

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

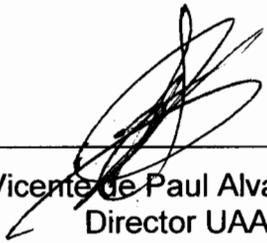
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



POTENCIAL FITORREMIADOR DE LA CHICURA (*Ambrosia ambrosioides*)
EN SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS (Cd, Cu y Pb)

Tesis

Que presenta RICARDO ISRAEL RAMÍREZ GOTTFRIED
como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS AGRARIAS



Dr. Vicente de Paul Alvarez Reyna
Director UAAAN



Dr. Guillermo González Cervantes
Director Externo

Torreón, Coahuila

Diciembre 2018

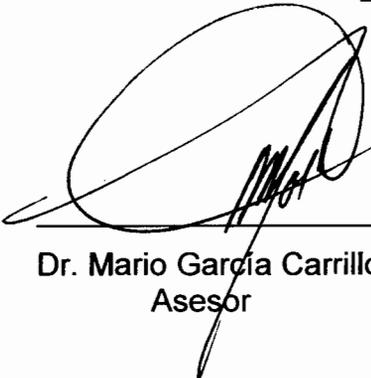
POTENCIAL FITORREMIADOR DE LA CHICURA (*Ambrosia ambrosioides*)
EN SUELOS CONTAMINADOS POR METALES PESADOS (Cd, Cu y Pb)

Tesis

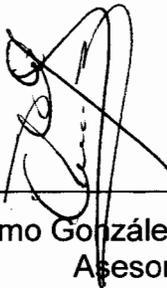
Elaborada por RICARDO ISRAEL RAMÍREZ GOTTFRIED como requisito parcial para
obtener el grado de Maestro en Ciencias Agrarias con la supervisión y aprobación del
Comité de Asesoría



Dr. Vicente de Paul Alvarez Reyna
Asesor Principal



Dr. Mario García Carrillo
Asesor



Dr. Guillermo González Cervantes
Asesor



Dr. Vicente Hernández Hernández
Asesor



Dra. Leticia Romana Gaytán Alemán
Jefe del Departamento de Postgrado



Dr. Marcelino Cabrera De la Fuente
Subdirector de Postgrado

Torreón, Coahuila

Diciembre 2018

AGRADECIMIENTOS

Primero que nada agradezco a mis padres por todo el apoyo brindado durante mis estudios. A mi alma mater la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que nos ha dado tanto y la única manera de retribuirle es convirtiéndonos en unos profesionistas ejemplares.

De manera especial, quiero agradecer a todo mi comité de asesores Ph.D. Vicente de Paul Álvarez Reyna, Dr. Mario García Carillo, Dr. Guillermo Cervantes y Dr. Vicente Hernández Hernández, quienes me han brindado sus conocimientos, confianza y apoyo, así como también sus consejos, no solo como maestros sino como amigos.

Al técnico académico José Silverio Álvarez Valadez del laboratorio de suelos de la UAAAN-UL, quien apporto todos sus conocimientos y apoyo en la realización de los análisis de este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar estudios de maestría CVU No 815402.

DEDICATORIA

A mis padres, porque creyeron en mí y me dieron todo su apoyo para sacarme adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, gracias a ustedes hoy puedo ver alcanzada una de las principales metas de mi vida, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mis estudios, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final.

A mi novia que siempre me apoyo a pesar que mucho tiempo la dejaba sola por cumplir con mis asuntos académicos.

A toda la gente que me apoyo en el transcurso de esta etapa de mi vida. Muchas gracias por todo.

A mis maestros quienes se han tomado el tiempo y trabajo de transmitirme sus diversos conocimiento. Pero además de eso, ellos han sido quienes han sabido guiarme por el camino correcto, y quienes me han ofrecido sabios conocimientos para lograr mis metas y lo que me proponga.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIA.....	II
ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
I. INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	3
<i>OBJETIVOS PARTICULARES.....</i>	<i>3</i>
HIPÓTESIS	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1DESCRIPCIÓN Y USO.....	4
2.1.1GENERO <i>Ambrosia</i>	4
2.1.2 <i>DESCRIPCIÓN</i>	4
2.1.3 <i>Ambrosia EN LA MEDICINA</i>	4
2.2 TOXICIDAD DE LAS PLANTAS.....	5
2.2.1 <i>TOXICIDAD DE Ambrosia EN HUMANOS</i>	5
2.2.2 <i>TOXICIDAD DE Ambrosia EN ANIMALES</i>	5
2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA <i>AMBROSIA AMBROSIOIDES</i>	5
.....	6
2.3.1 <i>FRUTO</i>	6
2.3.2 <i>TALLO</i>	6
.....	7
2.3.3 <i>HOJA</i>	7
2.3.4 <i>FLORES</i>	7
2.3.5 <i>PROPIEDADES FÚNGICAS</i>	8
2.3.6 <i>PROPIEDADES MEDICINALES</i>	8
2.4 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA.....	8
2.5 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	9

2.6 METALES PESADOS.	11
2.6.1 CADMIO.	13
2.6.1.1 TOXICIDAD DE CADMIO EN PLANTAS.	14
2.6.1.2 TOXICIDAD DE CADMIO EN HUMANOS.	14
2.6.2 COBRE.	16
2.6.2.1 TOXICIDAD DE COBRE EN PLANTAS.	16
2.6.2.2 TOXICIDAD DE COBRE EN HUMANOS.	17
2.6.3 PLOMO.	17
2.6.3.1 TOXICIDAD DE PLOMO EN PLANTAS.	17
2.6.3.2 TOXICIDAD DE PLOMO EN HUMANOS.	18
2.7 SUELO.	19
2.8 BIODISPONIBILIDAD.	20
2.9 CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR METALES PESADOS.	20
2.10 PLANTAS HIPERACUMULADORAS DE METALES PESADOS.	21
2.11 FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS.	23
2.12 FACTORES DE CONCENTRACIÓN.	26
2.12.1 FACTOR DE TRASLOCACIÓN BIOLÓGICO (FTB).	26
2.12.2 FACTOR BIOCONCENTRACIÓN (BCF).	26
III. MATERIALES Y MÉTODOS.	27
3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.	27
3.2 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.	27
3.3 PROCEDIMIENTOS.	27
3.3.1 COLECTA DE PLANTAS.	27
3.3.2 ACLIMATACIÓN DE LAS PLANTAS.	28
3.3.3 TRATAMIENTOS.	29
3.3.4 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.	30
3.3.5 COSECHA DE PLANTAS.	30
3.3.6 LAVADO.	31
3.3.7 SEPARACIÓN DE LA PLANTA.	31
3.3.8 SECADO.	31
3.3.9 PREPARACIÓN DE DIGESTIONES.	32
3.4 DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS.	34
.....	34
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	37

4.1 CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS.....	37
4.1.1 CADMIO	37
4.1.2 COBRE	38
4.1.3 PLOMO.....	39
4.2 ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN LAS ESTRUCTURAS MORFOLÓGICAS DE LA PLANTA.	40
4.2.1 RAÍZ.....	40
4.2.2 TALLO.....	43
4.2.3 HOJA.....	45
4.3 FACTOR DE TRASLOCACIÓN BIOLÓGICO (FTB) EN LA PLANTA.	48
4.4 FACTOR DE BIOCONCENTRACIÓN (BCF) EN LA PLANTA.	51
V. CONCLUSIONES.....	56
VI. LITERATURA CITADA	57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Fertilizantes y cantidades utilizados para la preparación de la solución nutritiva de Steiner.....	29
Cuadro 2: Proporciones utilizadas para la preparación de los diferentes tratamientos.	29
Cuadro 3: Metales evaluados.	35
Cuadro 4: Concentración de metal pesado aplicada.	35
Cuadro 5: Tratamientos de acuerdo a su interacción.	35
Cuadro 6: Acumulación de cadmio en planta bajo diferentes concentraciones (kg de peso seco).	37
Cuadro 7: Acumulación de cobre en planta bajo diferentes concentraciones (kg de peso seco).	38
Cuadro 8: Acumulación de plomo en planta bajo diferentes concentraciones (kg de peso seco).	39
Cuadro 9: Acumulación de metales en la raíz (kg de peso seco).	40
Cuadro 10: Acumulación de metales en el tallo (kg de peso seco).....	43
Cuadro 11 : Acumulación de metales en la hoja (kg de peso seco).	45
Cuadro 12 : Factor de traslocación biológico en <i>Ambrosia ambrosioides</i>	49
Cuadro 13 : Factor de bioconcentración en <i>Ambrosia ambrosioides</i>	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Ambrosia ambrosioides</i>	6
Figura 2: Fruto de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	6
Figura 3: Tallo de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	7
Figura 4: Hoja de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	7
Figura 5: Flores de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	8
Figura 6: <i>Ambrosia ambrosioides</i> en estado nativo.	9
Figura 7: Ubicación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna (UAAAN-UL).	27
Figura 8: Invernadero donde se realizó el experimento.	28
Figura 9: <i>Ambrosia ambrosioides</i> en sustrato de perlita y arena.	30
Figura 10: Estufa de secado.	31
Figura 11: Muestras molidas.	32
Figura 12: Molino eléctrico.	32
Figura 13: Calcinación de muestras en mufla Furnace 1500.	32
Figura 14: Muestra calcinada.	33
Figura 15: Contenido del crisol en el matraz.	33
Figura 16: Filtración del contenido del matraz.	34
Figura 17: Espectrofotómetro de absorción atómica modelo Perkin- Elmer 2380.	34
Figura 18: Concentración de cadmio en raíz tallo y hoja de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	38
Figura 19: Concentración de cobre en raíz tallo y hoja de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	39

Figura 20: Concentración de plomo en raíz tallo y hoja de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	40
Figura 21: Acumulación de Cd, Cu y Pb en la raíz de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	41
Figura 22: Factor metal pesado en raíz.	42
Figura 23: Factor concentración en raíz.	42
Figura 24: Acumulación de Cd, Cu y Pb en tallo de <i>Ambrosia ambrosioides</i> . .	44
Figura 25 Factor metal pesado en tallo.....	44
Figura 26: Factor concentración en tallo.....	45
Figura 27: Acumulaciones de Cd, Cu y Pb en la hoja de <i>Ambrosia ambrosioides</i>	46
Figura 28: Factor metal pesado en la hoja.....	47
Figura 29 : Factor concentración en la hoja.....	47
Figura 30: Factor de traslocación biológico en planta.....	50
Figura 31: Factor de traslocación biológico en el metal.	50
Figura 32: Factor de traslocación biológico en la concentración.....	51
Figura 33: Factor de bioconcentración en planta.....	53
Figura 34: Factor de bioconcentración en el metal.	53
Figura 35 Factor de bioconcentración en la concentración.....	54

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar el potencial fitorremediador de suelo de la *Ambrosia ambrosioides*, determinar la absorción de metales pesados (Cadmio, Cobre y Plomo) bajo diferentes concentraciones (0, 20, 40, y 60 mg L⁻¹) en sus estructuras morfológicas (raíz, hoja y tallo) mediante la absorción atómica, se calculó el factor de traslocación y factor de bioconcentración.

La colecta de plantas se realizó en el Lecho Seco del Rio Nazas en el área del Parque Estatal Cañón de Fernández. El desarrollo del experimento y análisis de laboratorio se realizaron en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna. Se utilizó un diseño factorial 3 por 4 con 4 repeticiones, siendo el factor A el metal pesado y el B la concentración del metal. Se tuvieron en total 12 tratamientos.

Los resultados mostraron que en raíz, tallo y hoja las mayores concentraciones se presentaron en el tratamiento de cobre a 20 mg L⁻¹ con valores de 15827.2, 13030.9 y 4979.4 mg Kg⁻¹ respectivamente. El cobre fue el metal que más absorbió la planta seguido por cadmio y plomo. El factor de traslocación biológico indicó que el cadmio es un elemento que la planta trasloca hacia sus hojas con mayor facilidad seguido por el cobre. En *Ambrosia ambrosioides* es nula la traslocación de plomo. El factor de bioconcentración superó el valor comparativo de 1 en todos los tratamientos, esto indica que se llevó una alta fitoextracción y que *Ambrosia ambrosioides* puede ser utilizada en fitorremediación y sanidad de suelos.

Palabras clave: absorción, acumulación, traslocación, bioconcentración.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the soil phytoremediation potential of *Ambrosia ambrosioides*, to determine the absorption of heavy metals (Cadmium, Copper and Lead) under different concentrations (0, 20, 40, and 60 mg L⁻¹) in their morphological structures (root, leaf and stem) through atomic absorption, the translocation factor and bioconcentration factor were calculated.

The collection of plants was carried out in the dry bed of Rio Nazas in the area of the Cañón de Fernández State Park. The development of the experiment and laboratory analysis were carried out at the Autonomous Agrarian University Antonio Narro Laguna Unit. A factorial design 3 by 4 with 4 replicates was used, being the factor A the heavy metal and B the concentration of the metal. A total of 12 treatments were evaluated.

The results showed that in root, stem and leaf the highest concentrations were presented in the copper treatment at 20 mg L⁻¹ with values of 15827.2, 13030.9 and 4979.4 (mg Kg⁻¹) respectively. Copper was the metal that most absorbed the plant followed by cadmium and lead. The biological translocation factor indicated that cadmium is an element that the plant translocates to its leaves more easily followed by copper. In *Ambrosia ambrosioides* the translocation of Pb is null. The bioconcentration factor exceeded the comparative value of 1 in all the treatments, this indicates that a high phytoextraction was carried out and that *Ambrosia ambrosioides* can be used in phytoremediation of soil.

Key words: absorption, accumulation, bioconcentration, translocation.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación por metales pesados es un problema que se ha incrementado debido principalmente a actividades antrópicas. La minería es una de las principales causas de la contaminación ambiental por metales pesados. Una de las principales fuentes de contaminación es la metalúrgica, la agricultura y los vehículos automotores.

Las actividades mineras y metalúrgicas practicadas en la Comarca Lagunera han contaminado el suelo, aire y agua de la región con diferentes elementos potencialmente tóxicos como plomo, cadmio, cobre, arsénico y zinc. Estudios conducidos sobre la contaminación con metales pesados en las inmediaciones de la plantas fundidoras cercanas a suelo agrícola también han mostrado evidencia que indica contaminación de este suelo.

Estudios han demostrado que el suelo de las áreas habitacionales cercanas a complejos metalúrgicos tienen alta concentración de cadmio y plomo, estas superan los niveles considerados como aceptables. El diagnóstico más reciente en la ciudad de Torreón, Coahuila, en el área donde opera una planta fundidora, indica alto nivel de contaminación.

Otro punto importante es que la escasez de agua dulce se ha convertido en un problema creciente en gran parte del territorio nacional y en la Comarca Lagunera. Actualmente la agricultura ocupa más del 70 por ciento del recurso hídrico disponible en el planeta. Esto ha provocado que el reciclaje y utilización de las aguas residuales de espacios urbanos en cultivos agrícolas sea una práctica cada vez más frecuente.

Los metales pesados que se depositan en suelo agrícola irrigado con agua tratada y residual son altamente contaminantes ya que quedan depositados en ellos y es muy difícil eliminarlos. La asimilación de estos metales en organismos vivos y su alta toxicidad los hace un peligro para el desarrollo fisiológico de plantas así como para la salud de los seres humanos.

En México, al igual que en muchos países, la prevención de la contaminación del ambiente (suelo, agua y aire) y su recuperación es una prioridad.

En las últimas décadas del siglo XX surgió tecnología basada en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelo y recuperar los ecosistemas afectados. Una de estas tecnologías es el uso de especies vegetales para la remoción de metales pesados del suelo o "fitorremediación". Esta técnica se basa en el uso conjunto de plantas, enmiendas de suelo y técnicas agronómicas para eliminar, retener, o disminuir la toxicidad de los contaminantes del suelo. Una ventaja de la fitorremediación es que los metales absorbidos por las plantas pueden ser extraídos de la biomasa cosechada y después ser reciclados.

OBJETIVOS

Determinar el potencial fitorremediador de la de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelos contaminados por metales pesados (Cd, Cu y Pb).

OBJETIVOS PARTICULARES

Determinar la concentración de metales pesados (Cd, Cu y Pb), absorbidos en los diferentes órganos de la planta raíz, tallo, hoja.

Evaluar el factor de traslocación de *Ambrosia ambrosioides*.

Determinar el factor de bioconcentración biológico de *Ambrosia ambrosioides*.

HIPÓTESIS

Las concentraciones de Cadmio, Cobre y Plomo se acumularán principalmente en la raíz de la planta y su concentración aumentará de acuerdo a la proporción de mg L^{-1} aplicadas.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 DESCRIPCIÓN Y USO.

2.1.1 GÉNERO *Ambrosia*.

El género *Ambrosia* L. pertenece a la familia *Asteraceae* (*Compositae*) y está constituido por casi cuarenta especies originarias, la mayor parte, de Norteamérica y Sudamérica, desde donde se han propagado a otras áreas del globo, especialmente a Europa y Japón, en las cuales se consideran sinantrópicas, es decir, plantas ligadas a la acción voluntaria o involuntaria del hombre, que generalmente tiende a modificar su área de distribución natural (Morales *et al.*, 2012).

2.1.2 DESCRIPCIÓN.

Suelen ser hierbas anuales, bienales o perennes, excepcionalmente arbustos, con tallos erectos, ramificados en la mitad superior, hojas alternas, opuestas o subopuestas, enteras, lobuladas o profundamente divididas, pecioladas o subsésiles, con peciolo alado o áptero (Morales *et al.*, 2012).

2.1.3 *Ambrosia* EN LA MEDICINA.

El género *Ambrosia* ha sido estudiada como antioxidante por los flavonoides y glicósidos que contienen, y que son utilizados en el tratamiento de infecciones y como antiinflamatorio por su capacidad de inhibir la producción de óxido nítrico, importante mediador en los procesos inflamatorios (Yañez *et al.*, 2011).

La mayoría de estas especies son plantas aromáticas y medicinales poco estudiadas en nuestro medio., son consideradas como hierbas malas y por lo tanto, el cultivo de la mayoría de ellas, no se ha sistematizado. En la región Arequipa y en otras regiones del Perú se ha encontrado otras especies del género *Ambrosia*, cuyos estudios etnobotánicos las reportan como medicinales (Cano, 2014).

2.2 TOXICIDAD DE LAS PLANTAS.

2.2.1 TOXICIDAD DE *Ambrosia* EN HUMANOS.

Las plantas de *Ambrosia spp.* producen granos de polen en grandes cantidades que son transportadas en el aire fácilmente y pueden alcanzar el tracto respiratorio de las personas. El polen de la *Ambrosia spp.* es reconocida por su alto poder alergénico. La rino-conjuntivitis y el asma debido a la inhalación del polen son las manifestaciones clínicas más comunes. La exposición cutánea puede ser vía aérea o por contacto con la planta. En estos casos, la manifestación clínica más común es la dermatitis atópica (Fundación Vasca para la Seguridad Alimentaria, 2013).

2.2.2 TOXICIDAD DE *Ambrosia* EN ANIMALES.

En una investigación realizada para estudiar la congestión nasal, perros de la raza beagle fueron expuestos a semillas de *Ambrosia spp.* via intranasal. La respuesta observada fue la disminución dosis-relacionada del volumen de la cavidad nasal pero sin mostrar efectos sistémicos adversos. Los animales vacunos son susceptibles de ser alérgicos a los antígenos de polen al igual que los caballos (Fundación Vasca para la Seguridad Alimentaria, 2013).

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LA *Ambrosia ambrosioides*.

Ambrosia ambrosioides es la ambrosía arbustiva más común, se encuentra en los lavados de arena y áreas alteradas como los bordes de las carreteras, orillas de ríos y ocasionalmente en las grietas de las rocas (Turner *et al.*, 1995).



Figura 1: *Ambrosia ambrosioides*.

2.3.1 FRUTO.

Los frutos son de 10-15 mm de largo armadas con numerosas espinas en forma de gancho (Turner *et al.*, 1995).



Figura 2: Fruto de *Ambrosia ambrosioides*.

2.3.2 TALLO.

Los tallos se congelan en el suelo a -6.6°C , pero vuelven a crecer rápidamente desde la corona de la raíz. La distribución indica una necesidad de inundación periódica en temporada cálida. (Turner *et al.*, 1995).



Figura 3: Tallo de *Ambrosia ambrosioides*.

2.3.3 HOJA.

Es de hoja perene, las hojas se desprenden después de heladas severas o durante una sequía prolongada. Tiene hojas de 4-18 cm de largo y 1.5-4 (ocasionalmente 6) cm de ancho. Son lanceolados-atenuados y de dientes gruesos (Turner *et al.*, 1995).



Figura 4: Hoja de *Ambrosia ambrosioides*.

2.3.4 FLORES.

Las flores aparecen principalmente en primavera (Febrero-Abril) ocasionalmente en otras épocas del año. Son polinizados por el viento y pueden ser un poderoso alérgeno para las personas susceptibles (Turner *et al.*, 1995).



Figura 5: Flores de *Ambrosia ambrosioides*.

2.3.5 PROPIEDADES FÚNGICAS.

Se ha utilizado el extracto alcohólico de *Ambrosia ambrosioides* como fungicida en diversas especies de hongos, teniendo un efecto en el crecimiento del hongo *Aspergillus niger*, mostrando una inhibición en el crecimiento entre el 52 y 50% respectivamente (Tequida *et al.*, 2002).

2.3.6 PROPIEDADES MEDICINALES.

La *Ambrosia ambrosioides* es usada como planta medicinal para ayudar en el dolor de estómago, expulsión placentaria, llagas, síntomas menstruales, enfermedades del cabello, heridas y reumatismo (Salido *et al.*, 2016).

Se usa en lavados después del parto, para arrojar la placenta. Las hojas de la chicura, tatemadas y con un poco de sebo, las utilizaban para curar granos y tomada era remedio cuando se detenía la menstruación (López, 2011).

Es común que la gente de las regiones donde se ubica la planta hagan te medicinal con la raíz (Turner *et al.*, 1995).

2.4 CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA.

Nombre Científico: *Ambrosia ambrosioides*

Nombre Común: Chicura

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta
Clase: Magnoliopsida
Orden: Asterales
Familia: Asteraceae
Subfamilia: Asteroideae
Tribu: Heliantheae
Subtribu: Ambrosiinae
Género: *Ambrosia*
Especie: *Ambrosia ambrosioides*
(CONABIO, 2009)



Figura 6: *Ambrosia ambrosioides* en estado nativo.

2.5 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

En las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos o emplazamientos contaminados y recuperar los ecosistemas afectados. Cuando estas tecnologías se basan en el uso de plantas, globalmente reciben el nombre de fitorremediación (en español se usan indistintamente también: fitorrecuperación, fitocorrección, fitorrestauración o fitorrehabilitación). Se define como el uso de plantas verdes para eliminar los contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad (Carpena *et al.*, 2007).

Kidd *et al.*, (2007) realizó una investigación donde recopiló información de plantas del género *Alyssum* L. y su efecto fitoextractor de níquel. En cultivos hidropónicos, algunas plantas hiperacumuladoras de Ni de este género mostraron un crecimiento óptimo en disoluciones con una concentración de 30 μM de Ni.

Contreras *et al.*, (2016) hizo un estudio donde estudió la capacidad de *Ambrosia ambrosioides* para absorber y acumular plomo (Pb) en sus tejidos e identificar cuál parte de la planta acumulaba el metal en mayor cantidad. Sus resultados demostraron que dicha planta es capaz de absorber en su raíz un promedio de 4,638 mg de plomo por cada kilogramo de planta (peso seco), cuando es

expuesta a grandes concentraciones de plomo (1.5g). La planta no mostro fitotoxicidad. Esto indica que *Ambrosia ambrosioides* es una planta hiperacumuladora de plomo y puede ser utilizada como fitoestabilizadora de dicho metal.

Becerril *et al.*, (2007) realizo un experimento donde se centró en las escombreras mineras y terrenos adyacentes de una mina de galena abandonada desde la década de los 60, en una zona kárstica y montañosa, un área altamente contaminada por diferentes metales pesados. Identifico más de 50 especies que perteneces a 29 géneros de 18 familias. La vegetación del entorno minero estaba constituida mayoritariamente por pseudometalofitas. Encontró especies hipertolerantes en lugares con alta concentración de metales: *Thlaspi caerulescens*, *Jasione montana* L., *Rumex acetosa* L. y *Festuca rubra* L. De éstas, algunas presentaban altos niveles de metales en sus hojas, como R. acetosa y J. montana. Sin embargo, los niveles más altos se encontraron en la especie hiperacumuladora de Zn *T. caerulescens* (14.000 mg Kg⁻¹ de materia seca).

Sepulveda *et al.*, (2012) utilizo *Sarcocornia neei* (salicornia) para la absorción de metales pesados desde un relave, determinó Cu, Fe, Mn, Mo, As Hg y Cd. *Salicornia* absorbió mayormente Fe, Cu y Mn. Para el caso de Mn y Hg una tonelada de plantas podría, teóricamente, absorber el 73% y 100%, respectivamente, de los elementos existentes en una tonelada de relave. Estos resultados muestran que esta especie parece ser adecuada para la fitoextracción desde relaves.

Jara *et al.*, (2014) evaluaron la capacidad fitorremediadora de cinco especies de plantas a diferentes concentraciones de relave de minas, sus resultados indicaron que la mayor eficiencia de acumulación de plomo y zinc fue obtenida en las raíces de *Fuertesimalva echinata* con el tratamiento de 100% de relave de mina, obteniendo 2015.1 mg de plomo y 1024.2 mg de zinc por kg. En las

raíces de *L. ballianus* fue obtenida la más alta acumulación de cadmio, con una concentración de 287.3 mg Kg⁻¹ con el tratamiento de 100% de relave de mina.

Ortiz *et al.*, (2009) probaron la capacidad extractora de Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) del quelite (*Amaranthus hybridus* L.) al adicionar una mezcla de micorrizas arbusculares (*Entrophospora columbiana*, *Glomus intraradices*, *G. etunicatum*, *G clarum*) al sustrato contaminado con Pb o Cd. Encontraron que las concentraciones de Pb y Cd en raíz, hoja y tallo a los 65, 95 y 125 días de edad los resultados indican que la adición de micorrizas incrementó significativamente la concentración de Pb y Cd en raíz, tallo y hoja de quelite. Las concentraciones de estos metales se incrementaron significativamente conforme la edad de la planta.

Ortega *et al.*, (2011), identificaron que la *Gynerium sagittatum* (aubl) beav es una especie que acumula Hg en sus tejidos, siendo la raíz la parte de la planta que presenta mayor concentración, seguida de los tallos-hojas. La capacidad de acumulación en las raíces está relacionada con la concentración que se presente en el medio de cultivo, y la capacidad de acumulación en los tallos-hojas está relacionada con la capacidad de traslocación del Hg a través de las raíces. Se pudo establecer que cuando las plantas de *Gynerium sagittatum* beav fueron sometidas a concentraciones elevadas de Hg, presentaron bajos porcentajes de clorosis y necrosis indicando pocos efectos fitotóxicos.

Landeros *et al.*, (2011) determinaron la tasa de fitoextracción de plomo en *Acacia farnesiana* L. Will. Utilizaron árboles jóvenes, colocados en macetas plásticas, en donde se agregó una combinación de tres concentraciones de plomo (0, 250 y 500 mg Kg⁻¹). Encontraron que la mayor acumulación de plomo ocurrió en la parte aérea de la planta con una media de 352.34 mg Kg⁻¹.

2.6 METALES PESADOS.

En la Tierra existe casi un centenar de elementos químicos naturales, pero los seres vivos que la habitan usan tan solo una veintena. Conforman este grupo

numerosos metales, muchos de ellos esenciales para que los organismos puedan completar su ciclo de vida. Sin embargo, mientras algunos son imprescindibles para la supervivencia, el exceso o la presencia de otros pueden resultar tóxicos o aún letales (Azpilicueta *et al.*, 2010).

Los metales pesados son especies químicas no degradables. Por tal motivo, una vez volcados al medio ambiente, sólo pueden distribuirse entre los entornos aire, agua y suelo, a veces cambiando su estado de oxidación, o incorporarse a los seres vivos (Vullo, 2003).

Se definen como “metales pesados” aquellos elementos químicos que presentan una densidad igual o superior a 5 g/cm cuando están en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20 (excluyendo a los metales alcalinos y alcalinotérreos). Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0,1% y casi siempre menor del 0,01%. Se pretende indicar con este término aquellos metales que, siendo elementos pesados, son “tóxicos” para la célula (Navarro *et al.*, 2007).

Se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Prieto *et al.*, 2009).

Debido a su toxicidad y tendencia a acumularse en los sistemas biológicos, representan un riesgo para la salud del hombre y los ecosistemas. Estos elementos provienen de diferentes fuentes como consecuencia de la actividad antropogénica: combustibles, aerosoles urbano-industriales, desechos líquidos y sólidos de origen animal y humano, industria minera, química, textil, productos químicos empleados en el sector agropecuario. Además, está comprobado que son fuentes de contaminación de suelos agrícolas los agroquímicos en general, los fertilizantes fosfatados en particular, los cohetes utilizados en la lucha antigranizo y los abonos orgánicos (Martí *et al.*, 2011).

Son muy peligrosos para los seres vivos en general, pues poseen una gran toxicidad, en parte debido a su elevada tendencia a bioacumularse. La bioacumulación es un aumento de la concentración de un producto químico en un organismo biológico en un cierto plazo, de forma que llega a ser superior a la del producto químico en el ambiente (Navarro *et al.*, 2007).

Marrero *et al.*, (2012) menciona que La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (E.P.A.) ha definido al Hg (un metal traza pesado) como peligroso, una ligera exposición a este metal puede causar daños a la salud humana. Otros nueve metales han sido definidos como posibles elementos peligrosos: Ba, Cd, Cu, Pb, Mn, Ni, Zn, Vn, Sn; su peligrosidad es potencial y deben mantenerse bajo control. Todos estos, excepto el manganeso son metales traza, y todos, excepto el bario, son metales pesados.

2.6.1 CADMIO.

Los metales como el cadmio se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, lo que hace inevitable que se acumulen a través de toda la cadena alimenticia. Esto es muy importante desde el punto de vista toxicológico, ya que el cadmio presenta un gran espectro de efectos tóxicos (García *et al.*, 1999).

El cadmio (*cadmia* en latín y en griego *kadmeia*, significa “calamina”, nombre que recibía antiguamente el carbonato de zinc) fue descubierto en Alemania en 1817 por Friedrich Stromeyer como una impureza en el carbonato de zinc. Desde esa fecha rara vez se utilizó; hasta hace apenas unos 50 años se le encontraron aplicaciones metalúrgicas. El cadmio suave y de color blanco plateado es relativamente barato, ya que es un subproducto del procesamiento de metales más valiosos, como el cinc y el cobre (Pérez & Azcona, 2012).

El Cadmio es un elemento relativamente raro en la litosfera. Por afinidad química, se le encuentra junto al zinc, en proporción muy variable. Las principales fuentes de contaminación son: la minero metalurgia de metales no ferrosos, la metalurgia del hierro y acero, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de residuos de madera, carbón o “plásticos”, la

combustión de aceite y gasolina y las aplicaciones industriales de cadmio (Ramírez, 2002).

2.6.1.1 TOXICIDAD DE CADMIO EN PLANTAS.

Los efectos tóxicos del cadmio sobre las plantas, han sido ampliamente estudiados. En general el Cd Interfiere en la entrada, transporte y utilización de elementos esenciales (Ca, Mg, P y K) y del agua, provocando desequilibrios nutricionales e hídricos en la planta. Las plantas expuestas a suelos contaminados con Cadmio presentan modificaciones en la apertura estomática, fotosíntesis y transpiración (Rodríguez *et al.*, 2008).

Pernía, *et al.*, (2008) menciona que algunos de los efectos del cadmio sobre las plantas son: reducción en el crecimiento y de la elongación de las raíces, inhibición de la apertura estomática, inhibición de la síntesis de clorofila, inhibición de la fotosíntesis, disminución en el contenido de carotinoides, disminución en la tasa de transpiración, inhibición de la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico, estrés oxidativo y enzimas antioxidantes, interferencia con la toma, transporte y uso de varios macro y micronutrientes, especialmente Fe, Mn y Zn.

Uno de los síntomas más extendidos de la toxicidad por Cadmio es la clorosis producida por una deficiencia en Hierro, fosfatos o por la reducción del transporte de Mn. También ocasiona alteraciones en la funcionalidad de la membrana plasmática y desequilibrios en el metabolismo del cloroplasto, inhibiendo la síntesis de clorofila y reduciendo la actividad de enzimas implicadas en la fijación de CO₂ (Rodríguez *et al.*, 2008).

2.6.1.2 TOXICIDAD DE CADMIO EN HUMANOS.

El Cadmio está clasificado como carcinógeno para los seres humanos, en general, la población está expuesta al Cadmio principalmente por vía la oral a través del agua e ingesta de comida contaminada con cadmio (hojas de vegetales, granos, cereales, frutas, vísceras animales y pescado). Los

mecanismos moleculares de la toxicidad de Cadmio no son completamente conocidos hasta el momento (Nava & Méndez, 2011).

El contenido corporal de Cadmio se incrementa con la edad hasta los 50 años. La vida media del Cadmio en el organismo total es de 30 a 40 años (Ramírez, 2002).

Tiene efectos bien establecidos sobre los riñones, los huesos y los pulmones; se tiene menos evidencia de sus efectos neurotóxicos, teratogénicos o alteradores del sistema endocrino. Incluso una exposición crónica relativamente baja puede causar daños irreversibles a los túbulos renales, que pueden dar lugar al daño glomerular y a la insuficiencia renal; con frecuencia se observa pérdida de hueso junto con estos efectos (Mead, 2011).

Causa enfisema; nefrotoxicidad; infertilidad; cáncer de próstata; alteraciones neurológicas; hipertensión; enfermedades vasculares y óseas. El cadmio es considerado uno de los elementos más peligrosos para la alimentación humana, particularmente por su carácter acumulativo (Navarro *et al.*, 2007).

Con mucha frecuencia se observan efectos pulmonares, en particular el cáncer de pulmón, en las poblaciones ocupacionalmente expuestas. La exposición al cadmio se asoció significativamente con niveles elevados de proteína reactiva y fibrinógeno, lo que sugiere que el cadmio podría contribuir a la diabetes, a la enfermedad cardiovascular y a otros problemas de salud relacionados con inflamación (Mead, 2011).

Algunas manifestaciones clínicas por ingestión son: náuseas, vómitos, dolores abdominales y cefalea. En muchos casos hay diarrea intensa con colapso. Estos síntomas aparecen cuando se ingiere agua o alimentos con cadmio en concentraciones de alrededor de 15 ppm. La intoxicación aguda puede producirse por la ingestión de altas concentraciones de Cadmio y lleva, incluso, al choque (Pérez & Azcona, 2012).

2.6.2 COBRE.

El cobre en el suelo se encuentra asociado a minerales sulfurosos simples y complejos, los cuales son fácilmente solubles a los procesos de intemperismo, especialmente en ambientes ácidos, también tiene una gran habilidad para interactuar químicamente con compuestos minerales y orgánicos (Bautista, 1999).

Este metal es esencial para la función de diversas reacciones enzimáticas, por lo cual desempeña un papel importante en procesos biológicos tales como la formación del tejido conectivo, la homeostasis del hierro y la protección contra la acción de radicales libres como el anión superóxido (Arcaya *et al.*, 2013).

2.6.2.1 TOXICIDAD DE COBRE EN PLANTAS.

El cobre es un elemento esencial pero en concentraciones altas puede llegar a ser tóxico para los organismos. Generalmente, se ha utilizado como fungicida para tratar varias enfermedades que presentan los cultivos de plantas, sin embargo debido a un uso excesivo, varios terrenos agrícolas tienen altos contenidos (Hernández *et al.*, 2012).

Es esencial de las plantas que es requerido para su crecimiento y participa en reacciones de oxidación-reducción. Sin embargo, se convierte en un metal tóxico cuando se encuentra en los tejidos a concentraciones más altas a las necesarias para el crecimiento vegetal ($>30\text{mg Kg}^{-1}$) (León & Sepúlveda, 2012).

El cobre es un metal tóxico cuando se encuentra en los tejidos de las plantas a concentraciones más altas a las necesarias para el crecimiento vegetal. El cobre promueve la generación de especies reactivas de oxígeno, en forma enzimática y no enzimática, las cuales pueden causar la oxidación de proteínas y lípidos, alterar la integridad de las membranas, la fotosíntesis, el crecimiento e inducir la muerte celular (León & Sepúlveda, 2012).

2.6.2.2 TOXICIDAD DE COBRE EN HUMANOS.

Los efectos por deficiencias y excesos intensos de cobre se conocen en la medicina humana porque existen dos enfermedades genéticas que representan estos casos extremos y están ampliamente descritas. La enfermedad de Menkes, es el modelo clásico de deficiencia de cobre muy grave. Por su parte, la enfermedad de Wilson es el ejemplo más conocido de los efectos que produce el exceso de cobre debido a la falla de la eliminación por la bilis acumula cobre hasta enfermar y desarrolla cirrosis e insuficiencia hepática. La información existente sugiere que no hay relación entre el consumo de cobre y el cáncer (PROCOBRE, 2010).

2.6.3 PLOMO.

En los últimos años se ha producido un rápido aumento del nivel de Pb en el ambiente, como consecuencia de diversas actividades antrópicas tales como la fundición, la minería, la fabricación de pinturas, la combustión de gasolina y el reciclaje de baterías ácidas (Cala & Kunimine, 2003).

El Pb generado de esas actividades puede permanecer como residuo por 1000 a 3000 años en suelos de clima templado. Por lo anterior, los altos contenidos de Pb en el suelo pueden provocar problemas de toxicidad en plantas, animales y humanos. En México han sido reportados algunos casos de contaminación; en Monterrey, Nuevo León, se encontró que los contenidos de Pb en suelos de un parque público y de un lote urbano fueron de 492 y 764 mg de Pb kg de suelo respectivamente (Rodríguez *et al.*, 2006).

2.6.3.1 TOXICIDAD DE PLOMO EN PLANTAS.

El ingreso de este metal causa disrupciones en la estructura celular y a lo largo del proceso fotosintético, provocando así alteraciones fisiológicas como reducción en el crecimiento, clorosis, necrosis y cambios en el régimen hídrico (Yllanes *et al.*, 2014).

El Pb es absorbido por las raíces de las plantas aunque su traslocación es generalmente limitada, puede acumularse en diferentes partes de este debido aparentemente a los enlaces que forma en las superficies y paredes celulares de las raíces. Debido a su afinidad para formar ligandos con compuestos clave relacionados con diversas funciones metabólicas, la acumulación de iones de Pb en plantas puede causar múltiples efectos, tanto directos como indirectos. Puede causar efectos en el metabolismo que repercutirán en el crecimiento, fotosíntesis y en la absorción de nutrientes (Díaz *et al.*, 2001).

En un experimento llevado a cabo por donde se aplicó Pb en maíz encontró que aplicación de este metal causó un aumento en la concentración de clorofila foliar, también encontró que la concentración de proteína total de la hoja y el porcentaje de humedad foliar disminuyeron considerablemente (Yllanes *et al.*, 2014).

2.6.3.2 TOXICIDAD DE PLOMO EN HUMANOS.

Sanón *et al.*, (1998) señala que los efectos nocivos del plomo han sido conocidos desde tiempos antiguos por su amplia gama; este metal afecta prácticamente todos los órganos y sistemas del cuerpo humano. Se han documentado efectos crónicos en los sistemas cardiovascular y nervioso, con niveles que antes se consideraban seguros. El sitio primario de almacenamiento del plomo en el organismo es el hueso.

Este metal afecta sistemas, órganos y tejidos y su efecto puede ser proporcional a la cantidad presente en el organismo. Pero los umbrales de sus efectos tóxicos varían en diferentes individuos. Se recomienda que los niveles en sangre se mantengan debajo de los límites marcados por los departamentos de salud (Poma, 2008).

Es el metal con propiedades tóxicas que más se ha propagado en el ambiente en las últimas décadas. Alteraciones neurológicas, nefrotoxicidad, anemia, cáncer de riñón. Los animales pueden absorber plomo por inhalación o

ingestión. Si la absorción es lenta, la excreción lo es más aún, de manera que el plomo tiende a acumularse (Navarro *et al.*, 2007).

Los niños son más susceptibles dado que, en relación con su masa, inhalan más aire e ingieren mayores cantidades de suelo que los adultos; pero además, la interacción mano-boca, tan común durante la infancia, facilita la ingesta de polvo. Por si estos datos no fueran suficientes, es necesario considerar que la absorción gastrointestinal del plomo en niños es hasta cinco veces superior que en el adulto y la distribución a órganos extra-óseos (incluyendo el sistema nervioso central) también es mayor (Flores *et al.*, 2012).

La anemia es el primer síntoma de envenenamiento crónico producido por el plomo en los animales, dado que interfiere en la síntesis del grupo hemo, reflejándose en síntomas tales como náuseas, vómitos y dolores abdominales. Más grave es la degeneración del tejido en el sistema nervioso central (Navarro *et al.*, 2007).

2.7 SUELO.

El suelo es un componente esencial del medio ambiente, base del ecosistema terrestre, principio de muchas cadenas tróficas y soporte del medio urbano e industrial. Dentro de sus funciones actúa como tampón, controlando el transporte de elementos químicos y sustancias hacia la atmósfera, hidrosfera y biosfera (Nungaray, 2014).

Es un sistema abierto que presenta intercambios de materia y energía con el medio, en donde se desarrollan diversos procesos físicos, químicos y biológicos, responsables de su morfología (forma) y propiedades. El suelo es un cuerpo natural, y dinámico que cambia con el tiempo y el espacio. Es soporte de una gran variedad de organismos, entre ellos la vegetación, característica relevante pues de ella dependen las actividades agrícolas, fuente de alimento para la humanidad. El suelo está constituido de tres fases que se corresponde

con los estados físicos de la materia, es decir, sólido, líquido y gaseoso (Bautista, 1999).

2.8 BIODISPONIBILIDAD.

El termino se refiere a la capacidad de un elemento para pasar de un compartimento cualquiera del suelo a un ser vivo. Esta movilidad, que se define como la aptitud de transferencia de metales pesados entre compartimentos, está determinada por la forma, el número de cargas y la energía de retención de los metales pesados y se ve influenciada por factores externos (pH, temperatura, humedad, ambiente químico etc.) aunque también se puede asociar con el uso de suelo (Nungaray, 2014).

2.9 CONTAMINACIÓN DE SUELOS POR METALES PESADOS.

Becerril *et al.*, (2007) nos menciona que una de las consecuencias más negativas de la revolución industrial ha sido la dispersión de los contaminantes en el agua, atmósfera y suelo. De éstos, el suelo es el medio más estático, donde los contaminantes pueden permanecer durante mucho tiempo. Esta permanencia a largo plazo es especialmente grave en el caso de contaminantes inorgánicos como los metales pesados, que no pueden ser degradados. Su persistencia, acumulación progresiva y/o su transferencia a otros sistemas supone una amenaza para la salud humana y la de los ecosistemas.

Las concentraciones anómalas de metales pesados en los suelos pueden deberse básicamente a dos tipos de factores: causas naturales y causas antropogénicas. Las causas naturales pueden ser entre otras, actividad volcánica, procesos de formación de suelos, meteoros, erosión de rocas, terremotos, tsunamis, etc. Las causas antropogénicas pueden ser la minería, la combustión de carburantes fósiles, la industria a través de los vertidos, emisiones, residuos (incineración, depósito), como algunos pesticidas y fertilizantes, etc. (Navarro *et al.*, 2007).

Prieto *et al.*, (2009) nos menciona que cuando el contenido de metales pesados en el suelo alcanzan niveles que rebasan los límites máximos permitidos causan efectos inmediatos como inhibición del crecimiento normal y el desarrollo de las plantas, y un disturbio funcional en otros componentes del ambiente así como la disminución de las poblaciones microbianas del suelo, el término que se usa o se emplea es “polución de suelos”.

Pueden alcanzar niveles de concentración que provocan efectos negativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas en los suelos como: reducción del contenido de materia orgánica, disminución de nutrimentos, variación del pH generando suelos ácidos, efectos adversos en el número, diversidad y actividad en los microorganismos de la rizósfera, dificultan el crecimiento de una cubierta vegetal protectora favoreciendo la aridez, erosión del suelo, y la dispersión de los contaminantes hacia zonas y acuíferos adyacentes y como consecuencia aumenta la vulnerabilidad de la planta al ataque por insectos, plagas y enfermedades, afectando su desarrollo (Trejo *et al.*, 2015).

2.10 PLANTAS HIPERACUMULADORAS DE METALES PESADOS.

La tolerancia a elementos potencialmente tóxicos (metales esenciales y no esenciales) en los organismos vegetales puede definirse como el resultado de un proceso evolutivo que confiere a distintas especies de plantas la capacidad de crecer y desarrollarse en ambientes con concentraciones elevadas de elementos potencialmente tóxicos. (González & Zapata, 2008).

En los últimos años ha crecido espectacularmente el interés en las plantas que pueden acumular y tolerar cantidades inusualmente altas de metales en los tejidos de su parte aérea. Las investigaciones con estas plantas llamadas hiperacumuladoras de metales se han multiplicado por su potencial utilidad para el hombre como herramienta en la limpieza de suelos contaminados (Llugany *et al.*, 2007).

Algunas plantas son obligadas a desarrollar estrategias muy precisas para sobrevivir en los suelos con altos niveles de metales. La mayor parte de las especies que toleran la presencia de metales son especies que impiden su entrada en la raíz y su transporte a los tejidos fotosintéticos, son las especies exclusoras (Becerril *et al.*, 2007).

Los principales mecanismos de resistencia y tolerancia a metales pesados que se han observado en las plantas son: exclusión selectiva del metal del proceso de absorción, excreción del metal, excreción de compuestos por la raíz que en la rizosfera reducen la disponibilidad del metal para la planta, retención del metal en la raíz y/o vías de conducción, inmovilización del metal en la pared celular, inmovilización del metal en vacuolas, formación por la planta de compuestos secuestrantes e inactivadores de los metales tóxico y tolerancia a los metales de los sistemas enzimáticos (Barceló & Poschenrieder, 1992).

Muchas especies toleran las elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y/o traslocación hacia las hojas, lo que les permite mantener concentraciones constantes y relativamente bajas en la biomasa aérea independientemente de la concentración metálica del suelo en un intervalo amplio. Sin embargo, otras absorben los metales activamente a partir del suelo y los acumulan en formas no tóxicas en su biomasa aérea. (Kidd *et al.*, 2007).

Este tipo de plantas que son las más raras y estas especies que acumulan metales en sus tejidos aéreos, incluso cuando la concentración de los metales en suelo es muy baja; son las especies hiperacumuladoras. Su concentración final en los tejidos aéreos depende del metal y de la especie, llegando a superar el 2% de su peso seco (Becerril *et al.*, 2007).

La hiperacumulación de metales no es un fenómeno común en las plantas superiores terrestres; las plantas hiperacomuladoras son relativamente raras y frecuentemente se encuentran en áreas geográficas remotas (Kidd & Monterroso, 2003).

Se han reconocido diferentes grados de acumulación metálica, desde pequeñas elevaciones sobre el nivel de fondo hasta respuestas extremas, en las que el metal llega a exceder el 1% de la materia seca de la planta (Diez *et al.*, 2002).

Las especies hiperacumuladoras son capaces de acumular más de 1.000 mg Kg⁻¹ de metal en su biomasa aérea. Han adquirido relevancia en las últimas décadas, debido a su potencial uso en técnicas defitoextracción de metales en suelos contaminados (González *et al.*, 2008).

Actualmente se utiliza el término hiperacumuladora de metales para designar plantas que acumulan >10 mg Kg⁻¹ de Mn y Zn, >1mg Kg⁻¹ de Co, Cu, Pb, Ni, As y Se y >100 mg Kg⁻¹ de Cd (Kidd *et al.*, 2007).

Existe un escaso conocimiento del efecto de la absorción de las plantas hiperacumuladoras sobre las fracciones de metales pesados del suelo y aun es tema de debate si estas plantas tienen acceso a las mismas o distintas fracciones metálicas que las plantas no hiperacumuladoras. Son escasos los estudios que abordan la relación entre la extracción de metales por plantas hiperacumuladoras y la localización de los metales en el suelo (Kidd & Monterroso, 2003).

Hasta la actualidad, se han identificado aproximadamente 400 especies hiperacumuladoras, de las que la mayor parte son endémicas de suelos serpentínicos y acumulan Ni (Diez *et al.*, 2002).

2.11 FITORREMEDIACIÓN DE SUELOS.

En México, al igual que en muchos países, la prevención de la contaminación del ambiente (suelo, agua y aire) y su recuperación es una prioridad. Las plantas se utilizan como sistemas directos o indirectos de descontaminación. En el primer caso, las plantas participan en la modificación del contaminante a través de la absorción, secuestro o acumulación (González, 2005).

La contaminación por metales pesados en México es un problema que va en aumento debido a la actividad antrópica, específicamente la minería. Los metales contaminantes más importantes en México, dada su toxicidad y abundancia son: mercurio, arsénico, plomo y cromo. Entre los sitios más afectados por las altas concentraciones de metales pesados en suelos se encuentran los estados de Zacatecas, Querétaro, Hidalgo y San Luis Potosí. Una alternativa para contribuir a la solución de este problema, es el uso de especies vegetales para la remoción de metales pesados del suelo o “fitorremediación” (Covarrubias & Peña, 2017).

Esta técnica aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el suelo, aire, agua o sedimentos como: metales pesados, metales radioactivos, compuestos orgánicos y compuestos derivados del petróleo. Estas fitotecnologías ofrecen numerosas ventajas en relación con los métodos fisicoquímicos que se usan en la actualidad, por ejemplo, su amplia aplicabilidad y bajo costo (Delgadillo *et al.*, 2011).

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. 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 (Carpena *et al.*, 2007).

Agudelo *et al.*, (2005) menciona que este proceso 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.

Según Trejo *et al.*, (2015) este mecanismo no es un sencillo remedio o receta que sea aplicable para todos los suelos contaminados, antes de que esta tecnología pueda volverse técnicamente eficiente y económicamente viable, hay algunas limitaciones que necesitan ser superadas. Por ejemplo, sus mecanismos tanto moleculares, bioquímicos y fisiológicos, son pocos conocidos e insuficientemente entendidos.

Las tecnologías principales para la fitorremediación de metales son la fitoextracción que es el uso de plantas para extraer los metales del suelo, trasportarlos y acumularlos en los órganos de la parte aérea, la fitoestabilización que se define como el uso de plantas para minimizar la movilidad de los metales mediante su acumulación en la raíz o su precipitación en la rizosfera (Becerril *et al.*, 2007).

Una ventaja de la fitorremediación (Agudelo *et al.*, 2005) es que los metales absorbidos por las plantas, pueden ser extraídos de la biomasa cosechada y después ser reciclados. La fitorremediación se puede utilizar para limpiar una gran variedad de contaminantes, por su capacidad de absorción de estos metales en sus raíces.

En los últimos años la fitorremediación ha ido ganando aceptación como tecnología, y ha supuesto un notable incremento del conocimiento de los mecanismos de absorción, transporte y detoxificación por plantas. La fitorremediación ofrece efectividad para un amplio rango de contaminantes orgánicos e inorgánicos, pero está todavía limitada por el poco conocimiento de algunos procesos básicos de las plantas, como la degradación mediante mecanismos orgánicos, los mecanismos de transporte y quelación mediante mecanismos inorgánicos, o las interacciones planta microorganismos. (Llugany *et al.*, 2007).

2.12 FACTORES DE CONCENTRACIÓN.

2.12.1 FACTOR DE TRASLOCACIÓN BIOLÓGICO (FTB).

Este factor asocia la concentración de metal en la raíz entre la concentración del metal en las hojas, el valor comparativo es 1. (Argota *et al.*, 2014).

Factor de translocación (FTB) = Metal en la parte aérea / Metal en las raíces.

2.12.2 FACTOR BIOCONCENTRACIÓN (BCF).

La habilidad de una planta para acumular metales de suelos se puede estimar utilizando el coeficiente de bioconcentración (BCF, bioconcentration factor, factor de bioconcentración). Este factor se define como la relación de la concentración del metal en la planta con respecto al suelo y un valor superior a 1 implica que es factible utilizar la especie en fitoextracción (Hernández *et al.*, 2012).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.

El desarrollo de esta investigación así como los análisis de laboratorio se realizaron en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna (UAAAN-UL) $25^{\circ}33'12.53''N$, $103^{\circ}22'32.07''O$ en la ciudad de Torreón Coahuila.



Figura 7: Ubicación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna (UAAAN-UL).

3.2 TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.

La investigación es de tipo experimental, se evaluó la concentración de cadmio (Cd), cobre (Cu) y plomo (Pb) presentes en las estructuras morfológicas (raíz, tallo y hoja) de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*).

3.3 PROCEDIMIENTOS.

3.3.1 COLECTA DE PLANTAS.

La Comarca Lagunera está ubicada en el norte-centro de México, integrada por cinco municipios del suroeste del estado de Coahuila y 10 del noreste del

estado de Durango. El clima es seco desértico con una precipitación media de anual 220 mm con una altitud media de 1100 msnm (Orona *et al.*, 2006). En verano el clima varía de semi cálido a cálido-seco y en invierno de semi-frío a frío; el periodo de lluvia comprende de mediados de junio a mediados de octubre (Nava & Cano, 2000).

Las plantas utilizadas en este trabajo fueron colectadas en el lecho seco del Rio Nazas en el área del Parque Estatal Cañón de Fernández en la Comarca Lagunera.

Se colectaron plantas entre 20 y 30 cm de altura, se trasplantaron en macetas de 600 cm³ con suelo de su zona de origen y regaron con agua destilada. El total de plantas colectadas fue de 60.

3.3.2 ACLIMATACIÓN DE LAS PLANTAS

Después de colectadas en campo, las plantas fueron introducidas por 21 días en un invernadero de 200 metros cuadrados, semicircular con techo en forma de arco cubierto de plástico; se protege con malla sombra durante las estaciones del año más calurosas, paredes laterales rectas, piso de grava, con extractores y pared húmeda de la UAAAN-UL.



Figura 8: Invernadero donde se realizó el experimento.

En estos 21 días las plantas fueron irrigadas cada tercer día con solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984) preparada con las concentraciones presentadas en el cuadro 1.

Cuadro 1: Fertilizantes y cantidades utilizados para la preparación de la solución nutritiva de Steiner.

Compuesto	Cantidad aplicada para 200 lts de Solución
Nitrato de Calcio $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	46.36 gr
Nitrato de Potasio KNO_3	144.57 gr
Nitrato de Magnesio MgNO_3	54.49 gr
Sulfato de Magnesio MgSO_4	42.94 gr
Ácido Fosfórico H_3PO_4	13.40 ml

3.3.3 TRATAMIENTOS.

En garrafones de plástico con capacidad de 20 litros, se efectuó la mezcla de solución Steiner previamente preparada en agua destilada y estándares de metales pesados de alta pureza (Cd, Cu y Pb) de mil partes por millón de la marca Perkir Elmer en las proporciones que se presentan en el cuadro 2. Las concentraciones fueron de 0, 20, 40 y 60 mg L^{-1} de cada metal.

Cuadro 2: Proporciones utilizadas para la preparación de los diferentes tratamientos.

Tratamiento	Volumen de Solución Steiner	Metal	Volumen de Metal
T1	10 lts	Cd	0
T2	9.8 lts	Cd	200 ml
T3	9.6 lts	Cd	400 ml
T4	9.4 lts	Cd	600 ml
T5	10 lts	Cu	0
T6	9.8 lts	Cu	200 ml
T7	9.6 lts	Cu	400 ml

T8	9.4 lts	Cu	600 ml
T9	10 lts	Pb	0
T10	9.8 lts	Pb	200 ml
T11	9.6 lts	Pb	400 ml
T12	9.4 lts	Pb	600 ml

3.3.4 DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.

48 plantas fueron trasplantadas a macetas de 1200 cm³ de volumen con un sustrato compuesto por arena (80 %) previamente lavada con hipoclorito de sodio al 5 % y perlita (20 %). La arena es un sustrato químicamente inerte que actúa como soporte de la planta, no interviene en el proceso de adsorción y fijación de nutrientes. La perlita se utilizó para evitar la compactación de la arena.



Figura 9: *Ambrosia ambrosioides* en sustrato de perlita y arena.

Desde que se realizó el trasplante, cada tercer día las plantas fueron irrigadas con 250 ml de solución de su respectivo tratamiento. En total se dieron 10 riegos.

3.3.5 COSECHA DE PLANTAS.

Al término de la aplicación de tratamientos las plantas fueron extraídas de cada una de las macetas.

3.3.6 LAVADO.

El lavado se realizó con el fin de retirar cualquier partícula de tierra y perlita que hubiese quedado en las muestras extraídas de las macetas. Lo cual se llevó a cabo utilizando un cepillo y una esponja además de agua común de la llave. Al término todas las muestras fueron enjuagadas tres veces con agua destilada para evitar cualquier contaminante que pudiera tener el agua de la llave y que llegara afectar los resultados.

3.3.7 SEPARACIÓN DE LA PLANTA.

Etapa que consistió en separar hojas, tallos y raíces de cada muestra. Las muestras fueron colocadas en bolsas de papel y etiquetadas para su identificación.

3.3.8 SECADO.

Las muestras se dejaron en el laboratorio de suelos de la UAAAN-UL una semana a una temperatura promedio de 30 C°, posteriormente se introdujeron en una estufa de secado marca Felisa a 65 C° durante 24 horas.



Figura 10: Estufa de secado.

3.3.9 PREPARACIÓN DE DIGESTIONES.

Se utilizó el método de digestión por vía seca (DVS), esta metodología se realizó en el Departamento de Suelos de la UAAAN-UL el procedimiento es el siguiente:

El proceso inicia con la molienda de la planta que es triturada y molida en un molino eléctrico (figura 11) hasta que queda de manera homogénea con textura de polvo. La muestra molida fue tamizada y las muestras fueron colocadas en bolsas de plástico pequeñas previamente etiquetadas (figura 12).



Figura 12: Molino eléctrico.

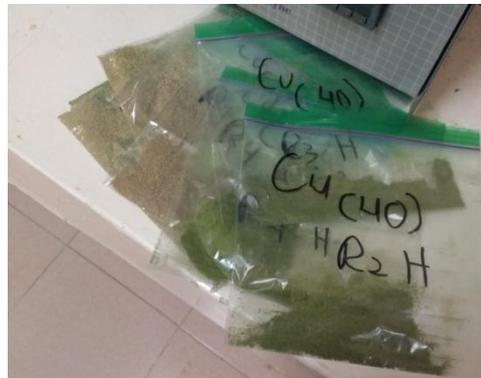


Figura 11: Muestras molidas

Se pesó 1 gr de muestra en un crisol de peso constante de 50 ml para proceder a introducirlo en una mufla marca Furnace 1500 en donde se calcinaron las muestras de planta a una temperatura de 600 C° por 4 hrs.



Figura 13: Calcinación de muestras en mufla Furnace 1500.

Posteriormente, la ceniza que quedo en el crisol se le agregaron 10 ml de ácido clorhídrico (HCL) al 37%, se agito por 10 segundos y deajo reposar 20 minutos.



Figura 14: Muestra calcinada.

El contenido del crisol se pasó a un matraz volumétrico de 100ml, al cual previamente se le agregaron 10 ml de cloruro de cesio (CsCl) y el resto del contenido se aforo con agua destilada.



Figura 15: Contenido del crisol en el matraz.

Se filtró el contenido del matraz en papel filtrante colocando el residuo en recipientes de plástico de 100ml, el residuo obtenido en el bote es utilizado para hacer la determinación de los metales pesados.



Figura 16: Filtración del contenido del matraz.

3.4 DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS.

La cuantificación de metales pesados se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer 2380. El espectrofotómetro es un instrumento utilizado para determinar a qué longitud de onda la muestra absorbe la luz y la intensidad de la absorción. Todos los espectrofotómetros consisten en una fuente de luz, un selector de longitud de onda, un contenedor transparente en el cual se deposita la muestra, un detector de luz y el medidor, detectan elementos como Ca, Mg, Na, K, Mn, Pb, Cd entre otros.

Se utilizó para la curva de calibración del equipo un estándar de 1000 ppm de cada metal y se colocó la lámpara correspondiente. Estas determinaciones fueron realizadas en el Laboratorio de Suelos de la UAAAN-UL.



Figura 17: Espectrofotómetro de absorción atómica modelo Perkin- Elmer 2380.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

En este estudio se consideró a la planta como la unidad experimental con un muestreo destructivo, por ello el análisis estadístico fue un diseño factorial de A por B, donde el factor A corresponde al metal pesado (cuadro 3) y B a su concentración (cuadro 4), con 4 repeticiones y un total de 12 tratamientos.

Cuadro 3: Metales evaluados.

Factor A	
Cadmio	A1
Cobre	A2
Plomo	A3

Cuadro 4: Concentración de metal pesado aplicada.

Factor B	
0 mg L ⁻¹	B1
20 mg L ⁻¹	B2
40 mg L ⁻¹	B3
60 mg L ⁻¹	B4

Cada planta se disecciono en tres partes (hoja, tallo y raíz) para determinar la absorción de los metales pesados. La prueba de medias se realizó por el método de Tukey's y se llevó a cabo utilizando el programa SAS versión 9.0.

En el cuadro 5 se presentan los diferentes tratamientos aplicados.

Cuadro 5: Tratamientos de acuerdo a su interacción.

Interacción	Tratamiento
A1*B1	1
A1*B2	2
A1*B3	3
A1*B4	4
A2*B1	5
A2*B2	6
A2*B3	7
A2*B4	8
A3*B1	9

A3*B2	10
A3*B3	11
A3*B4	12

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS.

A continuación se presenta la acumulación de cada metal pesado bajo diferentes concentraciones aplicadas en raíz, tallo y hoja de chicura (*Ambrosia ambrosioides*).

4.1.1 CADMIO

En el cuadro 6 se presenta la concentración de cadmio en cada estructura morfológica de la planta bajo diferentes concentraciones aplicadas.

Cuadro 6: Acumulación de cadmio en planta bajo diferentes concentraciones (kg de peso seco).

Parte de la planta	Concentración			
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)
Raíz	14.3	860.4	4195.3	3841.1
Tallo	108.89	138.80	460.75	266.17
Hoja	49.65	164.12	1037.27	429.28

La mayor acumulación de cadmio en raíz, tallo y hoja se presentó en la concentración de 40 (mg L⁻¹) con valores de 4195.3, 460.75 y 1037.27 (mg Kg⁻¹) respectivamente. La menor acumulación se presentó en la concentración de 0 (mg L⁻¹), 14.3, 108.89 y 49.65 (mg Kg⁻¹). El cadmio aumento su acumulación en raíz, tallo y hoja en relación a la concentración con que fue aplicado a excepción de la concentración de 60 (mg L⁻¹) donde se observa una acumulación a la baja en las estructuras de la planta; esto nos indica que la planta tiene un valor límite para absorber y tolerar el cadmio.

En la figura 18 se aprecia la tendencia de acumulación de cadmio en raíz, tallo y hoja de chicura (*Ambrosia ambrosioides*).

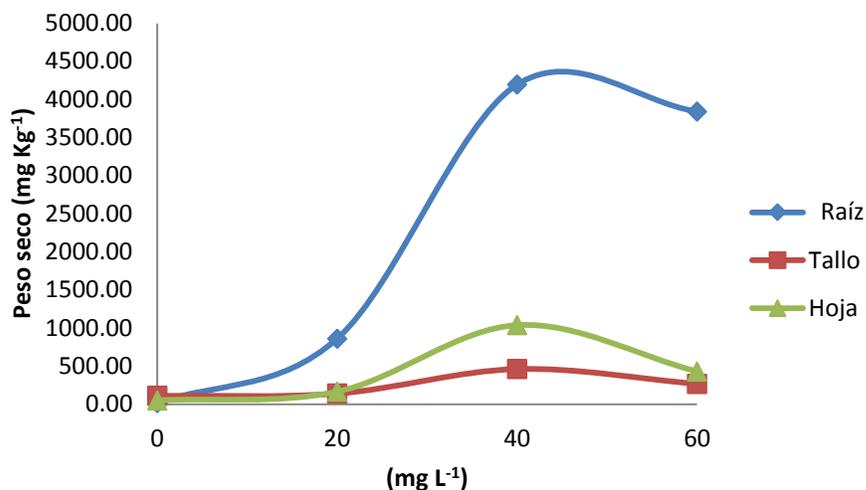


Figura 18: Concentración de cadmio en raíz tallo y hoja de *Ambrosia ambrosioides*.

4.1.2 COBRE

En el cuadro 7 se presenta la concentración de cobre en cada estructura morfológica de la planta bajo diferentes concentraciones aplicadas.

Cuadro 7: Acumulación de cobre en planta bajo diferentes concentraciones (kg de peso seco).

Parte de la planta	Concentración			
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)
Raíz	1063.4	15927.20	2386.8	1592.9
Tallo	183.3	13030.9	3429	3005
Hoja	1823.2	4979.4	3362	2679.9

La mayor acumulación de cobre en raíz, tallo y hoja se presentó en la concentración de 20 (mg L⁻¹) con acumulaciones de 15927.20, 13030.9 y 4979.4 (mg Kg⁻¹) respectivamente. De igual forma en raíz, tallo y hoja la menor acumulación de este metal se observó en la concentración de 0 (mg L⁻¹). El cobre mostró un comportamiento de reducción en la acumulación en raíz, tallo y hoja en las concentraciones mayores a 20 (mg L⁻¹).

En la figura 19 se muestra la tendencia de acumulación de cobre en las estructuras morfológicas de la planta.

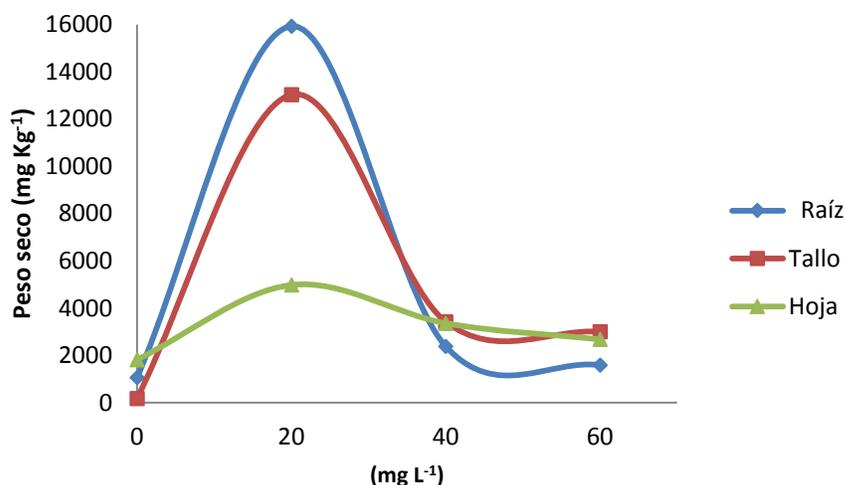


Figura 19: Concentración de cobre en raíz tallo y hoja de *Ambrosia ambrosioides*.

4.1.3 PLOMO

En el cuadro 8 se presenta la concentración de plomo en cada estructura morfológica de la planta bajo diferentes concentraciones aplicadas.

Cuadro 8: Acumulación de plomo en planta bajo diferentes concentraciones (kg de peso seco).

Parte de la planta	Concentración			
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)
Raíz	214.51	300	252.53	231.48
Tallo	200	228.89	440.09	1119.63
Hoja	589	547.6	833.9	872.5

En la raíz la mayor acumulación de plomo se dio en la concentración de 20 (mg L⁻¹) seguido por la de 40, 60 y 0 (mg L⁻¹), por otra parte en el tallo de la planta la mayor acumulación se presentó en la concentración de 60 (mg L⁻¹) con 1119.63 (mg Kg⁻¹), la menor acumulación se presentó en la concentración de 0 (mg L⁻¹). La presencia de plomo en la planta aumento en relación a la concentración del metal aplicado a la planta.

La figura 20 se aprecia la tendencia de acumulación del plomo.

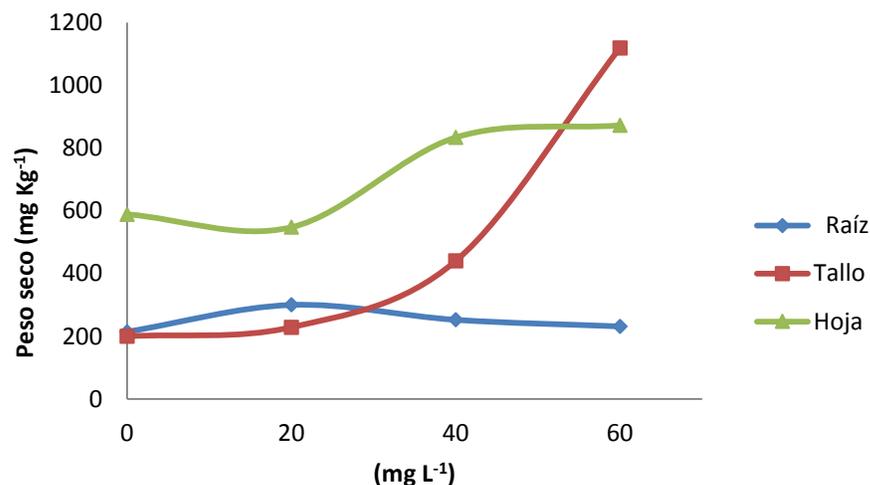


Figura 20: Concentración de plomo en raíz tallo y hoja de *Ambrosia ambrosioides*

4.2 ACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN LAS ESTRUCTURAS MORFOLÓGICAS DE LA PLANTA.

4.2.1 RAÍZ

En el cuadro 9 se presenta la acumulación de metales pesados en la raíz de la planta.

Cuadro 9: Acumulación de metales en la raíz (kg de peso seco).

Metal	Concentración				A
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)	
Cadmio	14.3 e	860.4 de	4195.3 b	3841.1 bc	2227.8 b
Cobre	1063.4 de	15827.2 a	2386.8 cd	1592.8 de	5217.5 a
Plomo	214.5 e	300.0 e	252.5 e	231.5 e	249.6 c
B	430.7 c	5662.5 a	2278.2 b	1888.4 b	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $P \leq 0.05$); C.V.:28.36%.

Para el factor metal pesado, el cobre fue el metal que más absorbió la raíz de la planta 5217.5 (mg Kg⁻¹), el que tuvo la menor absorción fue el plomo 249.6 (mg Kg⁻¹). En el factor concentración se observó que en 20 (mg L⁻¹) fue donde

se presentó la mayor acumulación 5662.5 (mg Kg^{-1}) y la menor en 0 (mg L^{-1}) 430.7 (mg Kg^{-1}), en los factores 40 (mg L^{-1}) y 60 (mg L^{-1}) no se encontró diferencia significativa.

En los tratamientos, cobre-20 (mg L^{-1}) (tratamiento 6) fue donde se encontró la mayor acumulación de metal pesado en la raíz 15827.2 (mg Kg^{-1}) seguido por la acumulación en cadmio-40 (mg L^{-1}) (tratamiento 3). La menor acumulación se presentó en cadmio-0 (mg L^{-1}) (tratamiento 1).

En la figura 20 se presenta la acumulación de metales pesados en la raíz de chicura (*Ambrosia ambrosioides*)

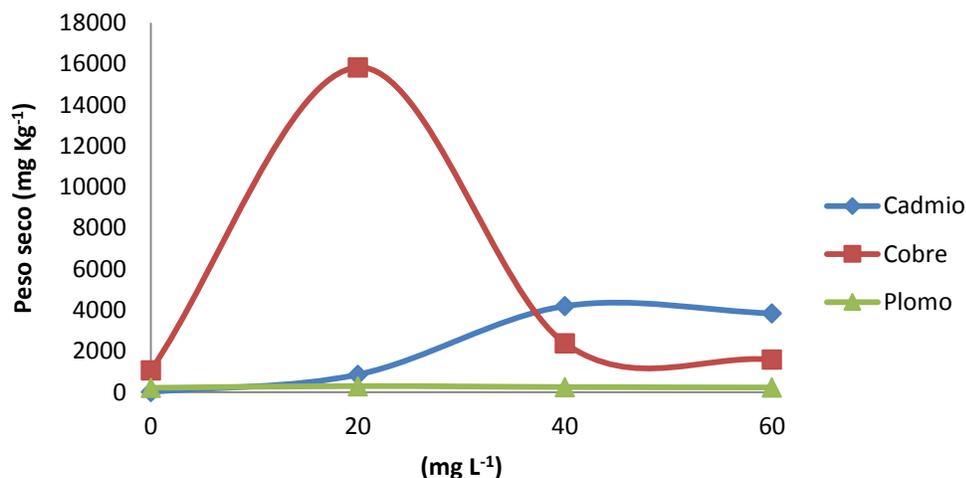


Figura 21: Acumulación de Cd, Cu y Pb en la raíz de *Ambrosia ambrosioides*.

En la figura 22 se presenta la acumulación para el factor metal pesado en la raíz.

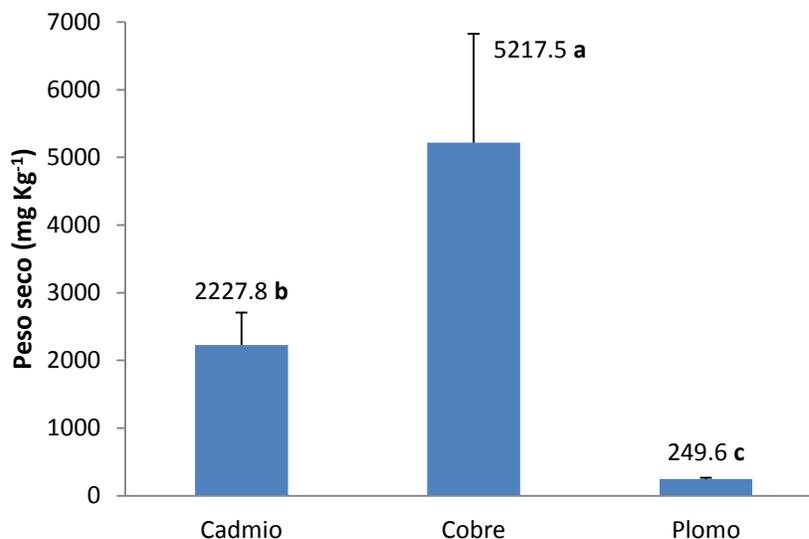


Figura 22: Factor metal pesado en raíz.

En la figura 23 se presenta la acumulación para el factor concentración en la raíz.

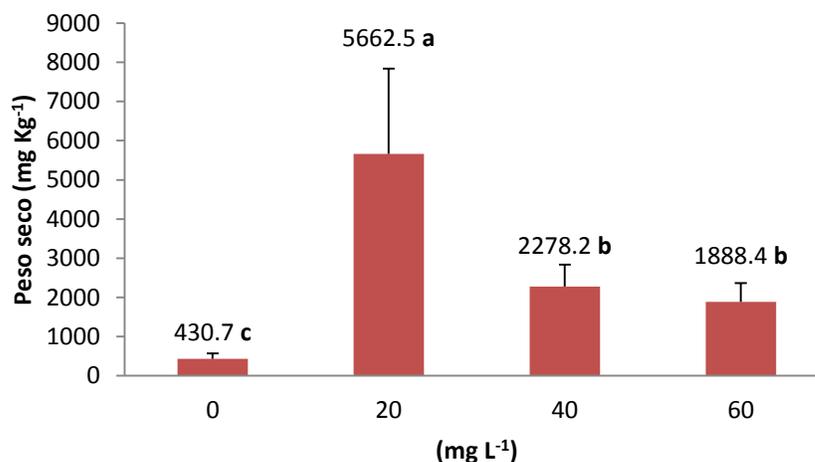


Figura 23: Factor concentración en raíz.

La raíz fue la parte de la planta donde se absorbió la mayor cantidad de metales pesados, resultado similar al de (Ortega *et al.*, 2011; Carrión *et al.*, 2012) quienes evaluaron la capacidad fitoextractora de diversas especies y encontraron que la raíz es la parte que más metales retiene. Esto se debe a

que uno de los principales mecanismos de resistencia y tolerancia a metales pesados es la retención del metal en la raíz (Barceló & Poschenrieder, 1992).

4.2.2 TALLO.

En el cuadro 10 se presenta la acumulación de metales pesados en el tallo de la planta.

Cuadro 10: Acumulación de metales en el tallo (kg de peso seco).

Metal	Concentración				A
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)	
Cadmio	108.9c	138.8 c	460.8 c	266.2 c	243.7 b
Cobre	183.3 c	13030.9 a	3429.0 b	3005.0 b	4912.0 a
Plomo	200.0 c	228.9 c	440.1 c	1119.6 c	497.2 b
B	164.1 c	4466.2 a	1443.3 b	1463.6 b	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $P \leq 0.05$); C.V.: 32.38%.

Para el factor metal pesado el cobre fue el que más absorbió el tallo de la planta 4912.0 (mg Kg⁻¹), el metal que tuvo menor absorción fue el cadmio 243.7 (mg Kg⁻¹). En el factor concentración se observó que en 20 (mg L⁻¹) se presentó la mayor acumulación 4466.2 (mg Kg⁻¹) y la menor en 0 (mg L⁻¹) 164.1 (mg Kg⁻¹). Las concentraciones de 40 y 60 (mg L⁻¹) no presentaron diferencia significativa.

En los tratamientos, cobre-20 (mg L⁻¹) (tratamiento 6) presentó la mayor acumulación de metal pesado 13030.9 (mg Kg⁻¹) seguido por las acumulaciones en cobre-40 (mg L⁻¹) (tratamiento 3) y cobre-60 (mg L⁻¹) (tratamiento 4). La menor acumulación se presentó en cadmio-0 (mg L⁻¹).

En la figura 24 se presenta la acumulación de metales pesados en el tallo de chicura (*Ambrosia ambrosioides*).

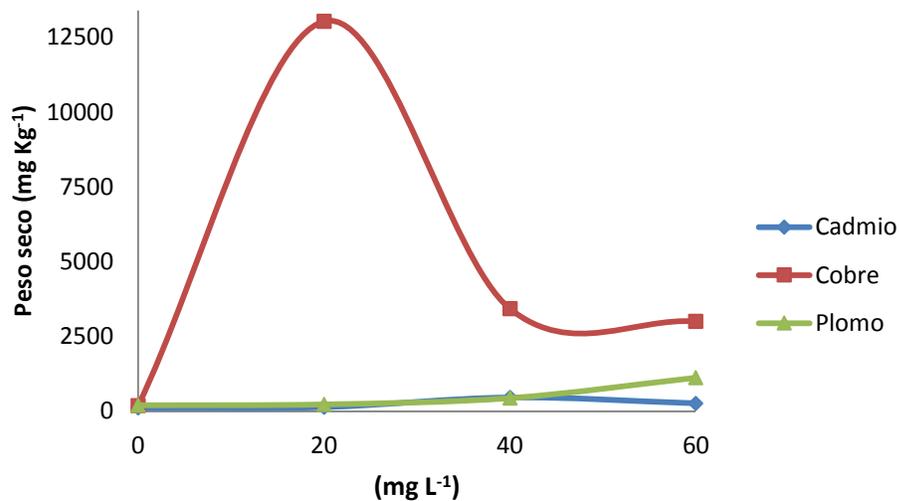


Figura 24: Acumulación de Cd, Cu y Pb en tallo de *Ambrosia ambrosioides*.

En la figura 25 se presenta la acumulación para el factor metal pesado en el tallo.

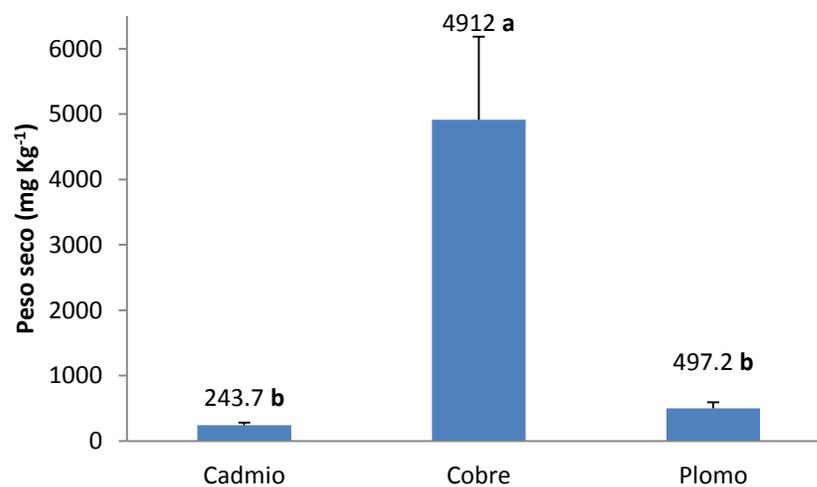


Figura 25 Factor metal pesado en tallo.

En la figura 26 se presenta la acumulación para el factor concentración en el tallo.

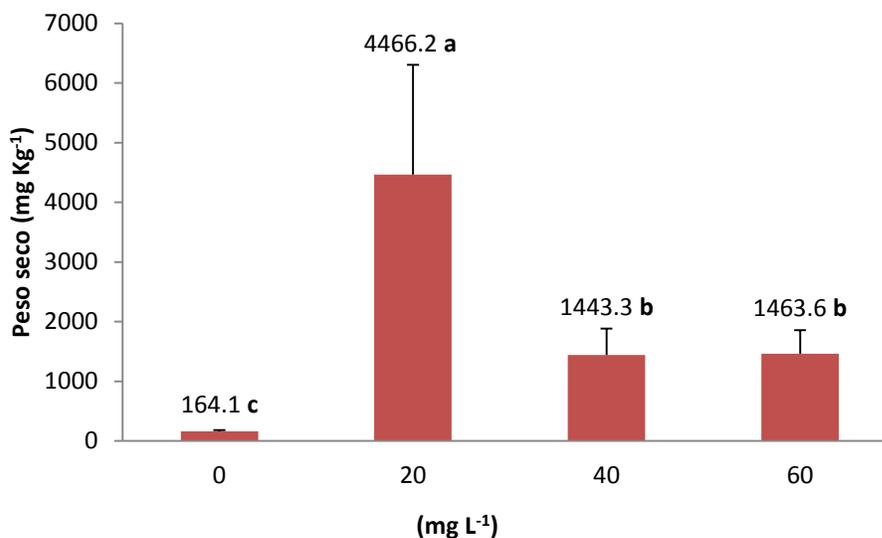


Figura 26: Factor concentración en tallo.

4.2.3 HOJA.

En el cuadro 11 se presenta la acumulación de metales pesados en la hoja de la planta.

Cuadro 11 : Acumulación de metales en la hoja (kg de peso seco).

Metal	Concentración				A
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)	
Cadmio	49.7 e	164.1 e	1037.3 ed	429.3 e	420.1 b
Cobre	1823.2 cd	4979.4 a	3362.0 b	2679.9 bc	3211.1a
Plomo	589.0 e	547.6 e	833.9 de	872.5 de	710.7 b
B	820.6 c	1897.0 a	1744.4 ab	1327.2 bc	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $P \leq 0.05$ C.V.: 24.26%.

Para el factor metal pesado el cobre fue el que más absorbió la hoja 3211.1 (mg Kg⁻¹), cadmio y plomo no presentaron diferencia significativa. En el factor concentración se observó que en 20 (mg L⁻¹) fue donde se presentó la mayor acumulación de los metales 1897.0 (mg Kg⁻¹); la menor se presentó en la concentración de 0 (mg L⁻¹) con 820.6 (mg Kg⁻¹).

En los tratamientos, cobre-20 (mg L⁻¹) (tratamiento 6) y cobre-60 (mg L⁻¹) (tratamiento 8) es donde se encontraron las mayores acumulaciones de metal

pesado en la hoja 4979.4 y 3362.0 (mg Kg^{-1}) respectivamente. Las menor acumulación en la hoja se presentó en cadmio-20 (mg L^{-1}) (tratamiento 1) y cadmio-20 (mg L^{-1}) (tratamiento 2) con 49.7 y 164.1 (mg Kg^{-1}).

En la figura 27 se presenta la acumulación de metales pesados en la hoja de chicura (*Ambrosia ambrosioides*).

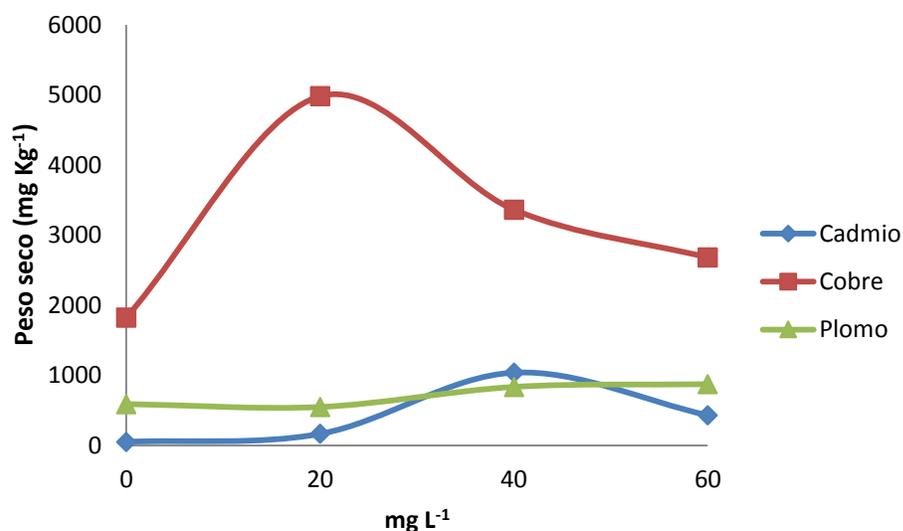


Figura 27: Acumulaciones de Cd, Cu y Pb en la hoja de *Ambrosia ambrosioides*.

En la figura 28 se presenta la acumulación para el factor metal pesado en la hoja.

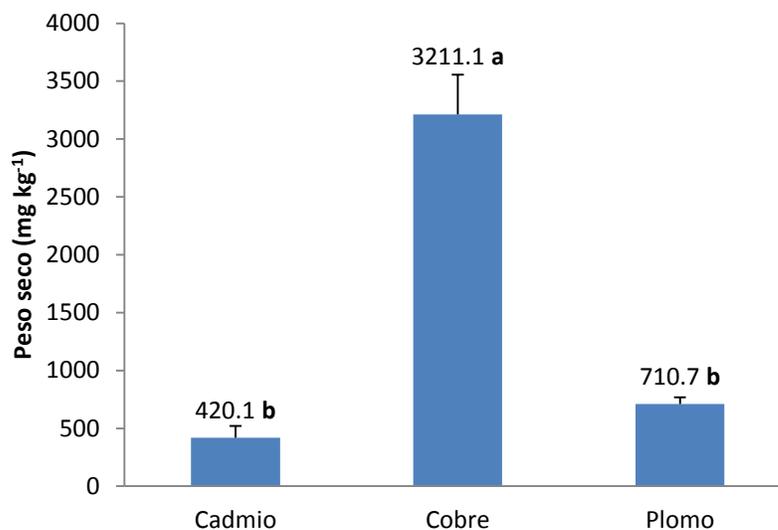


Figura 28: Factor metal pesado en la hoja.

En la figura 29 se presenta la acumulación para el factor concentración en la hoja.

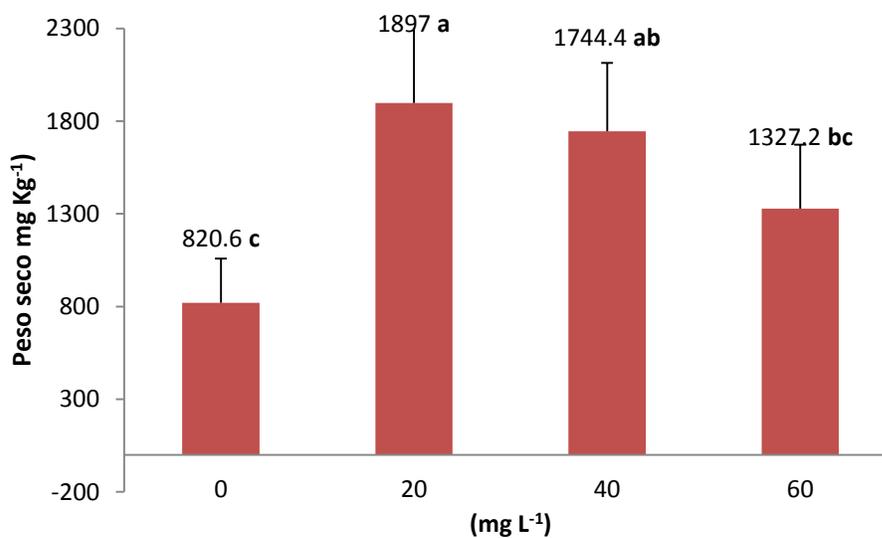


Figura 29 : Factor concentración en la hoja.

Los resultados indican que en raíz, tallo y hoja las mayores concentraciones de metales pesados se presentaron en cobre a 20 mg L¹, esto se debe a que el cobre es un elemento esencial para las plantas, es requerido para su

crecimiento y participa en reacciones de oxidación-reducción. (Hernández *et al.*, 2012; León & Sepúlveda, 2012)

En el cobre se observó una tendencia de absorción a la baja en concentraciones superiores a 20 (mg L^{-1}) de igual manera en el cadmio este comportamiento se dio en concentraciones superiores a 40 (mg L^{-1}) esto se debe a que algunas plantas son obligadas a desarrollar estrategias precisas para sobrevivir en suelo con alto nivel de metales (Becerril *et al.*, 2007).

Las menores concentraciones se presentaron en cadmio a 0 mg L^{-1} ;

Un estudio donde se expuso a *Ambrosia ambrosioides* a soluciones de plomo de 0.25, 0.5 y 1.5 (mg L^{-1}); se encontró que la mayor absorción del metal se dio en la raíz 4,638 (mg Kg^{-1}) seguida por el tallo 520 (mg Kg^{-1}) y la hoja 484.38 (mg Kg^{-1}). Se concluyó que a mayor concentración del metal será mayor la absorción en la planta (Contreras *et al.*, 2016).

Los resultados concuerdan con los de (Contreras *et al.*, 2016) ya que la absorción de plomo mostro un comportamiento similar. El plomo fue el único metal pesado que mostro este comportamiento.

Muchas especies toleran elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y/o traslocación hacia las hojas, lo que les permite mantener concentraciones constantes (Kidd *et al.*, 2007). Esto explica porque en las hojas de la *Ambrosia ambrosioides* se encontró la menor cantidad de metales pesados

4.3 FACTOR DE TRASLOCACIÓN BIOLÓGICO (FTB) EN LA PLANTA.

El factor de traslocación biológico asocia la concentración de metal en raíz y concentración del metal en hojas, el valor comparativo es 1. Un valor mayor a 1 significa que la planta trasloca el metal de su raíz hacia sus hojas. (Argota *et al.*, 2014).

En el cuadro 12 se presentan el factor de traslocación biológico (FTB).

Cuadro 12 : Factor de traslocación biológico en *Ambrosia ambrosioides*.

Metal	Concentración				
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)	A
Cadmio	0.35d	5.23 b	4.07 bc	9.74 a	4.85 a
Cobre	0.53 d	3.41c	0.47d	0.21d	1.15b
Plomo	0.43d	0.49d	0.35 d	0.26 d	0.38c
B	0.44c	3.04a	1.63b	3.40a	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $P \leq 0.05$); C.V.: 24.25%.

Para el factor metal pesado el cadmio fue el metal con mayor factor 4.85 seguido por cobre 1.15 y plomo 0.38. Este factor indica que el cadmio es el metal pesado que la planta trasloca con mayor facilidad. El cobre supero el valor comparativo de 1 por lo cual este metal también es traslocado por la planta. El plomo es un elemento que la planta no puede traslocar. En el factor concentración se observó que en 60 (mg L⁻¹) se presentó el mayor coeficiente 3.40; el menor coeficiente se presentó en la concentración de 0 (mg L⁻¹) 0.44, esto indica que a una mayor concentración de metales pesados la planta los traslocara con mayor facilidad.

En los tratamientos, cadmio a 60 (mg Kg⁻¹) (tratamiento 4) es donde se encontró el mayor coeficiente de traslocación 9.74. Cobre a 60 (mg Kg⁻¹) (tratamiento 8) fue donde se obtuvo el menor factor 0.21. La mayoría de los tratamientos resultaron estadísticamente similares y menores a 1 lo que indica que la planta en la mayoría de los casos no trasloca el metal de la raíz a sus hojas.

En la figura 30 se presenta el coeficiente de traslocación en la chicura (*Ambrosia ambrosioides*).

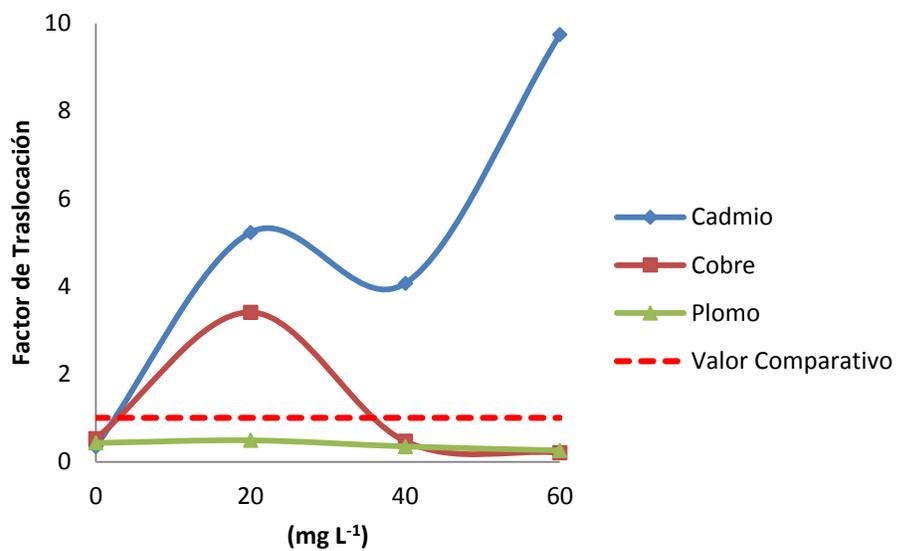


Figura 30: Factor de traslocación biológico en planta.

En la figura 31 se presenta el factor de traslocación biológico para el factor metal pesado.

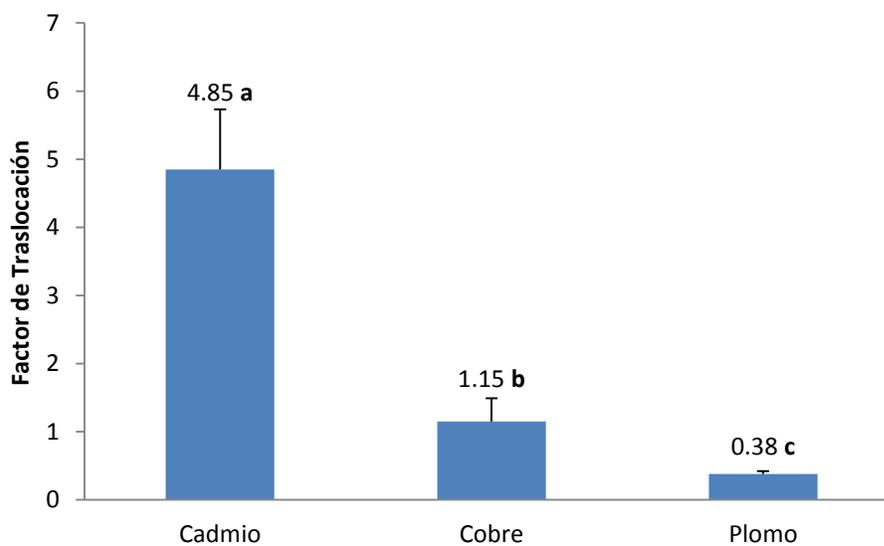


Figura 31: Factor de traslocación biológico en el metal.

En la figura 32 se presenta el factor de traslocación biológico para el factor concentración.

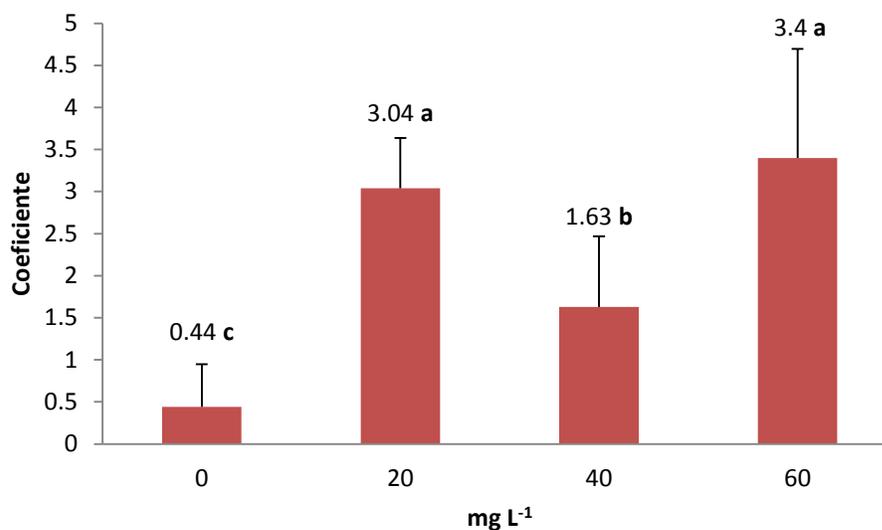


Figura 32: Factor de traslocación biológico en la concentración.

El plomo obtuvo los valores más bajos en este factor, tal como lo indica Díaz *et al.*, (2001) quien menciona que la traslocación en el plomo es generalmente limitada.

La tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en los organismos vegetales es resultado de un proceso evolutivo que confiere a distintas especies de plantas la capacidad de crecer y desarrollarse en ambientes con concentraciones elevadas de elementos potencialmente tóxicos. (González & Zapata, 2008). Capacidad que demostró *Ambrosia ambrosioides*.

4.4 FACTOR DE BIOCONCENTRACIÓN (BCF) EN LA PLANTA.

El factor de bioconcentración es la habilidad de una planta para acumular metales de suelos, coeficiente que se define como la relación de la concentración del metal en la planta con respecto al suelo. Un valor superior a 1 implica que es factible utilizar la especie en fitoextracción (Hernández *et al.*, 2012). Si el coeficiente es mayor a uno se puede decir que los metales absorbidos por las plantas, pueden ser extraídos de la biomasa cosechada y después ser reciclados (Agudelo *et al.*, 2005).

En el cuadro 13 se presentan los factores de bioconcentración (BCF).

Se excluyen los tratamientos 1, 5 y 9 debido a que en estos la concentración de metal pesado aplicada fue de 0 (mg L^{-1}).

Cuadro 13 : Factor de bioconcentración en *Ambrosia ambrosioides*.

Metal	Concentración			
	20 (mg L^{-1})	40 (mg L^{-1})	60 (mg L^{-1})	A
Cadmio	58.17 de	142.33 cd	75.61 cd	92.04 b
Cobre	1691.87 a	237.63 b	173.58 bc	701.03 a
Plomo	53.82 de	38.16 e	37.06 e	43.02 c
B	601.29 a	139.38 b	95.42 c	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $P \leq 0.05$); C.V.=13.79%.

Para el factor metal pesado, el cobre fue el que presentó el mayor factor de bioconcentración 701.03, el factor plomo fue el de menor 43.02. El factor concentración indica que en 20 (mg L^{-1}) se presentó el mayor 601.29; el menor en la concentración de 60 (mg L^{-1}), 95.42.

En los tratamientos cobre a 20 (mg L^{-1}) (tratamiento 6) fue el que obtuvo el factor de bioconcentración más alto 1691.87, El menor se presentó en plomo-60 (mg L^{-1}) (tratamiento 12) 37.06.

Los factores metal pesado y concentración así como todos los tratamientos presentes en el cuadro 13 superaron el valor comparativo de 1 lo que indica la factibilidad de *Ambrosia ambrosioides* para ser utilizada en técnicas de fitorremediación.

En la figura 33 se observa gráficamente el factor de bioconcentración.

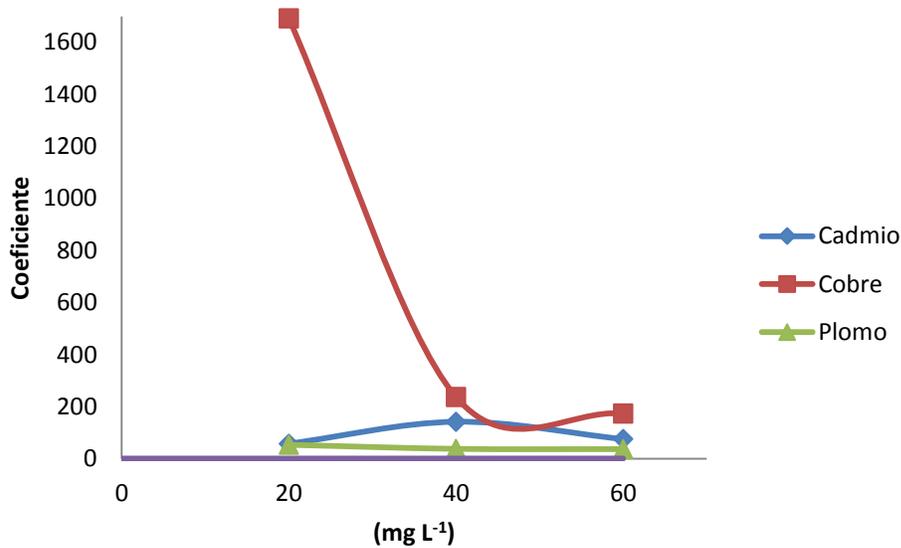


Figura 33: Factor de bioconcentración en planta.

En la figura 34 se presenta el factor bioconcentración para el factor metal pesado.

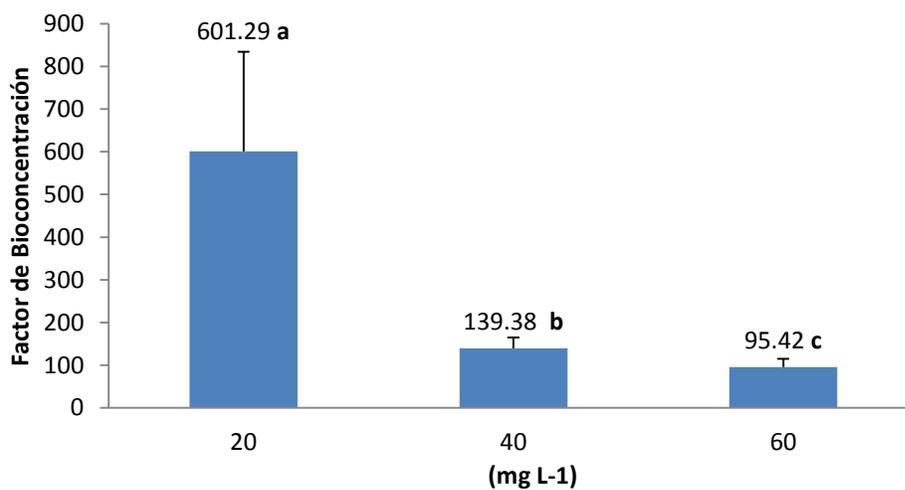


Figura 34: Factor de bioconcentración en el metal.

En la figura 35 se presenta el factor bioconcentración para el factor concentración.

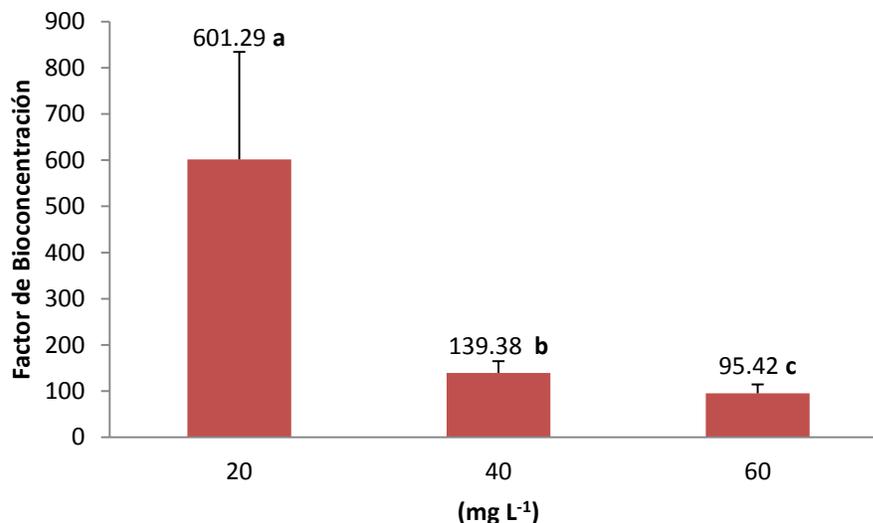


Figura 35 Factor de bioconcentración en la concentración.

En este coeficiente todos los tratamientos superaron el valor comparativo de 1 lo que indica que *Ambrosia ambrosioides* puede ser utilizada para técnicas de fitorremediación.

Actualmente se utiliza el término hiperacumuladora de metales para designar plantas que acumulan >10 (mg Kg⁻¹) de Mn y Zn, >1 (mg Kg⁻¹) de Co, Cu, Pb, Ni, As y Se y >100 (mg Kg⁻¹) de Cd (Kidd *et al.*, 2007). Han adquirido relevancia en las últimas décadas, debido a su potencial uso en técnicas de fitoextracción de metales en suelos contaminados (González *et al.*, 2008).

Ambrosia ambrosioides absorbió suficiente cantidad de metales pesados mostrando que es una planta hiperacumuladora de cadmio, cobre y plomo; puede ser utilizada en técnicas de fitorremediación de suelos.

Algunos de los efectos del cadmio sobre las plantas son: reducción en el crecimiento y de la elongación de las raíces, inhibición de la apertura estomática, inhibición de la síntesis de clorofila y de la fotosíntesis (Pernía, *et al.*, 2008). El cobre es un metal tóxico cuando se encuentra en los tejidos a

concentraciones mayores a las necesarias para el crecimiento vegetal ($>30\text{mg Kg}^{-1}$) (León & Sepúlveda, 2012). La acumulación de iones de Pb en plantas puede causar múltiples efectos, directos e indirectos. Puede causar efectos en el metabolismo que repercuten en el crecimiento, fotosíntesis y absorción de nutrientes (Díaz *et al.*, 2001).

Ambrosia ambrosioides no presentó síntomas visibles de fitotoxicidad en ningún tratamiento.

V. CONCLUSIONES

El cobre es el metal pesado que más absorbió la *Ambrosia ambrosioides* seguido por cadmio y plomo.

Al aplicar cobre a una concentración 20 mg L⁻¹ se presentó la mayor acumulación en raíz, tallo y hoja con 15827.2, 13030.9 y 4979.4 mg Kg⁻¹ respectivamente.

Cadmio y cobre mostraron una tendencia de acumulación a la baja al aplicarlos en concentraciones mayores de 40 y 20 mg L⁻¹ respectivamente.

El plomo fue el único metal pesado que aumento su acumulación en la planta en relación a la concentración con la que fue aplicado.

La raíz fue la estructura de la planta que absorbió la mayor cantidad de metales pesados seguido por tallo y hoja.

El factor de traslocación biológico indico que el cadmio es el metal pesado que la planta trasloca hacia sus hojas con mayor facilidad seguido por el cobre; el plomo es un metal que la planta no puede traslocar.

El factor de bioconcentración en cadmio, cobre y plomo señala que se llevó a cabo una alta fitoextracción al superar todos los tratamientos el valor comparativo de 1.

Ambrosia ambrosioides es una planta hiperacumuladora de cadmio, cobre y plomo; absorbió suficiente cantidad de metales pesados para demostrar que puede ser utilizada en técnicas de fitorremediación y sanidad de suelo.

A pesar de la ausencia de metales pesados en el tratamiento de 0 (mg L⁻¹) se presentaron concentraciones de metales en raíz, tallo y hoja; debido a que la planta fue colectada de campo y es probable que el metal estuviera presente en la planta desde su zona de origen.

VI. LITERATURA CITADA

- Agudelo Betancur, L. M., Macias Mazo, K. I., & Suárez Mendoza, A. J. (Enero-Junio de 2005). Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Revista Lasallista de Investigación*, II(1), 57-60.
- Arcaya, J. L., Carlos, M. T., Salazar, U., Silva, E. J., Karla, U., & Varela, K. (2013). La intoxicación con cobre disminuye la sobrevivencia e induce alteraciones neurológicas en *Drosophila melanogaster*. *Investigación Clínica*, LI(1).
- Argota Pérez, G., Encinas Cáceres, M., Argota Coello, H., & Iannacone, J. (2014). Coeficientes biológicos de fitorremediación de suelos expuestos a plomo y cadmio utilizando *alopecurus magellanicus bracteatus* y *muhlenbergia angustata* (poaceae). Puno, Perú. *The Biologist (Lima)*, XLL(1).
- Azpilicueta, C., Peña, L., & Gallego, S. (Abril-Mayo de 2010). Los metales y las plantas, entre la nutrición y la toxicidad. *Ciencia Hoy*, XX(116), 12-16.
- Barceló, J., & Poschenrieder, C. (1992). Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Suelo y Planta*, 345-361.
- Bautista Zúñiga, F. (1999). Introducción al estudio de la contaminación del suelo por metales pesados. *Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 1-67.
- Becerril, J., Barrutia, O., García Plazaola, J., Hernández, A., Olano, J., & Garbisu, C. (Mayo de 2007.). Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas*, XVI(2), 50-55.

- Cala, V., & Kunimine, Y. (2003). Distribución de plomo en suelos contaminados en el entorno de una planta de reciclaje de baterías ácidas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, XIX(3), 109-115.
- Cano de Terrones, T. (2014). Caracterización de una espirolactona sesquiterpénica metilénica obtenida de *Ambrosia arborescens* Miller y evaluación de su actividad biológica en *Tripanosoma cruzi*. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, LXXX(2), 124-135.
- Carpena, R., & Bernal, M. P. (Mayo de 2007). Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*, XVII(2), 1-3.
- Carrión, C., Ponce de León, C., Cram, S., Sommer, I., Hernández, M., & Vanegas, C. (2012). Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia*, XLVI(6), 609-620.
- CONABIO. (2009). Catálogo Taxonómico de especies de México .
- Contreras Pinto, L. A., Valencia Castro, C. M., De la Fuente Salcido, N., Linaje Treviño, M. S., & Trejo Calzada, R. (2016). Estudio de absorción, acumulación y potencial para la remediación del suelo contaminado por plomo usando *Ambrosia ambrosioides* . *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos* , I(1), 244-250.
- Covarrubias, S. A., & Peña Cabria, J. J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 7-21.
- Delgadillo López, A. E., González Ramírez, C. A., Prieto García, F., Villagómez Ibarra, J. R., & Acevedo Sandoval, O. (2011). Fitorremediación: una

alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems*, XIV, 597- 612.

Díaz Aguilar, I., Larqué Saavedra, M. U., Alcántar González, G., Carrillo González, R., & Vázquez Alarcón, A. (2001). Alteración de algunos procesos fisiológicos en trigo por la adición de plomo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, XVII(2), 79-90.

Diez Lazaro, J., Kidd, P., & Monterroso, C. (2002). Biodisponibilidad de metales en suelos y acumulación en plantas en el área de trás-os-montes (Ne Portugal): Influencia del material original. *EDAFOLOGIA* , IX(3), 313-328.

Flores Ramírez, R., Rico Escobar, E., Núñez Monreal, J. E., García Nieto, E., Carrizales, L., Ilizaliturri Hernández, C., & Díaz Barriga, F. (Julio-Agosto de 2012). Exposición infantil al plomo en sitios contaminados. *Salud Pública de México*, LIV(4), 382-392.

Fundacion Vasca para la Seguridad Alimentaria. (Febrero de 2013). Sustancias indeseables en la alimentación animal AMBROSIA spp. 1-4.

García Rico, L., Robles Burgueño, M. d., & Valenzuela Soto, E. M. (1999). Las metalotioneinas y su relación con la toxicidad del cadmio en los mamíferos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, XV(2), 113-120.

Gil Salido, A. A., Iloki Assanga, S. B., Lewis Luján, L. M., Fernández Ángulo, D., Lara Espinoza, C. L., Acosta Silva, A. L., & Rubio Pino, J. L. (March de 2016). Composition of Secondary Metabolites in Mexican Plant Extracts and their Antiproliferative Activity towards Cancer Cell Lines. *International Journal of Sciences*, V(3), 63-77.

González Chávez, M. d. (Enero-Marzo de 2005). Recuperación de suelos contaminados con metales pesados utilizando plantas y microorganismos rizosféricos. *Terra Latinoamerica*, XXIII(1), 29-37.

- González Mendoza, D., & Zapata Pérez, O. (2008). Mecanismos de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 53-61.
- González, I., Muenza, V., Cisternas, M., & Neaman, A. (2008). Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Revista Chilena de Historia Natural*, 279-291.
- Hernández Colorado, R. R., Alvarado, A. L., & Rosaura M., R. (2012). Acomulación de cobre en plantas silvestres de zonas agrícolas contaminadas con el metal. *Ciencia y Tecnología*, 55-61.
- Jara Peña, E., Gómez, J., Montoya, H., Chanco, M., Mariano, M., & Cano, N. (Agosto de 2014). Capacidad fitorremediadora de cinco especies altoandinas de suelos contaminados con metales pesados. *Revista Peruana de Biología*, XXI(2), 145 - 154.
- Kidd, P. S., & Monterroso, C. (2003). Biodisponibilidad de metales en suelos de mina: cambios inducidos por el crecimiento de *Alyssum serpyllifolium* ssp. *Lusitanicum*. *EDAFOLOGIA*, X(1), 33-52.
- Kidd, P., Becerra Castro, C., García Lestón, M., & Monterroso, C. (Mayo de 2007). Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L. *Ecosistemas*, XVI(2), 26-43.
- Landeros Márquez, O., Trejo Calzada, R., Reveles Hernández, M., Valdez Cepeda, R. D., Arreola Ávila, J. G., Pedroza Sandoval, A., & Ruíz Torres, J. (2011). Uso potencial del huizache (*Acacia farnesiana* L. Will) en la fitorremediación de suelos contaminados con plomo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, XVLL, 11-20.

- León Morales, J. M., & Sepúlveda Jiménez, G. (Noviembre de 2012). El daño por oxidación causado por cobre y la respuesta antioxidante de las plantas. *Interciencia* , XXXVII(11), 805-811.
- Llugany, M., Tolrà, R., Poschnrieder, C., & Barceló, J. (Mayo de 2007). Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre? *Ecosistemas*, XVI(2), 4-9.
- López López, A. (Agosto de 2011). Algunas plantas medicinales utilizadas en Teonadepa, Cumpas, Sonora. *Acta Médica* , XII(5), 28-31.
- M. Turner, R., Bowers, J. E., & Brugess, T. L. (1995). *Sonoran Desert Plants: An Ecological Atlas* (First Edition ed.). Tucson: The University of Arizona Press.
- Marrero Coto, J., Amores Sánchez, I., & Coto Pérez, O. (Septiembre-Diciembre de 2012). Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XLVI(3), 52-61.
- Martí, L., Filippini, M. F., Carlos, S., Drovandi, A., Troilo, S., & Valdés, A. (2011). Evaluación de metales pesados en suelos de los oasis irrigados de la Provincia de Mendoza: Concentraciones totales de Zn, Pb, Cd y Cu. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, XLII(2), 203-221.
- Mead, M. N. (Marzo-Abril de 2011). Confusión por el cadmio ¿Los consumidores necesitan protección? *Salud Pública de México*, LIII(2), 178-186.
- Morales, A. A., Navarro Andrés, F., & Sánchez Anta, M. A. (Octubre de 2012). Datos corológicos y morfológicos de las especies del género *Ambrosia* L. (Compositae) presentes en la Península Ibérica. *Botanica Complutensis*(36), 85-96.

- Nava Camberos, U., & Cano Ríos, P. (marzo-abril de 2000). Umbral económico para la mosquita blanca de la hoja plateada. *Agrociencia*, XXXIV(2), 227-234.
- Nava Ruíz, C., & Méndez Armenta, M. (Julio-Septiembre de 2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Archivos de Neurociencias*, XVI(3).
- Navarro Aviño, J., Aguilar Alonso, I., & López Moya, J. (Mayo de 2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas*, XVI(2), 10-25.
- Nungaray Arteaga, N. E. (Febrero de 2014). Fitorremediación del suelo de la mina La Blanca, Hidalgo, con plantas de la especie *Cosmos bipinnatus* y el género *Dahlia*. Distrito Federal, Mexico: Tesis de Doctorado.
- Orona Castillo, I., Espinoza Arellano, J. d., González Cervantes, G., Murillo Amador, B., García Hernández, J. L., & Santamaría César, J. (septiembre-diciembre de 2006). Aspectos técnicos y socioeconómicos de la producción de nuez (*Carya illinoensis* Koch.) en la Comarca Lagunera, Mexico. *Agricultura Técnica en México*, XXXII(3), 295-301.
- Ortega Ortega, R. E., Beltrán Herrera, J. D., & Marrugo Negrete, J. L. (Julio de 2011). Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (*Gynerium sagittatum*) (Aubl) Beauv. in vitro. *Revista Colombiana de Biotecnología*, XIII(1), 33-41.
- Ortiz Cano, H. G., Trejo Calzada, R., Valdez Cepeda, R. D., Arreola Ávila, J. G., Flores Hernández, A., & López Ariza, B. (2009). Fitoextracción de plomo y cadmio en suelos contaminados usando quelite (*Amaranthus hybridus* L.) y micorrizas. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 161-168.

- Pérez García, P., & Azcona Cruz, M. (Septiembre de 2012). Los efectos del cadmio en la salud. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas*, XVII(3), 199-205.
- Pernía, B., De Sousa, A., Reyes, R., & Castrillo, M. (Febrero de 2008). Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. *Interciencia*, XXXIII(2), 112-119.
- Poma, P. A. (2008). Intoxicación por plomo en humanos. *Anales de la Facultad de Medicina*, LIX(2), 120-126.
- Prieto Méndez, J., González Ramírez, C. A., Román Gutiérrez, A. D., & Prieto García, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, X(1), 29-44.
- PROCOBRE. (2010). *Cobre: Salud, medio ambiente y nuevas tecnologías*. (Primera ed.). Santiago de Chile: Cooper Cunnects Life.
- Ramírez, A. (2002). Toxicología del cadmio. Conceptos actuales para evaluar exposición ambiental u ocupacional con indicadores biológicos. *Anales de la Facultad de Medicina*, LXIII(1), 51-64.
- Rodríguez Ortiz, J. C., Rodríguez Fuentes, H., Lira Reyes, G., Martínez de la Cerda, J., & Lara Mireles, J. L. (Julio-Septiembre de 2006). Capacidad de seis especies vegetales para acumular plomo en suelos contaminados. *Revista Fitotecnia Mexicana*, XXIX(3), 239-245.
- Rodríguez Serrano, M., Martínez de la Casa, N., Romero Puertas, M., del Río, L., & Sandalio, L. (Septiembre de 2008). Toxicidad del Cadmio en Plantas. *Ecosistemas*, XVII(3), 139-146.
- Sanón, L. H., González Cossío, T., Romieu, I., & Hernández Avila, M. (Julio-Agosto de 1998). Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud. *Salud Pública de México*, XL(4).

- Sepúlveda, B., Pavez, O., & Tapia, M. (2012). Fitoextracción de metales pesados desde relaves utilizando plantas de *Salicornia* sp. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 20-26.
- Steiner, A. (1984). The Universal Nutrient Solution. Sixth International Congress on Soilless Culture, Wageningen. 633-650.
- Tequida Meneses, M., Cortez Rocha, M., Rosas Burgos, E. C., López Sandoval, S., & Corrales Maldonado, C. (Marzo de 2002). Efecto de extractos alcohólicos de plantas silvestres sobre la inhibición de crecimiento de *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium expansum*, *Fusarium moniliforme* y *Fusarium poae*. *Revista Iberoamericana de Micología*, 84-88.
- Trejo Calzada, R., Pedroza Sandoval, A., Reveles Hernández, M., Ruíz Torres, J., & Arreola Avila, J. G. (2015). Especies vegetales de zonas áridas para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. En F. d. UJED, *Libro Tópicos Selectos de Sustentabilidad: Un Reto Permanente*. (págs. 87-104).
- Vullo, D. L. (Diciembre de 2003). Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Química Viva*, II(3), 93-104.
- Yáñez C., C. A., Rios, N., Mora, F., Rojas, L., Díaz, T., Velasco, J., . . . Melendez, P. (Agosto de 2011). Composición química y actividad antibacteriana del aceite esencial de *Ambrosia peruviana* Willd. de los llanos venezolanos. *Revista Peruana de Biología*, XVII(2), 149-151.
- Yllanes, P., Armando, V. A., & Lozano, S. (Julio-Diciembre de 2014). Efectos fitotóxicos del plomo en maíz híbrido Dekalb (*Zea Mays* L.) en suelo arenoso y limoso. *The Biologist*, XII(2).