4 ANTECEDENTES

4.1 CONTAMINACIÓN DEL SUELO

El suelo puede definirse como aquel material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad; mientras que un suelo contaminado es aquel donde se encuentran presentes uno o más materiales peligrosos y/o residuos de toda índole y que pueden constituir un riesgo para el ambiente y la salud (Medina, 2001).

4.1.1 EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES

El suelo se puede degradar al acumularse en él sustancias a unos niveles tales que repercuten negativamente en el comportamiento de los suelos. Los efectos desfavorables de los contaminantes en el suelo como sistema son (Porta, 1994):

- Destrucción del poder de autodepuración por proceso de regeneración biológica normales, al haber superado la capacidad de aceptación del suelo.
- Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento normal de los microorganismos del suelo, o bien alteración de su diversidad.
- Disminución del rendimiento de los cultivos con posibles cambios en la composición de los productos con riesgo para la salud de los consumidores, al entrar determinados elementos a la cadena trófica.

- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia. Se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.
- Disminución de las funciones de soporte de actividades de esparcimiento. Los espacios contaminados presentan problema de salubridad para los usuarios.

4.1.2 FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Actualmente es por todos conocido que la contaminación de suelos y cuerpos de agua es provocada por diversas actividades antropogénicas, algunas de estas son:

Minería. Más de cuatrocientos años de actividades mineras, en muchos casos ininterrumpidas, han dejado tras de sí montañas de residuos mineros conteniendo diversos materiales potencialmente tóxicos, a los cuales se exponen las poblaciones, la flora y la fauna, a través del suelo, aire o de las aguas contaminadas. En otros casos, existe el riesgo de fenómenos de bioacumulación en las distintas fases de las cadenas alimenticias. Dos de los contaminantes más frecuentes en las zonas mineras del país son el arsénico y el plomo, a los cuales se suma el cadmio en algunas de ellas (Garbisu y Alkorta, 2001; Medina,2001; Porta, 1994; Wong, 2003).

Explotación de Petróleo. Las intensas actividades petroleras y de obtención de los derivados del petróleo en diversas regiones del país y en el mar, incluidas aquellas donde existe una vulnerabilidad ecológica, han contribuido a una severa contaminación por hidrocarburos y otro tipo de sustancias potencialmente tóxicas, que han penetrado al suelo y contaminado cuerpos de agua (Garbisu y Alkorta, 2001; Medina,2001; Porta, 1994).

Actividades Agrícolas. El empleo de agroquímicos en las actividades agropecuarias, frecuentemente mediante prácticas inadecuadas, constituye una de las formas de contaminación más importantes, que impactan no sólo los suelos de las áreas en donde se aplican sino que llegan a través de los ríos hasta las zonas costeras afectando las especies marinas. La aplicación de plaguicidas genera conflictos sociales por el elevado número de trabajadores del campo intoxicados por estos productos, con un alto índice de mortalidad, así como también por la sospecha de efectos adversos sobre la salud de las comunidades vecinas, la flora y la fauna (Garbisu y Alkorta, 2001; Medina,2001; Porta, 1994).

Actividades Industriales. La producción de bienes de consumo a lo largo y ancho del territorio nacional ha generado importantes focos de contaminación, en primer término por la falta de conciencia ecológica que prevaleció por muchos años, y en segundo por el manejo inadecuado de materiales y todo tipo de residuos, lo cual representa un serio problema en aquellos lugares donde se desarrollan estas actividades (Medina,2001; Porta, 1994).

Instalaciones de Servicios. Se han acumulado las evidencias de graves problemas de contaminación de suelos, que conllevan el riesgo de contaminación de acuíferos, por fugas en contenedores de materiales peligrosos, así como por derrames continuos de lubricantes, solventes orgánicos y otro tipo de sustancias, por prácticas inadecuadas en su manejo, principalmente en estaciones de servicio de gasolina, talleres de reparación de autotransportes, estaciones e instalaciones de ferrocarriles, terminales de autobuses, aeropuertos y diversas industrias(Medina,200; Porta, 1994).

Uso de Aguas Residuales en Irrigación de Campos Agrícolas. El empleo de aguas residuales para riego de cultivos agrícolas por su alto contenido de materia orgánica, que actúa como fertilizante, y otras sustancias nocivas, implica el riesgo de que los suelos y los cultivos se contaminen con los residuos químicos provenientes de descargas industriales y municipales (Garbisu y Alkorta, 2001;Medina,2001; Porta, 1994).

Basureros a Cielo Abierto. La disposición inadecuada de los residuos sólidos municipales, que pueden contener residuos peligrosos, representa una seria amenaza de contaminación a los suelos y cuerpos de agua (Medina,2001).

Las principales sustancias que se consideran causantes principales de problemas de contaminación son (Porta, 1994): metales (Pb, Cd ,Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Sn, Ba, Hg), compuestos inorgánicos, compuestos aromáticos y poliaromáticos, hidrocarburos clorados y agroquímicos.

4.2 METALES PESADOS

Se considera metal pesado a aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a $5g/cm^3$ cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor del 0.01%. junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos que aunque son metales ligeros o no metales se suelen englobar con ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados; es este el caso del As, B, Ba y Se (García y Dorronsoro, 2001).

Dentro de los metales pesados hay dos grupos:

A) Oligoelementos o micronutrientes, que son los requeridos en pequeñas cantidades traza por plantas y animales, y son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital. Pasando cierto umbral se vuelven tóxicos. Dentro de este grupo están : As, B, Co. Cr, Mo, Mn, Ni, Se y Zn (Dorronsoro, 2001; Nedelkoska y Doran, 2000).

B) Metales pesados sin función biológica conocida, cuya presencia en determinadas cantidades en seres vivos lleva a disfunciones en el funcionamiento de sus organismos. Resultan altamente tóxicos y presentan la propiedad de acumularse en los organismos vivos. Son, principalmente: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi.

El contenido de metales pesados en los suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogenéticos que dan lugar al suelo. Pero la actividad humana incrementa el contenido de estos metales en el suelo en cantidades considerables, siendo esta, sin duda, la más frecuente de las concentraciones tóxicas (Garbisu y Alkorta, 2001; García y Dorronsoro, 2001).

Los metales pesados incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías: pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación; pueden ser absorbidos por las plantas y ahí incorporarse a las cadenas tróficas; pueden pasar a la atmósfera por volatilización y pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas (García y Dorronsoro, 2001).

4.2.1 PLOMO

Su símbolo es Pb, su número atómico es 82 y su masa atómica es 207.2 g/mol. El plomo es un metal pesado de color azul-grisáceo, inodoro insípido y no tiene un valor fisiológico conocido (CEC, 1998; Marqués, 1999; WHO, 1977).

El plomo existe naturalmente en la corteza terrestre formando una gran variedad de minerales, entre los que se encuentran principalmente: galena (PbS), anglesita (PbSO4), cerusita (PbCO3) y crocoita ($PbCrO_4$) (F.Q, 2003; Mulligan, 2002; US EPA, 1997; Valdés y Cabrera; 1999; WHO, 1977).

4.2.1.1 Aplicaciones

El plomo es un producto muy importante en la industria moderna. Esta importancia se debe a propiedades como: bajo punto de fusión, alta densidad, baja dureza y resistencia a ácidos (F.Q, 2003).

Los principales usos de este metal y sus compuestos son: en baterías, tetraetilo de plomo (en gasolinas), pigmentos, cerámica, plásticos, municiones, soldaduras, circuitos electrónicos, cubiertas de cables y equipo militar . Además, su uso para atenuar ondas de sonido, radiación atómica y vibraciones mecánicas, va en aumento. En estas últimas aplicaciones, se aprovecha la suavidad y densidad alta del plomo para formar aleaciones que son las que realmente se usan (ATSDR, 2001; Axtel y col. 2003; Brennan y Shelley, 1999; CEC, 1998; F.Q, 2003; Henry,2000; Marqués, 1999; Mata y col. 1996; Mulligan y col. 200; Nastoff y col. 2000; S.A, 2002; Valdés y Cabarera, 2003; WHO, 1977).

4.2.1.2 Efectos en la salud

Cuando el plomo es ingerido, inhalado o absorbido por la piel, resulta ser altamente tóxico para los seres vivos en general y para los humanos en particular (Marqués, 1999; Mata y col. 1996; Nastoff y col. 2000; Wagner, 1996; WHO, 1977).

La eliminación del plomo se efectúa por la orina, las secreciones gastrointestinales y otras vías como el sudor. Cuando la cantidad de plomo absorbida supera a la eliminada se produce acumulación de plomo en higado, riñones, músculos y cerebro, pero de forma más clara en el tejido óseo (huesos y dientes). Después de un cierto tiempo de exposición afecta principalmente a los sistemas endócrino, cardiovascular, respiratorio, inmunológico, neurológico, reproductor, y gastrointestinal (F.Q, 2003; Henry,2000; Marqués, 1999; Mata y col. 1996; Nastoff y col. 2000; Valdés y Cabrera, 1999; Wagner, 1996; WHO, 1977).

4.2.1.3 Fuentes de contaminación del suelo

La amplia utilización de este metal, la inexistencia de un proceso de eliminación natural y su elevada vida media hacen que se acumulen en los ecosistemas (ATSDR, 2001; Marqués, 1999).

En las áreas rurales y remotas, el plomo presente en el suelo proviene principalmente de fuentes minerales; el plomo tiende a acumularse en los suelos en donde permanece inmóvil durante largo tiempo, las estimaciones de las contribuciones antropogénicas a la contaminación por plomo del suelo a nivel mundial para 1983, señalan que estas equivalen a un total entre 479 mil y 1.113 millones de toneladas anuales, como resultado de actividades industriales, urbanas y agrícolas. La concentración mas alta de plomo generalmente se

localizan la superficie del suelo entre 1 y 5 cm de profundidad (F.Q, 2003; Medina y col. 2001; WHO 1996 b).

Destacan como fuentes importantes de plomo el depósito de las partículas suspendidas en el aire, la disposición de productos comerciales, cenizas de las plantas carboeléctricas, y los desechos urbanos. A ello se suma la contribución de la minería y de las empresas fundidoras de minerales conteniendo plomo. La contaminación del suelo es particularmente alta a los lados de las carreteras por donde circulan vehículos que consumen gasolina conteniendo plomo. También puede ser fuente de contaminación de los suelos el depósito en ellos de los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales con un fuerte contenido de descargas industriales de plomo (ATSDR, 2001; Medina y col. 2001; Pitchel y col. 2000; Xiong, 1997).

La biodisponibilidad del plomo en los suelos depende de la composición de estos, de su acidez, de las especies de plomo presentes en ellos y de otros factores. Se sabe que las plantas pueden incorporarlo a su organismo, al igual que el ganado que ingiere suelos contaminados junto con la hierba. El polvo, sobre todo el que se introduce a los hogares en las áreas de intenso tráfico vehicular o cercanas a fuentes fijas emisoras, puede contener plomo. También la pintura con plomo utilizada intramuros que se descascara puede contribuir a la contaminación intradomiciliaria por este metal y a la exposición humana (ATSDR, 2001; F.Q, 2003; Medina y col. 2001; Valdés y Cabrera, 1999; WHO, 1977).

De acuerdo a la normatividad mexicana el suelo se considera normal cuando contiene 35 mg Pb /kg y se denomina peligroso cuando alcanza 100-300 mg Pb /kg.

4.2.2 CADMIO

Su símbolo es Cd, su número atómico es 48 y su masa atómica es 112,411 g/mol. El cadmio es un metal pesado de color blanco plateado que no es esencial para el crecimiento de animales o plantas (Antón y Lizaso, 2002; FQ, 2003).

No se encuentra nativo. Frecuentemente se presenta en pequeñas cantidades asociado a minerales de cinc, tales como la esfalerita (ZnS). Minerales propios son la greenockita o blenda de cadmio (CdS), la otavita ($CdCO_3$) y la monteponita (CdO) (ATSDR, 2003; FQ, 2003; Mulligan y col. 200; USEPA, 1997).

4.2.2.1 Aplicaciones

El cadmio metálico se emplea en la industria metalúrgica. Sus compuestos se utilizan como pigmentos, como estabilizador de plástico en el PVC y en la fabricación de baterías níquel-cadmio. Se utiliza también en la elaboración de plaguicidas y fertilizantes así como en los reactores nucleares (Antón y Lizaso, 2002; FQ, 2003; Mata y col. 1996; Mulligan y col. 200; WHO, 1996 b).

4.2.2.2 Efectos en la salud

El ser humano incorpora cadmio al organismo vía la inhalación de aire y la ingestión tanto de agua como de alimentos. La mayor parte de la carga total de cadmio acumulada en el organismo se localiza en el hígado y riñones, excretándose la parte no absorbida a través de la orina. La toxicidad del cadmio en los organismos ocurre cuando los iones Cd desplazan los iones de elementos como Zn, en el centro reactivo de enzimas esenciales (Antón y Lizaso, 2002; Jinadasa y col. 1999; WHO, 1992 a).

Las principales afecciones producidas por intoxicación aguda de este elementos son daño alveolar, gástrico y alteraciones reproductivas. Como consecuencia de exposición crónica puede provocar enfisema pulmonar, anemia, alteración del sistema nervioso central y alteraciones del metabolismo mineral (osteoporosis). Es además teratogénico, y sus compuestos están clasificados como probablemente cancerígenos para el hombre (Antón y Lizaso, 2002;WHO, 1996 b; WHO, 1992 a).

4.2.2.3 Fuentes de contaminación del suelo

El cadmio se libera al aire, al suelo y al agua por actividades humanas. Se introduce al suelo a través de residuos sólidos de la producción de metales y de la manufactura de artículos que contienen cadmio; así como de cenizas producto de la incineración de residuos urbanos; está también presente en pequeñas cantidades en los fertilizantes fosfatados, desde donde puede cederse al suelo y de este a los vegetales. Por otra parte, los ríos contaminados con cadmio pueden contaminar al suelo por medio de la irrigación para propósitos agrícolas (Jinadasa y col. 1999; Mejáre y Bülow, 2001; WHO, 1992 b).

La absorción de cadmio por las plantas es la principal ruta de entrada de este metal en la cadena alimentaria, siendo su concentración en el suelo y el pH del mismo los factores determinantes del proceso (Antón y Lizaso, 2002; Mata y col. 19996; WHO, 1992 b).

La normatividad mexicana clasifica al suelo como normal cuando contiene 0.35 mg Cd/kg y se considera un suelo peligroso cuando este nivel aumenta a 3- 5 mg Cd/kg.

4.3 REMEDIACIÓN DEL SUELO

Los metales no se degradan, así que pueden acumularse en el ecosistema a través del tiempo provocando a concentraciones elevadas efectos adversos en la mayoría de los organismos; por ello, se han desarrollado técnicas para remediar a los suelos contaminados con metales (Gardea- Torresdey y col. 2002; Kärenlampi y col, 2000; Kelley y col. 2000).

4.3.1 TÉCNICAS TRADICIONALES

Las técnicas tradicionales de remediación del suelo contaminado con metales pesados generalmente involucran prácticas convencionales de ingeniería civil, aplicadas individualmente o en grupo. En estos procesos físicos, químicos y térmicos principalmente se requiere remover físicamente el suelo del sitio contaminado o bien minimizar el riesgo de exposición (Brennan y Shelley, 1999; McIntyre, 2003). Las técnicas se clasifican en tres grupos.

Contención. Incluye a las técnicas denominadas de cobertura, barreras verticales y barreras horizontales. Al aplicar estos procesos el material contaminado se mantiene es su lugar, de manera que no entra en contacto con personas ni con el medio ambiente (McIntyre, 2003; Mulligan y col. 2001; Seoane, 1999;US EPA, 1997).

Solidificación y Estabilización. Es el grupo de procesos en los que se mezclan o inyectan agentes de tratamiento al material contaminado para obtener residuos sólidos, reducir la solubilidad del contaminante, disminuir el área de contaminación expuesta o limitar el contacto entre fluidos y contaminantes. En esta categoría se incluyen técnicas como mezcla con cemento, encapsulación con polímeros y vitrificación (Mulligan y col. 2001; Seoane, 1999; US EPA, 1997; USEPA, 2003 c).

Separación y Concentración. A esta categoría pertenecen las técnicas de lavado del suelo, enjuague in situ y pirometalurgia (McIntyre, 2003; Mulligan y col. 2001; Seoane, 1999; US EPA, 1997; US EPA, 2003b).

Las técnicas de remediación antes mencionadas tienen como desventajas un alto costo, elevado consumo de energía, destrucción del sitio contaminado y problemas de logística (Cunningham y col. 19995; Henry, 2000; Kärenlampi y col. 2000; McIntyre, 2003; Nedelkoska y Doran, 2000; Susarla y col. 2002).

Debido a las limitaciones que presentan las tecnologías tradicionales de remediación surge la necesidad de utilizar técnicas alternas como la fitorremediación (Nedelkoska y Doran, 1999; Raskin y col. 1997).

4.4 FITORREMEDIACIÓN

La fitorremediación emplea plantas para remover, degradar o contener a contaminantes localizados en suelos, sedimentos, aguas subterráneas, aguas superficiales y aún en la atmósfera (Chaney y col. 1997; Dietz y Schnoor, 2001; Dushenkov, 2003; Garbisu y Alkorta, 2001; Gisbert y col. 2003; Lasat, 2000; Lombi y col. 2001; Ouyang, 2002; Raskin y col. 1997; Salt, 1998; Susarla y col. 2002).

Las plantas se utilizan para tratar a contaminantes como metales pesados, derivados de petróleo, solventes clorados, pesticidas, compuestos radioactivos, explosivos y nutrientes en exceso. Estas plantas pueden ser hierbas, arbustos y árboles (Dietz y Schnoor, 2001; Garbisu y Alkorta, 2001; Incorvia y col. 2003; Lasat, 2000; Ouyang, 2002; Pitchel y col. 2000; Raskin y col. 1997; Susarla y col. 2002; US EPA, 1999).

4.4.1 VENTAJAS

Aplicación *In Situ* y *Ex Situ*, la aplicaciones *In Situ* disminuyen la cantidad de suelo perturbado en comparación con los métodos convencionales, disminución de la cantidad de residuos destinados a confinamiento (superior al 95%), las aplicaciones *In Situ* diminuyen la diseminación de contaminación a través del aire o el agua, no se requiere de equipos costosos ni de personal altamente capacitado, fácil de implementar y de mantener, bajos costos en comparación con los tratamientos convencionales (Henry, 2000; McIntyre, 2003; Susarla y col. 2002; Raskin y col. 1997).

4.4.2 LIMITACIONES

Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta, puede llevar varios años remediar un sitio contaminado, está limitado a sitios con baja concentración de contaminantes, la biomasa de las plantas cosechadas en el tratamiento de fitoextracción pueden ser clasificadas como residuos peligrosos, depende de las condiciones climáticas y la introducción de especies no nativas puede afectar la biodiversidad (Cunningham y col. 1995; Henry, 2000; Khan y col. 2000; McIntyre, 2003; Raskin y col. 1997).

4.4.3 FITORREMEDIACIÓN Y METALES PESADOS

De los diferentes procesos de fitorremediación solo cuatro son relevantes para la fitorremediación de metales: fitoextracción, fitoestabilización, rizofiltración y fitovolatilización (Henry, 2000).

4.4.3.1 Fitoextracción

También llamada fitoacumulación, se refiere a la absorción de los contaminantes por la raíz de la planta y su translocación a las porciones superiores de la misma. Las plantas se distribuyen en el sitio contaminado y transcurrido un tiempo, se cosechan para ser incineradas; si los metales tienen valor comercial pueden ser extraídos de las cenizas. El procedimiento se realiza tantas veces como sea necesario para descender hasta niveles permisibles contaminantes como Ag, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn (Brennan y Shelley, 1999; Chaney y col. 1997; Dietz y Schnoor, 2001; Garbisu y Alkorta, 2001; Henry, 2000; Jarvis y col. 2002; Khan y col. 2000; Lasat, 2002; Madrid y col. 2003; McGrath, 2001; Raskin y col. 1997; Susarla y col. 2002; US EPA, 1999; US EPA 2000).

4.4.3.2 Fitoestabilización

Es el uso de ciertas plantas para inmovilizar contaminantes en el suelo, sedimentos y lodos a través de su absorción y acumulación en la raíz, adsorción a la raíz o precipitación en la rizósfera. Por medio de este proceso se reduce la mobilidad de los contaminantes y previene la migración de los mismos al agua o al aire; además disminuye la biodisponibilidad de los metales para su entrada a la cadena alimenticia. Existen reportes de la aplicación de esta técnica a sitios contaminados con Pb, Cd, As, Cr, Cu, Hg y Zn (Chaney y col. 1997; Dietz y Schnoor, 2001; Garbisu y Alkorta, 2001; Henry, 2000; Madrid y col. 2003; McGrath, 2001; Raskin y col. 1997; Susarla y col. 2002; US EPA, 1999; US EPA 2000; Wong, 2003).

4.4.3.3 Rizofiltración

Este proceso se utiliza fundamentalmente para remediar aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas residuales. Implica la adsorción, precipitación o absorción de los contaminantes por las raíces de las plantas acuáticas o terrestres. Una vez que se ha desarrollado el sistema radicular, las plantas se aclimatan con agua contaminada y posteriormente se plantan en el área designada. Cuando las raíces de las plantas se saturan de contaminantes como Pb, Cd, Cu, Ni, Zn o Cr, estas se cosechan e incineran para el posterior reciclado de los metales (Chaney y col. 1997; Dietz y Schnoor, 2001; Garbisu y Alkorta, 2001; Henry, 2000; Raskin y col. 1997; US EPA, 1999; US EPA 2000).

4.4.3.4 Fitovolatilización

Involucra el uso de plantas para absorber a los contaminantes , transformarlos a formas volátiles y por transpiración liberarlos a la atmósfera. La fitovolatilización se aplica generalmente en agua subterránea aunque también puede utilizarse en suelo, sedimentos y lodos contaminados con Se, Hg o As (Chaney y col. 1997; Dietz y Schnoor, 2001; Henry, 2000; Raskin y col. 1997; Susarla y col. 2002; US EPA, 1999; US EPA 2000).

4.4.4 MECANISMOS DE RESISTENCIA A METALES

Los vegetales que crecen en sitios contaminados han desarrollado mecanismos de tolerancia a su medio ambiente, a la fecha dichos mecanismos no son comprendidos en su totalidad; sin embargo, las posibles estrategias se clasifican dentro de dos categorías.

Exclusión. Implica la formación de compuestos bioquímicos complejos en el medio ambiente o en la pared celular de las plantas; precipitación de metales en el exterior, a través de secreción de mucílagos y otros compuestos orgánicos; alteración de los sistemas de membrana del transporte para reducir la entrada de metales y aumento en la actividad de ciertas bombas iónicas (Lasat, 2002; Maiti y col. 2002; McGrath y col. 2001; Mejáre y Bülow, 2001; Raskin, 2000; Salt y col. 19998).

Inclusión y acumulación. Comprende la captura en el interior de las células donde no tienen efectos tóxicos como en la vacuola y la pared celular; destoxificación interna de los metales a través de la incorporación de proteínas, ácidos orgánicos, histidina y péptidos ricos en grupos tiol denominados fitoquelatinas; reacciones de óxido reducción las cuales cambian el estado reactivo del metal a una forma menos tóxica (Chaney y col. 1997; Garbisu y Alkorta; 2001 Lasat, 2002; Maiti y col. 2002; McGrath y col. 2001; Mejáre y Bülow, 2001; Salt y col. 1998).

4.4.5 ACUMULACIÓN DE METALES EN LAS PLANTAS

De acuerdo a Clemens y col. (2002), el proceso de acumulación de metales involucra en general a los siguientes mecanismos:

a) Los iones alcanzan la zona de absorción de la raíz por difusión a través de la solución salina del suelo, son arrastrados por el movimiento del agua hacia la raíz o entran en contacto con las zonas de absorción a medida que la raíz crece. (Fernández y Maldonado, 2000). Los iones metálicos son movilizados por la secreción de quelantes o por la acidificación de la rizósfera.

b) Las raíces capturan a los metales hidratados o a los complejos metal-quelante por medio de sistemas de transporte como bombas primarias, canales iónicos y transportadores. Dentro de las células los metales son quelados principalmente por fitoquelatinas; el exceso de metales es transportado a la vacuola.

c) Los metales se transportan de las raíces a la parte aérea vía el xilema, dentro de él los metales se presentan como iones hidratados o como complejo metal-quelante principalmente con histidina y ácido cítrico como ligantes.

d) Después de penetrar al apoplasto de las hojas, los metales se distribuyen dentro de las célula, manteniendo en cada organelo las concentraciones dentro de rangos fisiológicos específicos. El exceso de metales esenciales y no esenciales (como Pb y Cd) se almacena en las vacuolas.

4.4.6 PLANTAS HIPERACUMULADORAS DE METALES PESADOS

Las plantas denominadas fitorremediadoras, poseen como atributos ideales la capacidad para acumular el (los) metal (es) de interés, preferiblemente en la parte superior de la planta; son tolerantes a la concentración del metal acumulado; crecen rápido; generan elevada producción de biomasa; resultan fácilmente cosechables y contienen sustancias que impide que los herbívoros las consuman, para prevenir la transferencia de metales pesados a la cadena alimenticia (Garbisu y Alkorta, 2001; Gisbert y col. 2003; Kärenlampi y col. 2000; McIntyre, 2003).

Dentro de las plantas fitorremediadoras destacan las plantas llamadas hiperacumuladoras, la cuales son capaces de crecer en suelos contaminados con metales tóxicos y acumularlos a niveles extraordinariamente elevados. Por definición las plantas hiperacumuladoras de Pb, Ni , Co y Cu, son aquellas capaces de acumular en la parte aérea mas de 1000 mg/kg de peso seco; en tanto que las plantas hiperacumuladoras de Cd acumulan 100 mg/kg de peso seco. Se han reportado mas de 400 diferentes especies de plantas hiperacumuladoras (Chaney y col, 19997; Gisbert y col. 2003; Lasat, 2002; McGrath y col. 2001; Piechalak y col. 2002; Raskin y col. 1997; Salt y col. 1998; Wong, 2003) .

En la Tabla 1 se muestra algunos ejemplos de plantas capaces de acumular cuatro o más metales, incluyendo plomo y cadmio (McIntyre, 2003).

Tabla 1. Plantas capaces de acumula cuatro o mas metales. (Adaptado de McIntyre, 2003).

NOMBRE CIENTÍFICO	NOMBRE COMÚN	NÚMERO DE ELEMENTOS	ELEMENTOS
Plantas Acuáticas			
Azolla filicuiloides	Helecho acuático	4	Cu, Ni, Mn, Pb
Bacopa monnieri	Bacopa	5	Cd, Cr, Cu, Hg, Pb
Eichornia crassipes	Jacinto de agua	6	Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn
Hydrilla verticillata	Maleza acuática	4	Cd, Cr, Hg, Pb
Lemma minor	Lenteja de agua	4	Cd, Cu, Pb, Zn
Pistia stratiotes	Lechuga de agua	4	Cd, Cr, Cu, Hg
Salvinia molesta	Salvinia	4	Cr, Ni, Pb, Zn
Spirodela polyrrhiza	Flores de agua	5	Cd, Cr, Ni, Pb, Zn
Vallisneria americana	Valisneria lisa	4	Cd, Cr, Cu, Pb
Plantas de ornato			
Brassica juncea	Mostaza	7	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, U, Zn
Helianthus annus	Girasol	4	Cs, Pb, Sr, U
Plantas terrestres			
Agrostis castellana	Vallico	5	Al, As, Mn, Pb, Zn
Thlaspi caerulescens	Carraspique	7	Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn
Athyrium yokoscense	Helecho	4	Cd, Cu, Pb, Zn

4.4.7 COSTOS DE FITORREMEDIACIÓN

Diversos autores mencionan que una de las principales ventajas de la fitorremediación sobre otras técnicas es su bajo costo (ITRC, 2001; US EPA, 2001;). En la Tabla 2 se muestran los costos de fitoextracción para metales.

Tabla 2. Costos de fitoextracción para metales. (Adaptado de ITRC, 2001).

TIPO DE TRATAMIENTO	COSTO/ m^3 ($)	TIEMPO REQUERIDO (meses)
Estabilización	90 – 200	6 – 9
Cobertura	100 – 400	6 – 9
Extracción del suelo y lavado	250 – 500	8 – 12
Fitoextracción	15- 40	16 - 60

4.5 ACELGA

La acelga pertenece a la Familia de las Quenopodiáceas. Es una planta bianual y de ciclo largo. Las hojas constituyen la parte comestible.

La acelga es una planta de clima templado, que crece bien con temperaturas medias; le perjudica bastante los cambios bruscos de temperatura (Infoagro, 2002).

La planta se hiela cuando las temperaturas son menores de 5°C bajo cero y detiene su desarrollo cuando las temperaturas bajan de 5°C por encima de cero. En el desarrollo vegetativo las temperaturas están comprendidas entre un mínimo de 6°C y un máximo de 27° a 33° C, con un medio óptimo entre 15° y 25°. Las temperaturas de germinación están entre 5°C de mínima y 30° a 35°C de máxima, con un óptimo entre 18° y 22° C.

No requiere excesiva luz, perjudicándole cuando esta es elevada, si va acompañada de un aumento de la temperatura .

La acelga necesita suelos de consistencia media; crece mejor cuando la textura tiende a arcillosa que cuando es arenosa. Requiere suelos profundos, permeables, con gran poder de absorción y ricos en materia orgánica en estado de humificación (Infoagro, 2002).

Es un cultivo que soporta muy bien la salinidad del suelo, resistiendo bien a cloruros y sulfatos, pero no tanto al carbonato sódico. Requiere suelos algo alcalinos, con un pH óptimo de 7.2, creciendo en buenas condiciones en los comprendidos entre 5,5 y 8, no tolerando los suelos ácidos (Infoagro, 2002).

La longitud de la hoja es un indicador visual del momento de la cosecha (25 cm), siendo el tiempo otro parámetro, 60 – 70 días el primer corte y después cada 12 a 15 días.

4.6 FRIJOL

Dentro del grupo de las especies leguminosas, el frijol común es una de las más importantes. Es una planta anual, herbácea intensamente cultivada desde la zona tropical hasta las templadas (BVS, 2002).

El cultivo necesita entre 300 a 400 mm de lluvia, la falta de agua durante las etapas de floración, formación y llenado de vanas afecta seriamente el rendimiento.

El exceso de humedad afecta el desarrollo de la planta y favorece el ataque de gran número de enfermedades. Se recomienda que los suelos para el cultivo de frijol sean profundos, fértiles, preferiblemente de origen volcánico con no menos de 1.5% de materia orgánica en la capa arable y de textura liviana con no más de 40% de arcilla como los de textura franco, franco limoso y franco arcilloso ya que el buen drenaje y la aeración son fundamentales para este cultivo(BVS, 2002).

Se debe evitar sembrar en suelos ácidos, con contenidos altos en manganeso y aluminio y bajos en elementos menores. El pH óptimo para frijol está comprendido entre 6.5 y 7.5 aunque es tolerante a pH entre 4.5 y 8.2 (BVS, 2002).

4.7 PEREJIL

El perejil, *Petroselinum savitum*, es una umbelífera bianual que se cultiva por sus hojas. Tiene raíces profundas (Infoagro, 2002)

Aunque el perejil se cultiva en los climas cálidos , resiste bien el frío. En consecuencia, se puede cultivar, prácticamente en todo tipo de climas.

Si bien los suelos gumíferos son los mas indicados, se adapta a cualquier tipo de terreno. Prefiere los profundos, sueltos, frescos, provistos de materia orgánica muy descompuesta y limpios de malas hierbas. En tierras ligeramente ricas en materia orgánica, que se rieguen regularmente, puede producir buenos rendimientos (Infoagro, 2002).

El suelo debe ser neutro, no tolerando un pH inferior a 6.5, ni superior a 8.

La recolección comienza a realizarse más o menos a los tres meses de nacidas las plantas en las siembras de invierno y a los dos en las de verano. El cultivo dura aproximadamente un año.