

Potencial fitorremediador de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelos contaminados por metales pesados

Ricardo Israel Ramírez Gottfried¹

Mario García Carrillo^{1§}

Vicente de Paul Álvarez Reyna¹

Guillermo González Cervantes²

Vicente Hernández Hernández¹

¹Posgrado en Ciencias Agrarias-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro-Unidad Laguna. Periférico Raúl López Sánchez y Carretera Santa Fe s/n, Torreón, Coahuila, México. CP. 27010. (Ricardo.gottfried@hotmail.com; vdpar.190754@hotmail.com; vickhdz.hdz@gmail.com). ²INIFAP. Gómez Palacio, Durango. (gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx).

§Autor para correspondencia: mgc570118@hotmail.com.

Resumen

El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar el potencial fitorremediador de suelo de *Ambrosia ambrosioides*, determinar la absorción de metales pesados (cadmio, cobre y plomo) en la planta bajo diferentes concentraciones 0, 20, 40, y 60 mg L⁻¹ aplicadas en el agua de riego. Los análisis se realizaron mediante absorción atómica, y con los datos obtenidos se calculó el factor de traslocación y factor de bioconcentración. El desarrollo del experimento y análisis de laboratorio se realizaron en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna en el año 2018. 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 15 827.2, 13 030.9 y 4 979.4 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 efectuó una alta fitoextracción y que *Ambrosia ambrosioides* puede ser utilizada en fitorremediación y sanidad de suelos.

Palabras clave: absorción, acumulación, bioconcentración, traslocación.

Recibido: agosto de 2019

Aceptado: octubre de 2019

Introducción

Una de las consecuencias más negativas de la revolución industrial ha sido la dispersión de contaminantes en aire, agua y suelo (Vullo, 2003; Becerril *et al.*, 2007; Navarro *et al.*, 2007). 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 (Becerril *et al.*, 2007; Azpilicueta *et al.*, 2010; Martí *et al.*, 2011).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, ha definido como posibles elementos peligrosos al Ba, Cd, Cu, Pb, Mn, Ni, Zn, Vn, Sn, su peligrosidad es potencial y deben mantenerse bajo control (Marrero *et al.*, 2012). Estos metales cuando rebasan los límites máximos permitidos provocan efectos negativos en las propiedades físicas, químicas y biológicas en suelo (Trejo *et al.*, 2015), el término que se usa o se emplea es ‘polución de suelo’ (Prieto *et al.*, 2009).

En las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelo y recuperar los ecosistemas afectados (Carpena y Bernal 2007). Una de estas tecnologías es el uso de especies vegetales para la remoción de metales pesados del suelo o ‘fitorremediación’ (Covarrubias y Peña, 2017). Esta técnica 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 (Carpena y Bernal 2007; Delgadillo *et al.*, 2011). Una ventaja de la fitorremediación es que los metales absorbidos por las plantas pueden ser extraídos de la biomasa cosechada y después ser reciclados (Agudelo *et al.*, 2005).

En los últimos años ha crecido el interés en las plantas que pueden acumular y tolerar cantidades inusualmente alta de metales pesados, esto debido a su potencial utilidad para el hombre como herramienta en la limpieza de suelo contaminado (Llugany *et al.*, 2007). Este tipo de plantas llamadas hiperacumuladoras son relativamente raras y frecuentemente se encuentran en áreas geográficas remotas (Kidd y Monterroso, 2003). Su concentración final en los tejidos aéreos depende del metal y de la especie, llegando a presentar entre el 1 y 2% de su peso seco (Becerril *et al.*, 2007; Diez *et al.*, 2002).

Actualmente se utiliza el término hiperacumuladora de metales para asignar plantas que acumulan $>10 \text{ mg kg}^{-1}$ de Mn y Zn, $>1 \text{ mg kg}^{-1}$ de Co, Cu, Pb, Ni, As y Se y $>100 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd (Kidd *et al.*, 2007). En la actualidad, se han identificado aproximadamente 400 especies hiperacumuladoras, de las que la mayor parte son endémicas de suelo serpentínico y acumulan Ni (Diez *et al.*, 2002). 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.

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

La mayoría de estas especies son plantas aromáticas y medicinales poco estudiadas, son consideradas como malas hierbas y, por lo tanto, el cultivo de la mayoría de ellas, no se ha sistematizado (Cano, 2014).

Ambrosia ambrosioides es la ambrosía arbustiva más común, se encuentra en áreas como los bordes de carreteras, orillas de ríos, suelo arenoso y ocasionalmente en las grietas de las rocas, su uso principal es con fines medicinales (Turner *et al.*, 1995; López, 2011; Gil-Salido *et al.*, 2016). El objetivo de este trabajo de investigación fue determinar el potencial fitorremediador de la chicura (*Ambrosia ambrosioides*) en suelo contaminado por Cd, Cu y Pb. Esta planta no se encuentra reportada en la literatura como especie hiperacumuladora ni fitorremediadora.

Materiales y métodos

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° 33' 12.53'' latitud norte, 103° 22' 32.07'' longitud oeste) en la ciudad de Torreón Coahuila.

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 1 100 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 y 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.

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. En estos 21 días las plantas fueron irrigadas cada tercer día con 250 ml de solución nutritiva Steiner (Steiner, 1984).

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 1. Las concentraciones fueron de 0, 20, 40 y 60 mg L⁻¹ de cada metal. 48 plantas se trasplantaron a macetas de 1 200 cm³ de volumen con un sustrato compuesto por arena (80%) previamente lavada con hipoclorito de sodio (NaClO) al 5% y perlita (20%).

Cuadro 1. Proporciones utilizadas para la preparación de los tratamientos.

Tratamiento	Volumen de Solución Steiner (L)	Metal	Volumen de metal (mL)
T1	10	Cd	0
T2	9.8	Cd	200
T3	9.6	Cd	400
T4	9.4	Cd	600
T5	10	Cu	0
T6	9.8	Cu	200
T7	9.6	Cu	400
T8	9.4	Cu	600
T9	10	Pb	0
T10	9.8	Pb	200
T11	9.6	Pb	400
T12	9.4	Pb	600

La arena es un sustrato químicamente inerte que actúa como soporte de la planta, no interviene en el proceso de adsorción y fijación de nutrimentos. La perlita se utilizó para evitar la compactación de la arena. Desde que se realizó el trasplante, cada tercer día las plantas fueron irrigadas con 250 ml de solución de su respectivo tratamiento, en 21 días se dio un total de 10 riegos. Al término de la aplicación de tratamientos las plantas fueron extraídas de cada una de las macetas.

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. 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 llegar a afectar los resultados.

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.

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 h.

Preparación de las 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 fue el siguiente: el proceso inicio con la molienda de la planta que fue triturada y molida en un molino eléctrico hasta quedar de manera homogénea y con textura de polvo. La muestra molida fue tamizada y las muestras fueron

colocadas en bolsas de plástico pequeñas previamente etiquetadas. Se pesó 1 g de muestra en un crisol de peso constante de 50 ml para proceder a introducirlo en una mufla marca Furnace 1 500 en donde se calcinaron las muestras de planta a una temperatura de 600 °C por 4 h.

Posteriormente a la ceniza resultante en el crisol se le agregaron 10 ml de ácido clorhídrico (HCL) al 37%, se agitó por 10 s y se dejó reposar 20 min. El contenido del crisol se pasó a un matraz volumétrico de 100 ml, al cual previamente se le agregaron 10 ml de cloruro de cesio (CsCl), el contenido se aforo con agua destilada hasta completar 100 ml. Se filtró el contenido del matraz en papel filtrante colocando el residuo en recipientes de plástico de 100 ml, el residuo obtenido en el bote es utilizado para hacer la determinación de los metales pesados.

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 1 000 ppm de cada metal y se colocó la lámpara correspondiente.

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 y B a su concentración (Cuadro 2), con 4 repeticiones y un total de 12 tratamientos.

Cuadro 2. Identificación del factor A y B.

Factor A		Factor B	
Cadmio	A1	0 mg L ⁻¹	B1
Cobre	A2	20 mg L ⁻¹	B2
Plomo	A3	40 mg L ⁻¹	B3
		60 mg L ⁻¹	B4

Cada planta se diseccionó 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, utilizando el programa SAS versión 9.0. En el Cuadro 3 se presentan los diferentes tratamientos aplicados.

Cuadro 3. Tratamientos aplicados.

Interacción	Tratamiento
A1*B1	1
A1*B2	2
A1*B3	3
A1*B4	4
A2*B1	5

Interacción	Tratamiento
A2*B2	6
A2*B3	7
A2*B4	8
A3*B1	9
A3*B2	10
A3*B3	11
A3*B4	12

Resultados y discusión

Raíz

La raíz fue la parte de la planta donde se absorbió la mayor cantidad de metales pesados (Cuadro 4), 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 de las plantas a metales pesados es la retención del metal en la raíz (Barceló y Poschenrieder, 1992).

Cuadro 4. Concentración de metales en la raíz (mg kg⁻¹) bajo los diferentes tratamientos.

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	4 195.3 b	3 841.1 bc	2 227.8 b
Cobre	1 063.4 de	15 827.2 a	2 386.8 cd	1 592.8 de	5 217.5 a
Plomo	214.5 e	300 e	252.5 e	231.5 e	249.6 c
B	430.7 c	5662.5 a	2 278.2 b	1 888.4 b	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $p \leq 0.05$); CV= 28.36%; A= metal pesado; B= concentración; CV= coeficiente de variación.

Para el factor metal pesado, el cobre fue el metal que más absorbió la raíz de la planta 5 217.5 (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 5 662.5 (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 cobre-20 (mg L⁻¹) (tratamiento 6) fue donde se encontró la mayor acumulación de metal pesado en la raíz 15 827.2 (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).

Hoja

La hoja de la planta presentó las menores acumulaciones de metales pesados (Cuadro 5). Esto se debe a que muchas especies toleran elevadas concentraciones de metales en el suelo porque restringen su absorción y traslocación hacia las hojas, lo que les permite mantener concentraciones constantes (Kidd *et al.*, 2007).

Cuadro 5. Acumulación de metales en la hoja (mg kg⁻¹) bajo los diferentes tratamientos.

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	1 037.3 ed	429.3 e	420.1 b
Cobre	1 823.2 cd	4 979.4 a	3 362 b	2 679.9 bc	3 211.1a
Plomo	589 e	547.6 e	833.9 de	872.5 de	710.7 b
B	820.6 c	1 897 a	1 744.4 ab	1 327.2 bc	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $p \leq 0.05$ CV= 24.26%. A= metal pesado; B=concentración; CV= coeficiente de variación.

Para el factor metal pesado el cobre fue el que más absorbió la hoja 3 211.1 (mg kg⁻¹), cadmio y plomo no presentaron diferencia significativa. En el factor concentración se observó que en 40 (mg L⁻¹) fue donde se presentó la mayor acumulación de los metales 1 744.4 (mg kg⁻¹), la menor se presentó en la concentración de 0 (mg L⁻¹) con 820.6 (mg kg⁻¹). En 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 4 979.4 y 3 362 (mg kg⁻¹) respectivamente. La menor acumulación en la hoja se presentó en cadmio 0 (mg L⁻¹) (tratamiento 1) y cadmio 20 (mg L⁻¹) (tratamiento 2) con 49.7 y 164.1 (mg kg⁻¹), respectivamente.

Tallo

Para el factor metal pesado el cobre fue el que más absorbió el tallo de la planta 4 912 (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 4 466.2 (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 13 030.9 (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) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Acumulación de metales en el tallo (mg kg⁻¹) bajo los diferentes tratamientos.

Metal	Concentración				A
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)	
Cadmio	108.9 c	138.8 c	460.8 c	266.2 c	243.7 b
Cobre	183.3 c	13 030.9 a	3429 b	3 005 b	4 912 a
Plomo	200 c	228.9 c	440.1 c	1 119.6 c	497.2 b
B	164.1 c	4 466.2 a	1 443.3 b	1 463.6 b	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $p \leq 0.05$); CV= 32.38%. A= metal pesado; B= concentración; CV= coeficiente de variación.

Los resultados indican que en raíz, tallo y hoja las mayores concentraciones de metales pesados se presentaron en cobre a 20 mg L⁻¹, 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 y 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 desarrollan 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). En 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 es mayor la absorción en la planta (Contreras *et al.*, 2016).

Los resultados en el tallo y hoja concuerdan con los de (Contreras *et al.*, 2016) ya que la absorción de plomo mostro un comportamiento similar. En la raíz de la planta se mostró un decaimiento en la absorción a partir de la concentración de 40 mg kg⁻¹. El plomo fue el único metal pesado que mostro este comportamiento.

Factor de traslocación biológico (FTB) en 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 7 se presentan el FTB para *Ambrosia ambrosioides*.

Cuadro 7. Factor de traslocación biológico en *Ambrosia ambrosioides*.

Metal	Concentración				A
	0 (mg L ⁻¹)	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)	
Cadmio	0.35 d	5.23 b	4.07 bc	9.74 a	4.85 a
Cobre	0.53 d	3.41c	0.47 d	0.21 d	1.15 b
Plomo	0.43 d	0.49d	0.35 d	0.26 d	0.38 c
B	0.44 c	3.04 a	1.63 b	3.4 a	

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey's $p \leq 0.05$); CV= 24.25%; A= metal pesado; B= concentración; CV= coeficiente de variación.

Para el factor metal pesado el cadmio fue el metal con mayor FTB 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 3.4, 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 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 FTB 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 tratamientos no trasloca el metal de la raíz a sus hojas.

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 *et al.*, 2008). Capacidad que demostró *Ambrosia ambrosioides*.

Factor de bioconcentración (BCF) en 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 y Romero, 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 8 se presentan los BCF para *Ambrosia ambrosioides*. 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 8. Factor de bioconcentración en *Ambrosia ambrosioides*.

Metal	Concentración			A
	20 (mg L ⁻¹)	40 (mg L ⁻¹)	60 (mg L ⁻¹)	
Cadmio	58.17 de	142.33 cd	75.61 cd	92.04 b
Cobre	1 691.87 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 $p \leq 0.05$); CV= 13.79%. A= metal pesado; B=concentración; CV= coeficiente de variación.

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 presentados en el Cuadro 8 superaron el valor comparativo de 1 lo que indica la factibilidad de *Ambrosia ambrosioides* para ser utilizada en 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 y Zapata, 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 crecimiento y 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 y 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.

Conclusiones

El cobre es el metal pesado que más absorbió la *Ambrosia ambrosioides*. El cobre a una concentración $20 \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$ presentó la mayor acumulación en raíz, tallo y hoja con 15827.2, 13030.9 y 4979.4 (mg kg^{-1}) respectivamente. El cadmio y cobre mostraron una tendencia de disminución en su acumulación al aplicarlos en concentraciones mayores de 40 y 60 (mg L^{-1}) respectivamente. El factor de traslocación biológico indicó que el cadmio es el metal pesado que la planta trasloca hacia sus hojas con mayor facilidad. 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.

Agradecimientos

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

Literatura citada

- Agudelo-Betancur, L. M.; Macias-Mazo, K. I. y Suárez-Mendoza, A. J. 2005. Fitorremediación: la alternativa para absorber metales pesados de los biosólidos. *Rev. Lasallista Investig.* 2(1):57-60.
- Argota-Pérez, G.; Encinas-Cáceres, M.; Argota-Coello, H. y Iannacone, J. 2014. Coeficientes biológicos de fitorremediación de suelos expuestos a plomo y cadmio utilizando *alopecurus magellanicus bracteatus* y *muhlenbergia angustata (poaceae)*. *Punu, Perú. The Biologist (Lima)*. 12(1): 99-108.
- Azpilicueta, C.; Peña, L. y Gallego, S. 2010. Los metales y las plantas, entre la nutrición y la toxicidad. *Ciencia Hoy*. 20(116):12-16.
- Barceló, J. y Poschenrieder, C. 1992. Respuestas de las plantas a la contaminación por metales pesados. *Suelo y Planta*, 28(1):345-361.
- Becerril, J.; Barrutia, O.; García-Plazaola, J.; Hernández, A.; Olano, J. y Garbisu, C. 2007. Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Ecosistemas*. 16(2):50-55.
- 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*. *Rev. Soc. Química del Perú*. 80(2):124-135.
- Carpeta, R. y Bernal, M. P. 2007. Claves de la fitorremediación: fitotecnologías para la recuperación de suelos. *Ecosistemas*. 16(2):1-3.

- Carrión, C.; Ponce de León, C.; Cram, S.; Sommer, I.; Hernández, M. y Vanegas, C. 2012. Aprovechamiento potencial del lirio acuático (*Eichhornia crassipes*) en Xochimilco para fitorremediación de metales. *Agrociencia*. 46(6):609-620.
- Contreras-Pinto, L. A.; Valencia-Castro, C. M.; De la Fuente-Salcido, N.; Linaje-Treviño, M. S. y Trejo-Calzada, R. 2016. Estudio de absorción, acumulación y potencial para la remediación del suelo contaminado por plomo usando *Ambrosia ambrosioides*. *Inv. Des. Cienc. Tecnol. Alim.* 1(1):244-250.
- Covarrubias, S. A. y Peña-Cabria, J. J. 2017. Contaminación ambiental por metales pesados en México: problemática y estrategias de fitorremediación. *Rev. Inter. Cont. Amb.* 33(especial):7-21.
- Delgadillo-López, A. E.; González-Ramírez, C. A.; Prieto-García, F.; Villagómez-Ibarra, J. R. y Acevedo-Sandoval, O. 2011. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Trop. Subtropical Agroecosystems*. 14(2):597-612.
- Díaz-Aguilar, I.; Larqué-Saavedra, M. U.; Alcántar-González, G.; Carrillo-González, R. y Vázquez-Alarcón, A. 2001. Alteración de algunos procesos fisiológicos en trigo por la adición de plomo. *Rev. Inter. Cont. Amb.* 17(2):79-90.
- Diez-Lazaro, J.; Kidd, P. y 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. *Edafología*. 9(3):313-328.
- Gil-Salido, A. A.; Iloki-Assanga, S. B.; Lewis-Luján, L. M.; Fernández-Ángulo, D.; Lara-Espinoza, C. L.; Acosta-Silva, A. L. y Rubio-Pino, J. L. 2016. Composition of secondary metabolites in mexican plant extracts and their antiproliferative activity towards cancer cell lines. *Inter. J. Sci.* 5(3):63-77.
- González, I.; Muena, V.; Cisternas, M. y Neaman, A. 2008. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Rev. Chilena de Historia Natural*. 81(2):279-291.
- González-Mendoza, D. y Zapata-Pérez, O. 2008. Mecanismos de tolerancia a elementos potencialmente tóxicos en plantas. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 1(82):53-61.
- Hernández-Colorado, R. R.; Ana, L. A. y Romero, M. R. 2012. Acumulación de cobre en plantas silvestres de zonas agrícolas contaminadas con el metal. *Ciencia y Tecnología*. 1-2(28):55-61.
- Kidd, P. S. y Monterroso, C. 2003. Biodisponibilidad de metales en suelos de mina: cambios inducidos por el crecimiento de *alyssum serpyllifolium* ssp. *Lusitanicum*. *Edafología*. 10(1):33-52.
- Kidd, P.; Becerra-Castro, C.; García Lestón, M. y Monterroso, C. 2007. Aplicación de plantas hiperacumuladoras de níquel en la fitoextracción natural: el género *Alyssum* L. *Ecosistemas*. 16(2):26-43.
- León Morales, J. M. y Sepúlveda-Jiménez, G. 2012. El daño por oxidación causado por cobre y la respuesta antioxidante de las plantas. *Interciencia*. 37(11):805-811.
- Llugany, M.; Tolrà, R.; Poschrieder, C. y Barceló, J. 2007. Hiperacumulación de metales: ¿una ventaja para la planta y para el hombre? *Ecosistemas*. 16(2):4-9.
- López-López, A. 2011. Algunas plantas medicinales utilizadas en Teonadepa, Cumpas, Sonora. *Acta Médica*. 7(5):28-31.
- Marrero-Coto, J.; Amores-Sánchez, I. y Coto-Pérez, O. 2012. Fitorremediación, una tecnología que involucra a plantas y microorganismos en el saneamiento ambiental. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 46(3):52-61.

- Martí, L.; Filippini, M. F.; Carlos, S.; Drovandi, A.; Troilo, S. y 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. *Rev. Fac. Cienc. Agr.* 42(2):203-221.
- Morales, A. A.; Navarro-Andrés, F. y Sánchez-Anta, M. A. 2012. Datos corológicos y morfológicos de las especies del género *Ambrosia* L. (*Compositae*) presentes en la Península Ibérica. *Botánica Complutensis.* 1(36):85-96.
- Nava-Camberos, U. y Cano-Ríos, P. 2000. Umbral económico para la mosquita blanca de la hoja plateada en melón en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia.* 34(2):227-234.
- Navarro, A. J.; Aguilar, A. I. y López, M. J. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Ecosistemas.* 16(2):10-25.
- Orona, C. I.; Espinoza, A. J. D.; González, C. G.; Murillo, A. B.; García, H, J. L.; y Santamaría, C. J. 2006. Aspectos técnicos y socioeconómicos de la producción de nuez (*Carya illinoensis* Koch.) en la Comarca Lagunera, México. *Agric. Téc. Méx.* 32(3):295-301.
- Ortega-Ortega, R. E.; Beltrán-Herrera, J. D. y Marrugo-Negrete, J. L. 2011. Acumulación de mercurio (Hg) por caña flecha (*Gynerium sagittatum*) (Aubl) Beauv. *in vitro*. *Rev. Colomb. Biotecnol.* 8(1):33-41.
- Pernía, B.; De Sousa, A. y Reyes-Rosa, R. 2008. Biomarcadores de contaminación por cadmio en las plantas. *Interciencia.* 33(2):112-119.
- Prieto-Méndez, J.; González-Ramírez, C. A.; Román-Gutiérrez, A. D. y Prieto-García, F. 2009. Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Trop. Subtrop. Agroecosys.* 10(1):29-44.
- Steiner, A. 1984. The universal nutrient solution. *In: Sixth International Congress on Soilless Culture, Wageningen.* 633-650 pp.
- Trejo-Calzada, R.; Pedroza-Sandoval, A.; Reveles-Hernández, M.; Ruíz-Torres, J. y Arreola-Ávila, J. G. 2015. Especies vegetales de zonas áridas para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *UJED. Libro tópicos selectos de sustentabilidad: Un reto permanente.* 87-104 pp.
- Turner, M. R.; Bowers, J. E. y Bruggess, T. L. 1995. *Sonoran Desert plants: an ecological atlas* (1ra Ed.). Tucson: The University of Arizona Press. 504 p.
- Vullo, D. L. 2003. Microorganismos y metales pesados: una interacción en beneficio del medio ambiente. *Química Viva.* 2(3):93-104.