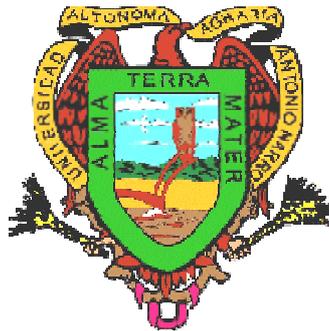


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”.
UNIDAD LAGUNA**

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS.



**FITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR PLOMO
(Pb), CADMIO (Cd) Y ARSÉNICO (As) MEDIANTE LA ESPECIE
VEGETAL *Nicotiana glauca* G.**

POR

NATALIA BELÉN ORTEGA MORALES.

TESIS:

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

Torreón Coahuila, México.

Febrero, 2009.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”.
UNIDAD LAGUNA**



DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS.

**FITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR PLOMO (Pb),
CADMIO (Cd) Y ARSÉNICO (As) MEDIANTE LA ESPECIE VEGETAL
Nicotiana glauca G.**

POR

NATALIA BELÉN ORTEGA MORALES.

ASESOR PRINCIPAL

DR. MARIO GARCIA CARRILLO.

Torreón Coahuila, México.

Febrero, 2009.

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"
UNIDAD LAGUNA**

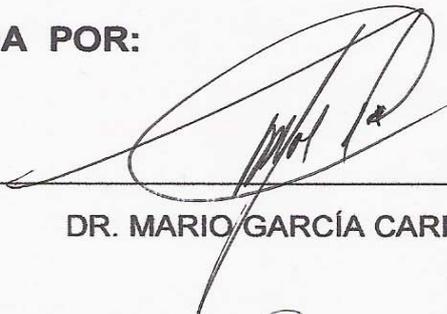
DIVISIÓN DE CARRERAS AGRÓNOMICAS.

**FITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR PLOMO (Pb),
CADMIO (Cd) Y ARSÉNICO (As) MEDIANTE LA ESPECIE VEGETAL
Nicotiana glauca G.**

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

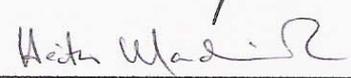
APROBADA POR:

ASESOR PRINCIPAL



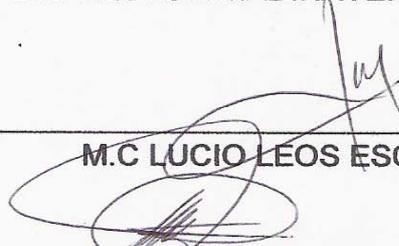
DR. MARIO GARCÍA CARRILLO.

VOCAL:



DR. HECTOR MADINAVEITIA RÍOS.

VOCAL:



M.C. LUCIO LEOS ESCOBEDO.

VOCAL SUPLENTE:

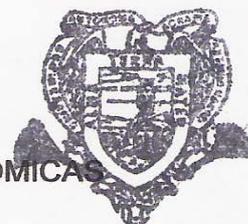


ING. JOEL LIMONES AVITIA



M.C. VICTOR MARTINEZ CUETO.

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONOMICAS



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"**

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS.

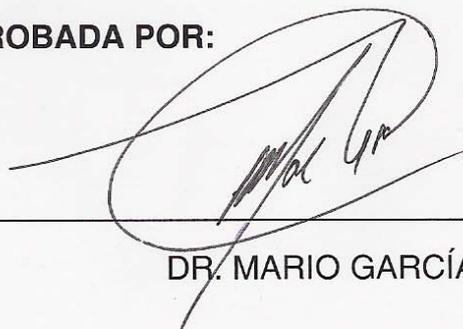
**FITORREMEDIACIÓN DE SUELO CONTAMINADO POR PLOMO (Pb),
CADMIO (Cd) Y ARSÉNICO (As) MEDIANTE LA ESPECIE VEGETAL
Nicotiana glauca G.**

**TESIS DE LA C. NATALIA BELÉN ORTEGA MORALES QUE SE SOMETE A LA
CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ PARTICULAR DE ASESORIA Y APROBADA
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

INGENIERO EN PROCESOS AMBIENTALES

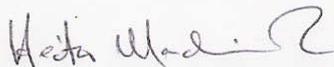
APROBADA POR:

ASESOR PRINCIPAL



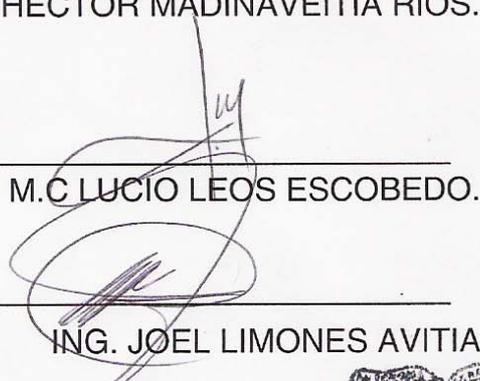
DR. MARIO GARCÍA CARRILLO.

COASESOR:



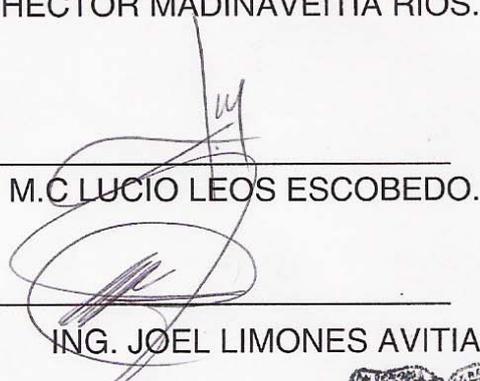
DR. HECTOR MADINAVEITIA RÍOS.

COASESOR:

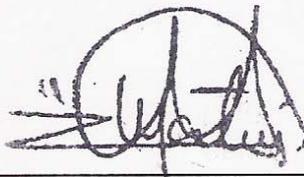


M.C LUCIO LEOS ESCOBEDO.

COASESOR SUPLENTE:

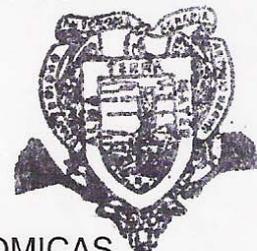


ING. JOEL LIMONES AVITIA



M.C VICTOR MARTÍNEZ CUETO.

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONOMICAS



Coordinación de la División
de Carreras Agronómicas

DEDICATORIA

A DIOS por que sin el no existiría nada, por el simple hecho de haberme dado la oportunidad de estar en este mundo, por ser mi fortaleza en mis momentos difíciles, por permitirme gozar de salud y simplemente por la oportunidad de vivir. Y por ahora darme la oportunidad de llegar a este momento cumpliendo uno de mis sueños.

A mis padres: Federico Ortega Lozano y Lourdes Morales Avitia, por la vida que me han dado, por todo su amor incondicional, sus consejos y su motivación a alcanzar mis sueños y metas.

A mi hermano Aldo: por todas las vivencias de nuestra infancia y por ser mi inspiración y motivación de seguir adelante.

A toda mi familia: por su cariño y sus consejos.

A mis amigos; por su amor incondicional, por las risas, lagrimas y momentos compartidos, por ser una motivación y quitarme mil veces el aburrimiento.

Dedico este trabajo a un gran maestro y amigo al **Ing. Luis Ángel Bazaldúa Zurita** por sus consejos y orientación que quedaran siempre en mi corazón, descanse en paz.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS primeramente por permitirme culminar mis sueños, por la vida que me ha brindado, y por que me acompañe en mi destino.

A mi “Alma Terra Mater” por cobijarme en su seno y darme las herramientas necesarias para un mejor futuro.

A mis padres: por estar siempre conmigo y ser tan excelentes padres los quiero mucho.

Al Doc. Mario García Carrillo por haber aceptado ser mi asesor, y por todo su apoyo y orientación para poder realizar este proyecto compartiendo sus conocimientos y experiencia conmigo.

Al Doc. Héctor Madinaveitia Ríos: por todos sus consejos y orientación, por haberme prestado artículos y revistas para la realización de mi tesis y haber aceptado ser participe de este trabajo.

Al Ing. Lucio Leos Escobedo: por su orientación y apoyo en el proyecto, por que nos abrió un nuevo panorama y agilizar el convenio con peñoles.

Al MC. Cesar Martínez Lomas por permitirme formar parte de este proyecto y trabajar en conjunto, sus consejos y los esfuerzos hechos.

A mis amigos y compañeros de escuela: Por todos esos lindos momentos que vivimos juntos.

Al Ing. Luis Ángel Bazaldúa Zurita: Por la orientación del presente trabajo se le recordara siempre con mucho afecto.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó para determinar la capacidad de la especie vegetal *Nicotiana glauca* G como planta fitorremediadora en suelos contaminados con metales pesados, tales como Plomo, Cadmio y Arsénico, para el presente estudio se utilizó un suelo de experimentación altamente contaminado con los metales pesados antes mencionados, este suelo fue proporcionado por la empresa metalúrgica Met-Mex Peñoles de Torreón Coahuila, con la cual se trabajó en convenio con la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro donde se llevó a cabo la investigación.

La planta *Nicotiana glauca* G logró absorber metales pesados en su biomasa, además que esta especie demostró ser altamente resistente y adaptativa pese a fenómenos climáticos y adversidades que surgieron en el lapso de evaluación de la planta.

Palabras clave: Fitorremediación, metales pesados, plomo, cadmio, arsénico, *Nicotiana glauca* G

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	vii
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1OBJETIVOS.....	3
1.1.1Objetivo General.....	3
1.1.2Objetivo Específico.....	3
1.1.3Hipotesis.....	3
II.-REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1 Minería.....	4
2.2 Met-Mex Peñoles.....	4
2.3 Historia De Penoles.....	5
2.4 Primera Queja.....	5
2.5 Contaminación causada por la Industria minera.....	6
2.6 Problemática Ambiental.....	7
2.7 Panorama de la problemática.....	7
2.8 Contaminación.....	8
2.9 Contaminantes.....	8
2.10 Metales Pesados.....	8
2.11 Concentraciones naturales de los elementos.....	11
2.12 Metales pesados y su bioacumulacion.....	11
2.13 Disponibilidad de los metales pesados en el suelo.....	12
2.14 Movilización de metales pesados.....	12
2.2 El Plomo.....	13
2.2.1 Efectos del plomo en la salud.....	14
2.2.2 Efectos del plomo en la vegetación.....	16
2.2.3 Transporte y destino ambiental del plomo.....	16
2.2.4 Normatividad del plomo en el suelo.....	17
2.2.5 Normas del plomo para los trabajadores.....	17
2.3 El arsénico.....	18
2.3.1 Arsénico en el ambiente.....	20
2.3.2 Eliminación del arsénico del agua.....	20
2.3.3 El arsénico en la salud.....	21
2.3.4 Movimiento del arsénico.....	22
2.3.5 Normatividad del arsénico en el suelo.....	22

2.4 Cadmio.....	23
2.4.1 Cadmio en la Industria.....	23
2.4.2 Cadmio en el ambiente.....	24
2.4.3 Cadmio en la salud.....	25
2.4.4 Legislación.....	26
2.4.4.1 Agua.....	26
2.4.4.2 Suelo.....	27
2.4.5 Movilización del cadmio en el suelo.....	27
2.5 Remediación.....	28
2.5.1 Tecnologías de remediación fisicoquímicas.....	28
2.5.2 Biorremediación.....	29
2.5.2.1 Tecnologías IN SITU.....	30
2.5.2.2 Tecnologías EX SITU.....	30
2.6 Fitorremediación.....	30
2.7 Plantas híper acumuladoras de metales pesados.....	35
2.8 Mecanismos para la absorción y translocación de metales pesados en las plantas.....	36
2.9 Nicotiana glauca G.....	38

III. MATERIALES Y MÉTODOS.....39

3.1 Localización Geográfica.....	39
3.2 Desarrollo del experimento.....	39
3.2.1 Selección de la especie vegetal.....	39
3.2.2 Recolección, Siembra y Germinación.....	39
3.2.3 Primer trasplante en invernadero.....	40
.....3.2.4 Riego en invernadero.....	40
.....3.2.5 Temperatura.....	40
3.2.6 Recolección de suelo contaminado en Met-Mex Peñoles.....	41
3.2.7 Preparación de sustratos para el segundo trasplante.....	41
3.2.8 Segundo trasplante (sombreadero) con suelo contaminado.....	41
3.3 Riego fuera de invernadero.....	42
3.4 Análisis para determinar concentraciones de metales pesados en el agua de riego.....	42
3.5 Primer análisis de suelo.....	42
3.6 Análisis Vegetal.....	42
3.6.1 Primer análisis vegetal.....	42
3.6.2 Segundo análisis vegetal.....	43
3.6.3 Tercer análisis vegetal.....	43
3.6.4 Cuarto análisis vegetal.....	44
3.7 Segundo Análisis del Suelo.....	43
3.8 Diseño Experimental.....	44
3.9 Tratamientos.....	44

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
4.1 Concentraciones iniciales y finales de los metales pesados en el suelo.....	45
4.2 Evaluación físico-químico del suelo.....	46
4.3 Evaluación del agua de riego.....	47
4.4 Concentraciones de plomo, arsénico y cadmio (Nicotiana glauca G.) a nivel raíces, tallos y hojas.....	49
4.5 Absorción y acumulación total de Plomo, Arsénico y Cadmio en Nicotiana glauca G.....	55
4.6 Concentraciones de Plomo, Arsénico y Cadmio en Nicotiana glauca G en Tratamiento 1.....	54
VI. CONCLUSIONES.....	59
VII. RECOMENDACIONES.....	60
VIII. BIBLIOGRAFIA.....	62

INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadro 1. Concentraciones iniciales y finales de metales en el suelo a una profundidad de 0-15 cm y en el lixiviado.....	45
Cuadro 2. Resultado del análisis de las características físico-químicas del suelo (profundidad 0-15).....	46
Cuadro 3. Concentraciones de los elementos químicos presentes en el agua de riego empleada en macetas con suelo contaminado con Pb, As, Cd.....	48
Cuadro 4. Resultados de la concentración de Plomo (mg/kg) encontrado en los diferentes meses y diferentes partes de la planta <i>Nicotiana glauca</i> G.....	49
Cuadro 5. Absorción de arsénico (mg/kg) encontrado en los diferentes meses y diferentes partes de la planta <i>Nicotiana glauca</i> G.....	50
Cuadro 6. Absorción de cadmio (mg/kg) encontrado en los diferentes meses y diferentes partes de la planta <i>Nicotiana glauca</i> G.....	50
Cuadro 7. Concentraciones de los metales pesados en las Diferentes partes de la planta y muestreos.....	54
Cuadro 8. Absorción y acumulación total de Plomo, Arsénico y Cadmio en <i>Nicotiana glauca</i> G.....	55
Cuadro 9. Concentraciones de Plomo, Cadmio y Arsénico (mg/kg) en raíces, tallos y hojas de <i>Nicotiana glauca</i> G, (T1).....	57
Figura 1. Comportamiento de la concentración del Plomo en los diferentes meses y partes de la planta.....	49
Figura 2. Comportamiento de la concentración del Arsénico en los diferentes meses y partes de la planta.....	51
Figura 3. Comportamiento de la concentración del Cadmio en los diferentes meses y partes de la planta.....	52

I.-INTRODUCCIÓN

Los metales pesados se han convertido en una amenaza ambiental, esto se debe a algunas de sus características que los vuelven tóxicos: como puede ser por el estado en que se encuentren en contacto con el ambiente, no son química ni biológicamente biodegradables, una vez ya liberados en el ambiente estos pueden permanecer cientos o miles de años, son bioacumulativos, es decir; que estos aumentan su concentración de un producto químico en un organismo biológico en cierto plazo.

Los metales pesados se incorporan a las cadenas tróficas a través de ciclos afectando en gran medida el desarrollo normal y la salud de los vegetales y animales incluyendo al hombre.

Este riesgo se deriva a causas antropogénicas, la contaminación por metales pesados se ha disparado más en los últimos tiempos debido a la industrialización, específicamente las industrias mineras y metalúrgicas.

Met-Mex Peñoles es una empresa metalúrgica fundidora de metales pesados, es una empresa líder mundial en el mercado, en su proceso de producción emite a la atmósfera metales pesados como son el plomo, cadmio y arsénico entre otros los cuales son altamente dañinos al hombre, afectando la salud de las personas aledañas de la empresa provocando una serie de problemas de contaminación ambiental y salud pública en la ciudad de Torreón Coahuila.

La biorremediación es el proceso en el que se emplean microorganismos o plantas capaces de resolver problemas medioambientales como pueden ser degradar o acumular sustancias contaminantes tales como metales pesados y compuestos orgánicos.

Actualmente *Nicotiana glauca* G. es una planta se ha extendido por todo el mundo y ha llegado a todo tipo de ambientes.

Está totalmente adaptada a las condiciones ambientales de la región Lagunera aunque su origen es de Sudamérica.

Genera gran masa por lo que tiene una alta capacidad de acumulación y retención de metales pesados.

Conociendo la problemática en cuanto a los metales pesados de la región se pretende por medio de este trabajo de investigación proponer una alternativa viable para disminuir la magnitud del problema por medio de una especie vegetal conocida como Virginio (*Nicotiana glauca* G).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

Evaluar la capacidad de extracción de metales pesados de la especie vegetal *Nicotiana glauca* G. conocida comúnmente como Virginio en suelos contaminados de la empresa Met-Mex Peñoles, ubicada en la ciudad de Torreón, Coahuila, México.

1.1.2. Objetivos específicos

Determinar la concentración de Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y Arsénico (As) en hojas, tallos y raíces en *Nicotiana glauca* G.

Determinar la concentración inicial de Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y Arsénico (As) en el suelo del estrato 0-15 cm, así como su concentración final al término del proceso.

1.2. HIPÓTESIS

Nicotiana glauca G. acumula significativas cantidades de metales pesados como Plomo, Cadmio y Arsénico en las hojas, tallos y raíces.

La especie vegetal estudiada reduce las concentraciones de Plomo, Cadmio y Arsénico a una profundidad de 0-15 cm del suelo.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Minería

La extracción minera data desde el año 1600, provocando disturbios al medioambiente y generando suelos con limitaciones físicas, químicas y biológicas para el establecimiento de vegetación y riesgos a la salud (Puga, 2006).

El suelo es alterado como resultado de las actividades mineras. Una de las anomalías biogeoquímicas que se generan al momento de la extracción, es el aumento de la cantidad de micro elementos en el suelo convirtiéndolos a niveles de macro elementos los cuales afectan negativamente la biota y calidad de suelo; estos afectan el número, diversidad y actividad de los organismos del suelo, inhibiendo la descomposición de la materia orgánica del suelo (Wong, 2003).

2.2 Met-Mex Peñoles

Met-Mex peñoles es la fundidora y refinadora de plomo más grande en México y en América Latina y la cuarta en el mundo por su nivel de producción, también es la productora de plata más importante en todo el mundo. Se estableció en 1901 en Torreón en la zona conocida como Comarca Lagunera (América, 2004).

2.3 Historia de Peñoles

El Primero de Marzo de 1887, un grupo de 18 entusiastas mineros mexicanos fundó la Compañía Minera de Peñoles con el propósito de explotar tres minas localizadas en la sierra de Peñoles, cercana a un pueblo del estado de Durango de donde tomó su nombre. En el año de 1890, se fundó la Compañía Minera Fundidora y Afinadora de Monterrey, S.A., instalando una Fundición de plomo, la cual inició sus operaciones en 1891. Para el año de 1897 empezó la construcción de instalaciones para la afinación de oro y plata, la construcción fue concluida en 1901. Esta Fundidora y Afinadora se adquirió en 1918 por la Compañía de Minerales y Metales. (<http://intranet/>, 2008.)

2.4 Primera queja

La primera queja documentada oficialmente contra Peñoles data de 1937 (Viniegra et al. 1964); desde entonces han sido recurrentes las quejas de la comunidad sobre las molestias que se atribuyen a las actividades de esta empresa, en especial, irritación de ojos, garganta y olores desagradables; sin embargo, hasta el momento, las acciones correctivas por parte de la empresa han sido lentas, renuentes y definitivamente insuficientes.

En 1961 los trabajadores de Peñoles pusieron una queja ante las autoridades federales de salud; en respuesta a ella, dichas autoridades realizaron dos estudios en 1962 los cuales estuvieron enfocados a evaluar si en la planta y sus alrededores existía contaminación que pudiera ser atribuida a esta empresa. En ellos se encontró que la contaminación atmosférica debida a las emisiones de arsénico, bióxido de azufre y plomo generadas por Peñoles era grave; se demostró que estos contaminantes, en especial los dos últimos, eran dispersados por los vientos dominantes hacia el oeste y el sur de la ciudad

y se documentaron numerosas deficiencias en las operaciones e instalaciones de la planta, así como una exposición severa de los trabajadores a arsénico. Poco después, y posiblemente como consecuencia de estos resultados, la producción de arsénico de esta planta fue descontinuada. (Viniegra *et al.*, 1964; Escobar *et al.*, 1964).

2.5 Contaminación causada por la Industria minera

Las actividades mineras en México tienen más de 450 años y han causado un impacto muy fuerte en el suelo, tanto en las zonas de explotación como en donde se depositan los residuos; el más notable es el enterramiento de grandes áreas de suelo y vegetación. La contaminación del suelo es un problema que ha atraído importantemente la atención de los diferentes grupos de investigación en el mundo, debido al incremento de la contaminación en grandes extensiones de suelos y que ahora resultan peligrosos para el humano y la vida silvestre. Cada vez se considera que el problema de la contaminación del suelo debe de atenderse de manera inmediata, desafortunadamente los costos para remover los contaminantes por métodos fisicoquímicos, han hecho que los industriales ignoren dicho problema (Universidad Autónoma de Zacatecas, 2005).

2.6 Problemática Ambiental

El desarrollo sustentable surge como una forma de atender las necesidades básicas del desarrollo sin afectar el entorno ecológico; enfatiza una visión integral en el que intervienen tres rubros principales de igual importancia entre sí: protección ambiental, eficiencia económica e igualdad social (Flamant *et al.*, 1999; Heitschmidt *et al.*, 2004).

2.7 Panorama de la problemática

El problema en la ciudad de Torreón es provocado principalmente por el plomo, el cadmio y el arsénico, tres elementos altamente dañinos para los humanos; sin embargo, los estudios, las denuncias y ahora las acciones que se han realizado en torno a este problema tienen como actor principal al plomo. En marzo de 1999 las autoridades federales aceptaron que Peñoles era la fuente de las emisiones tóxicas de plomo y dióxido de azufre en la zona. (López, 1999).

Desde mediados de los años setenta, las autoridades de salud de los Estados Unidos reconocieron el envenenamiento por plomo en niños como un problema grave al que llamaron una epidemia silenciosa. Una vez reconocido el problema, el creciente cuerpo de información sobre el daño del plomo a la salud llevó a las autoridades de salud a emitir normas cada vez más estrictas sobre los niveles de este metal en la sangre, mientras que las autoridades del medio ambiente prohibieron el uso de las pinturas basadas en plomo en 1978 y se empezó a sustituir paulatinamente el plomo en las gasolinas a partir de la década de los setenta. Al mismo tiempo, la Ley del Aire Limpio (Clean Air Act) señalaba límites máximos para la concentración del plomo en el aire (América, 2004).

2.8 Contaminación

Es la introducción o presencia de sustancias, organismos o formas de energía en ambientes o sustratos a los que no pertenece o que están en cantidades superiores propias a los dichos sustratos por un tiempo suficiente, y bajo condiciones tales que estas sustancias interfieren en la salud, y la

comodidad de las personas, dañan los recursos naturales o el equilibrio natural de la zona (Albert, 2001).

2.9 Contaminantes

Los efectos más graves de la contaminación ocurren cuando la entrada de sustancias naturales o sintéticas al ambiente rebasa la capacidad de los ecosistemas para asimilarlas y/o degradarlas aunque la contaminación se inició a fines del siglo XVIII, durante la revolución industrial después de la segunda guerra cuando el mundo aumento el consumo de energía. (Sociedad Mexicana de Toxicología A. C. Xalapa, 1992)

2.10 Metales Pesados

Los metales pesados se definen como aquellos elementos que tienen una densidad mayor de 5 g/cm^3 en su forma elemental. Estos están conformados por 38 elementos, pero generalmente son 12 los utilizados más comúnmente y descargados como parte de una serie de residuos al medio ambiente: Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn y Zn. Dos de los contaminantes encontrados con más frecuencia en las zonas mineras del país son el Arsénico y el Plomo, junto con el Cadmio en algunas de ellas. El envenenamiento por metales pesados entre los pobladores de la Comarca Lagunera es provocado por el Plomo, el Cadmio y el Arsénico, tres elementos altamente dañinos para la salud. Sin embargo, los estudios, las denuncias y las acciones que se han realizado en torno a este problema tienen como actor principal al Plomo. Esto no significa que sea el más tóxico de los tres de hecho ocurre lo contrario sino a que, es el que ha sido utilizado por la humanidad más ampliamente y, por ende, causa más problemas y más preocupación en el mundo. (Valdez, 1999)

Los metales son componentes naturales de la corteza terrestre tienen un papel importante en los organismos al ser parte fundamental de sus funciones bioquímicas y fisiológicas (Schuhmacher, 2007).

En general la expresión “metales pesados” se usa cuando hay una connotación de toxicidad. Los metales pesados más comunes por sus efectos tóxicos y porque son fácilmente medibles en muestras marinas son Plomo, Cadmio, Mercurio, Arsénico, Bario, Zinc, Cobre, Hierro y Manganeseo (Ansari, 2004). Generalmente los metales pesados se encuentran en concentraciones muy bajas, aunque la actividad humana ha aumentado sus niveles debido a residuos mineros, extracción de petróleo y gas, industrias (pesticidas, pinturas, cuero, tejidos, fertilizantes, medicamentos, vertidos domésticos y residuos agrícolas. (Lesaca, 1997).

Los metales pesados son principalmente una preocupación porque ellos no pueden ser destruidos por la degradación. Con frecuencia, la nueva mediación de suelos contaminados, aguas subterráneas, y el agua superficial requiere el retiro de metales tóxicos de áreas contaminadas. Los metales pesados más comunes en sitios contaminados son el Cadmio (Cd), el Cromo (Cr), el Cobre (Cu), el Plomo (Pb), el Mercurio (Hg), el Níquel (Ni) y el Zinc (Zn) (Henry, 2000).

El problema de la contaminación por metales tóxicos surge como resultado de actividades humanas, principalmente de la industria, agricultura y de la eliminación de residuos mineros. Estos contaminantes son descargados al medio ambiente alcanzando concentraciones por encima de los valores permisibles por legislaciones internacionales (WHO, 1992).

Algunos metales pesados son esenciales para la vida y otros son beneficiosos, pero muchos son altamente tóxicos. Las concentraciones en las cuales los metales pueden ser considerados tóxicos cambian de una especie a otra, para una especie, un elemento es esencial en niveles bajos, puede ser tóxico para otras. Los criterios para establecer si o no un metal pesado es esencial para el crecimiento normal de plantas y/o los animales incluyen: El organismo no puede crecer ni puede completar su ciclo biológico sin un suministro adecuado del metal. El metal no puede ser totalmente reemplazado por otro metal. El metal tiene una influencia directa en el organismo y está involucrado en su metabolismo. Además de C, H, O, N, P, K y S, los elementos que se ha demostrado que son esenciales para los vegetales son: Al, B, Br, Ca, Cl, Co, Cu, F, I, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Rb, Si, Ti, V, Zn. Los oligoelementos esenciales que con más probabilidad pueden provocar problemas de deficiencia en vegetales son: B, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn.

Los metales pesados considerados tóxicos cumplen con los siguientes criterios:

- *Son relativamente abundantes en la corteza continental
- *Son extraídos y usados en procesos industriales.
- *Son tóxicos al ser humano.
- *Causan perturbaciones a los ciclos biogeoquímicos.

Aun así todas las especies dependen de metales en su dieta para mantenerse vivos y reproducirse. (Bruland, Ansari, 2002)

2.11 Concentraciones naturales de los elementos

La abundancia natural de los elementos químicos en la superficie de la tierra está relacionada con la síntesis de los elementos de las estrellas, la separación de la corteza continental, y de la atmosfera del manto de la tierra

durante la historia geológica. La transformación de la corteza de la tierra por la interacción entra agua, roca y atmosfera. (Morton, 2006)

2.12 Metales pesados y su bioacumulación

La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación. De hecho, la toxicidad de estos metales ha quedado documentada a lo largo de la historia: los médicos griegos y romanos ya diagnosticaban síntomas de envenenamientos agudos por plomo mucho antes de que la toxicología se convirtiera en ciencia. (Medio Ambiente, 2001)

Lo que hace tóxicos a los metales pesados no son en general sus características esenciales, sino las concentraciones en las que pueden presentarse, y casi más importante aun, el tipo de especie que forman en un determinado medio (Higueras y Oyarzun, 2008)

2.13 Disponibilidad de los metales pesados en el suelo

La cantidad de metales disponibles en el suelo está en función del pH, el contenido de arcillas, contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y otras propiedades que las hacen únicas en términos de manejo de la contaminación (Kimberly y William, 1999).

Los suelos arenosos contienen menores concentraciones de metales pesados que los suelos arcillosos (Ross, 1994).

2.14 Movilización de metales pesados

La movilización de metales pesados esta relacionada con las condiciones del medio (Martínez *et al*; 1996) de manera que el descenso del pH, los cambios de las condiciones redox o el incremento de las sales inorgánicas o agentes complejantes, naturales o sintéticos, puede aumentar la movilización de estos (Bourg, 1995).

En comparación a la extracción soluble, la efectuada en medio ácido resulta más efectivo en cuanto a la movilización de metales, pues los valores de concentración son muchos más elevados y por ende también los porcentajes de fracción movilizables. Se advierte que el Cadmio es el metal que experimenta una mayor movilización, con un valor medio que ronda el 30 %, seguido de Arsénico (10 %) y finalmente Plomo (1 %), que es el menos móvil (Solano, 2005).

Las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para absorber, traslocar, y acumular nutrientes, sin embargo algunos metales y metaloides no esenciales son absorbidos, traslocados y acumulados en la planta esto debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos requeridos. (Lasat, 2000).

Los iones inorgánicos y el agua (savia bruta) se transportan desde la raíz hasta las hojas mediante una serie células tubulares que pertenecen a un tejido leñoso denominado xilema. La fuerza que mueve esta solución no radica en las células del tejido xilemático, sino en la fuerza propia del proceso de ósmosis y en otra fuerza, menos habitual, conocida como fuerza de succión. La ósmosis se produce porque existe una gran diferencia de concentración entre la parte superior de la planta (hojas, inflorescencias) donde es mayor y la parte inferior, es decir existe un potencial hídrico favorable al impulso ascendente. La fuerza de succión se

produce cuando en las hojas se pierde agua por transpiración, pues las moléculas perdidas producen una succión de nuevas moléculas cercanas para reemplazar a las anteriores, de tal manera que se produce una fuerza que atrae agua desde las raíces hacia las hojas. (AEET, 2007)

2.2 El plomo (Pb)

El plomo es uno de los metales pesados más ampliamente distribuidos en toda la superficie de la tierra y, por consecuencia, el riesgo de exposición de la población en general es muy variado. La forma química del plomo es un factor importante que afecta su comportamiento biológico en el cuerpo humano: los compuestos del plomo orgánico son absorbidos rápidamente a través de la piel o las membranas mucosas y los compuestos de plomo inorgánico son absorbidos primariamente a través del tracto gastrointestinal y respiratorio (INE, 2005).

El plomo es un metal natural gris azulado que se forma en la corteza terrestre. Su símbolo químico es Pb. Su número atómico es 82, y su peso atómico (molecular) 207.20. Tiene una presión a vapor de 1.77 mm Hg a 1000 °C, 10 mm Hg a 1162 °C, 100 mm Hg a 1421°C, y 400 mm Hg a 1630 °C. Del grupo 14, tiene su punto de fusión a 327.4 °C y el de ebullición a 1740 °C. Su peso específico es 11.3 (Expediente de trabajo, 1998).

El plomo existe naturalmente en la corteza terrestre, de donde es extraído y procesado para usos diversos. 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 (Rosen, 1992).

Industrialmente, sus compuestos más importantes son los óxidos de plomo y el tetraetilo de plomo. El plomo forma aleaciones con muchos metales y, en general, se emplea en esta forma en la mayor parte de sus aplicaciones (Lenntech, 2008)

El plomo es un metal metálico, aproximadamente 11 veces más denso que el agua y se obtiene del sulfuro de plomo, que es la forma más abundante de este elemento en la naturaleza (Valdés y Cabrera, 1999).

2.2.1 Efectos del Plomo en la salud

El plomo es muy tóxico para los seres vivos. Afecta a los sistemas endocrino, cardiovascular, respiratorio, inmunológico, neurológico y gastrointestinal, además de afectar la piel y los riñones. No es biodegradable y persiste en el suelo, en el aire, en el agua, en los hogares y en los expuestos a él. La exposición al plomo, aun a niveles bajos, afecta a niños y a adultos. En cantidades muy pequeñas, interfiere con el desarrollo del sistema neurológico, causa crecimiento retardado y problemas digestivos. En casos extremos, causa convulsiones, colapso e incluso la muerte. La exposición a cantidades muy pequeñas puede causar a largo plazo daños medibles e irreversibles en niños aún cuando éstos no muestren síntomas particulares. En los adultos, un nivel bajo de plomo causa incrementos pequeños, pero significativos, en la presión arterial y no existe evidencia de que haya un umbral para este efecto. La hipertensión causada por la exposición al plomo contribuye a la muerte de miles de personas cada año. También afecta la fertilidad (Valdez, 2001).

La intoxicación por plomo en adultos ocurre cuando hay dolor abdominal, anemia o neuropatía (debilidad particularmente en las muñecas) y sucede por la presencia de niveles de plomo elevados en la sangre. En lo que respecta a los

niños, la intoxicación por plomo ocurre cuando el plomo, un metal tóxico, alcanza un nivel de 0.1 ppm. Niveles de 0.20 ppm más, representan un envenenamiento real por plomo (Smoost, 2006).

El límite máximo permisible de plomo en la sangre según la Norma Oficial Mexicana promulgada en Junio de 1999, es de 10 $\mu\text{g/dL}$ (0.1 ppm). Sin embargo es importante resaltar que este nivel no es seguro ni es normal (Valdés y Cabrera, 1999).

Las acciones tóxicas del plomo se atribuyen a su afinidad por los sitios de acción molecular del calcio; el metal actúa como sustituto del calcio en varios eventos regulatorios intracelulares, ya que es capaz de activar las fosfodiesterasas dependientes de la calmodulina y las proteínas cinasas independientes de la misma, teniendo efectos, además, sobre los canales de calcio. Estas reacciones moleculares pueden contribuir a bajas dosis del plomo y a efectos sutiles sobre la función cerebral y la de otros sistemas y aparatos. El depósito de plomo en hueso está influido por prácticamente todos los procesos que afectan el depósito o la movilización del calcio en el mismo, aunque se aclara que, como toda analogía, ésta también tiene sus limitaciones ya que, por ejemplo, la distribución de ambos iones en tejido sanguíneo es muy diferente. El tejido óseo, por ser el principal compartimento mineral del cuerpo humano, se ha convertido en un elemento importante en el estudio de la exposición acumulada a plomo. Los análisis químicos han revelado que, en los adultos, cerca de 95 % del plomo en el cuerpo se almacena en los huesos; en los niños la cifra se aproxima al 70 % (Elena, 1998).

Los síntomas para el envenenamiento por metales pesados varían, dependiendo del tipo de exposición que haya tenido. Fatiga o palidez (por anemia) Irritabilidad, dolor de cabeza, debilidad muscular, problemas para caminar, mala pronunciación, convulsiones o coma, pérdida de apetito, náusea,

vómito, dolor abdominal, dolor articular o artritis gotosa, presión arterial, alta enfermedad renal o insuficiencia, daño de las habilidades mentales, motoras y del lenguaje, daño en el equilibrio, falta de comportamiento, desempeño escolar, memoria y concentración, y retardo mental en los niños (Badash, 2006).

Los efectos de plomo en el cuerpo son los mismos para toda clase de exposiciones. Demasiado plomo en el cuerpo puede dañar el cerebro y el sistema nervioso, la sangre, el sistema digestivo, y el sistema reproductivo (Comisión de calidad ambiental de Texas, 2004).

La eliminación se produce sobre todo por orina y heces. La eliminación urinaria normal es de 10 ppm/24h. No está claro qué proporción del plomo detectado en las heces corresponde a la parte no absorbida (Ferrer, 2003).

2.2.2 Efectos del Plomo en la vegetación

Dado que el plomo es acumulativo, este tiene un movimiento lento dentro de las plantas, pero en altas concentraciones las cuales pueden ser tóxicas para los cultivos, estos pueden presentar un crecimiento lento o no se llegan a desarrollar normalmente (América, 2004).

2.2.3 Transporte y destino ambiental del plomo

Las partículas de plomo en la atmósfera varían en cuanto a tamaño; las más grandes, se depositan rápidamente cerca de la fuente de emisión, y las pequeñas pueden permanecer suspendidas durante periodos más largos y viajar distancias considerables antes de depositarse. Los procesos químicos y

físicos naturales, como la alteración por exposición a la intemperie, escurrimientos y precipitaciones hacen que el plomo se éste transfiriendo constantemente entre el aire, el agua y el suelo (ATSDR, 1993).

Los suelos y sedimentos son importantes depósitos de plomo en el medio ambiente. Históricamente, la deposición atmosférica de plomo ha sido la fuente principal de plomo en el suelo. Este plomo se deposita, por lo general, a una profundidad de 2 a 5 cm de la superficie (EPA, 1986).

2.2.4 Normatividad del plomo en el suelo

Las concentraciones de referencias totales por tipo de usos de suelos para el plomo según la norma oficial mexicana 147- Semarnat/SSA1-2004; establece que para uso agrícola/residencial las concentraciones limites permisibles es de 400 ppm, mientras que para uso industrial las concentraciones limites permisibles es de 700 ppm (Orden jurídico, 2008). El nivel máximo en los Estados unidos es de 500 ppm. (Al Benin, 1999).

La normatividad señalada por la Agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA), para suelos de uso residencial y agrícola es de 400 ppm. (Universidad Autónoma de Zacatecas, 2005).

El valor limite del plomo en suelo, según la normatividad española es de 50-300 ppm. El valor de 50 se emplea en suelos con pH menor a 7, por lo tanto el de 300 se emplea para suelos con pH mayor a 7 (La Caxia, 1995).

2.2.5 Normas del plomo para los trabajadores

El Instituto Nacional de la Seguridad y la Salud Ocupacional consideran plomo al plomo metálico, óxidos de plomo y sales de plomo (incluyendo las sales como los jabones, pero excluyendo el arseniato de plomo). Los límites de exposición recomendados para el plomo (10 horas tiempo promedio) es 0.100 mg/ m³, las concentraciones en el aire deben mantenerse de tal forma que el nivel de plomo en la sangre de los trabajadores permanezca menor a 0.60 mg Pb/100 g de sangre. El Límite de Exposición Permisible (LEP) (8 horas tiempo promedio) es 0.050 mg/m³, para fundidoras de no ferrosos con menos de 20 empleados es 0.075 mg/m³. (NIOSH, 2006).

2.3 El arsénico

Las características del arsénico es que es un elemento metálico cuya simbología es As, su numero atómico 33, masa atómica 74,92159 g/mol, descubierto por Albertus Magnus (Wikipedia, 2008.)

Es el 52º elemento en abundancia de la corteza terrestre, es uno de los 22 elementos conocidos que se componen de un solo nuclido estable. El arsénico se encuentra en forma nativa y, principalmente, en forma de sulfuro en una gran variedad de minerales que contienen cobre, plomo, hierro (arsenopirita o *mispickel*), níquel, cobalto y otros metales.(Wikipedia, 2008.)

Existen tres alótropos o modificaciones polimórficas del arsénico. La forma "A" cúbica de color amarillo se obtiene por condensación del vapor a muy bajas temperaturas. La b polimórfica negra, que es isoestructural con el fósforo negro. Ambas revierten a la forma más estable, la gris metálica, del arsénico

romboédrico, al calentarlas o por exposición a la luz. La forma metálica es un conductor térmico y eléctrico moderado, quebradizo, fácil de romper y de baja ductibilidad (Lenntech, 2008).

El arsénico es un elemento natural ampliamente distribuido en la corteza terrestre. En el medio ambiente, el arsénico se encuentra combinado con oxígeno, cloro y azufre formando compuestos inorgánicos de arsénico. El arsénico en animales y en plantas se combina con carbono e hidrógeno formando compuestos orgánicos de arsénico. Los compuestos inorgánicos de arsénico se usan principalmente para preservar madera. Los compuestos orgánicos de arsénico se usan como pesticidas, principalmente sobre plantas de algodón. (ASTDR, 2001)

Los compuestos inorgánicos de arsénico contienen arsénico (As) y tienen por lo menos otro elemento, pero no carbono (C). Existen cuatro formas químicas principales de arsénico inorgánico que se conocen por valencias o estados de oxidación. A veces se utiliza la forma abreviada "arsénico inorgánico" para referirse a los compuestos inorgánicos. Las formas dominantes son Arsenito, con valencia 3, también se denomina trivalente arsénico (As (III), As+3). Arseniato, con valencia 5, también se denomina pentavalente arsénico (As (V), As+5) Los compuestos inorgánicos de arsénico son principalmente de origen geológico y pueden encontrarse en el agua subterránea que se emplea para el agua de bebida en algunas partes del mundo. (International Programme on Chemical Safety, 2004).

Los compuestos de As (III) inorgánicos, más comunes son, el trióxido de As, el arsenito de sodio y el tricloruro de As. Los compuestos inorgánicos pentavalentes son, el pentóxido de As, el ácido arsénico y los arsenatos tales como: arsenato de plomo y de calcio. Se ha reconocido que la toxicidad del As(III)_i es 10 veces mayor que el As(V)_i y resulta de su habilidad para enlazarse

a grupos sulfhídricos, especialmente a trioles vecinales en las proteínas, produciendo un mal funcionamiento de la actividad enzimática. La toxicidad del As(V) es el resultado de su habilidad para sustituir al fosfato en reacciones catalizadas por enzimas, donde puede impedir el normal funcionamiento de éstas. Estudios reportados por (Albores y col. 1979), realizados en la región lagunera de México, indican que la fuente natural es la principal responsable de la contaminación detectada (Centro de Investigaciones Toxicológicas de la Universidad de Carabobo, 2005).

2.3.1 Arsénico en el ambiente

El arsénico no puede ser destruido en el medio ambiente. Solamente puede cambiar de forma. El arsénico en el aire se deposita en el suelo o es removido del aire por la lluvia. Muchos de los compuestos de arsénico pueden disolverse en agua. Los peces y mariscos pueden acumular arsénico, pero el arsénico en peces está en una forma que no es dañina. En los medios acuáticos, el arsénico existe principalmente en la forma de arseniuros y arseniatos. En los sedimentos y los suelos, los arseniatos son rápidamente absorbidos en forma de hierro o de hidróxido de aluminio, lo que reduce su capacidad y velocidad de percolación así como su disponibilidad para los sistemas biológicos. En las fases acuosas, el arsénico forma precipitados insolubles con un cierto número de elementos (Ca, S, Ba, Al, Fe), lo que resulta en la eliminación de los compuestos de arsénico del agua. En los microorganismos, las plantas y los animales, existe mutilación y reducción de los compuestos del arsénico. Esto favorece la producción de un cierto número de compuestos del arsénico, que son estables físico-química y biológicamente. (Lenntech, 2008).

2.3.2 Eliminación del arsénico del agua

Primeramente es necesario oxidar el As (III) a As (V). Para conseguir esto se puede utilizar peróxido de hidrógeno. A continuación se puede hacer un tratamiento tipo coagulación/floculación, oxidación/filtración, intercambio iónico, aluminio activado, osmosis inversa. (Lenntech, 2008)

2.3.3 El arsénico en la salud

Respirar niveles altos de arsénico inorgánico puede causar dolor de garganta o irritar los pulmones. Ingerir niveles altos de arsénico orgánico puede causar la muerte. Niveles de arsénico más bajos pueden causar náusea y vómitos, educción de la producción de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, daño de los vasos sanguíneos y una sensación de hormigueo en las manos y los pies. Ingerir o respirar niveles bajos de arsénico por largo tiempo puede producir el oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeños callos o verrugas en las palmas de las manos, las plantas de los pies y el torso. El contacto de la piel con arsénico inorgánico puede causar enrojecimiento e hinchazón. Los compuestos orgánicos de arsénico son menos tóxicos que los compuestos inorgánicos de arsénico. La exposición a niveles altos de ciertos compuestos orgánicos de arsénico puede causar efectos similares a los causados por arsénico inorgánico. (ASTDR, 2001).

Organismos internacionales han evaluado con anterioridad el arsénico. Así, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció un valor guía de 10 µg/litro para el arsénico presente en agua de bebida. Según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), hay suficientes pruebas para concluir que el "arsénico y los compuestos de arsénico" causan cáncer a

los seres humanos. (Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas, 2001).

Muchos compuestos de arsénico son rápidamente transformados y eliminados por el cuerpo a través de la orina. Sin embargo, la capacidad de las personas es diferente en el momento de eliminar compuestos de arsénico. Las cantidades de arsénico en el cuerpo se pueden determinar tomando muestras de sangre, orina, pelo o uñas y midiendo el nivel de arsénico o de sustancias que contengan arsénico. Los niveles en orina son los que mejor determinan una exposición reciente, mientras que los niveles en pelo y uñas pueden indicar exposiciones pasadas (International Programme on Chemical Safety, 2004).

2.3.4 Movimiento del arsénico

Las principales vía de entrada del arsénico al organismo son el tracto gastrointestinal que es el mas alto (95 %) y el respiratorio. La absorción por la vía dérmica es baja y alcanza solo el 2 %. Las partículas menores de 7 μm se absorben de un 75 a 85 % (ASTDR, 1993).

Para la remediación de un sitio contaminado por arsénico, el suelo no debe presentar una concentración mayor de 100 mg/Kg. de arsénico esto lo considera la agencia de protección al ambiente de los estados unidos (USEPA) de lo que corresponde al plomo refiere una recomendación para suelo de recreación infantil una máxima de 400mg/Kg. de plomo, y para un suelo común 1200 mg/Kg. de plomo Estas guías para arsénico y plomo fueron seleccionadas como referencia debido a la carencia de normas ambientales mexicanas que establezcan las concentraciones máximas permisibles para recomendar la remediación de suelos en sitios contaminados por metales tóxicos (Marcos G, Monroy Fernández, Díaz Fernando, 2002).

2.3.5 Normatividad del arsénico en el suelo

Los siguientes datos fueron establecidos por la PROFEPA. Los límites máximos permisibles en un suelo de uso residencial es de 20 mg/Kg, para uso industrial su límite máximo permisible es de 40 mg/Kg. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diciembre, 2003)

La norma actual de la EPA para arsénico en agua potable sigue siendo 0.05 ppm (50 ppb). (ASTDR, 2000).

2.4 Cadmio

Elemento químico relativamente raro, símbolo Cd, número atómico 48; tiene relación estrecha con el zinc, con el que se encuentra asociado en la naturaleza. Es un metal dúctil, de color blanco con un ligero matiz azulado. Peso atómico de 112.40 y densidad relativa de 8.65 a 20 °C (68 °F). Su punto de fusión de 320.9 °C (610°F) y de ebullición de 765 °C (1410 °F). Hay ocho isótopos estables en la naturaleza y se han descrito once radioisótopos inestables de tipo artificial. El cadmio es miembro del grupo II b (zinc, cadmio y mercurio) en la tabla periódica, y presenta propiedades químicas intermedias entre las del zinc metálico en soluciones ácidas de sulfato. El cadmio es divalente en todos sus compuestos estables y su ión es incoloro. El cadmio no se encuentra en estado libre en la naturaleza, y la greenockita (sulfuro de cadmio), único mineral de cadmio, no es una fuente comercial de metal. Casi todo el que se produce es obtenido como subproducto de la fundición y refinamiento de los minerales de zinc, los cuales por lo general contienen de 0.2 a 0.4% (Lenntech, 2008).

2.4.1 Cadmio en la industria

El cadmio es un metal pesado de uso industrial frecuente que ha sido clasificado como metal tóxico por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 2007).

El cadmio en la industria se utiliza frecuentemente como agente antifricción, antioxidante, en aleaciones y en la manufactura de conductores eléctricos, galvanoplastia y PVC. Se emplea en la industria cerámica y textil, en la soldadura, como pigmento de pinturas industriales, prótesis dentales, estabilizadores de plásticos y baterías telefonía móvil, también se usa en las industrias de la fotografía, caucho, motores y aviación. Las fundiciones, los hornos de procesamiento de metales y la combustión de hulla y aceite originan gran parte del cadmio que se encuentra en el aire. (Universidad Ceu-San Pablo. Madrid. España, 2008).

2.4.2 Cadmio en el ambiente

En el ambiente, el cadmio es peligroso porque muchas plantas y algunos animales lo absorben y lo concentran dentro de sus tejidos. Las fuentes de contaminación de este metal son diversas, pero podemos destacar las siguientes:

Fuentes naturales: la mayor fuente natural de liberación de cadmio a la atmósfera es la actividad volcánica. El suelo se contamina por este metal a través de los desechos de la fabricación de cementos y a través de residuos sólidos y de aguas residuales municipales. La minería de metales ferrosos, especialmente el zinc, es la principal fuente de liberación de cadmio al medio

acuático, se han llegado a encontrar relaciones de cadmio y zinc de 1:100 a 1:1200 en la mayoría de minerales y suelos.

Fuentes industriales: entre las industrias que utilizan el cadmio, podemos citar la galvanoplastia, baterías, grabados, pigmentos de pinturas y vidrios.

Fuentes agrícolas: algunos pesticidas fosfatados que contenían cadmio, actualmente prohibidos, han aportado concentraciones variables de este metal a algunos alimentos, como por ejemplo el arroz o el trigo.

El cadmio puede entrar en el organismo por distintas vías, siendo las principales: la inhalación, en caso de los trabajadores, o por ingestión, en caso de la población en general. Por inhalación, dependiendo del tamaño de partícula, se absorbe, aproximadamente, el 5 % del cadmio inhalado. (Universidad Ceu-San Pablo. Madrid. España, 2008).

El Cadmio es encontrado mayoritariamente en la corteza terrestre, o bien de las fundadoras ya que es un subproducto del zinc, plomo, y cobre. Y entra al ambiente mayormente a través del suelo. (Lenntech, 2008).

2.4.3 Cadmio en la salud

Las partículas pequeñas de cadmio muy solubles que se absorben de diferentes maneras con una tasa de un 25 a un 50 %. Respecto al aporte oral, diariamente se puede ingerir una media de 20 a 40 g/día, de los cuales, sólo se absorbe entre un 5 a un 10 %. Esta absorción puede aumentar si existe déficit de hierro o de calcio. (Universidad Ceu-San Pablo Madrid. España, 2008).

La toma por los humanos de Cadmio tiene lugar mayormente a través de la comida y también las personas fumadoras han mostrado índices de cadmio. El Cadmio primero es transportado hacia el hígado por la sangre. Allí es unido a proteínas para formar complejos que son transportados hacia los riñones.

Los efectos sobre la salud que pueden ser causados por el Cadmio son:

Diarreas, dolor de estómago y vómitos severos

Fractura de huesos

Fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad

Daño al sistema nervioso central

Daño al sistema inmune

Desordenes psicológicos

Posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer (Lenntech, 2008).

El cadmio que penetra en el organismo, se suele fijar rápidamente a los tejidos, combinándose de forma selectiva con la metalotioneína, una pequeña proteína compuesta de un alto número de residuos de cisteína. La mayor parte de la carga total de cadmio acumulada en el organismo se localiza en el hígado y riñones, unido a dicha proteína. Cuando la capacidad de estos órganos para sintetizar metalotioneína se ve sobrepasada, el cadmio podría ejercer su efecto tóxico, cuyas primeras manifestaciones son las propias de una nefropatía. En intoxicaciones crónicas son habituales las osteopatías, que parecen estar relacionadas con una alteración del metabolismo del calcio. Algunos tipos de cáncer relacionados con el aparato reproductor masculino también pueden ser inducidos por el cadmio. (Universidad Nacional del Noroeste, 2003).

2.4.4 Legislación

Las normas de Ley de Residuos Peligrosos" es la ley 24.051, sancionada el 17 de diciembre de 1991 y La Ley de Protección Ambiental Para la Actividad Minera, incorporados al Código de Minería de la Nación". El anexo IV "Niveles Guía de Calidad de Agua, Suelo y Aire", posee los siguientes niveles de calidad:

2.4.4.1 Agua

Bebida Humana: 5 mg/litro.

Protección de Vida Acuática en Agua Dulce Superficial: 0,2 mg/litro.

Protección de Vida Acuática en Aguas Saladas Superficiales: 5 mg/litro.

Para Irrigación: 10 mg/litro.

Bebida de Ganado: 20 mg/litro. (PROFEPA, 2008).

2.4.4.2 Suelo

Agrícola: 3 mg /gr de peso seco

Industrial: 20 mg /gr de peso seco (PROFEPA, 2008).

La O.M.S (1993) indica que el Cd es el segundo elemento considerado peligrosamente tóxico. (Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2005).

La Legislación Nacional de Argentina Vigente establece como valor máximo, para suelos que sean utilizados con fines agrícolas, 375 ppm para Pb y 3 ppm para Cd (Universidad Nacional de San Juan Argentina, 2005).

En México no se ha definido el marco normativo específico para la restauración de suelos contaminados por metales pesados, razón por la cual se debe utilizar como referencia la normatividad de Estados Unidos o de otros países (PROFEPA, 2002)

2.4.5 Movilización del cadmio en el suelo

Por otro lado sus movilidades dependen fundamentalmente del pH. El cadmio es más móvil en medio ácido, Lo cual es un factor importante que influirá en la lixiviación (Andrea Díaz, Agustín Arroqui, Pedro Sarquis, 2005)

Los límites máximos permisibles para un suelo de uso agrícola o bien residencial son de 400 mg/Kg de plomo, 22 mg/Kg de arsénico y 37 mg/Kg de cadmio. En el caso de los límites máximos permisibles para un suelo de uso industrial los rangos son mayores por lo que es 750 mg/Kg de plomo, 260 mg/Kg de arsénico y 450 mg/Kg de cadmio. (PROY-NOM-147, SEMARNAT/SSA1,2004).

2.5 Remediación

El uso de una tecnología de remediación en particular depende, además de los factores específicos del sitio y de las propiedades fisicoquímicas del contaminante, de su disponibilidad, de la fiabilidad demostrada o proyectada, de su estado de desarrollo (laboratorio, escala piloto o gran escala) y de su costo (Sellers, 1999).

Técnica de remediación implica cualquier operación unitaria o serie de operaciones unitarias que altera la composición de una sustancia peligrosa o

contaminante a través de acciones químicas, físicas o biológicas de manera que reduzcan la toxicidad, movilidad o volumen del material contaminado (EPA, 2001).

2.5.1 Tecnologías de remediación fisicoquímicas

Como ya se mencionó, los tratamientos fisicoquímicos aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para destruir, separar o contener la contaminación. Este tipo de tecnologías generalmente son efectivas en cuanto a costos y pueden concluirse en periodos cortos, en comparación con las tecnologías de biorremediación. Sin embargo, los costos pueden incrementarse cuando se utilizan técnicas de separación en las que los contaminantes pueden requerir de tratamiento o disposición (Van Deuren *et al.*, 1997).

Mientras que las tecnologías de biorremediación son principalmente métodos destructivos, las fisicoquímicas incluyen las tres estrategias básicas de acción sobre el contaminante (destrucción, separación e inmovilización). Al igual que el resto de las tecnologías de remediación, las fisicoquímicas pueden realizarse *in situ* o *ex situ*. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías se aplican *in situ*. Entre las tecnologías fisicoquímicas para tratamiento *in situ*, se encuentra la remediación electrocinética (RE), el lavado de suelos (LS), la extracción por solventes (ES), la extracción de vapores (EV) y la solidificación/estabilización (Van Deuren *et al.*, 1997).

2.5.2 Biorremediación

El término biorremediación se utiliza para describir una variedad de sistemas que utilizan organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) para degradar, transformar o remover compuestos orgánicos tóxicos a productos metabólicos inocuos o menos tóxicos. Esta estrategia biológica depende de las actividades catabólicas de los organismos, y por consiguiente de su capacidad para utilizar los contaminantes como fuente de alimento y energía (Van Deuren, *et al.*, 1997).

Las rutas de biodegradación de los contaminantes orgánicos, varían en función de la estructura química del compuesto y de las especies microbianas degradadoras. El proceso de biorremediación incluye reacciones de oxidoreducción, procesos de absorción e intercambio iónico, e incluso reacciones de acomplejamiento y quelación que resultan en la inmovilización de metales (Eweis, *et al.*, 1998).

La biorremediación puede emplear organismos propios del sitio contaminado (autóctonos) o de otros sitios (exógenos), puede realizarse *in situ* o *ex situ*, en condiciones aerobias (en presencia de oxígeno) o anaerobias (sin oxígeno) (Eweis y col., 1998). Aunque no todos los compuestos orgánicos son susceptibles a la biodegradación, los procesos de biorremediación se han usado con éxito para tratar suelos, lodos y sedimentos contaminados con hidrocarburos del petróleo (HTPs), solventes (benceno y tolueno), explosivos (TNT), clorofenoles (PCP), pesticidas (2,4-D), conservadores de madera (creosota) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (Van Deuren, *et al.*, 1997; Semple, *et al.*, 2001).

2.5.2.1 Tecnologías *in situ*

Las técnicas *in situ* buscan estimular y crear un ambiente favorable para el crecimiento microbiano a partir de los contaminantes. Este objetivo generalmente puede lograrse con el suministro de aire u oxígeno (bioventeo), nutrientes (bioestimulación), microorganismos (bioaumentación) y/o humedad, además del control de temperatura y pH (EPA, 2001).

2.5.2.2 Tecnologías *ex situ*

Los procesos de biorremediación *ex situ*, incluyen: (i) procesos de biodegradación en fase de lodos, en donde el suelo se mezcla con agua (para formar un lodo), microorganismos y nutrientes; y (ii) de biodegradación en fase sólida, en donde los suelos colocan en una celda de tratamiento (composteo) o sobre membranas impermeables (biolabranza), en donde se agrega agua y nutrientes (EPA, 2001).

2.6 Fitorremediación

La fitorremediación es un proceso que utiliza plantas para remover, transferir, estabilizar, concentrar y/o destruir contaminantes (orgánicos e inorgánicos) en suelos, lodos y sedimentos, y puede aplicarse tanto *in situ* como *ex situ*. Los mecanismos de fitorremediación incluyen la rizodegradación, la fitoextracción, la fitodegradación y la fitoestabilización (Van Deuren y Hutchinson, 2001).

La rizodegradación se lleva a cabo en el suelo que rodea a las raíces. Las sustancias excretadas naturalmente por éstas, suministran nutrientes para los microorganismos, mejorando así su actividad biológica. Durante la

fitoextracción, los contaminantes son captados por las raíces (fitoacumulación), y posteriormente éstos son traslocados y/o acumulados hacia los tallos y hojas (fitoextracción). En la fitoestabilización, las plantas limitan la movilidad y biodisponibilidad de los contaminantes en el suelo, debido a la producción en las raíces de compuestos químicos que pueden adsorber y/o formar complejos con los contaminantes, inmovilizándolos así en la interfase raíces suelo. La fitodegradación consiste en el metabolismo de contaminantes dentro de los tejidos de la planta, a través de enzimas que catalizan su degradación. (Sellers, 1999).

Aplicaciones. Puede aplicarse eficientemente para tratar suelos contaminados con compuestos orgánicos como benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos (BTEX); solventes clorados; HAPs; desechos de nitrotolueno; agroquímicos clorados y organofosforados; además de compuestos inorgánicos como Cd, Cr (VI), Co, Cu, Pb, Ni, Se y Zn (Sellers, 1999). Se ha demostrado también su eficiencia en la remoción de metales radioactivos y tóxicos de suelos y agua.

Limitaciones. Existen varias limitaciones que deben considerarse para su aplicación: el tipo de plantas utilizado determina la profundidad a tratar; altas concentraciones de contaminantes pueden resultar tóxicas; puede depender de la estación del año; no es efectiva para tratar contaminantes fuertemente sorbidos; la toxicidad y biodisponibilidad de los productos de la degradación no siempre se conocen y pueden mobilizarse o bioacumularse en animales. (Sellers, 1999)

Costos y tiempos de remediación. Se estima que la fitorremediación de un suelo contaminado con Pb (50 cm de profundidad) puede costar entre 24,000 y 40,000 USD/ha (Van Deuren, 1997).

La fitorremediación de suelos contaminados se basa en el uso conjunto de plantas, enmiendas del suelo y técnicas agronómicas para eliminar, retener, o disminuir la toxicidad de los contaminantes del suelo (Chaney *et al.*, 1997). Este grupo de fitotecnologías reúne un gran número de ventajas, especialmente la limpieza y la economía; no utilizan reactivos químicos peligrosos, ni afectan negativamente a la estructura del suelo, sólo aplican prácticas agrícolas comunes; además, el proceso se realiza '*in situ*' evitando costosos transportes (Cunningham *et al.*, 1995).

Las ventajas y desventajas de un tratamiento *in situ* o *ex situ* son de acuerdo a las necesidades del suelo; ventajas *in situ* son que permiten tratar al suelo sin necesidad de excavar ni trasladar por lo que es mas económico pero siendo así la desventaja de que es mas lento, pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad y la heterogeneidad en las características del suelo. Además de que hay mayor dificultad en verificar la eficacia del proceso. En el caso del *ex situ* el tratamiento es mas rápido, seguro, homogéneo, y uniforme en sus eficacia, pero el costo es mas elevado por los equipos de ingeniería. (Volke y Velasco, 2002.)

Las ventajas de la fitorremediación pueden ser que Las plantas pueden ser utilizadas como bombas extractoras de bajo costo para depurar suelos y aguas contaminadas, algunos procesos degradativos ocurren en forma más rápida con plantas que con microorganismos, es un método apropiado para descontaminar superficies grandes o para finalizar la descontaminación de áreas restringidas en plazos largos. Algunas limitaciones son que el proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas, los tiempos del proceso pueden ser muy prolongados, la biodisponibilidad de los compuestos o metales es un factor limitante de la captación. (Volke y Velasco, 2002.)

Los tipos de fitorremediación, en donde se indica la zona de la planta en la cual ocurre el proceso son:

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación Tratada
Fitoextracción	Las plantas se usan para concentrar metales en las partes cosechables (hojas y raíces)	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc
Rizofiltración	Las raíces de las plantas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos
Fitoestabilización	Las plantas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.	Lagunas de deshecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos)	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, etc
Fitovolatilización	Las plantas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano)
Fitodegradación	Las plantas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzono, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, etc.

(www.medioambiente.gob.mx, 2008).

2.7 Plantas hiperacumuladoras de metales pesados

Todas las plantas poseen un potencial para absorber una amplia variedad de metales del suelo pero la mayor parte de las plantas tienden solamente a absorber los que son esenciales para su supervivencia y desarrollo. Existe una notable excepción de esta regla de un pequeño grupo de plantas que pueden tolerar, absorber altos niveles de ciertos metales, estas plantas reciben el nombre de hiperacumuladoras. (Chen *et al.*, 2001).

Las plantas pueden absorber los metales pesados dependiendo de su disponibilidad en el suelo y de los mecanismos de selectividad propios de cada especie, variedad o genotipo. Algunos metales pesados constituyen elementos esenciales en el metabolismo de las plantas, como por ejemplo, el Manganeseo (Mn), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn) o Molibdeno (Mo); mientras que otros, como el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg) y Plomo (Pb) son fitotóxicos. (Loayza, 2008).

Los metales pesados se pueden acumular en distintos órganos según su movilidad en la planta, este proceso es altamente específico para la relación metal-planta. El grupo de metales pesados de mayor riesgo lo constituyen el grupo de metales cuya concentración en la planta no es tóxica para ellas, pero si para el hombre o para los animales, como por ejemplo, el cadmio (Cd), cobalto (Co) y selenio (Se). Por tal motivo, es necesario regular en los cultivos el contenido de metales potencialmente tóxicos para la salud humana y/o animal. (Loayza, 2008).

2.8 Mecanismos para la absorción y translocación de metales pesados en las plantas

Las plantas han desarrollado mecanismos específicos para absorber, translocar y acumular nutrientes (Lasat, 2000); sin embargo, algunos metales y metaloides no esenciales para los vegetales son absorbidos, traslocados y acumulados en la planta debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos requeridos.

Mecanismo I.- La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen de:

- 1.- el movimiento de los metales desde la solución del suelo a la raíz de la planta,
- 2.- el paso de los metales por las membranas de las células corticales de la raíz,
- 3.- el transporte de los metales desde las células corticales al xilema desde donde la solución con metales se transporta de la raíz a los tallos, y
- 4.- el posible movilización desde los metales desde las hojas hacia los tejidos de almacenamiento usados como alimento (semilla, tubérculos y frutos) por el floema.

Después de la absorción por los vegetales los metales están disponibles para los herbívoros y humanos directamente o a través de la cadena alimentaria (John y Leventhal, 1995).

Mecanismo II.- La absorción foliar es otro mecanismo de ingreso de sustancias potencialmente tóxicas a las plantas, como los metales pesados.

La disponibilidad a través de las hojas de algunos elementos traza provenientes de fuentes aéreas puede tener un impacto significativo en la contaminación de las plantas y también es de particular importancia en la aplicación de fertilizantes foliares. La absorción foliar es mediada por una fase de penetración cuticular y un mecanismo de carácter metabólico que considera la acumulación de los elementos contra la gradiente de concentración. (Kabata-Pendias, 2000).

Las especies vegetales incluyendo algunos cultivos, tienen la capacidad de acumular metales en sus tejidos. Las plantas capaces de absorber y acumular metales por sobre lo establecido como normal para otras especies en los mismos suelos se llaman hiperacumuladoras y se encuentran principalmente en suelos que son ricos en metales por condiciones geoquímicas naturales o contaminación antropogénica. Las plantas hiperacumuladoras generalmente tienen poca biomasa debido a que ellas utilizan más energía en los mecanismos necesarios para adaptarse a las altas concentraciones de metales en sus tejidos (Kabata-Pendias, 2000).

La capacidad de las plantas para bioacumular metales y otros posibles contaminantes varía según la especie vegetal y la naturaleza de los contaminantes. Arveja (*Pisum sativum*) por ejemplo, sus tallos acumulan más cadmio que plomo en suelos tratados con dosis crecientes de metales. Estas diferencias en la absorción de metales puede ser atribuida a la capacidad de retención del metal por el suelo y a la intersección planta-raíz-metal (Naidu, 2003).

Pero es importante anotar que el comportamiento de la planta frente a los metales pesados depende de cada metal (Sag.gob, 2008).

2.9 *Nicotiana glauca* G. (Tabaquillo, Virginio)

Esta planta es originaria de los Andes, crece sobre más allá de los mil metros de altura, pero ha llegado a todo tipo de ambientes. Su sistema radicular es profundo y produce alcaloides, sustancia que funciona como un insecticida natural y, por tanto, incomedible por los animales herbívoros, al ser venenosa. Se impide así el paso a la cadena alimentaria de los metales que pudiese haber acumulado (Machado y Gracia, 2006).

La empresa de Bancaja recibió en 2006 el Premio Jóvenes Emprendedores. Por la utilización del virginio (*Nicotiana glauca* G.) como técnica de fitorremediación, esta planta fue elegida por multitud de motivos, entre ellos, porque genera una gran biomasa con la consiguiente capacidad de extracción de metales pesados del suelo. Asimismo, la planta produce anabasina, un alcaloide bastante tóxico, por el cual los herbívoros la repelen. Esta característica es una ventaja ya que, al acumular alta cantidad de metales pesados, si estos pasasen a la cadena alimentaria o de nutrición no se estaría solucionando el problema. Por último, *Nicotiana Glauca* G. es capaz de adaptarse a condiciones extremas de salinidad, baja cantidad de nutrientes, alta concentración de materiales pesados, climas secos y fríos y tiene un sistema de raíces bastante profundo (Cierval, 2008).

Se ha experimentado en suelos procedentes de las minas de La Unión de Murcia con una concentración de metales pesados bastante alta. La planta ha acumulado, en un plazo de seis meses, el 76 % del plomo que había en el terreno (Cierval, 2008).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo de investigación se realizó durante el periodo Septiembre 2007 Agosto 2008, en las instalaciones de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro- UL y la empresa Met-Mex Peñoles, en Torreón, Coahuila México.

3.1 Localización Geográfica

La región de la Comarca Lagunera se localiza en la parte suroeste del estado de Coahuila, se ubica entre las coordenadas geográficas $103^{\circ} 25'57''$ de longitud oeste con relación al meridiano de Greenwich y $25^{\circ} 31'11''$ de latitud norte con una altura de 1120 msnm (CNA, 2002).

3.2 Desarrollo del experimento

3.2.1 Selección de la especie vegetal

Se seleccionó la especie vegetal *Nicotiana glauca* G. conocida como virginio por presentar hábitos perennes, por ser resistente a los cambios de clima además de encontrarse en buen funcionamiento en lugares de condiciones pobres y hostiles tales como: secos, contaminados, escombros,. Así como por sus características ornamentales.

3.2.2 Recolección, Siembra y Germinación

La recolección de la semilla se llevó a cabo durante el mes de Agosto del 2007 y la siembra se realizó el 15 de Septiembre del 2007 en el sombreadero

de la UAAAN, se utilizó una charola de unicel de 200 cavidades, primeramente se humedeció el sustrato orgánico (Peat moss) depositándolo en las cavidades o celdas, posteriormente se realizaron pequeños orificios para depositar una semilla por cavidad, cubriendo con una capa ligera de material orgánico para dicha semilla, finalmente se cubrió la charola con plástico negro y se colocó en el área de sombreadero del departamento de horticultura en la UAAAN-UL. Las semillas que fueron sembradas en las charolas fueron recolectadas en el municipio de Fco. I. Madero. La germinación se dio a los 14 días después de la siembra.

3.2.3 Primer trasplante en invernadero

El primer trasplante se realizó el 06 de Noviembre del 2007, cuando la planta alcanzó una altura de 6 cm esto se dio a los 52 DDS (días después de la siembra). La plántula se sacó de la charola de unicel con cuidado y se depositó en bolsas de polietileno de una medida de 10x8x20, para mayor espacio de desarrollo de raíz.

3.2.4 Riego en invernadero

Se aplicaron riegos a las plantas cada tercer día durante todo el experimento, para el riego se utilizó una regadera.

3.2.5 Temperatura

La temperatura estuvo controlada mientras las plantas estuvieron en el invernadero la cual fue de 25 ° C

3.2.6 Recolecta de suelo contaminado en Met-Mex peñoles

El día 18 de enero del 2008 se visitó a la empresa Met-Mex Peñoles para recolectar suelo contaminado con metales pesados, se recolectó aproximadamente 300 Kg. de perfil 0-15 cm. El suelo fue trasladado a la UAAAN-UL en una camioneta, anteriormente ya se tenía otros 300 Kg. de arena de río proveniente de la Concha Coahuila. En la investigación de fitorremediación se utilizó el suelo proveniente de Peñoles

3.2.7 Preparación de sustratos para el segundo trasplante (sombreadero)

El 25 de enero del 2008 se realizó el cribado de la arena de río; después se continuó con el cribado del estrato 0-15 cm que es el suelo contaminado por metales pesados que fue proporcionado por la empresa Met-Mex Peñoles. El 28 de enero del 2008 se llenaron 80 bolsas negras de polietileno de 10 kg de la siguiente manera; se utilizó una bascula y una carretilla para llenar 40 bolsas con el estrato 0-15 cm el cual llevó una proporción de 60% perfil 0-15 (6 kg) que es el suelo contaminado y 40% suelo testigo o arena (4 kg) Las otras 40 bolsas se llenaron solamente de arena y fueron utilizadas como testigo.

3.2.8 Segundo trasplante (sombreadero) con suelo contaminado

El trasplante se realizó cuando la planta alcanzó una altura de 12 cm presentando 5 a 6 hojas verdaderas esto fue el 01 de febrero del 2008.

Estando ya preparadas las bolsas de polietileno con 10 Kg de sustrato preparado., con una cantidad de 40 plantas para testigo (T1) que contenían la arena de río y 40 plantas para el perfil de profundidad 0-15 cm (T2) que era el suelo contaminado.

3.3 Riego fuera de invernadero

La aplicación del riego se realizó cada tercer día con una cantidad de 250 mL a cada una de las macetas el primer mes después del trasplante (DDT), posteriormente se les agregó 500 mL cada 4 días hasta el fin de la evaluación.

3.4 Análisis para determinar concentraciones de metales pesados en el agua de riego

La muestra para el análisis de agua de riego se adquirió directamente de una de las tomas del sombreadero y se traslado hasta el laboratorio central certificado de la empresa Met-Mex Peñoles para el análisis correspondiente, los parámetros evaluados fueron Pb, As, Cd, Fe, Zn, Ag, Cu, Na, Hg, Al, Ni, Mn, Cr, Cl, F, SO₄, pH, C.E. en el cual se utilizó el espectrofotómetro de plasma marca Varian.

3.5 Primer análisis de suelo

Se recolectó una muestra de 1 kg de arena de río y 1 kg del estrato 0-15 cm del suelo contaminado por metales pesados, los cuales se trasladaron al laboratorio central certificado de la empresa Met-Mex Peñoles para determinar las características físicas y químicas % arena, % arcilla, % limo, textura, C.E, M.O, D.A, pH, y las concentraciones de metales pesados antes del trasplante.

3.6 Análisis Vegetal

Se realizaron 4 muestreos vegetales a los 30, 60, 90 y 120 días después del trasplante con el objetivo de determinar las concentraciones de metales

pesados absorbidos por la planta en raíz, tallo y hoja. Se consideraron las plantas más homogéneas en altura y número de hojas.

3.6.1 Primer análisis vegetal

Este se realizó a los 30 días después del trasplante. Se tomaron 4 plantas al azar, dos plantas del T1, dos plantas del T2. Se les practicó un lavado completo, se dejaron deshidratar en el horno de secado a una temperatura de 70 °C por 24 horas, posteriormente se les realizó un macerado de raíz, tallo y hoja, y se tomó la muestra correspondiente para hacerla pasar por el espectrofotómetro de plasma y determinar las concentraciones de metales pesados (Pb, As y Cd). Esto se llevó a cabo en el laboratorio central de la empresa Met-Mex Peñoles.

3.6.2 Segundo análisis vegetal

Este se realizó a los 60 días después del trasplante. Se tomaron 4 plantas en total al azar, dos plantas del T1, dos plantas del T2. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento del primer análisis.

3.6.3 Tercer análisis vegetal

Este se realizó a los 90 días después del trasplante. Se tomaron 4 plantas en total al azar, una planta del T1, dos plantas del T2. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento del primer análisis.

3.6.4 Cuarto análisis vegetal

Este se realizó a los 120 días después del trasplante. Se tomaron cuatro plantas en total al azar, una planta del T1, dos plantas del T2. Posteriormente se realizó el mismo procedimiento del primer análisis.

3.7 Segundo análisis del suelo.

Se recolectó una muestra de 1Kg de arena de río, 1Kg del estrato 0-15 del suelo contaminado por metales pesados, los cuales se trasladaron al laboratorio central certificado de la empresa Met-Mex Peñoles para determinar las características físicas y químicas y las concentraciones de metales pesados después de los análisis vegetales.

3.8 Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental “bloques al azar” con dos tratamientos y seis repeticiones donde la planta es la unidad experimental.

3.9 Tratamientos

Los tratamientos de estudio fueron: el testigo con el 100% arena de río (T1), y el siguiente con un 40% de arena de río y un 60% de suelo contaminado de 0-15cm de profundidad del suelo (T2).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Concentraciones iniciales y finales de los metales pesados en el suelo

En el suelo a una profundidad de 0-15 cm se puede observar en el Cuadro 1 las concentraciones iniciales y finales de los metales pesados; es importante mencionar que las concentraciones iniciales del suelo se consideran elevadas y por encima de norma de acuerdo a los límites máximos permisibles de los Estados Unidos; de 500 mg/kg en plomo (Valdez y Cabrera, 1999), mientras que la normatividad de México marca que para suelo de uso industrial el límite máximo permisible en el Plomo (Pb) es de 750 mg/kg, para arsénico (As) es 260 mg/kg y para Cadmio (Cd) es 450 mg/kg (SEMARNAT/SSA1, PROY-NOM-147, 2004,).

Cuadro 1. Concentraciones iniciales y finales de metales en el suelo a una profundidad de 0-15 cm y en el lixiviado.

ELEMENTOS	Concentraciones iniciales (mg/kg)	Concentraciones finales (mg/kg)	Diferencia de concentraciones (mg/kg)
Plomo (Pb)	12000	9832	2168
Cadmio (Cd)	1790	193	1597
Arsénico (As)	2900	473	2427

Es importante aclarar que estos datos fueron los resultados obtenidos del laboratorio de Met- Mex Peñoles, por lo tanto; las concentraciones iniciales

es el suelo contaminado con metales pesados, las concentraciones finales es el suelo al final del experimento de fitorremediación, la diferencia de concentración indica la cantidad de metales pesados que absorbió la planta.

El contenido de los metales pesados en el suelo disminuyó debido a la absorción de la planta, y también por lixiviados que no fueron evaluados, sin embargo, las concentraciones finales no están dentro de los límites máximos permisibles según la NOM 147 de SEMARNAT, excepto por el Cadmio.

4.2 Evaluación físico-químico del suelo

En el Cuadro 2 se presentan los resultados del análisis de las características físico-químicas del suelo a una profundidad de 0-15 cm.

Cuadro 2. Resultados del análisis de las características físico-químicas del suelo a una profundidad de 0-15 cm

Parámetro	Método	Tratamiento	Testigo
Arena %	Bouyucos	64.96	85.56
Arcilla %	Bouyucos	3.04	7.76
Limo %	Bouyucos	32	6.68
Textura	Bouyucos	Migajón arenoso	Arena
C.E. (MS/cm)	Extracto de saturación	3.5	3.24
Ph	Extracto de saturación	6.74	7.79
M. O. %	Walkley y Black	1.54	0.66
D. A. (g/ml)	de probeta	1.61	1.56

4.3 Evaluación del agua de riego

En el Cuadro 3 se muestra las concentraciones de cada elemento presentes en el agua utilizada en los riegos para la planta así como su normatividad.

Cuadro 3. Concentraciones de los elementos químicos presentes en el agua de riego empleada en macetas con suelo contaminado con Pb, As y Cd.

Parámetros	Concentración de agua de riego (mg/L)	Límites máximos permisibles <i>NOM-127-SSA1-1994</i> (mg/L)	Diferencia de Concentración
Pb	0.046	0.025	0.021
As	0.011	0.05	-0.039
Cd	0.044	0.005	0.39
Fe	0.687	0.3	0.3
Zn	0.181	5	-4.81
Ag	0.001	***	***
Cu	0.006	2	-1.994
Na	62.2	200	-137.8
Hg	0.002	0.001	0.001
Al	0.001	0.2	-0.199
Ba	0.06	0.7	-0.64
Ni	0.008	***	***
Mn	0.02	0.15	-0.13
Cr	0.004	0.05	-0.046
Cl	74.2	250	-175.8
F	25.3	1.5	23.8
SO ₄	239	400	-161
Ph	7.87	6.5-8.5	
C.E.	1.18		

En el Cuadro 3 se indica que todos los elementos que se encuentran con números negativos en la diferencia de concentraciones se encuentran dentro de la norma (NOM-127-SSA1-1994) todos los demás elementos rebasan las concentraciones que la norma marca como máxima entre ellos el Plomo y el Cadmio.

4.4 Concentraciones de Plomo, Arsénico y Cadmio en *Nicotiana glauca* G. a nivel raíces, tallos y hojas

En el Cuadro 4 muestra que el mes de marzo las raíces fue la parte que más acumuló concentración de Plomo. En los demás meses la absorción fue menor incluyendo la concentración en las raíces, aunque en mayo se obtuvo una concentración significativa. En los tallos y hojas fue muy poca la concentración de Plomo encontrada.

Se observa que hay un decremento de absorción en el segundo análisis debido al acontecimiento del granizo que se dio en el invernadero de la Universidad. La planta acumula más el Plomo en la parte radicular logrando retener un 78.6 % del total que acumuló la planta en los cuatro meses evaluados.

Cuadro 4. Resultados de la concentración de Plomo (mg/kg) encontrado en los diferentes meses y diferentes partes de la planta *Nicotiana glauca* G,

Plomo mg/kg							
# de análisis (Meses)	RAICES %		TALLOS %		HOJAS %		
1° Análisis (Marzo)	164.7	86.5	5,6	2.9	20.1	10.5	
2° Análisis (Abril)	20.9	73.3	3,7	13	3,9	13.7	
3° Análisis (Mayo)	75,3	67.5	25,4	22.7	10,8	9.7	
4° Análisis (Junio)	20.9	74.4	7,2	25.6	0	0	
Suma	281.8		41.9		34.9		
Promedio	70.5		10.5		8.7		
%	78.6		11.7		9.7		

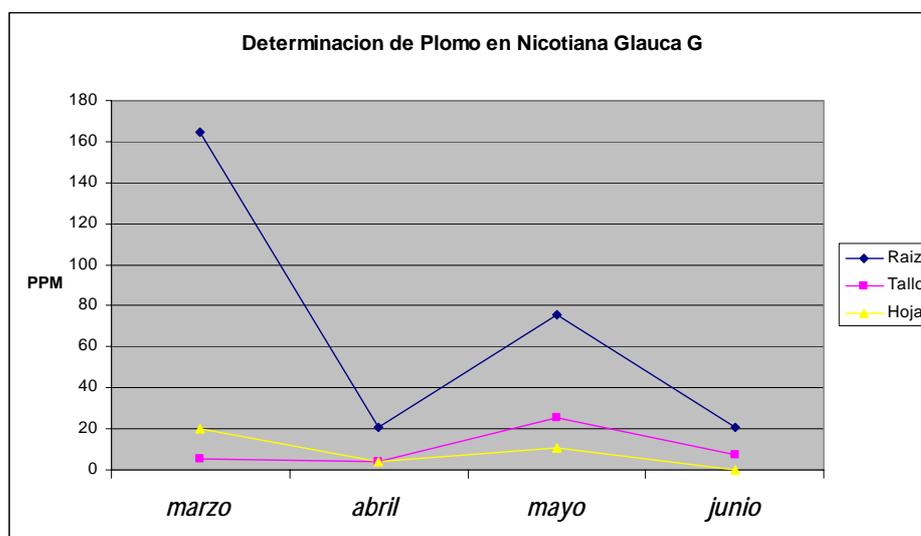


Figura 1. Comportamiento de la concentración del Plomo en los diferentes meses y diferentes partes de la planta. Torreón Coahuila. 2008.

En la Figura 1 muestra el comportamiento del Plomo en *Nicotiana glauca* G, en el segundo mes evaluado (abril) se observa una recaída de la absorción, en donde la planta soltó el metal pesado (Pb) que ya había acumulado, esto debido al acontecimiento del granizo en donde la planta sufrió estrés y demostró resistencia, volviendo a recuperarse al tercer mes (mayo) de la evaluación consiguiendo absorber nuevamente Plomo.

El Cuadro 5 evidencia que la planta acumula la mayor parte del Arsénico en las raíces más que en tallos y hojas, igual que ocurrió con el Plomo. Durante el tiempo del experimento *Nicotiana glauca* G. acumuló 57.7 % del Arsénico en las raíces, 11.3 % en los tallos y 31.1 % en las hojas. Esto debido a que el tiempo de la evaluación fue de cuatro meses, donde en el principio la planta se dedica a absorber los metales pesados por las membranas de las células corticales de las raíces, después el transporte de los metales pesados (en forma de solución) va de las células corticales al xilema, es decir de la raíz al tallo, y posteriormente estos metales se movilizan hasta llegar a las hojas

tejidos de almacenamiento, semillas, frutos, por medio del floema, que es cuando llegan al último paso de la fitorremediación, la acumulación y por lo tanto tarda más tiempo. (Lasat, 2000).

Es probable que las concentraciones de Arsénico acumuladas en las hojas hayan sido absorbidas y/o adquiridas en el momento del riego (el riego se efectuaba de las hojas hacia el suelo) esto debido a las estructuras estomáticas de las hojas, esto sería congruente a causa de que se encontró acumulación mínima y nula en los tallos de la planta por lo que se deduce que *Nicotiana glauca* G. también puede absorber metales pesados de forma aérea, es decir, en el aire por medio de las estomas ubicadas en las hojas a esto se le conoce como absorción foliar (Kabata y Pendias, 2000).

Cuadro 4.5. Absorción de arsénico (mg/kg) en los diferentes meses y diferentes partes de la planta *Nicotiana glauca* G.

# de análisis (meses)	Arsénico mg/kg					
	RAICES	%	TALLOS	%	HOJAS	%
1° Análisis (Marzo)	30,1	86	0	0	4,8	14
2° Análisis (Abril)	26,7	96.4	0	0	1	3.6
3° Análisis (Mayo)	12,7	92.7	0,5	3.6	0,5	3.6
4° Análisis (Junio)	20,26	25.5	17,1	21.5	42,05	53
Suma	89.8		17,6		48.4	
Promedio	22.4		4.4		12.1	
%	57.7		11.3		31.1	

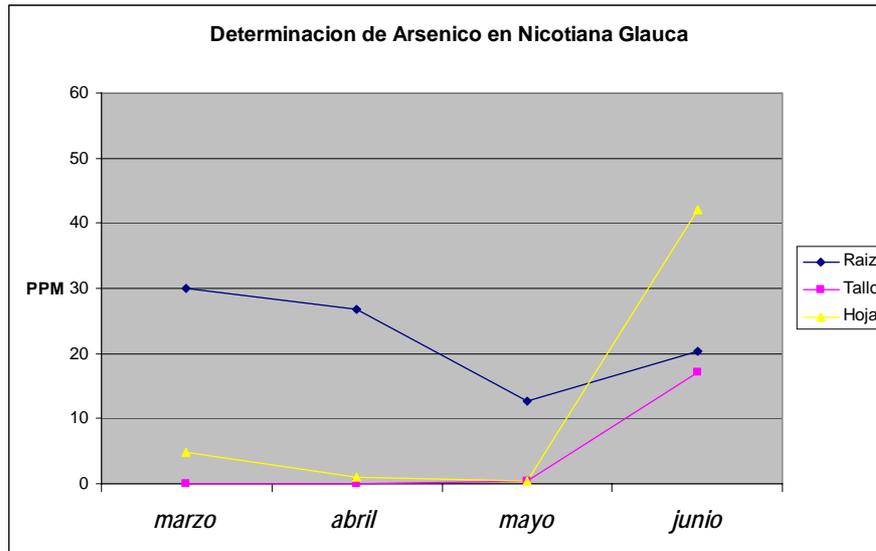


Figura 2. Comportamiento de Arsénico en los diferentes meses y diferentes partes de la planta.

En la Figura 2 muestra que *Nicotiana glauca* G. es capaz de absorber Arsénico en su estructura principalmente en la parte radicular pero también en las hojas, es importante mencionar que el tallo es una estructura de transporte, es por eso que no retiene cantidades significativas de metales pesados en este caso Arsénico. La figura 2 muestra que en las plantas hiperacumuladoras existe una relación entre tiempo y acumulación de metales pesados (As), donde a mayor tiempo mayor acumulación (mg/kg) en tallos y hojas. (Estructuras de transporte y acumulación).

De acuerdo con los resultados de los análisis del Cuadro 6 se muestra que la planta tiene afinidad por absorber y acumular Cadmio en su estructura, la planta acumuló cantidades significativas del metal que fueron en aumento conforme al paso del tiempo, *Nicotiana glauca* G., mostró mucha tolerancia al Cadmio, la planta mostró resistencia a los cambios drásticos del clima como el granizo acontecido los últimos días de abril, la planta no solo logró sobrevivir si no también acumular metales pesados.

Cuadro 6. Absorción de Cadmio (mg/kg) en los diferentes meses y diferentes partes de la planta *Nicotiana glauca* G.

Cadmio mg/kg							
# de análisis (meses)	RAICES	%	TALLOS	%	HOJAS	%	
1° Análisis (Marzo)	26,6	65.8	0	0	13,8	34.2	
2° Análisis (Abril)	20,7	40.5	6,7	13.1	23,7	46.4	
3° Análisis (Mayo)	33,7	27.4	23,9	19.5	65,2	53.1	
4° Análisis (Junio)	15,4	18.20	23,9	28.3	45,3	53.5	
Suma	96,4		54,5		148		
Promedio	24.1		13.6		37		
%	32.3		18.2		49.5		

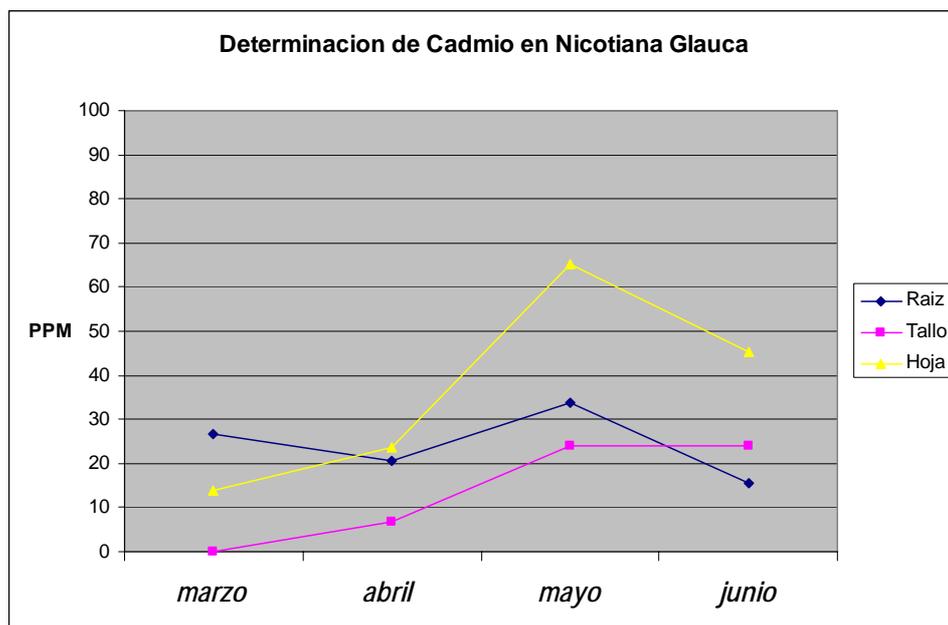


Figura 3. Comportamiento de Cadmio en los diferentes meses y diferentes partes de la planta.

En la Figura 3 se muestra que la *Nicotiana glauca* G. absorbió Cadmio y este fue en aumento pese a adversidades en las que se encontró la planta. La raíz posee cargas negativas en sus células, debido en gran medida a la presencia de grupos carboxilo del ácido péctico. Las cargas negativas de estas células de la rizodermis interaccionan con las positivas de los metales pesados presentes en el suelo, creando un equilibrio dinámico que facilita la entrada hacia el interior celular. (Marmioli, 2005).

En el Cuadro 7 se observa que *Nicotiana glauca* G. absorbió mayor cantidad de Plomo que Cadmio y Arsénico, esto en función a que había mayor concentración inicial disponible de este metal en el suelo contaminado. Se puede apreciar que la planta absorbió más concentración de metales pesados en el primer mes de los análisis, se puede observar también que las plantas en suelos contaminados por metales pesados absorben y acumulan más metales en el sistema radicular (Rafael, 2006).

En el Cuadro 7 se muestran las concentraciones de Plomo, Arsénico y Cadmio obtenidos en los cuatro meses en que se evaluó el comportamiento de estos metales en *Nicotiana glauca* G

Cuadro 7. Concentraciones de metales pesados en las diferentes partes de la planta y muestreos.

Partes de la planta		Concentraciones de los Metales pesados (mg/kg)				
Raíces	Pb	%	As	%	Cd	%
1° Análisis(marzo)	164.7	74.4	30.1	14	26.6	12
2° Análisis (abril)	20.9	30.6	26.7	39	20.7	30.3
3° Análisis(mayo)	75.3	61.9	12.7	10	33.7	27.7
4° Análisis (junio)	20.86	36.9	20.26	36	15.41	27.3
Suma	281.8		89.76		96.41	
Promedio	70.45		22.4		24.1	
%	60.2		19.2		20.6	
Tallos	Pb	%	As	%	Cd	%
1° Análisis (marzo)	5.6	100	0	0	0	0
2° Análisis (abril)	3.7	35.6	0	0	6.7	64.4
3° Análisis (mayo)	25.4	51	0.5	1	23.9	48
4° Análisis (junio)	7.2	14.9	17.1	36	23.89	49.6
Suma	41.9		17.6		54.49	
Promedio	10.5		4.4		13.6	
%	36.8		15.4		47.8	
Hojas	Pb	%	As	%	Cd	%
1° Análisis (marzo)	20.1	51.9	4.8	12	13.8	35.6
2° Análisis (abril)	3.9	13.6	1	3.5	23.7	82.9
3° Análisis (mayo)	10.8	14.1	0.5	0.7	65.2	85.2
4° Análisis (junio)	0	0	42.05	48	45.3	51.8
Suma	34.8		48.35		148	
Promedio	8.7		12.1		37	
%	15.1		20.9		64	

4.5 Absorción y acumulación total de Plomo, Arsénico y Cadmio en *Nicotiana glauca* G.

Cuadro 8. Concentración total y afinidad por el Plomo, el Arsénico y el Cadmio por *Nicotiana glauca* G.

Metales Pesados	Concentraciones totales absorbidas por <i>Nicotiana glauca</i> G. (mg/kg)	Afinidad de <i>Nicotiana glauca</i> G. (mg/kg)	Lixiviación Calculada (mg/kg)	%
Pb	358.5	3%	1809.5	83.5
Cd	298.9	16.6 %	1491.1	83.3
As	155.7	5.4 %	2744.3	94.6

En el Cuadro 8 se observa que en el periodo de los cuatro meses que duró el experimento *Nicotiana glauca* G. absorbió y acumuló estos metales pesados, siendo que absorbió más Plomo, luego Cadmio y en menor concentración Arsénico. Sin embargo, esta especie tuvo mayor afinidad por el Cadmio, después por Arsénico y al final por Plomo. La afinidad se calculó con una regla de tres tomando en cuenta los datos de las concentraciones iniciales del Cuadro 1 y las concentraciones totales absorbidas por *Nicotiana glauca* G. La lixiviación calculada resultó de la diferencia de concentración del Cuadro 1 menos las concentraciones totales absorbidas del Cuadro 8.

Se puede apreciar la existencia de metales pesados en los lixiviados en cantidades considerables en el predio donde se llevó a cabo el experimento. Esto debido a que cierta cantidad de riego escapó por los orificios de las bolsas de polietileno que contenían las plantas, los metales pesados reaccionaron con el agua formando hidróxidos metálicos, aumentando la solubilidad de estos. (Salomons, 1993). Sin embargo los datos obtenidos de los lixiviados no fueron

considerados debido a que no se contó con una retención de lixiviados adecuados.

De acuerdo con el Cuadro 8 se puede observar que el arsénico se lixivió más que los otros metales, el cual es un metal altamente tóxico al momento de lixiviarse por el hecho de su toxicidad al momento de llegar a los mantos acuíferos.

Teniendo en cuenta que se utilizó 6 kg de arena (inerte) a 4 Kg. de suelo contaminado con metales pesados se encontró un suelo predominantemente arenoso los cuales carecen de capacidad de fijación de los metales pesados, los cuales lixiviaron grandes cantidades de metales por medio de quelatos a través de los agujeros de las bolsas (macetas) (Manziona y Berril, 1985).

4.6 Concentraciones de Plomo, Arsénico y Cadmio en *Nicotiana glauca* G. en tratamiento 1

En el Cuadro 9 se presentan las concentraciones tanto de Plomo Arsénico y Cadmio presentes en las plantas testigo (tratamiento 1), que en comparación con los valores del Cuadro 7, las concentraciones encontradas fueron mínimas, esto debido a que el sustrato que se utilizó para establecer la especie vegetal fue arena la cual es inerte. Posiblemente algunos de los metales que acumuló la planta estaban en el agua de riego y no tanto en el sustrato, ya que este no era suelo contaminado (Solano, 2005).

Cuadro 9. Concentraciones de plomo (Pb), cadmio (Cd) y arsénico (As), (mg/kg) en raíces, tallos y hojas de *Nicotiana glauca* G, (T1, testigo).

Parte de la planta	Metales pesados		
	mg/kg		
Raíces	Pb	As	Cd
1° Análisis (marzo)	5.89	2.43	0
2° Análisis (abril)	3.6	2.2	0
3° Análisis (mayo)	8	4	1.6
4° Análisis (junio)	0	4.29	0
Tallos	Pb	As	Cd
1° Análisis (marzo)	2.46	0	0
2° Análisis (abril)	1.8	0	0
3° Análisis (mayo)	8.5	0.5	1.5
4° Análisis (junio)	0	2.7	3.6
Hojas	Pb	As	Cd
1° Análisis (marzo)	4.17	3.11	0
2° Análisis (abril)	1.5	2.9	1
3° Análisis (mayo)	17.1	0.5	3.7
4° Análisis (junio)	0	0	0

Es importante mencionar que durante la evaluación la especie vegetal sufrió de una serie de factores no controlados, tales como son:

Las heladas del invierno que provocaron en la planta quemaduras retrasando su crecimiento.

El impedimento del buen crecimiento de la raíces, esto debido a que las bolsas de polietileno en la que se encontraban eran sometidas a grandes temperaturas por la acción del sol quemando las raíces de la planta y a su vez estas no encontraban espacio suficiente para desarrollarse naturalmente.

La acción de los vientos (tolvaneras) que golpeaban duramente a las plantas despojándolas de sus hojas y dañando los tallos.

El 27 de abril del 2008 se suscitó una tormenta de agua y granizo en la ciudad de Torreón, Coahuila; con una precipitación de 44 mm de agua, una velocidad de vientos de 106 km/hr y un diámetro de granizo que oscilaba entre 1- 3 cm. Esto provocó un daño severo en las plantas destrozándoles casi en su totalidad hoja, fracturándoles tallos, y rompiendo las bolsas de polietileno en las que se encontraban.

Los metales pesados que se lixiviaron y no estaban disponibles a la planta, debido a la presencia de sulfatos en el agua de riego (SO_4) que al entrar en contacto con el Plomo, Cadmio y Arsénico se hacen solubles en agua (González, 2008). A pesar de estos hechos la planta presentó resistencia y sobrevivencia, reponiéndose gradualmente. *Nicotiana glauca* G. es capaz de adaptarse a condiciones extremas (Navarro, 2008) Probablemente eso explica las variaciones drásticas de los resultados en cada análisis (desde el primer análisis hasta el cuarto).

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación demostraron que el suelo ubicado dentro de la planta Peñoles rebasa los límites máximos permisibles de los metales pesados tales como Pb, As, y Cd según la norma oficial mexicana 147- Semarnat/SSA1-2004.

En las concentraciones finales del suelo hubo un decremento en las concentraciones de los metales evaluados, esto por consecuencia de las concentraciones que absorbió la planta y por otra parte los metales que se lixiviaron al momento del riego.

La planta, *Nicotiana glauca* G. absorbió metales pesados en las siguientes cantidades: 358.46 mg/kg de Plomo, 155.26 mg/kg de Arsénico y 298.9 mg/kg de Cadmio, por lo que se puede concluir que a pesar que absorbió más Plomo, la planta tiene mayor afinidad porcentual por absorber Cadmio y Arsénico en su biomasa.

Al finalizar el proyecto de cuatro meses no se logró un decremento en las concentraciones de metales para que estén dentro de norma excepto en el caso del Cadmio que disminuyó su concentración hasta estar el suelo rehabilitado y dentro de norma de uso de suelo industrial 450 mg/Kg de cadmio . (NOM-147-SEMARNAT, 2004.)

La *Nicotiana glauca* G. es una especie vegetal altamente resistente a condiciones adversas, además de poseer un alto grado de adaptación, absorbe cantidades considerables de metales pesados, a pesar de las condiciones climáticas de la región, se puede considerar como planta fitorremediadora.

VI. RECOMENDACIONES

- Antes de llevar a cabo una fitorremediación de un suelo es necesario conocer las concentraciones iniciales de metales pesados que este posee y las características físicas y químicas del mismo y al final conocer las concentraciones finales de metales en el suelo.

- Realizar investigaciones más profundas sobre la capacidad fitorremediadora de la *Nicotiana glauca* G.

- Apoyar la fitorremediación que es una de las técnicas que tiene como objetivos; asimilar y desintoxicar metales pesados, compuestos orgánicos y compuestos radiactivos en el medio ambiente.

- Para investigaciones posteriores se recomienda tener controlada la salida del agua de riego en las macetas ya que a través de ellas, se presentan pérdidas por lixiviación. Es importante tener un contenedor para lixiviados y regresar el agua con los metales lixiviados a la maceta donde se encuentra la planta.

- Se recomienda poner un plástico que cubra el suelo donde se lleve a cabo el experimento, de esta manera se evitará contaminarlo por metales pesados, posteriormente se podrá poner las macetas.

- Se recomienda buscar un mejor sustrato para las macetas, o bien no mezclar el suelo con ningún tipo de sustrato ni arena para así evaluar solo la capacidad de absorción de la planta (*Nicotiana glauca* G.)

- Al término de la aplicación de la técnica de fitorremediación, se recomienda que extraigan la planta del suelo cuando esta se halla llenado su capacidad de absorber mas metales pesados o contaminantes, la planta fitorremediadora debe tener un post tratamiento especial ya sea una disposición final, confinamiento o incineración, tratado como materia o residuo peligroso o bien de manejo especial. En el caso de la planta metalúrgica se puede volver al proceso para extraer los metales pesados que la planta contenga.

VII. BIBLIOGRAFIA

- AEET 2007, (En línea), Acumulacion de metales pesados en plantas,
<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=488>, (Consultado el 08 de Agosto del 2008).
- América A. L. 2004. (En línea), Met-mex Peñoles y los Niños de Torreón. Consultora en toxicología ambiental y evaluación de riesgos, Xalapa, México,
<http://www.sertox.com.ar/retel/default.htm>, (Consultado el 29 de Junio de 2008).
- Arnulfo Albores, ASTDR 1993, (En línea), Monitorización de Metales de Interés Medioambiental, www.tdx.cbuc.es/TESIS_URV/AVAILABLE/TDX-1016102-134358/Doc1FGS.pdf. (Consultado el 05 de Octubre del 2008).
- Andrea Díaz, Agustín Arroqui, Pedro Sarquis, 2005, (En línea), Estudio de niveles de Cadmio en perfiles del Suelo,
revistas.mes.edu.cu/elibro/Members/amvargas/19938012/2005/19938012-05102.pdf/view - 34k, (Consultado el 06 de Octubre del 2008).
- Arsénico, Lenntech, 2008, (En línea) arsénico, y su propiedades y efectos en la salud,
www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/As.htm - 29k, (Consultado el 7 de septiembre del 2008).
- ATSDR 2001, (En línea) arsénico,
www.atsdr.cdc.gov/HAC/pha/isladeviequesspan/cdb_p3.html - 63k -, (Consultado el 7 de septiembre del 2008).
- ATSDR. 2005. (En línea). Resumen de Salud Publica,
http://translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&u=http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts13.html. (Consultada el 8 septiembre del 2008).

(ATSDR). 2005. (En línea). Plomo, http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts13.html.
(Consultada el 18 de Agosto del 2008)

Badash, 2006. (En línea). Envenenamiento por metales pesados.
healthlibrary.epnet.com/print.aspx?token=32d718a0-166a-4083-8595-fcf396db9201&chunkid=104043. ((Consultada el 18 de Agosto del 2008).

Cierval, 2008, (En línea), Nicotiana glauca, altavista- [http:// www.cierval.es/oku-oct-4.htm](http://www.cierval.es/oku-oct-4.htm)
(Consultado el 07 de Julio del 2008).

Cunningham et al., 1995, (En línea), claves fitorremediacion de suelos contaminados,
www.revistaecosistemas.net/pdfs/490.pdf - (Consultado 03 de Octubre del 2008).

Chaney et al., 1997, (En línea), claves fitorremediacion de suelos contaminados,
www.revistaecosistemas.net/pdfs/490.pdf -(Consultado 03 de Octubre del 2008).

Chen et al., 2001, (En línea) Fitorremediación del suelo,
[www.monografias.com/trabajospdf/fitorremediacion/ pdf](http://www.monografias.com/trabajospdf/fitorremediacion/pdf), (Consultado 03 de Octubre del 2008).

EPA 1986. Air quality criteria for lead. Research Triangle Park, NC: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Office of Health and Environmental Assessment, Environmental Criteria and Assessment.

EPA 2001, Tecnologías de remediación de suelos,
www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/372/tecnolog.html - 80k, (Consultado 03 de Octubre del 2008).

EPA, 2000 (En línea) Introduction to Phytoremediation. National Risk management research laboratory. <http://www.aehs.com/journals/phytoremediation>. (Consultada el día 14 de septiembre de 2006).

Eweis y col., 1998, (En línea) Tecnologías de remediación de suelos, www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/372/tecnolog.html - 80k, (Consultado 03 de Octubre del 2008)

Ferrer, A. 2003. (En línea), intoxicación por metales. www.cfnavarra.es/salud/anales/textos/vol26/sup1/pdf/07Intoxicación%20por%20metales.pdf. (Consultada el día 7 de septiembre de 2008).

Henry 2000, (En línea), Contaminación Del Suelo, Metales Pesados, http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mbt/maqueda_g_ap/capitulo4.pdf (Consultado el 05 de Septiembre del 2008).

Higueras y Oyarzun, 2008, (En línea) Metales Pesados y su Bioacumulacion, <http://www.fcyt.umss.edu.bo/docentes/29/practicas/practica4.pdf>, (Consultado el 13 de Septiembre de 2008).

<http://intranet/> (En línea) página de Internet de la empresa peñoles, historia de l empresa peñoles, (consultado el 15 de Junio del 2008).

International Programme on Chemical Safety 2004; (En línea), Consenso Científico sobre el arsénico, <http://www.greenfacts.org/es/arsenico/> (Consultado el 05 de Octubre del 2008).

Kabata y Pendias, 2000, (En línea), movilización de metales, [http://www2.sag.gob.cl/Recursos- Naturales/criterios calidad_suelos agricolas/pdf/6 _ metales_pesados_cultivos.pdf](http://www2.sag.gob.cl/Recursos-Naturales/criterios%20calidad_suelos_agricolas/pdf/6_%20metales_pesados_cultivos.pdf), (Consultado el 12 de Agosto 2008).

Kimberly y William 1999. Trace metals in Montreal urban soils and the leaves of *Teraxacum officinale*. *Can. J. Soil Sci.* pg 385–387.

“La Caxia” fundación 1995. Reutilización de residuos urbanos en agricultura Editorial Aedos.

Lasat, 2000, (En línea), movilización de metales, http://www2.sag.gob.cl/Recursos-Naturales/criterios_calidad_suelos_agricolas/pdf/6_metales_pesados_cultivos.pdf, (Consultado el 12 de Agosto 2008).

Lenntech, 2008, (En línea), Propiedades Químicas Del Cadmio, www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Cd.htm - 29k, (Consultado el 05 de Octubre del 2008).

Lenntech 2008. (En línea). Plomo. <http://www.lenntech.com/espanol/tabla-peiodica/Pb.htm>. (Consultado el 22 de marzo del 2008).

Lilia América Albert 2001 , (En línea) Industria y salud: la gravedad de los accidentes químicos en México, *Ecológica*, 26 de Abril del 2001, <http://www.jornada.unam.mx/2001/04/30/eco-albert.html>, (Consultada el día 16 de Agosto del 2008).

Elena 1998, (En línea) Plomo en la salud, http://www.geocities.com/cyborgio2002/index_ligero/Articulos_boletin/plomo_hueso.htm, (Consultado el 20 de Septiembre del 2008).

INE, 2005. (En línea), Lo que usted debe saber sobre el plomo,
<http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/folletos/98/98.html>, (Consultada el 5 de septiembre de 2008).

Lesaca 1999, Complejos Orgánicos de Metales Pesados,
<http://rincondelvago.com/complejos-organicos-de-metales-pesados.html> - 44k
(Consultada el 27 de Agosto del 2008).

Loayza, 2008, (En línea), Plantas híper acumuladoras,
www.unmsm.edu.pe/quimica/ing%20loayza/BOLETIN_37.pdf - (Consultado el 16 de Octubre, 2008).

López 1999, (En línea) Panorama de la Problemática referente a la contaminación por metales, la Contaminación por metales pesados en Torreón Coahuila.
www.texascenter.org/publications/torreon.pdf, (Consultado el 20 de Agosto del 2008).

M Schuhmacher, 2000, artículo, Metales pesados y Salud, Consultado el 26 de Agosto de 2008).

Marcos G, Monrroy Fernández, Díaz Fernando, 2002, (En línea), Contaminación por arsénico y metales pesados, Análisis de riesgo en la salud,
<http://ambiental.uaslp.mx/docs/FDBByMMF-020701-NotaContVPMat.pdf>
(Consultado el 05 de Octubre del 2008).

Medio Ambiente 2001, Manual de Ecología y Medio Ambiente, 2005.

Marmioli, 2005 (En línea), movilización de metales,
<http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=488> , (Consultado el 12 de Agosto 2008).

Morton 2006, (En línea) Suelos Contaminados por Metales Pesados en México,
<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/432/43290106.pdf>, (Consultado e 08 de Septiembre de 2008).

Naidu et al; 2003 (En línea), Plantas híper acumuladoras,
www.unmsm.edu.pe/quimica/ing%20loayza/BOLETIN_37.pdf - (Consultado el 16 de Octubre, 2008)

Orden jurídico 2008, (En línea) norma oficial mexicana 147- Semarnat/SSA1-2004,
<http://vlex.com.mx/vid/27296997>. (Consultado el 7 de septiembre del 2008).

Puga 2006 (En línea). Suelo contaminado por Industria Minera,
www.accessmylibrary.com/coms2/summary_0286-32165564_ITM - 28.
(Consultada el 25 de Junio del 2008).

Pérez J. García G y Esparza F. 2002 (En línea). Papel Ecológico de la Flora Risosferica en Fitorremediacion,
www.cinvestav.mx/publicaciones/avayper/sepoct02/PAPELECOLOGICO.PDF
(Consultado el día 13 de septiembre de 2008).

Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas 2001, (En línea); El arsénico en el ambiente; Consenso Científico sobre el arsénico,
<http://www.greenfacts.org/es/arsenico/> (Consultado el 05 de Octubre del 2008).

PROFEPA, 2002, (En línea), Contaminación del suelo,
www.monografias.com/trabajos7/hime/hime.shtml?relacionados - 99k, (Consultado el 06 de Octubre del 2008).

PROY-NOM-147 SEMARNAT/SSA1-2004. (En línea), Norma Oficial Mexicana 147,
[www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Proyectos/111112005\(1\).pdf](http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Proyectos/111112005(1).pdf), (Consultado el 15 de Septiembre del 2008).

Rafael, I. J. 2006, (En línea). Plomo.

<http://webdelprofesor.ula.ve/farmacia/lunajr/escuela/plomo.ppt#257,1,Plomo>
(Consultado el día 26 de Agosto de 2008).

Rosen 1992. "Effects of Low Levels of Lead Exposure", Science 256 pg. 294.

Ross, S.M 1994. Sources and Forms of Potentially Toxic Metals in Soil-Plant Systems., p. 3–26, In S. M. E. Ross, ed. Toxic Metals in Soil-Plant Systems. John Wiley and Sons, England, UK.

Sellers, 1999, (En línea), Tecnologías de remediación de suelos,

www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/372/tecnolog.html - 80k, (Consultado 03 de Octubre del 2008).

Smoots. 2006. (En línea). Intoxicación por plomo.

healthlibrary.epnet.com/print.aspx?token=a69a3720-1856-4368-a0de-70fab1b892d&chunkid=103603. (Consultada el 8 de septiembre de 2008).

Sociedad Mexicana de Toxicología A.C. Xalapa 2003, (En línea), Contaminación ambiental, origen, clases, fuentes y efectos,

<http://www.cepis.org.pe/bvstox/fulltext/toxico/toxico-01a4.pdf>, (consultado el 26 de Agosto de 2008).

The University of Arizona. 2004 (En línea) restauración ambiental,

<http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/c4-3-1-2.html> (Consultada el 6 de septiembre de 2008).

Universidad Autónoma de Zacatecas. 2005. (En línea), Evaluación de riesgos ambientales por plomo en la población de Beta Grande Zacatecas,

<http://www.ine.gob.mx/dgicurg/download/Inf-Vetagrande%20final-1004-eine%20final.pdf>. (Consultada el 6 de septiembre de 2008).

- Universidad Ceu-San Pablo. Madrid. España, 2008, (En línea), El Cadmio, www.conganat.org/9congreso/PDF/625.pdf, (Consultado el 06 de Octubre del 2008).
- UNIVERSIDAD NACIONAL del NORDESTE, 2003, (En línea), Cadmio en las hojas de tabaco, eluniversitario.unne.edu.ar/2004/45/pagina/cienciaaldiaA.htm, (Consultado el 06 de Octubre del 2008).
- Valdez F. V. M. Cabrera, 1999. (En línea) La Contaminación por Metales Pesados en Torreón Coahuila, México, <http://www.texascenter.org/publications/torreon.pdf> (Consultada el 3 de septiembre del 2008).
- Valdés P., F. y V.M. Cabrera 1999. La contaminación por metales pesados en Torreón, Coahuila, México 1ª Ed. Texas Center for policy studies, CILADHAC, Torreón, Coahuila, México.
- Van Deuren y col., 1997, Tecnologías de remediación de suelos, www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/372/tecnolog.html - 80k, (Consultado 03 de Octubre del 2008).
- Valdez. 2001. (En línea). Contaminación por metales pesados en torreón, Coahuila. <http://www.jornada.unam.mx/2001/04/30/eco-valdez.html>. (Consultada el 7 de septiembre de 2008).
- Vargas, G. P., Rene. R. C. y Jenny D., 2004. (En línea). Biorremediacion del residuo del petróleo.<http://ciencias.uniandes.edu.co/pdf/petroleo.pdf#search=%22bioaumentacion%22>. (Consultada el día 9 de septiembre de 2008).
- Vázquez M. D 2001. (En línea). Uso de especies vegetales para controlar superficies contaminadas. Ecotropia. www.ecotropia.com. (Consultada el día 29 de Octubre del 2008).

- Viniegra et al. 1964, (En línea) Met Mex Peñoles y los niños de Torreón, Consultora en Toxicología Ambiental y Evaluación de Riesgos; Xalapa, México, (Consultado el 08 de julio de 2008).
- Viniegra G, R. Escobar., E. Borja., y PJ. Caballero 1964. La polucion atmosférica e hídrica de Torreón, Coahuila, Salud Pública México
- Volke, Velasco, 2002, (En línea), Tratamientos in situ y ex situ, www.ine.gob.mx/dgcenica/publica_dirsc.html - 56k- (Consultado 03 de Octubre del 2008).
- Waalkes MP, Rehm S. Cadmium and prostate cancer. J Toxicol Environ Health 1994; Martin JJ, Martin R, Codesal J, Fraile B, Paniagua R, Santamaria L. Cadmium chloride-induced dysplastic changes in the ventral rat prostate: an immunohistochemical and quantitative study
- WHO 1992, (En línea), Cinética de los Metales Pesados, http://www.itson.mx/drn/Revista/Vol_2_2006/Art_9_Navarro%20et%20al.pdf (Consultado el 05 de Septiembre del 2008).
- Wikipedia 2008, (En línea) arsénico, es.wikipedia.org/wiki/Arsénico – 58k, (Consultado el 7 de septiembre del 2008).
- Wong. Puga, 2003 (En línea). Universidad Autónoma de Chihuahua. Minería suelos contaminados, www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v5n1-2/a20v5n1-2.pdf. (Consultado el 25 de Junio de 2008).