. In situ immobilization of heavy-metal-contaminated soils. Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ, USA.
- Dickinson N.M., Baker A.J.M., Doronila A., Laidlaw S., Reeves R.D. 2009. Phytoremediation of inorganics: realism and synergies. International Journal of Phytoremediation 11: 97-114.
- Ernst W.H.O. 2005. Phytoextraction of mine wastes: Options and impossibilities. Chemie der Erde, 65S1: 29-42.
- EPA (Environmental Protection Agency)/ OERR (Office of Emergency and Remedial Response)/ ORD (Office of Research and Development). 1997. Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg and Pb.



- Garbisu C., Alkorta I. 2001. Phytoextraction: a cost-effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology* 77: 229-236.
- González-Chávez, M.C.A. 2005. Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *TERRA Latinoamericana* 23: 29-37.
- González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R. 2013a. Tolerance of *Chrysanthemum maximum* to heavy metals: the potential for its use in the revegetation of tailings heaps. *Journal of Environmental Sciences* 25: 367-375.
- González-Chávez M.C.A., Carrillo González R. 2013b. Enlazando fitorremediación de sitios contaminados y secuestro de carbono como servicio ambiental. IV Simposio Internacional del Carbono en México. 20-24 de mayo del 2013. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco edo. de México.
- Ghosh M., Singh S.P. 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of it's by products. *Asian Journal on Energy and Environment* 6: 214-231.
- ITRC (Interstate Technology and Regulatory Cooperation). 2009. Phytotechnology technical and regulatory guidance and decision trees. Revised Technical/Regulatory Guidance Interstate Technology & Regulatory Council Phytotechnologies. U.S. 204 p.
- Juwarkar A.A., Singh S.K., Mudhoo A. 2010. A comprehensive overview of elements in bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 9: 215-288.
- Kidd P., Barcel J., Berna, M.P., Navari-Izz, F., Poschenriede, C., Shile, S., Clement R., Monteroso C. 2009. Trace element behaviour at the root-soil interface: implications in phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany* 67: 243-259.
- Koopmans G.F., Römkens P.F., Fokkema M.J., Song J, Luo Y.M., Japenga J., Zhao F.J. 2008. Feasibility of phytoextraction to remediate cadmium and zinc contaminated soils. *Environmental Pollution* 156: 905-914.
- Lindenmayer D.B., Likens G.E. 2010. *Effective Ecological Monitoring*. CSIRO Publishing and Earthscan. 170 pp.
- Mendez M.O., Maier R.M. 2008. Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments: an emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives* 116: 278-283.
- Miransari M. 2011. Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. *Biotechnology Advances* 29: 645-653.
- Nascimento C.W.A., Xing B. 2006. Phytoextraction: a review on enhanced metal availability and plant accumulation. *Scientia agricola* 63: 299-311.
- Peer W.A., Baxter I.R., Richards E.L., Freeman J.L., Murphy A.S. 2006. Phytoremediation and hyperaccumulator plants. *Topics in Current Genetics* 14: 299-340.
- Robinson B.H., Bañuelos G., Conesa H.M., Evangelou M.W.H., Schulin R. 2009. The phytomanagement of trace elements in soil. *Critical Reviews in Plant Sciences* 28: 240-266.
- Ruiz-Olivares A., Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A., Soto-Hernández R.M. 2013. Potential of castor bean (*Ricinus communis* L.) for phytoremediation of mine tailings and oil production. *Journal of Environmental Management*. 15: 316-323.
- Ruiz-Olivares A. 2016. Esquema de fitorremediación de un sitio contaminado con residuos de baterías de automóvil. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México.
- Sánchez-López A., González-Chávez M.C., Carrillo-González R. 2012a. Plants growing on mine tailings avoid dispersion and contribute to stabilization of potentially toxic elements. 9th International Phytotechnologies Society. Hasselt, Belgium.
- Sánchez-López A., González-Chávez M.C.A., Carrillo-González R. 2012b. Particle deposition containing metal son vegetation growing around a tailing mine in Hidalgo, México. *Urban Environmental Pollution Conference*. Amsterdam.
- Sánchez-López A.S., Carrillo-González R., González-Chávez M.C.A., Rosas-Saito G.H., Vangronsveld J. 2015. Phytobarriers: Plants capture particles containing potentially toxic elements originating from mine tailings in semiarid regions. *Environmental Pollution* 205: 33-42.
- Shukla K.P., Singh N.K., Sharma S. 2010. Bioremediation: developments, current practices and perspectives. *Genetic Engineering and Biotechnology Journal* GEBJ-3.
- Tordoff G.M., Bake, A.J.M., Willis A.J. 2000. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. *Chemosphere* 41: 219-228.
- UNEP (United Nations Environment Programme). 2003. *Freshwater management series no. 7 Phytotechnologies: A technical approach in environmental management*.
- Vamerali T., Bandiera M., Mosca G. 2010. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemical Letters* 8: 1-17.
- van der Ent A., Baker A.J.M., Reeves R.D., Pollard A.J., Schat, H. 2013. Hyperaccumulators of metal and metalloids trace elements: Facts and fictions. *Plant Soil* 362: 319-334.
- Vangronsveld J., Herzig R., Weyens N., Boulet J., Adriaensen K., Ruttens A., Thewys T., Meers E., Nehnevajova E., van der Lelie D., Mench M. 2009. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research* 16: 765-794.
- Wilson-Corral V., Anderson C., Rodriguez-Lopez M., Arenas-Vargas M., Lopez-Perez J. 2011. Phytoextraction of gold and copper from mine tailings with *Helianthus annuus* L. and *Kalanchoe serrata* L. *Minerals Engineering* 24: 1488-1494.
- Wu G., Kang H., Zhang X., Shao H., Chu L., Ruan C. 2010. A critical review on the bio-removal of hazardous heavy metals from contaminated soils: Issues, progress, eco-environmental concerns and opportunities. *Journal of Hazardous Materials* 174: 1-8.