

Universidad Complutense

FACULTAD DE FARMACIA



Trabajo Fin de Grado. Departamento de Edafología

APLICACIÓN DE LA FITORREMEDIACIÓN A SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS

Autor: Sara Bayón Sanz

DNI: 03474661-M

Tutor: Inmaculada Valverde Asenjo

ÍNDICE

1. RESUMEN	3
2. INTRODUCCIÓN	3-8
3. OBJETIVOS	9
4. METODOLOGÍA	9-10
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11-20
a. Análisis bibliográfico	11-12
b. Recuperación de los suelos. Técnicas de fitorremediación.....	12- 17
c. Fitoextracción de metales pesados. Relación con la biodisponibilidad y forma de aumentarla.....	17-18
d. Mecanismos de absorción, translocación y tolerancia.....	18-19
e. Limitaciones.....	19-20
f. Tendencias.....	20
6. CONCLUSIONES	20-21
7. BIBLIOGRAFÍA	21-23



“Suelos sanos para una vida sana” es el lema que la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) ha elegido para el Año Internacional de los Suelos 2015. Nuestros suelos están en peligro debido a la expansión de las ciudades, la deforestación, el insostenible uso de la tierra y las prácticas de gestión, la contaminación, el sobrepastoreo y el cambio climático. El ritmo actual de degradación de los suelos amenaza la capacidad de satisfacer las necesidades de las generaciones futuras. En este contexto, la FAO pretende apoyar políticas y medidas eficaces para la gestión y protección de los recursos del suelo, promoviendo inversiones en actividades sostenibles de gestión de los suelos y concienciando a la sociedad.

1. RESUMEN

Los metales pesados constituyen uno de los grupos de contaminantes ambientales sujetos a una mayor investigación y preocupación, fundamentalmente debido a su persistencia, a las bajas concentraciones a las que pueden manifestar sus efectos tóxicos. Todo esto, junto con su acumulación progresiva y/o su transferencia a otros medios naturales (como las aguas subterráneas), su entrada en la cadena trófica, etc., suponen una amenaza para la salud humana y la de los ecosistemas. Por todo esto, la legislación europea obliga a restaurar de dichos suelos mediante acciones de remediación que permitan extraer, controlar, contener o reducir los contaminantes de un área determinada. Dentro del amplio abanico de tecnologías existentes para ello, la fitorremediación, que implica la utilización de plantas, y en especial la fitoextracción, se presenta como una técnica emergente que supone, generalmente, unos menores costes y una menor destrucción y alteración del medio. Sin embargo, se encuentra todavía en fase experimental y presenta grandes limitaciones que la convierten en un proceso lento y difícil de llevar a la práctica, dada la competencia con otras técnicas usualmente empleadas. Esto se advierte por el escaso número de artículos, aunque se percibe en aumento en las bases de datos ISI Web of Science y Science Direct. Las últimas tendencias se dirigen a la identificación de los genes que codifican la hiperacumulación de metales pesados específicos. Es de vital importancia, ya que nos daría la posibilidad de crear plantas transgénicas combinando las características deseables en una sola especie vegetal, sin embargo existe una carencia de estudios de campo que permitan comprobar su viabilidad.

Palabras clave: *soil, phytoremediation, heavy metals, soil contamination, soil-heavy metals.*

2. INTRODUCCIÓN

El suelo se define generalmente como la capa superior de la corteza terrestre, constituida por partículas minerales, materia orgánica, agua, aire y organismos vivos. La interrelación entre estos componentes y los distintos factores que participan en su formación (la roca o material original, el clima, los seres vivos, etc.), hacen del suelo un medio extremadamente complejo y variable que constituye la base funcional de todos

los ecosistemas terrestres, resultando tan esencial para las sociedades humanas como el aire y el agua. Entre las funciones que desempeña el suelo, éste actúa como una barrera natural en el control del transporte de elementos químicos y sustancias a la atmósfera, la hidrosfera y la biota. Sin embargo, su carácter de recurso no renovable (por su formación extremadamente lenta) y la difícil, y también lenta, recuperación de los suelos degradados, producen cambios en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres que pueden trascender a otros medios naturales. (EEA, 2002).

La contaminación constituye uno de los ocho procesos claves de degradación de los suelos identificados en el marco de la Unión Europea (EC-JCR, 2005). Se estima que el número de suelos potencialmente contaminados en la Unión Europea está entre 3.250.000 y 3.600.000, y la gran mayoría de estos suelos presentan cantidades variables de metales pesados que son movilizados, principalmente, por diferentes actividades antropogénicas (Diez Lázaro, 2008). De acuerdo con la “Estrategia Temática de la Protección del Suelo” por parte de la Comisión Europea (COM 231 final, 2006), los estados europeos están obligados a realizar un inventario de las áreas contaminadas de su territorio, lo que aporta una importante información sobre la magnitud del problema existente. En España, el inventario realizado por la Comunidad Autónoma de Madrid (2001) puntualiza que los contaminantes predominantes en los suelos son los metales pesados, Figura 1.

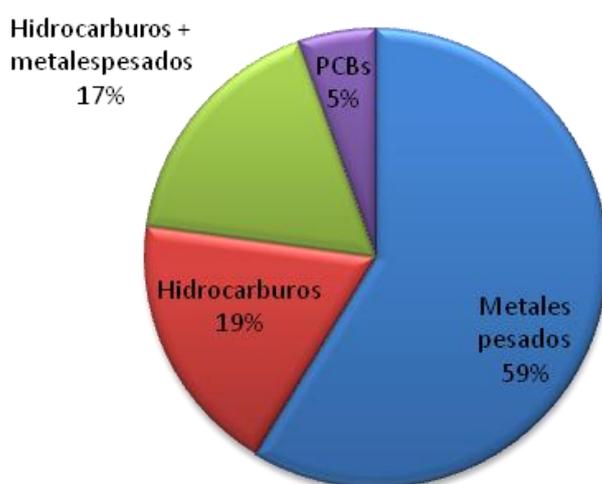


Figura 1. Principales contaminantes encontrados en los suelos contaminados de la Comunidad de Madrid (Comunidad de Madrid, 2001).

El término de “metal pesado” se refiere a aquellos metales de la tabla periódica cuyo peso específico es superior a 5 g/cm³ o que tienen un número atómico por encima de 20, excluyendo generalmente a los metales alcalinos y elementos alcalinotérreos (Tiller, 1989). Sin embargo, el término resulta algo impreciso si se tienen en cuenta las propiedades físico-químicas de los elementos, especialmente las propiedades iónicas que definen la capacidad de complejación y las propiedades biológicas. Se han utilizado otros términos como “metal tóxico” o “elemento traza”, sin que ninguno de ellos se refiera a los mismos elementos, resultando igualmente poco satisfactorios (Diez Lázaro, 2008). En cualquier caso, de acuerdo con Tiller (1989), parece que el término de “metal pesado” puede ser utilizado de una forma globalizadora para referirse a aquellos metales y metaloides clasificados como contaminantes ambientales.

Los metales pesados pueden presentarse en el suelo bajo diferentes formas: solubles en la solución del suelo, como iones intercambiables de los coloides que integran el complejo de cambio, formando complejos con la materia orgánica, adsorbidos en los óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al, sulfuros y fosfatos y como constituyentes de los minerales del suelo. A su vez, dichas formas de retención representan diferentes grados de disponibilidad relativa para organismos del suelo, vegetación, etc (López arias y Grau Corbí 2004). Sin embargo, la disponibilidad de los metales en el suelo, depende de diversos factores tales como el pH, la capacidad de intercambio de cationes, el potencial redox, el propio tipo y especiación química de los elementos metálicos o el material carbonatado, etc. (Alloway, 1995). En particular, en la cuenca Mediterránea es común la presencia de suelos carbonatados en uno o varios de sus horizontes que, junto con la alternancia de periodos húmedos y secos y la existencia de un larga estación cálida, favorece la retención metálica en el suelo. Sin embargo, la acción de los organismos del suelo y/o cambios en las condiciones ambientales (ej., una disminución del pH del suelo) pueden favorecer un incremento en la disponibilidad de la concentración de metales pesados (de Santiago et al., in press).

Las fuentes naturales más significativas de metales pesados derivan de los procesos de erosión del sustrato rocoso y de las erupciones volcánicas (Ali, 2013), pero su contribución es insignificante si comparamos estas fuentes con las diversas acciones

antropogénicas (Salazar y Pignata, 2014). La UE distingue cinco categorías de actividades potencialmente contaminantes de metales pesados (Van-Camp et al., 2004):

- Industria: accidentes, vertidos, escapes o fugas, almacenamiento y deposición de residuos.
- Actividades mineras: con un riesgo generalmente asociado con el almacenamiento y deposición de escombreras, drenajes ácidos y el uso de ciertos reactivos químicos.
- Actividades de procesado de residuos: Se estima que el 57% de los residuos municipales generados en la UE se llevan a un vertedero; el 87% en la CEE (EEA, 1995).
- Tráfico: a través de emisión de gases, pérdidas de aceites y gasolinas, abrasión de gomas de los neumáticos, etc.
- Otras actividades: productos de construcción usados sobre el suelo (hormigones, pinturas), prácticas inadecuadas de agricultura (uso de fertilizantes y pesticidas) almacenamientos privados y comerciales (tanques, gasolineras), sistemas de tratamientos de aguas, etc.

Los metales pesados constituyen uno de los grupos de contaminantes ambientales sujetos a una mayor investigación y preocupación, fundamentalmente debido a su persistencia y a las bajas concentraciones a las que pueden manifestar sus efectos tóxicos (Salazar y Pignata, 2014). Su perpetuación, acumulación progresiva y/o su transferencia a otros medios naturales, como las aguas subterráneas, entrada en la cadena trófica, etc., supone una amenaza para la salud humana y la de los ecosistemas (Becerril Soto et al., 2007).

En particular, los metales pesados forman radicales libres que causan estrés oxidativo en los seres vivos (Mudipalli, 2008). El estrés oxidativo se refiere a una mayor generación de especies reactivas de oxígeno (ROS), que pueden disminuir las defensas antioxidantes intrínsecas de las células, conduciendo a daño o muerte celular (Das et al., 2008, Krystofova et al., 2009 y Sánchez-Chardi et al., 2009). Además, pueden sustituir a los metales esenciales en pigmentos o enzimas interrumpiendo su función

(Malayeri et al., 2008). En cuanto a sus efectos tóxicos, los metales pesados más problemáticos son Hg, Cd, Pb, As, Cu, Zn, Sn y Cr como se muestra en la Tabla 1 (Ghosh, 2010). De estos, Hg, Cd, Pb y As son metales pesados no esenciales, mientras que Cu y Zn son metales pesados esenciales (oligoelementos). Los problemas de salud causados dependen del metal pesado que se trate, su estado de concentración y oxidación, etc.

Tabla 1. Efectos en la salud humana de metales pesados específicos (Ail, 2013).

Metal pesado	Efecto en la salud
As	Es análogo del fosfato y causa interferencias en procesos celulares esenciales como es la fosforilación oxidativa y la síntesis de ATP.
Cd	Carcinogénico, mutagénico y teratogénico; disruptor endocrino; interferencias con el calcio en la regulación de sistemas biológicos; causa fallo renal y anemia crónica.
Cr	Causa pérdida del cabello.
Cu	Se ha encontrado que niveles elevados causan daños en el cerebro y el riñón, cirrosis hepática y anemia crónica, irritación intestinal y estomacal.
Hg	Ansiedad, enfermedades autoinmunes, depresión, pérdidas de equilibrio, modorra, fatiga, pérdida del cabello, insomnio, irritabilidad, pérdida de memoria, infecciones recurrentes, inquietud, fallos en la visión, temblor, arrebatos de temperamento?, úlceras y daños en el cerebro, riñón y pulmones.
Ni	Dermatitis alérgica; la inhalación puede causar cáncer de pulmón, nariz, mama, garganta y estómago; hematotoxicidad, neurotóxico, genotóxico, toxico reproductiva, toxico pulmonar, nefrotóxico, y hepatotóxico; causa pérdida del cabello.
Pb	Su ingesta causa problemas en los niños como subdesarrollo, reduce la inteligencia, pérdida de memoria a corto plazo, discapacidad del aprendizaje y problemas de coordinación; causa fallo renal; aumenta el riesgo a desarrollar enfermedades cardiovasculares.
Zn	La sobredosis puede causar mareo y fatiga.

La protección del suelo frente a la contaminación tiene una regulación específica: la ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, desarrollada por el Real Decreto 9/2005, que establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de los suelos contaminados. Este último obliga a la restauración de dichos suelos mediante acciones de remediación que permitan extraer, controlar, contener o reducir los contaminantes de un área determinada. Dentro del amplio abanico de tecnologías existentes para la restauración de los suelos contaminados en metales pesados, la fitorremediación, que implica la utilización de plantas, se presenta como una técnica emergente que supone generalmente unos menores costes y una menor destrucción y alteración del medio. Sin embargo, todavía es una técnica en fase experimental y presenta grandes limitaciones que la convierten en un proceso lento y difícil de llevar a la práctica dada la competencia con otras técnicas usualmente empleadas (Salazar y Pignata 2014).

Las técnicas de fitorremediación se basan en el empleo de especies tolerantes a los metales. El término de especies metalofitas agrupa a una gran variedad de especies de plantas capaces de resistir, tolerar y sobrevivir en suelos con altos niveles de metales. Son endémicas de suelos con afloramientos naturales de minerales metálicos y pueden colonizar suelos degradados por actividades antrópicas, si tienen la oportunidad y el tiempo necesario. Sin embargo, tienen restringida supervivencia en zonas no mineralizadas y sobreviven específicamente en entornos contaminados por metales concretos. Las especies pseudometalófitas, de ámbito de distribución más extenso, son capaces de sobrevivir en suelos metalíferos en los que se han especializado tolerando los efectos tóxicos de los metales. Por otro lado, se pueden distinguir distintos mecanismos por los que las especies vegetales pueden sobrevivir en suelos con altos niveles de metales, y se habla de especies exclusoras, haciendo referencia a aquellas especies que desarrollan estrategias por las que impiden la entrada de metales pesados en la raíz y su transporte a los tejidos fotosintéticos; y de especies hiperacumuladoras cuando se especializan en acumular metales en sus tejidos aéreos llegando a superar el 2% de su peso seco (Becerril Soto et al., 2007).

3. OBJETIVOS

El conocimiento de estas técnicas novedosas de remediación de suelos, ha promovido la presente revisión bibliográfica, punto de partida para futuras investigaciones aplicadas, articulándose en los siguientes objetivos:

- Saber qué tipos de técnicas de fitorremediación son aplicables a la eliminación de metales pesados que pueden contaminar el suelo, relacionados en la bibliografía científica, sus características y limitaciones.
- Conocer su relación con la biodisponibilidad de metales pesados del suelo.
- Revisar los mecanismos de absorción, translocación y tolerancia de dichos metales en las plantas.

4. METODOLOGÍA

En la búsqueda bibliográfica realizada se han utilizado las bases de datos Science Direct e ISI Web of Science a través de la web del Consorcio Madroño que nos permite consultar todos los recursos electrónicos que contienen artículos de revistas, libros, informes, tesis... Las etapas que se han seguido incluyen:

Etapa 1. Revisión de todos los artículos que hacían referencia a las siguientes palabras clave: *soil, phytoremediation, heavy metals, soil contamination, soil-heavy metals*. Los artículos revisados se encuentran datados entre los años 1996 y 2015.

Etapa 2. A partir de los artículos obtenidos en la Etapa 1, se ha realizado un análisis preliminar de los estudios relacionados con el suelo y su contaminación; en especial por metales pesados y, tanto sus fuentes como su impacto en los ecosistemas y en la salud pública. También se ha revisado la legislación actual sobre residuos y suelos contaminados.

Etapa 3. Se ha desarrollado un segundo trabajo de revisión, con mayor detalle, de aquellos artículos relacionados con la fitorremediación en general. Se integraron en una sola lista los artículos de ambas bases de datos (en relación con las palabras clave *soil, phytoremediation, heavy metals, soil contamination, soil-heavy metals*). Para

completar esta etapa se realizó un análisis de las tendencias temporales sobre dichos artículos.

Etapa 4. Se han estudiado con mayor profundidad aquellos artículos correspondientes a las técnicas de fitorremediación, en concreto de fitoextracción de metales pesados relacionada con la biodisponibilidad de éstos en el suelo; los tipos de mecanismos de absorción, traslocación y tolerancia de los metales pesados en las plantas conocidos hasta el momento; y las limitaciones y las tendencias de estas técnicas. Esta última etapa se inició a partir de los artículos localizados en las bases de datos descritas, pero el proceso de revisión se amplió con nuevas referencias que aparecían en la bibliografía de los trabajos previamente revisados.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se consideran dos aspectos diferentes. Por un lado los resultados obtenidos del análisis bibliográfico expuesto en el punto anterior de metodología. A continuación se desarrolla el contenido de los artículos analizados sobre recuperación de suelos atendiendo a las técnicas de fitorremediación, en particular las características que definen a cada una de ellas. Se hace especial énfasis en la técnica de fitocorrección al ser la más investigada, la relación de esta técnica con la biodisponibilidad de los metales y la forma en que dicha biodisponibilidad puede ser incrementada. Así mismo se detallan los mecanismos de absorción, translocación y tolerancia por la vegetación, las limitaciones de estas estrategias de fitorremediación y las tendencias investigadoras.

a. Análisis bibliográfico

Desde el año 1996 hasta el 2015, existen un total de 227.348 artículos en la base de datos Science Direct y 118.606 artículos en ISI Web, que relacionan el suelo con las diferentes palabras clave, como se muestra en la Figura 2. Las diferencias observadas en el número de artículos ha justificado la utilización conjunta e integrada de ambas

bases de datos. Se excluye la información previa a 1996 en este apartado dado que las bases de datos no muestran los datos desglosados a partir de esta fecha.

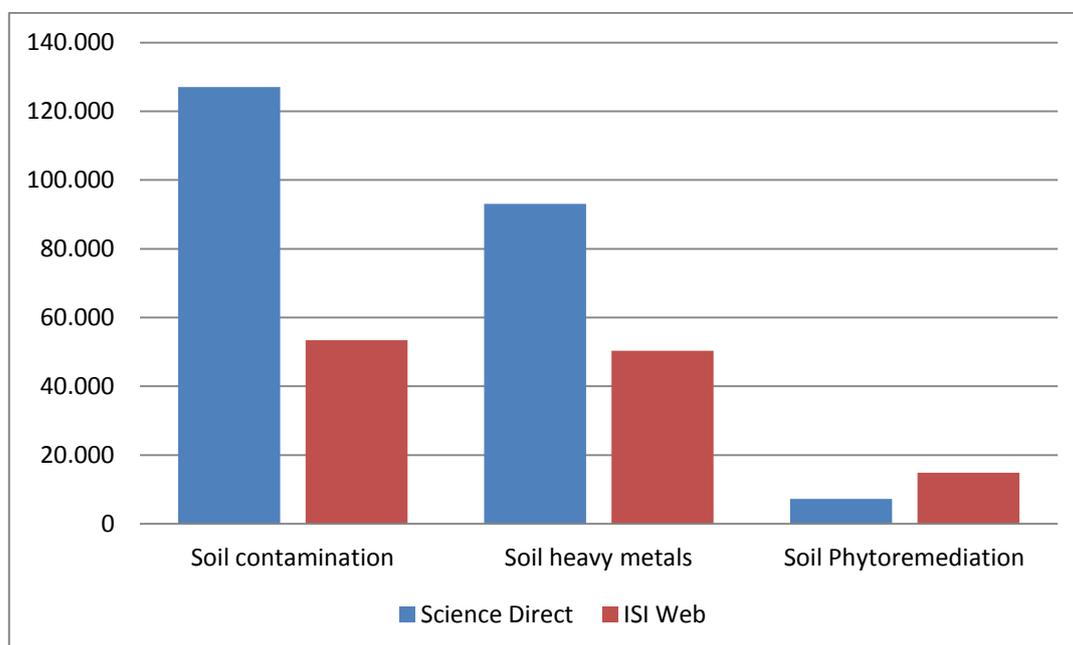


Figura 2. Grafica del número de artículos en cada una de las bases de datos por palabras clave. Bases de datos Science Direct e ISI Web (1996-2014).

En la Figura 3 se muestra la evolución temporal creciente de las investigaciones sobre *fitorremediación* en el periodo de tiempo considerado. Se puede percibir que hasta el año 1999 no se comenzó a investigar la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados con mayor intensidad, como refleja la pendiente. Esto podría atribuirse a la preocupación progresiva por la búsqueda de tecnologías menos invasivas para la extracción de metales pesados de los suelos.

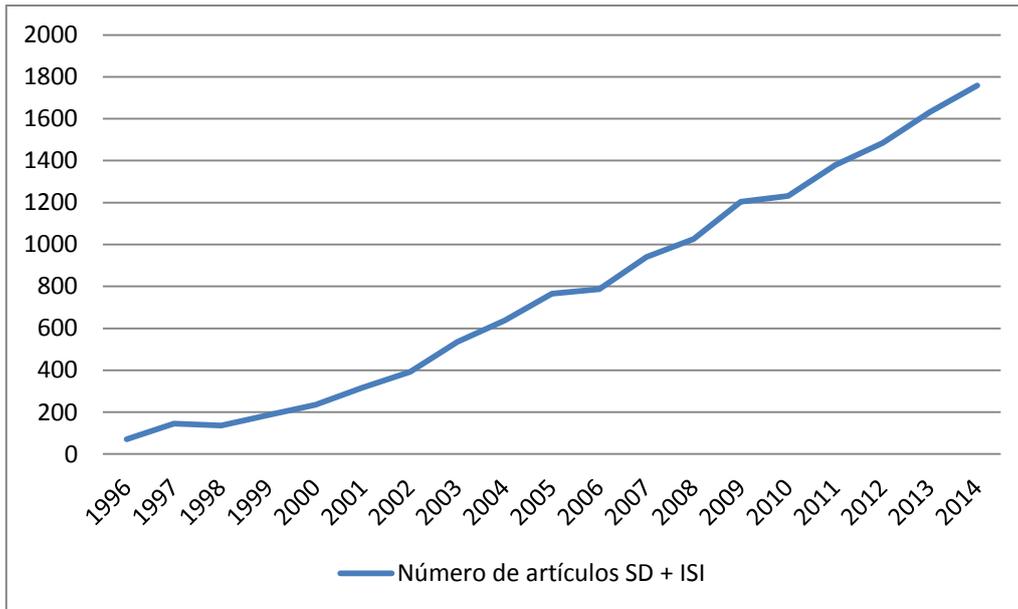


Figura 3. Gráfica de la evolución temporal de las investigaciones de la fitorremediación en las bases de datos elegidas. Bases de datos Science Direct e ISI Web (1996-2014).

En la Figura 4, obtenida a partir de la evolución temporal de las investigaciones sobre *fitorremediación* y, posteriormente, filtrando con el término *contaminación de los suelos y metales pesados*, se observa que el número de artículos, aunque en aumento progresivo es muy inferior a la búsqueda anterior, más general.

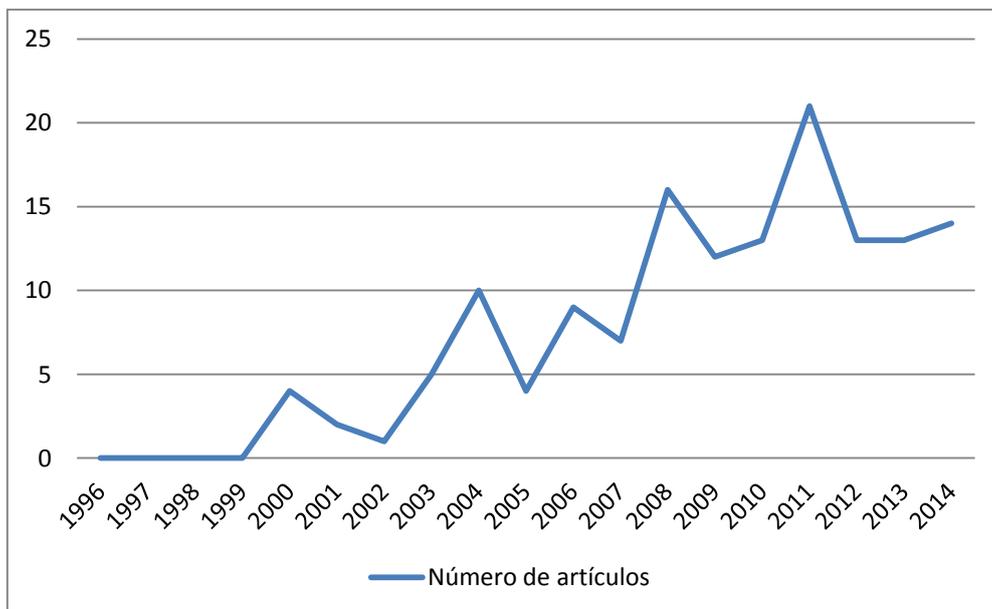


Figura 4. Evolución temporal de las investigaciones sobre fitorremediación filtrando los artículos relacionados con la contaminación de los suelos por metales pesados. Base de datos Science Direct (1996-2014).

b. Recuperación de los suelos. Técnicas de fitorremediación.

La elección de una estrategia de remediación dependerá de la naturaleza de los contaminantes. Los suelos contaminados con metales pesados son extremadamente difíciles de remediar y normalmente son excavados y sustituidos con suelo nuevo. Además, algunas zonas contaminadas con metales son tratadas con otras técnicas, como la lixiviación ácida, separación física del contaminante o procesos electroquímicos que tienen costes muy elevados (Cunningham, 1995). Por ello, se busca utilizar técnicas de remediación biológicas menos invasivas y costosas.

La fitorremediación es considerada a menudo como una alternativa para las tecnologías de remediación convencionales por ser una actividad económicamente sostenible, eficaz y respetuosa con el medio ambiente (Kumar P., 1995).

Las técnicas de fitorremediación son de diverso tipo: fitoextracción, fitoestabilización o fitomovilización, fitodegradación, rizodegradación, rizofiltración, fitovolatilización y fitosalinización (Figura 5).

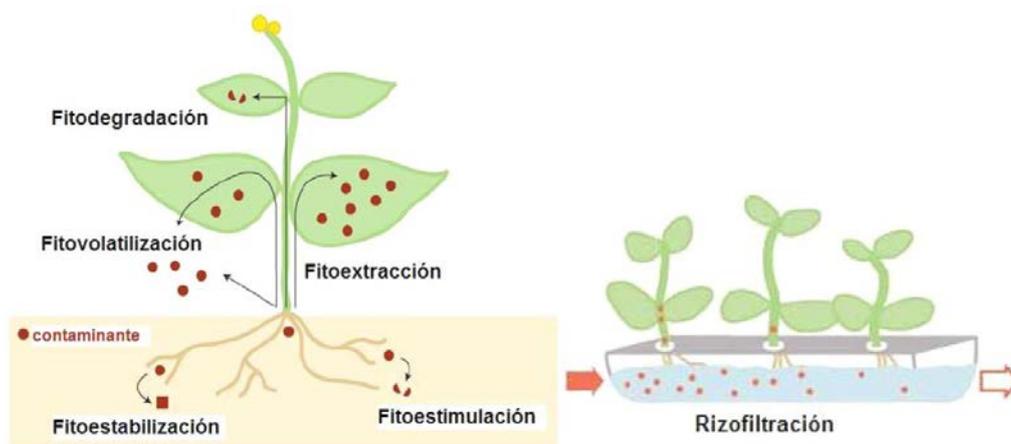


Figura 5. Representación esquemática de los distintos mecanismos de fitocorrección (Díez, 2008).

La **fitoextracción** (también conocida como fitoacumulación, fitoabsorción o fitosequestración) emplea la capacidad de las plantas para absorber y extraer el contaminante del suelo, especialmente metales, y acumularlo en sus tallos y hojas (Sekara et. Al., 2005; Yoon et al.; Rafati et al., 2011). Según Vangronsveld (2009), las plantas fitoextractoras ideales deberían poseer las siguientes características:

- Elevado índice de crecimiento.

- Elevada producción de biomasa.
- Sistema radicular ampliamente distribuido y muy ramificado.
- Acumular metales pesados del suelo.
- Translocar los metales pesados acumulados desde la raíz hasta los brotes.
- Tolerar los efectos tóxicos de los metales pesados.
- Presentar buena adaptación a las condiciones ambientales y climáticas de la zona y resistencia a patógenos y plagas.
- Deben ser de fácil cultivo y cosecha.
- Y repeler a los herbívoros para evitar la contaminación de la cadena alimentaria.

En el proceso de fitoextracción, tal y como indica la Figura 6, primero se elegirá la especie apropiada que será cultivada en un suelo contaminado determinado. Tras haberse llevado a cabo la extracción del contaminante por la planta, se retirará la cosecha, ahora convertida en biomasa enriquecida por el metal pesado que contaminaba el suelo. Posteriormente, se llevará a cabo el tratamiento de la cosecha; por compostaje, compresión o tratamientos térmicos por ejemplo, para reducir el volumen y/o el peso de biomasa. Por último ésta materia prima se procesará como si se tratara de un residuo peligroso, o se reciclará para recuperar los elementos que podrán tener valor económico (Vangronsveld et al., 2009).

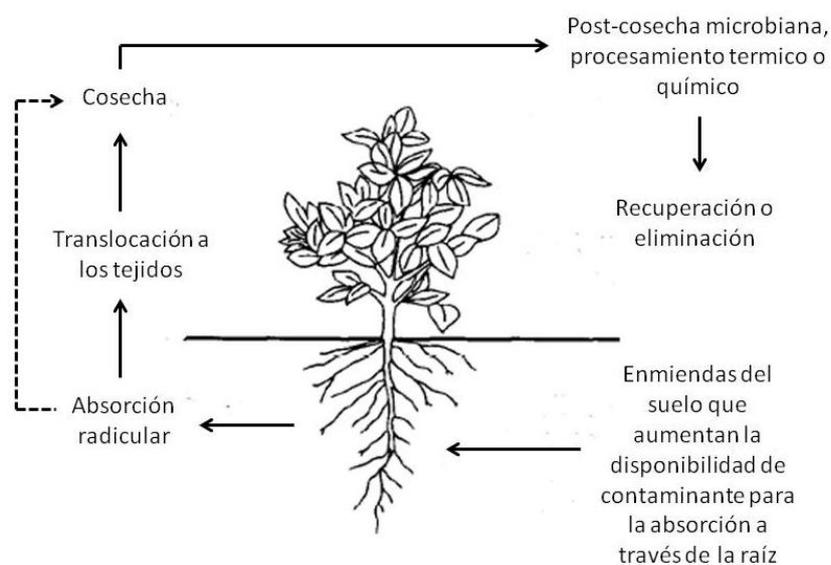


Figura 6. Proceso implicado en la fitoextracción de contaminantes del suelo (Cunningham, 1995).

La **fitoestabilización** o **fitoinmovilización** (Figura 7) es el uso de plantas para estabilizar los contaminantes en suelos contaminados (Singh, 2012). Esta técnica es utilizada para inmovilizar y reducir la biodisponibilidad de contaminantes en el suelo, previniendo su migración a aguas subterráneas o su entrada en la cadena trófica. Las plantas pueden inmovilizar los metales pesados en los suelos a través de adsorción por la raíz, precipitación, complejación o reducción de la valencia del metal en la rizosfera (que hace el metal menos tóxico como sucede, por ejemplo, con la reducción del Cr VI a Cr III). Esta técnica no es una solución permanente porque los metales pesados permanecen en el suelo, solo se limita su movimiento, por ello actualmente es una estrategia utilizada para estabilizar o inactivar contaminantes potencialmente tóxicos (Hazrat Ali et al., 2013).

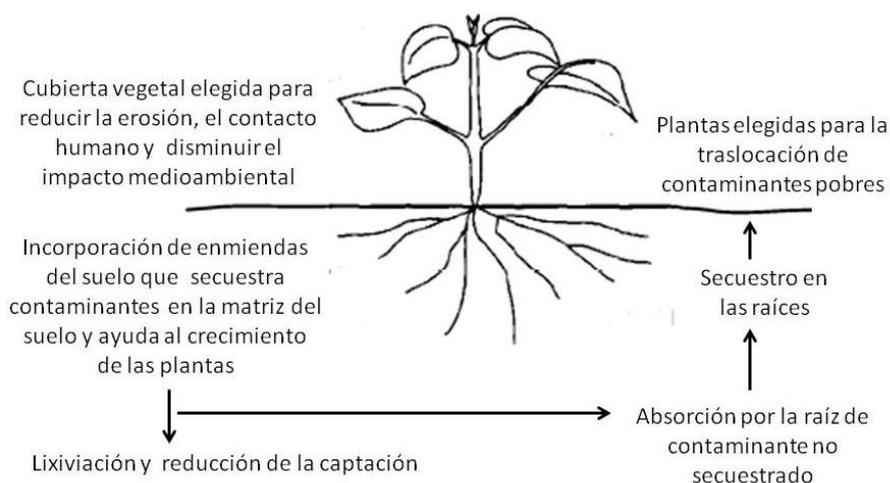


Figura 7. Procesos implicados en la fitoestabilización de los suelos contaminados.

La **fitodegradación** (Figura 8) es la degradación de contaminantes orgánicos por las plantas con la ayuda de enzimas como la deshalogenasa y la oxigenasa, no dependientes de los microorganismos de la rizosfera (Vishnoi and Srivastava, 2008). Las plantas pueden acumular xenobióticos orgánicos de suelos contaminados y detoxificarlos por sus actividades metabólicas. Esta estrategia está limitada solo a contaminantes orgánicos, ya que los metales pesados no son biodegradables (Doty et al., 2007).

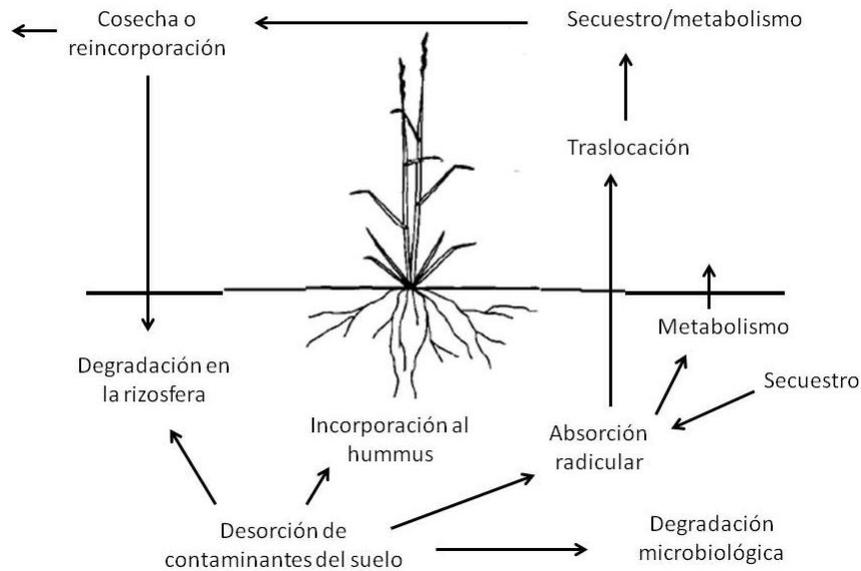


Figura 8. Procesos de fitodegradación de contaminantes orgánicos en el suelo (Cunningham, 1995).

La **rizodegradación** refiere a la descomposición de contaminantes orgánicos en el suelo por microorganismos presentes en la rizosfera (Mukhopadhyay and Maiti, 2010). En esta zona del suelo las plantas secretan exudados ricos en carbohidratos, aminoácidos y flavonoides; creando así un entorno rico en nutrientes que estimula la actividad metabólica microbiana hasta cien veces mayor de lo normal.

La **rizofiltración** se basa en que algunas plantas acuáticas, de humedales, algas, bacterias y hongos, resultan ser buenos biosorbentes de metales presentes en las aguas contaminadas a través de las raíces. Aunque los estudios en este sentido son prometedores, la limpieza a gran escala utilizando esta técnica no está demostrada excepto para algunas aplicaciones limitadas (Díez, 2008).

La **fitovolatilización** es la absorción de contaminantes del suelo por plantas, su conversión a formas volátiles y su posterior liberación a la atmósfera. Es una estrategia utilizada con contaminantes orgánicos y algunos metales pesados como Hg y Se; pero en esta técnica existe una controversia, ya que no se excluye completamente el contaminante, sino que se transfiere del suelo a la atmósfera, donde puede volver a ser redepositado (Hazrat et al., 2013).

La **fitodesalinación** es una técnica reciente emergente. Se refiere al uso de plantas halófitas para suprimir el cloruro sódico de suelos salinos que hacen imposible el crecimiento normal de otras plantas (Hazrat et al., 2013).

c. Fitoextracción de metales pesados. Relación con la biodisponibilidad y forma de aumentarla.

La fitoextracción es la técnica de fitorremediación más útil para eliminar los metales pesados de los suelos contaminados (Hazrat et al., 2013). Sin embargo, la eficiencia de esta técnica depende de las formas químicas en las que se encuentran los metales en el suelo, cuya movilidad y biodisponibilidad viene determinada, en gran medida, por el conjunto de los diferentes componentes del suelo, así como por los factores químicos, físicos y biológicos que influyen en la reactividad de los componentes. Los procesos que gobiernan la compartimentalización de metales en los suelos se traducen en reacciones de adsorción-desorción y precipitación-disolución, que afectan directamente al reparto de metales entre la fase sólida y la acuosa, así como reacciones de complejación y oxidación-reducción que afectan a la reactividad del propio metal (solubilidad y biodisponibilidad). Como se dijo anteriormente, estas reacciones están controladas por factores ambientales como el pH, la capacidad de intercambio de cationes, el contenido de humedad de los suelos, el potencial redox y el propio tipo y especiación química de los elementos (Díez, 2008).

La biodisponibilidad de un elemento se refiere a las formas biológicamente disponibles que pueden llegar a ser absorbidas por un organismo e integrarse en su metabolismo y va a depender fundamentalmente de las formas o especiación en las que se encuentren los metales en el suelo y de la capacidad de absorción del propio organismo. A causa de esto, las plantas han desarrollado ciertos mecanismos de “solubilización” de metales pesados en el suelo:

- Las raíces pueden secretar a la rizosfera sustancias capaces de movilizar metales, denominadas fitosideróforos (Lone et al., 2008).

- También pueden excretar protones, que acidifican la rizosfera e incrementan la disolución de metales ya que pueden desplazar los cationes de metales pesados adsorbidos en partículas del suelo (Alford et al., 2010). Los exudados radiculares pueden disminuir el pH de la rizosfera en una o dos unidades, esto hace que aumente la concentración de metales pesados en disolución promoviendo su desorción (Thangavel and Subbhuraam, 2004).
- Además de esto, los microorganismos rizosféricos (mayoritariamente bacterias y hongos micorriza) pueden aumentar considerablemente la biodisponibilidad de metales pesados en el suelo, ya que las interacciones de sideróforos microbianos puede aumentar la labilidad de los metales y aumentar la absorción radicular (Mench et al., 2009).

La **fitoextracción inducida** es otra forma de aumentar la biodisponibilidad de metales pesados en el suelo. Se hace añadiendo diferentes quelantes, como el EDTA, el ácido cítrico, el sulfuro elemental y el sulfato amónico. Los quelatos forman complejos solubles en agua con los metales pesados y ayudan a la desorción de las partículas del suelo. En contraposición, estos tratamientos químicos causan problemas de contaminación secundaria, por ejemplo, el EDTA es no biodegradable y puede filtrarse y contaminar las aguas subterráneas, por ejemplo. Por ello se buscan quelantes biodegradables, como el ácido cítrico, de origen natural (Ali, 2013).

d. Mecanismos de absorción, translocación y tolerancia.

Los metales pesados son transportados al interior de la planta en forma de iones. Estos atraviesan una serie de transportadores especializados o acoplados a proteínas portadoras de protones en la membrana plasmática de la raíz (Greipsson, 2011). Posteriormente, los iones podrán ser almacenados en las raíces o translocados a los tejidos a través de los vasos del xilema (Prasad, 2004) donde serán depositados en vacuolas, eliminando así el exceso de iones metálicos del citosol y así reducir las interacciones con los procesos metabólicos celulares. La compartimentalización de complejos metálicos en vacuolas es parte de los mecanismos de tolerancia en hiperacumuladoras, que se basan en la unión de la pared celular, activar el transporte

de iones a la vacuola y la quelación a través de la formación de complejos metálicos (Sheoran et al., 2011).

El viaje de los metales pesados desde el suelo hasta las vacuolas está controlado y regulado por gran variedad de moléculas especializadas en distintas funciones de transporte, complejación y secuestro. Las moléculas más importantes en los procesos de acumulación y tolerancia de metales son las fitoquelatinas (PCs) y las metalotioninas (MTs). Estas moléculas son ricas en grupos cisteinsulfhidrilo que unen y secuestran iones de metales pesados formando complejos muy estables. Las plantas las expresan de manera natural para facilitar la translocación a través del xilema. Las PCs son péptidos sintetizados por la enzima fitoquelatina sintetasa, que se unen a los metales y son parte del sistema de detoxificación vegetal (Ali, 2013). Se expresan mayormente en las raíces y en menor medida en las hojas (Gomez et al., 2009). Por otro lado, MTs son un grupo de genes modificados, de bajo peso molecular, que unen proteínas a metales y cuya función es la de proteger las plantas de los efectos tóxicos de los iones metálicos (Sheoran et al., 2011).

e. Limitaciones.

Algunas de las limitaciones más importantes según Díez Lázaro (2008) y Hazrat (2013) son:

- La escasez de especies vegetales potencialmente utilizables y, que en ocasiones son foráneas e invasivas que afectarían a la biodiversidad local.
- El escaso crecimiento y producción de biomasa de la mayor parte de estas especies provocando la ralentización del proceso.
- El excesivo tiempo requerido para la recuperación del suelo. Se calcula que la descontaminación satisfactoria de suelos moderadamente contaminados requiere una eliminación de 200-1.000 kg de metal por hectárea y por año en un período de veinte años (Cunningham., 1995).

- La dificultad de movilizar la fracción de iones metálicos más fuertemente unidos al sustrato, limitando la biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo.
- Es aplicable a sitios con niveles bajos o moderados de contaminación por metales porque el crecimiento de estas plantas no es posible en suelos muy contaminados.
- Hay riesgo de contaminación de la cadena alimentaria.

f. Tendencias

Actualmente la mayoría de investigaciones se limitan a realizar estudios de laboratorio e invernadero y muy pocos tienen lugar en situaciones reales de campo. En consecuencia, los resultados de estos estudios difieren mucho, ya que los estudios en exteriores están condicionados por numerosos factores ambientales.

Las últimas tendencias se dirigen a la identificación de los genes que codifican la hiperacumulación de metales pesados específicos. Es de vital importancia ya que nos daría la posibilidad de crear plantas transgénicas combinando las características deseables en una sola especie vegetal (Hazrat, 2013).

6. CONCLUSIONES

Al ser una técnica novedosa, el número de artículos que relaciona las técnicas de fitorremediación con metales pesados es reducido. Además, dado su carácter experimental, su aplicación presenta grandes limitaciones que la convierten en un proceso lento y difícil de llevar a la práctica al ser poco competitivas con otras técnicas de remediación habitualmente empleadas.

En la mayoría de los casos, las investigaciones se centran en los mecanismos fisiológicos de acumulación de metales pesados en plantas, obteniendo importantes progresos. Las últimas tendencias apuntan a la comprensión de los mecanismos moleculares relacionados con la eliminación de metales pesados.

El estudio de los mecanismos de absorción, traslocación y tolerancia de las plantas se centra, en gran medida, en los procesos de identificación, aislamiento y caracterización de las biomoléculas que intervienen en dichos procesos.

Para asegurar el éxito de la fitorremediación como una técnica viable de limpieza de metales pesados en el suelo, no deben dejarse de lado los estudios de campo con los que deberían validarse los resultados obtenidos en el laboratorio.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Alford, E.R., Pilon-Smits, E.A.H., Paschke, M.W., 2010. Metallophytes – a view from the rhizosphere. *Plant Soil* 337, 33–50.
2. Ali H., Khan E., Sajad, M.A., 2013. Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications. *Chemosphere*, 91 (2), 869-881.
3. Alloway, B.J. 2012. Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. En: *Heavy Metals in Soils. Trace Metals and Metalloids in Soil and Their Bioavailability*. Chapter 2, Third edition. University of Reading, UK. p. 11-50.
4. Becerril Soto, J.M., Barrutia Sarasua, O., García Plazaola, J.I., Hernández, A., Olano Mendoza, J.M., Garbisu Crespo, C., 2007. Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas*. 16 (2), 50–55.
5. BOE nº 15, 2005. Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.
6. COM 231 final. 2006. Estrategia temática para la protección del suelo. Comunicación de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones. pp. 13.
7. Comunidad de Madrid, 2001. “Plan Regional de actuación en materia de suelos contaminados de la Comunidad de Madrid 2001 – 2006”. Consejería de Medio Ambiente - Junio 2001.
8. Cunningham, S.D., Berti, W.R., Huang, J.W. 1995. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends Biotechnol.* 13, 393-397.
9. Das, K., Das, S., Dhundasi, S., 2008. Nickel, its adverse health effects and oxidative stress. *Indian J. Med. Res.*, 128, 412-425.
10. Díez Lázaro, F.J., 2008. Fitocorrección de suelos contaminados con metales pesados: evaluación de plantas tolerantes y optimización del proceso mediante prácticas agronómicas. Tesis doctoral, p. 6.
11. Doty, S.L., Shang, Q.T., Wilson, A.M., Moore, A.L., Newman, L.A., Strand, S.E., 2007. Enhanced metabolism of halogenated hydrocarbons in transgenic plants containing mammalian cytochrome P450 2E1. *P. Natl. Acad. Sci. USA*. Vol. 97, nº 12, 6287–6291.
12. EC-JCR. 2005. Soil Atlas of Europe. European Soil Bureau Network. European Commission. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg. pp 128.
13. EEA. 2002. Con los pies en la Tierra: la degradación del suelo y el desarrollo sostenible en Europa. En: *Problemas ambientales nº 16*. Agencia europea de medio Ambiente. Copenhague, pp 34.
14. Ghosh, M., Singh, S.P., 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by products. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 3, 1-18.
15. Gomez, N.E., Cozatl, D.M., Sanchez, R.M., Mendoza, D.G., Perez, O.Z., Hernandez, A.M., Santamaria, J.M., 2009. The Pb-hyperaccumulator aquatic fern *Salvinia minima* Baker, responds to Pb²⁺ by increasing phytochelatin synthesis via changes in SmPCS expression and in phytochelatin synthase activity. *Aquat. Toxicol.* 91, 320–328.
16. Greipsson, S., 2011. Phytoremediation. *Nat. Educ. Knowl.* 2, 7.
17. Krystofova, O., Shestivska, V., Galiova, M., Novotny, K., Kaiser, J., Zehnalek, J., Babula, P., Opatrilova, R., Adam, V., Kizek, R., 2009. Sunflower plants as bioindicators of environmental pollution with lead (II) ions. *Sensors* 9, 5040-5058.
18. Kumar, P.B.A.N., Dushenkov, V., Motto, H., Raskin, L., 1995. Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.* 29, 1232-8.
19. Licht, L., Isebrands, J., 2005. Linking phytoremediated pollutant removal to biomass economic opportunities. *Biomass Bioenerg.*, 28, 203-18.
20. Lone, M.I., He, Z., Stoffella, P.J., Yang, X., 2008. Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: progresses and perspectives. *J. Zhejiang Univ. – Sci. B* 9, 210–220.

21. Malayeri, B.E., Chehregani, A., Yousefi, N., Lorestani, B., 2008. Identification of the hyper accumulator plants in copper and iron mine in Iran. *Pak. J. Biol. Sci.* 11, 490-492.
22. Mench, M., Schwitzguebel, J.-P., Schroeder, P., Bert, V., Gawronski, S., Gupta, S., 2009. Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 16, 876–900.
23. Mudipalli, A., 2008. Metals (micro nutrients or toxicants) and global health. *Indian J. Med. Res.* 128, 331-334.
24. Prasad, M.N.V., 2004. Phytoremediation of metals in the environment for sustainable development. *Proc. Indian Natl. Sci. Acad. Part B* 70, 71–98.
25. Rafati, M., Khorasani, N., Moattar, F., Shirvany, A., Moraghebi, F., Hosseinzadeh, S., 2011. Phytoremediation potential of *Populus Alba* and *Morus Alba* for Cadmium, Chromium and Nickel absorption from polluted soil. *Int. J. Environ. Res.* 5, 961–970.
26. Robinson, B., Fernández, J.E., Madejón, P., Marañón, T., Murillo, J.M., Green, S., 2003. Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability. *Plant Soil*, 249, 117-25.
27. Salazar, M.J., Pignata, M.L., 2014. Lead accumulation in plants grown in polluted soils. Screening of native species for phytoremediation. *J. Geochem. Explor.*, volume 137, 29-36.
28. Salt, D.E., Smith, R.D., Raskin, I., 1998. Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Phys.* 49, 643-668.
29. Sánchez-Chardi, A., Ribeiro, C.A.O., Nadal, J., 2009. Metals in liver and kidneys and the effects of chronic exposure to pyrite mine pollution in the shrew *Crocidura russula* inhabiting the protected wetland of Doñana. *Chemosphere* 76, 387-394.
30. Sekara, A., Poniedzialek, M., Ciura, J., Jedrzczyk, E., 2005. Cadmium and lead accumulation and distribution in the organs of nine crops: implications for phytoremediation. *Pol. J. Environ. Stud.*, 14 (4), 509–516.
31. Sessitsch, A., Kuffner, M., Kidd, P., Vangronsveld, J., Wenzel, W. W., Fallmann, K., Pushenreiter, M., 2013. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. *Soil, Biol., Biochem.* 60, 182-194.
32. Sheoran, V., Sheoran, A., Poonia, P., 2011. Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: a review. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 41, 168–214.
33. Thangavel, P., Subbhuraam, C., 2004. Phytoextraction: role of hyperaccumulators in metal contaminated soils. *Proc. Indian Natl. Sci. Acad. Part B* 70, 109–130.
34. Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnelajova, E., van der Lelie, D., Mench, M., 2009. Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ. Sci. Pollut. R.* 16, 765-794.
35. Vishnoi, S.R., Srivastava, P.N., 2008. Phytoremediation-green for environmental clean. *Proceedings of Taal 2007: The 12th World Lake Conference*, 1016–1021.
36. Witters, N., Mendelsohn, R., Van Passel, S., Slycken, S., Weyens, N., Schreurs, E., Meers, E., Tack, F., Vanheusden, B., Vangronsveld, J., 2012. Phytoremediation, a sustainable remediation technology? II: Economic assessment of CO₂ abatement through the use of phytoremediation crops for renewable energy production. *Biomass Bioenerg.* 39, 470-477.
37. Yoon, J., Cao, X., Zhou, Q., Ma, L.Q., 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Sci. Total Environ.* Vol. 368, 456–464.