



Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost

Lead and cadmium uptake by sunflower from contaminated soil and remediated with organic amendments in the form of compost and vermicompost

Rubén Munive Cerrón^{1,*} ; Gilberto Gamarra Sánchez¹ ; Yveth Munive Yachachi² ; Fernando Puertas Ramos¹ ; Lorgio Valdiviezo Gonzales³ ; Rita Cabello Torres³ 

¹ Universidad Nacional del Centro del Perú, Mariscal Castilla 3909, Huancayo, Peru.

² Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Cercado de Lima 15081, Lima, Peru.

³ Universidad Cesar Vallejo, San Juan de Lurigancho 15434, Lima, Peru.

Received October 9, 2019. Accepted April 22, 2020.

Resumen

Con la finalidad de reducir la contaminación por metales pesados en suelos agrícolas, decidimos evaluar el efecto de las enmiendas orgánicas (compost y vermicompost). Se realizó el trabajo utilizando girasol como fitorremediadora. Para ello se emplearon los suelos agrícolas de las localidades Mantaro y Muqui del valle del Mantaro. Los resultados indican que los suelos de la localidad de Muqui, contienen la mayor cantidad de Pb y Cd, presentando efectos negativos en la producción de biomasa. La planta de girasol absorbe los metales pesados como lo demuestra la mayor acumulación de plomo y cadmio en la raíz de ésta, no se encontraron diferencias significativas entre la acumulación de plomo en tallos y flores, tallos y hojas, para cadmio en los tallos y hojas, confirmando que la aplicación de las enmiendas orgánicas contribuye a solubilizar el Pb y Cd del suelo, además de contribuir en un mayor desarrollo del cultivo. Los valores del Factor de Bioconcentración (FBC) de Cadmio (0,53 - 0,66) fueron mejores que el plomo (0,07 - 0,08), mientras que los valores del Factor de Translocación (FT) indicaron una capacidad del girasol como un fitoestabilizador, especialmente con el uso de vermicompost (Pb: 1,2 - Cd: 1,4) en el compost (Pb: 0,8 - Cd: 1,2).

Palabras clave: Metales pesados; *Helianthus annuus*; fitorremediación; enmiendas orgánicas.

Abstract

In order to reduce heavy metal contamination in agricultural soils, we decided to assess the effect of organic amendments (compost and vermicompost). The work was carried out using sunflower as a fitorremediator. For this purpose, the agricultural soils of the Mantaro and Muqui localities of the Mantaro Valley were used. The results indicate that the soils of the locality of Muqui, contain the greatest amount of Pb and Cd, presenting negative effects on biomass production. The sunflower plant absorbs heavy metals as evidenced by the increased accumulation of lead and cadmium at the root of the sunflower, no significant differences were found between the accumulation of lead in stems and flowers, stems and leaves, for cadmium on the stems and leaves, confirming that the application of organic amendments contributes to solubilizing the Pb and Cd of the soil, in addition to contributing to further development of the crop. Cadmium Bioconcentration Factor (BCF) values (0.53 - 0.66) were better than lead (0.07 - 0.08), while Translocation Factor (FT) values indicated a sunflower capacity as a phytostabilizer, especially with the use of vermicompost (Pb: 1.2 - Cd: 1.4) in compost (Pb: 0.8 - Cd: 1.2).

Keywords: Heavy metals; *Helianthus annuus*; phytoremediation; organic amendments.

Cite this article:

Munive, R.; Gamarra, G.; Munive, Y.; Puertas, F.; Valdiviezo, L.; Cabello, R. 2020. Absorción de plomo y cadmio por girasol de un suelo contaminado y remediado con enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost. *Scientia Agropecuaria* 11(2): 177-186.

* Corresponding author
E-mail: rmunive21@hotmail.com (R. Munive).

1. Introducción

La contaminación de suelos por la introducción del Pb y Cd se debe principalmente a eventos relacionados a los procesos industriales como: derrames, transporte, pérdidas de mermas y generación de residuos sólidos (Prasetia et al., 2017), lo cual genera riesgos sobre la calidad de los recursos, los alimentos y la salud humana (Chabukdhara y Nema; 2012; Naveedullah et al., 2013). Al respecto, diversos estudios han demostrado la degradación de suelos por Pb y Cd (Mudd, 2010), debido al empobrecimiento de sus nutrientes lo cual dificulta la actividad microbiana, afectando negativamente a los cultivos (Upadhyay et al., 2016). Aunque existen diversos métodos para el tratamiento de estos suelos, muchas veces las interacciones de estos metales con otros componentes dificultan su limpieza haciendo el tratamiento más costoso (Cameselle y Gouveia, 2019; Delgadillo et al., 2011). Por el contrario, la fitorremediación ha resultado ser una tecnología menos costosa y más amigable con el ambiente, el uso de plantas con elevada biomasa suelen usarse como fito-acumuladoras (Niu y Sun, 2017), por la habilidad de movilizar en sus tejidos niveles altos de metales como Pb y Cd (Govarthanana et al., 2018; Agnello et al., 2018; Alaboudi et al., 2018), hoy en día estos procesos vienen siendo asistidos por la aplicación de microorganismos o fortalecidos por la aplicación de fertilizantes químicos (Chabukdhara y Nema, 2012) y enmiendas naturales (Niu y Sun, 2017; Delgado et al., 2006) para facilitar la bioacumulación del metal en los tejidos de la planta, debido a la presencia de ácidos húmicos (Zhang et al., 2019).

Respecto a la especie *Helianthus annuus* (girasol) existen muchos estudios sobre la conveniencia de usarla en el proceso de fitorremediación, ya que pueden estabilizar a los metales almacenándolos en los tejidos foliares y las raíces (Gómez et al., 2018), debido a la presencia de grupos funcionales tanto en los exudados del vegetal que ayudan en este proceso, (Nigam et al., 2001). Goudriaan y Van Laar (2012) señalaron que las plantas presentan tres subfases durante su crecimiento: aceleración temprana, fase lineal y fase de saturación para la maduración y en el caso del *Helianthus annuus* (planta herbácea cuyo periodo desde su siembra hasta su cosecha es de 120 días), este periodo se divide en cinco etapas: (a) su establecimiento durante los primeros 20 días, (b) una temporada de desarrollo vegetativo de 01 mes, (c) floración a los largo de 30 días, (d) formación de rendimiento de 25 días y (e) la madurez por 15 días (Zhao et al.,

2019), sin embargo, la biomasa disminuye progresivamente cuando la planta es sometida a altas concentraciones de plomo (Alaboudi et al., 2018; Zhao et al., 2019) debido a la toxicidad del metal (Gao y Zhu, 2004).

Por esta razón, es importante mantener un buen desarrollo de la planta durante el proceso de fitorremediación, para que esta acumule la mayor cantidad de metales en sus tejidos con una alta tolerancia sobre los niveles presentes en el suelo, esta capacidad de acumulación se mide a través del factor de bioacumulación (FBC) y el factor de translocación (FT) en los diferentes tejidos (Rostami y Azhdarpoor, 2019).

Si la planta acumula mayores cantidades en la raíz serán clasificadas como fitoestabilizadoras o exclusoras (Deng et al., 2004), pero si acumulan más en la parte aérea entonces serán denominadas fitoextractoras o acumuladoras (Yoon et al., 2006).

En el Perú, el Valle del Mantaro posee suelos agrícolas muy fértiles, pero también presenta algunos sitios seriamente contaminados por Pb y Cd (Munive et al., 2018) que requieren recuperación. Aunque recientemente se ha estudiado la aplicación de enmiendas (compost y vermicompost) a base de *Stevia rabaudiana* en la fitorremediación de estos suelos con la especie *Zea mays* los resultados mostraron a la planta como fitoestabilizadora por su absorción de metales en las raíces (Li et al., 2019) reflejado en sus factores de bioconcentración y translocación menores a 1 (Munive et al., 2018). Las enmiendas como el compost y vermicompost a base de Stevia, resultan convenientes, es importante destacar que el vermicompost es un material orgánico natural elaborado a partir de las lombrices rojas californianas (*Eisenia foetida*) sobre los residuos orgánicos, que debido a la velocidad de conversión de la materia orgánica residual a sus formas más estables *humus*, incluyendo, minerales y nutrientes es de esperarse que mejoren el desarrollo de los cultivos (Rubenacker et al., 2011; Saavedra, 2007).

Por estas razones el presente estudio experimental, buscó solubilizar los elementos contaminantes (Plomo y Cadmio) presentes en el suelo agrícolas del valle del Mantaro con enmiendas orgánicas: compost y vermicompost de Stevia, a fin de que los metales pesados puedan ser extraídos por el girasol, para tal efecto se evaluaron el efecto de la aplicación de las enmiendas orgánicas a base de Stevia sobre los metales pesados y la fertilidad de los dos suelos agrícolas del valle del Mantaro con la aplicación de la técnica de fitorremediación; se determinó la extracción de los elementos pesados del

suelo, evaluando la capacidad de fitorremediación del girasol, para acumular metales pesados (cadmio y plomo) en interacción con las enmiendas orgánicas.

2. Materiales y métodos

2.1 Muestras de suelos y sus características

La población en estudio comprendió dos suelos agrícolas del valle del Mantaro ubicados en las localidades de: Mantaro en las coordenadas UTM 458051 E – 8692416 N y de Muqui en las coordenadas 458051E - 862818 N en la región central del Perú. El suelo de Mantaro con textura franco arcillosa y contenido de Pb promedio de 208 mg/kg, en el caso del suelo de Muqui con textura franco arenosa y elevadas concentraciones de Pb promedio de 1174 mg/kg. Las concentraciones de cadmio fueron bajas no mayores a 10 mg/kg en ambas localidades (Tabla 1).

Se evaluaron las características fisicoquímicas de los suelos estudiados ya que estuvieron sujetas al transporte de los metales pesados en el ambiente, especialmente filtraciones, entre otros (Rog-Young et al., 2015). Se midió especialmente la conductividad eléctrica (CE), CaCO₃, materia orgánica (MO), fósforo y potasio disponible, capacidad de intercambio catiónico total (CIC), saturación de bases y cationes como calcio, magnesio, potasio y sodio, asimismo la medición del Pb y Cd. En la Tabla 1 se presenta las principales características de los suelos y enmiendas empleadas en el experimento.

2.2 Enmiendas orgánicas y preparación para el cultivo de girasol en macetas

El compost se elaboró en Pichanaki - región Junín, a partir de los residuos agroindustriales de *Stevia rebaudiana* y el vermicompost resultado de una mezcla al 50% entre el compost de *Stevia* con el vermicompost proveído por el Instituto Nacional de Innovación

Agraria (INIA) Santa Ana - Huancayo - Perú. Con respecto a las enmiendas orgánicas, sus características químicas, disponibilidad, costo y calidad en relación con la materia orgánica son aspectos muy importantes para la fitorremediación de los relaves mineros (Tapia et al., 2020). Las enmiendas orgánicas aumentaron la biomasa microbiana y las actividades y cambiaron sustancialmente la composición bacteriana y la diversidad del suelo de la rizósfera, proporcionando así una opción efectiva para facilitar la fitoextracción de suelos contaminados con metales (Yang et al., 2019). Las enmiendas del suelo, especialmente la aplicación repetida de compost, condujeron a cambios en las poblaciones de microbios del suelo (Borges et al., 2020).

Se empleó la especie Girasol (*Helianthus annuus*) como una alternativa, de plantas estudiadas capaces de remover sustancias tóxicas en suelos expuestos a tales contaminantes, a su capacidad de adaptarse a distintos tipos de suelos con un desarrollo importante de biomasa que llega alcanzar hasta 2m de alto con una floración de hasta 30 cm de diámetro (Alaboudi et al., 2018; Shahid et al., 2012).

Se colocaron las semillas a 1,2 cm por debajo del suelo en cada maceta con 4 kg de capacidad. Se incorporó compost y vermicompost a la dosis del 2% como tratamientos comparados al testigo, luego se aplicó el riego necesario de forma periódica manteniendo a capacidad de campo, durante todo el desarrollo del cultivo, además, se efectuó el mantenimiento del cultivo para evitar la compactación en la parte superior del macetero y el control de maleza con la finalidad de mantener el cultivo libre de enfermedades. No fue necesaria la aplicación de agroquímicos debido a la ausencia de plagas y enfermedades y la cosecha se efectuó cuando el cultivo alcanzó su madurez fisiológica.

Tabla 1
Datos del análisis inicial de los suelos y enmiendas orgánicas

Características físico química de los suelos															
Localización	Textura	Parámetros fisicoquímicos										Relación		Metales pesados	
		C.E.	pH	M. O.	P	K	Ca	Mg	Na	CIC	Ca/Mg	(Ca + Mg) / K	Mg/K	Pb	Cd
		mS/cm													
Mantaro	Franco arcilloso	0,18	7,30	3,56	29,7	0,47	17,08	2,37	0,09	20,0	7,20	41,38	5,04	208,24	6,76
Muqui	Franco arenoso	0,38	7,85	2,30	15,8	0,33	9,57	1,23	0,07	11,2	7,78	32,73	3,73	1174,40	8,26
Características fisicoquímicas de las enmiendas orgánicas															
Enmiendas	Localización	C.E.	pH	M. O.	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Hd	Na	Pb	Cd		
		mS/cm												%	
Compost	Pichanaki - Junín	1,31	7,23	20,18	0,81	0,52	0,41	1,61	0,32	23,58	0,02	31,08	39,25		
Vermicompost	INIA - Huancayo Junín	1,87	6,82	29,55	1,10	1,09	0,38	2,30	0,40	39,74	0,02	35,1	39,25		

2.3 Cosecha del girasol y medición del contenido de metales

La cosecha se efectuó una vez lograda la formación de las flores a los 3 meses, en estadio de reproducción R5, una vez que la flor del girasol estuvo bien conformada para un periodo de 90 días (Alberio et al., 2015). El experimento duró 90 días, cuando la planta se encontraba en la fase de madurez (Alberio et al., 2015), se monitoreo el crecimiento de la planta semanalmente apenas el girasol emergió en la maceta, es importante mencionar que la altura se ha contabilizado a partir del borde de la suelo (desde el tallo) hasta el ápice del tallo principal y en la semana 13, los tejidos aéreos (tallos, hojas, y flores) y de la raíz, fueron separados, pesados (peso fresco) y luego lavados con agua desionizada para ser secados a 70 °C, hasta lograr un peso constante, para determinar su peso seco por triplicado y medir la concentración de plomo y cadmio, de acuerdo a los descrito por Alaboudi et al. (2018) bajo la técnica de espectroscopia de absorción atómica con sistema flama.

2.4 Estadística

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el paquete estadístico para las Ciencias Sociales (SPSS), versión 25,0. Se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA), para mostrar la diferencia de significación en $p \leq 0,05$ y Duncan prueba estadística post hoc para comparar las medias.

3. Resultados y discusión

3.1 Efecto de los tratamientos sobre la altura del Girasol (*Helianthus annuus*)

Las alturas del girasol sometido a los distintos tratamientos durante los 90 días mostraron una distribución normal (Figura 1) en los suelos de Mantaro que tuvo una concentración de plomo de 208 mg.kg⁻¹. Se hizo una comparación entre tratamientos aplicados en una misma localidad, los resultados de la Prueba de Mann-Whitney en las alturas logradas en Mantaro, indicaron diferencias significativas entre el compost (T1) y su muestra control T3, ($p = 0,031 < 0,05$), pero no así, con el vermicompost (T2). En Muqui, ambos tratamientos (T4 y T5) produjeron diferencias significativas en las alturas con su muestra control T6 ($p < 0,05$). Las alturas máximas registradas al final del periodo evaluado (promedio: 122,17 cm y $\sigma = \pm 29,13$ cm) se lograron aplicando compost en el suelo de Mantaro (T1). La Figura 1a) muestra los resultados en Mantaro, se observa que el tratamiento con compost (T1) logro una mediana de 73,5 cm, (con un

promedio de 76,8 cm; $\sigma = 31,9$ cm), el 75% de valores fueron inferiores a 105,5 cm, mientras que con vermicompost (T2) en la Figura 1a) muestra una mediana (66,5 cm) que no mostro diferencia significativa de la muestra control (57 cm) con un 75% de alturas inferiores a 99 cm, valores muy cercanos al control (75% de T3: < 96 cm).

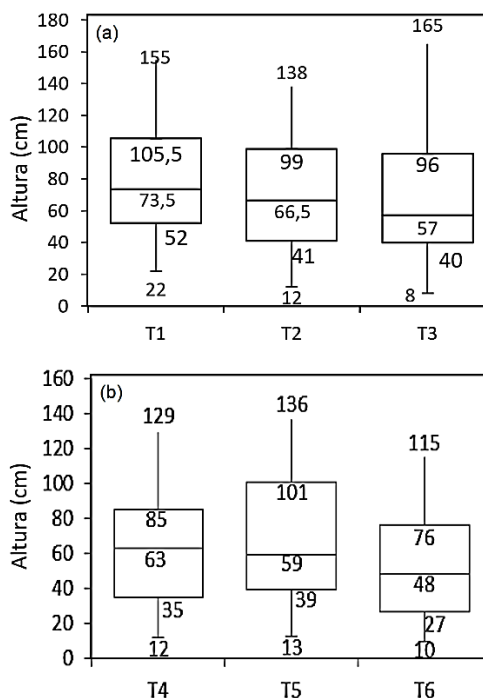


Figura 1. Distribuciones estadísticas sobre las alturas del girasol desarrolladas con los tratamientos en suelos contaminados con Pb y Cd. (a) Mantaro y (b) Muqui.

En suelos de Muqui, la aplicación de compost generó una distribución normalizada de las alturas ($p = 0,20$), lo cual no fue observado con el vermicompost (T2) ni la muestra control ($p < 0,05$). Las alturas de ambos tratamientos presentaron diferencias significativas frente a la muestra control (p -valor T4 vs. T6: 0,041 y p -valor T5 vs. T6: 0,006), lo cual se reflejó en las medianas logradas en las aplicaciones T4 (63 cm) y T5 (59 cm) contra las medianas de T6 (48 cm). El 75% de valores referidos al vermicompost fueron inferiores a 101 cm, y el de compost inferiores a 85 cm.

3.2 Comparaciones entre los tratamientos y su influencia sobre las alturas logradas por el girasol

Un análisis comparativo entre los cuatro tratamientos (T1, T2, T4 y T5) demostró diferencias significativas entre las alturas de girasol de ambas localidades (Mantaro y Muqui) que fueron tratadas con compost (T1 vs. T4 p valor: 0,01) debido a la diferencia extrema de concentraciones entre los

suelos de Mantaro (promedio Pb: 208 mg.kg⁻¹ y Cd: 6,76 mg.kg⁻¹) y Muqui (promedio Pb: 1174,4 mg.kg⁻¹ y Cd: 8,26 mg.kg⁻¹), no hallando mayores diferencias entre otras combinaciones ($p > 0,05$).

La **Figura 2a** muestra para el caso del compost, tres momentos definidos en el crecimiento del girasol, durante el primer mes (etapa I), los brotes presentaron mayores alturas en el suelo menos contaminado (Mantaro), con un promedio de 48 cm, mientras que en Muqui se obtuvo un promedio (31 cm) mostrando un crecimiento más lento. Durante los 23 días posteriores, se observó un cambio con crecimientos promedios muy cercanos entre sí, de 74 cm (Mantaro) y 66 cm (Muqui), sin embargo, en el III periodo, nuevamente son las alturas de Mantaro las que superaron a las de Muqui con promedios finales de 109 cm y 93 cm respectivamente.

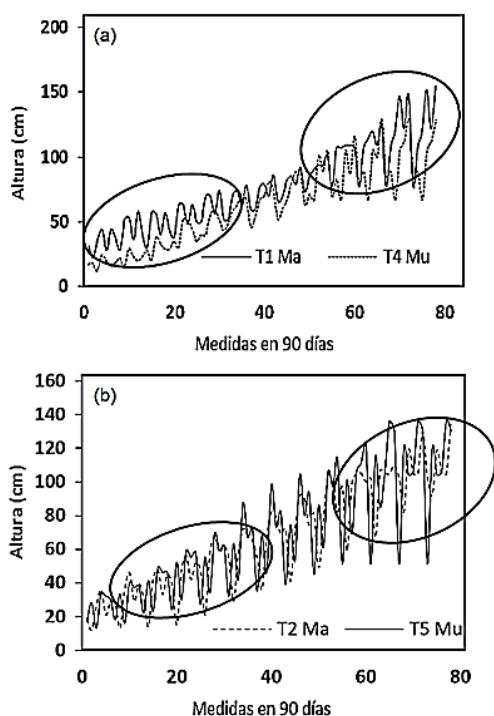


Figura 2. Efecto de las enmiendas sobre las alturas desarrolladas por el girasol en suelos de distintos niveles de contaminación de plomo y cadmio: a) compost y b) vermicompost.

La **Figura 2b**, en cambio, muestra un comportamiento similar para las alturas logradas con vermicompost en suelos con distintos niveles de stress de plomo (asociado a cadmio) ($p > 0,05$), reflejados en las medianas de 66,5 cm (Mantaro) y de 59 cm (Muqui), con un 75% de valores muy próximos entre Mantaro (< 99 cm) y Muqui (< 101 cm). Los registros sobre el desarrollo del girasol describen un periodo de 100 y de 120 días

para alcanzar su máxima altura y biomasa respectivamente, en este experimento el cultivo del girasol duró 90 días, para evaluar la tolerancia del girasol a la acumulación de plomo y cadmio desde suelos enmendados, **Zhao et al. (2019)** también estudiaron el comportamiento del girasol en un tiempo similar para evaluar la respuesta de la planta ante el stress de los niveles de plomo y cadmio presentes en suelos mediante pruebas en macetas.

De acuerdo con los resultados, solo se presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las alturas logradas en los tratamientos con compost señalando el lento crecimiento de la planta afectando las alturas del girasol, debido especialmente a las altas concentraciones del plomo en el suelo (1174,4 mg.kg⁻¹). En cambio, la aplicación de vermicompost no produjo diferencias significativas ($p > 0,05$) ni en las alturas obtenidas ni en los pesos del girasol, esto confirmaría que los contenidos metálicos en los suelos no afectaron el alargamiento de los tallos ni la producción de la biomasa de la planta (**Zhao et al., 2019**).

La aplicación de las enmiendas de Stevia como abonos orgánicos, desarrolló efectos diferentes en su crecimiento especialmente en las raíces, demostrando que las propiedades de biodisponibilidad dependen de las características fisicoquímicas de estos materiales entre otros aspectos.

Por otro lado, **Zhao et al. (2019)**, demostraron que la tasa de crecimiento inicial de los girasoles es alta y alcanza tasas de crecimiento máximas alrededor de 45 a 60 días, cuando la planta está expuesta al cadmio y plomo en el suelo, el cadmio resulta ser más tóxico que el plomo (**Zhao et al., 2019; Zhi-Xin et al., 2007**), sin embargo, esta situación no fue observada en este estudio, ya que su concentración en ambos suelos siempre fue baja (Cd: < 10 mg.kg⁻¹), asimismo el desarrollo de las alturas y el peso del girasol se incrementaron con el aumento de cadmio en sus tejidos. El plomo mantuvo un comportamiento opuesto, ya que, a mayor contenido de plomo en el suelo, se produjo una mayor acumulación en las raíces generando menores pesos y tamaños de tallo. Los resultados de alturas y pesos en las muestras de control resultaron siempre inferiores a los logrados por las enmiendas, indicando los beneficios del contenido de NPK y la materia orgánica, que activaron las funciones metabólicas de la planta favoreciendo su crecimiento (**Malkowski et al., 2005**).

Estos resultados fueron comparables con los promedios máximos de altura logrados por **Zhao et al. (2019)** en la fitorremediación

empleando el girasol durante 90 días de cultivo sometido a concentraciones de 300 mg.kg⁻¹ (altura: 91,13 ± 13,63 cm) y 2000 mg.kg⁻¹ (altura: 74,70 ± 4,53 cm) de plomo en el suelo, esta situación confirma que “las concentraciones de metales pesados en suelos por encima de las concentraciones de toxicidad crítica, no afectarían significativamente tanto la germinación de las semillas como el crecimiento de las plántulas, pero afectan de manera rigurosa tanto el crecimiento posterior como la producción de biomasa” (Zhao et al., 2019), ya que ambos metales mantienen sitios de acción asociados a una retención menos tóxica por lo que la planta logró tolerarlas durante su acumulación (Zhi-Xin et al., 2007).

La aplicación de las enmiendas proporcionó al suelo de Muqui nutrientes que mantuvieron la tolerancia de la planta frente a altos contenidos de plomo, ya que indujo una mayor actividad hormonal y sinérgica con los microorganismos del suelo (Beltrán et al., 2016). Asimismo, (Ahmadreza et al., 2020) concluyen que agregar biosólidos y estiércol de vaca al mismo tiempo mejora la capacidad de la planta ornamental de girasol para acumular metales pesados significativamente.

3.3 Pesos de los tejidos de la planta obtenidos en los distintos tratamientos y localidades

Respecto a los pesos de los tejidos, se produjo un desarrollo decreciente: tallo > flores > hoja > raíz. Las raíces presentaron los menores valores (7 a 16 g), seguido de las hojas (13 a 30 g), mientras que, entre los pesos de las flores y tallos, se desarrolló una distribución opuesta de tal manera que en Mantaro predominaron mayores pesos de flores (46 a 68 g) y en Muqui mayores pesos de tallos (28 a 34 g).

El análisis estadístico reportó una distribución normal en los pesos finales registrados en la semana 13 en los distintos tejidos de la planta (p -valor > 0,05) tales como: hojas, tallos, flores y raíces. Los mayores pesos correspondieron a los tallos, seguido de las flores y hojas, mientras que las raíces presentaron los menores pesos con relación a los demás. Una prueba de homogeneidad de varianzas evidenció diferencias de pesos entre los tejidos a excepción de tallos y flores que siguieron un patrón similar.

La Figura 3a muestra los promedios y desviaciones estándar entre los distintos tejidos del girasol con y sin enmiendas en ambas localidades, mientras que en la Figura 3b se ha graficado los pesos desarrollados en la parte aérea vs. las raíces, los números que aparecen en el eje “x” corresponden a

los tratamientos T1, T2, control Mantaro (T3), T4, T5 y control Muqui (T6), respectivamente.

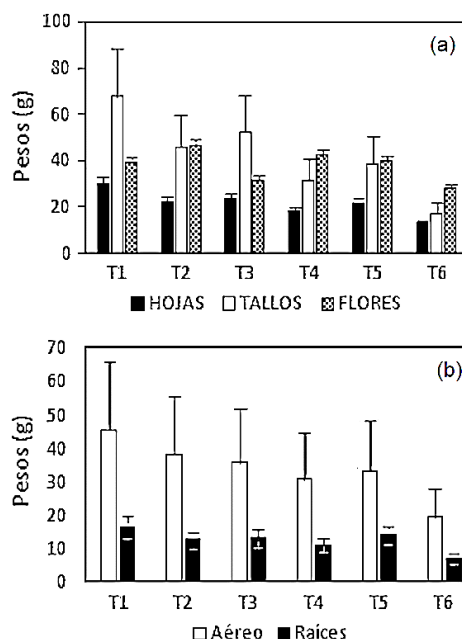


Figura 3. (a) Tendencia de pesos de tejidos de la planta y (b) diferencias estadísticas entre los pesos aéreos y de raíces.

Como en el caso de las alturas finales, en Mantaro se registraron los mayores valores (120 a 150 g) a diferencia de Muqui (100 a 120 g), de manera general el rango de pesos en hojas fue menor de 40 g, en la raíz fue menor de 20 g. Según la Figura 3a, se observa que los tratamientos con vermicompost (T2 y T5) generaron pesos de tallos y flores muy cercanos para una misma localidad, destacando Mantaro con mayores valores (~70 g) frente a Muqui (~40 g). La Figura 3b muestra los promedios de pesos y desviaciones registradas en los tejidos aéreos y las raíces, en este caso.

3.4 Concentración de plomo y cadmio en los tejidos del girasol

En el caso del plomo (Figuras 4a y 4b), este metal fijó mayores contenidos en las raíces especialmente en aquellas correspondientes a los suelos más contaminados de Muqui (T4, T5 y T6) presentándose un promedio máximo de 134,75 mg.kg⁻¹ (Figura 4a). La investigación de la adsorción de Pb, Ni y Zn en la raíz del grupo de control mostró que la cantidad de absorción en esta parte es mayor que el brote (Ahmadreza et al., 2020). En el caso de hojas, tallos y flores (Figura 4b) se observó que las hojas bioconcentraron más plomo (prom. max.: 28,38 mg.kg⁻¹) y en menor grado lo hicieron los tallos y flores con valores muy cercanos entre sí (prom. max.: 9,16 mg.kg⁻¹).

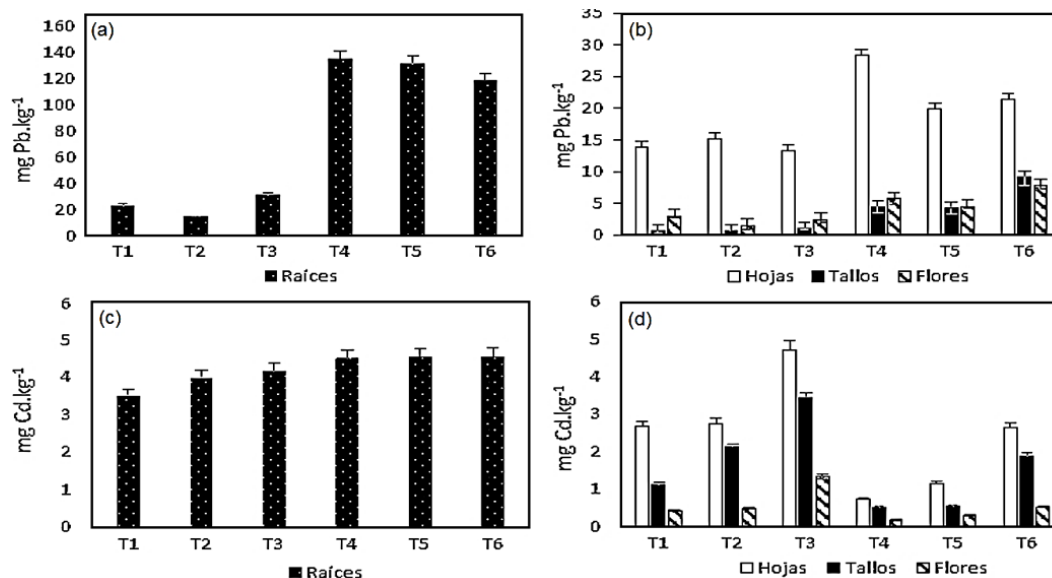


Figura 4. Promedios y desviaciones estándar de las concentraciones de (a) plomo en las raíces, (b) plomo en los tejidos aéreos, (c) cadmio en raíces y (d) cadmio en los tejidos aéreos.

Respecto al cadmio (Figuras 4c y 4d), es importante destacar que el contenido de cadmio en los suelos de Mantaro y Muqui fueron cercanos (6,76–8,26 mg.kg⁻¹ respectivamente), la absorción fue casi lo mismo en las raíces en ambas localidades (3,5 a 4,5 mg.kg⁻¹), sin embargo, en el caso del contenido en los tejidos aéreos fue mayor en Mantaro (T1, T2 y T3) donde los suelos presentaron menores concentraciones de cadmio y de plomo; esto permitió al Cd tener una mayor movilidad a través de la planta. Según Zhao et al. (2019) hasta los primeros 45 días hay una acumulación progresiva de metales, estos cambios, se han observado de una manera especial para el caso del compost, porque las alturas presentaron etapas de inflexión en su crecimiento afectadas por altas concentraciones de plomo. Es importante destacar el orden de bioacumulación de plomo en los tejidos: raíz > hojas > tallos > flores, resalto la capacidad de retención de la raíz y demostró que las hojas absorbieron en segundo lugar mayores concentraciones de este metal quedando relegadas el tallo y las flores, que no acumularon más de 8 mg.kg⁻¹. La bioacumulación es diferente en cada situación, los análisis estadísticos sobre el contenido de plomo en los tejidos del girasol mostraron diferencias significativas entre estos órganos ($p < 0,05$) a excepción de los tallos y flores ($p = 0,37886$) que fijarían este metal de manera similar, asimismo, sucedió para el cadmio entre las hojas y tallos ($p=0,23014$) y entre las hojas y las raíces ($p = 0,06576$), además ambos metales mostraron semejanzas estadísticas en su fijación sobre los tallos ($p = 0,379$).

Aunque Malkowski et al. (2005) señalaron que los altos contenidos de plomo en las raíces se deben a la formación de enlaces plomo-fosfato, que incrementan la masa de los tejidos, o a la retención de plomo incrustado en la estructura lignina-celulosa (Marmioli et al., 2005), ya que la raíz de la planta secreta enzimas, aminoácidos y azúcares, que estimulan el crecimiento de microorganismos (January et al., 2008) y propician una red ramificada muy pronunciada y ramificada (Gomes et al., 2016); sin embargo, los resultados de este estudio señalaron menores pesos cuanto más cantidad de plomo acumulo el girasol, de manera similar a lo reportado por Lu y He (2005). Por otro lado, Navarro et al. (2007) sostuvieron que la absorción de cadmio se debe a la transpiración de mucilagos que engrosan la capa externa de la raíz ya la formación de complejos metálicos, lo cual pareció ocurrir en este experimento facilitado por las cantidades discretas presentes de este contaminante en el suelo.

3.6 Factores de bioacumulación y translocación

El factor de bioconcentración (FBC) definido previamente como la relación entre las concentraciones del contaminante en la parte aérea de la planta dividida por la concentración del contaminante en el suelo se calculó a partir de las mediciones realizadas en el experimento. Los factores fueron más bajos que la unidad con valores de FBC más bajos para el plomo (0,01 a 0,08) (Figura 5a), aunque en los suelos más contaminados se observó un mayor deterioro de la planta (Figura 5b), mientras que en el caso del

cadmio, los valores oscilaron entre 0,15 y 1,20, siempre que los cultivos correspondieran a menores contenidos de plomo (ya que el contenido de cadmio en estos suelos no excede los 10 mg.kg⁻¹). La muestra de control en Mantaro (T3) mostró un factor alto que se explicaría en una mayor biodisponibilidad de cadmio frente a la solución de fertilizante que deteriora gravemente la planta.

Respecto al factor de translocación (FT) que es la relación entre las concentraciones del contaminante en la parte aérea de la planta dividida por el contenido en las raíces (Figuras 5a y 5c), muestran una cierta habilidad de extraer concentraciones de plomo en el suelo de 208,24 mg.kg⁻¹, y de cadmio 6,76 mg.kg⁻¹, cuando este es enmendado a base de *Stevia rebaudiana*, mientras que para elevadas concentraciones de plomo en el suelo 1174 mg.kg⁻¹ asociado a cantidades de cadmio 8,26 mg.kg⁻¹, la planta desarrolló un comportamiento excluyente o estabilizador generado por las raíces. El factor de bioconcentración (FBC) y factor de translocación (FT) son 2 indicadores críticos para evaluar la capacidad de una planta para acumular metales (Ahmadreza et al., 2020).

Debido a la diferencia de concentraciones de plomo y cadmio presentes en el suelo, los

FBC fueron diferentes entre sí, aunque siempre menores a la unidad (Max. Cd: 1,20 en Muqui), el comportamiento del girasol se expresó como fitoestabilizador de metales, con valores menores a los hallados por Zhao et al. (2019) tanto para el plomo como para el cadmio (0,878 Pb y 1,574 Cd), manteniéndose un orden potencial de acumulación decreciente Pb > Cd en ambas investigaciones.

Para ambas enmiendas aplicadas, la raíz fue el órgano que más absorbió los contaminantes, especialmente en Muqui, pero a diferencia del plomo, el cadmio tuvo más afinidad con los fertilizantes disueltos y en menor proporción con las enmiendas, debido a un incremento de su disponibilidad iónica en el fertilizante disuelto y a su incorporación por la planta (Rostami y Azhdarpoor, 2019).

De otro lado, se observó que en el suelo de Mantaro con el uso de enmiendas los factores de translocación calculados para ambos metales fueron similares (> 1) a excepción de T1 (FT: 0,75), sin embargo, aún son valores próximos a la unidad; en el caso de Muqui tenemos que todos los valores son < 1 a excepción de T6 (FT: 1,12), lo cual señaló la capacidad del girasol de actuar como un fitoestabilizador (Ali et al., 2013).

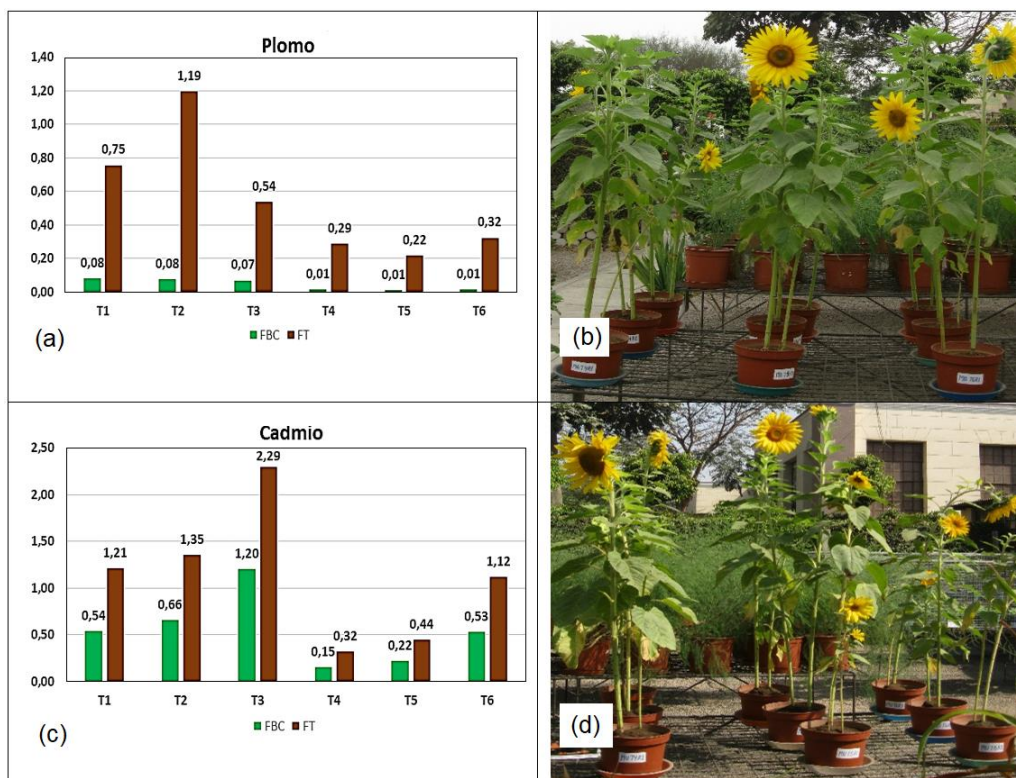


Figura 5. Tolerancia ejercida por el girasol y distribución de los factores de bioconcentración (FBC) y translocación (FT) a) Plomo b) Girasol cultivado en suelo de Mantaro, c) Cadmio y d) Girasol cultivado en suelo de Muqui. (Fotografía: Rubén Munive).

4. Conclusiones

La producción de la biomasa del girasol fue afectada significativamente por los metales pesados, las enmiendas orgánicas (compost y vermicompost de Stevia) lograron mayor desarrollo del girasol, en ambas localidades las raíces presentan los mayores valores de extracción de plomo y cadmio, el girasol extrae mayor cantidad de plomo y cadmio cuando el suelo presenta mayor contenido en el suelo; los factores de bioconcentración (FBC) señalaron un comportamiento estabilizador o excluyente del girasol para ambos metales, respecto a los factores de translocación (FT), los valores ligeramente mayores a la unidad, indicó la habilidad de fitoextraer en un suelo con bajo contenido de metales pesados. Es importante tener en cuenta que suelos agrícolas contaminados con altos contenidos de metales pesados constituyen un peligro para los cultivos agrícolas ya que existen evidencias de translocación hacia las partes comestibles. Se recomienda la aplicación de enmiendas orgánicas por la tolerancia de las plantas con un enfoque potencial en la fitorremediación de Pb y Cd.

ORCID

R. Munive  <https://orcid.org/0000-0001-8951-2499>
 G. Gamarra  <https://orcid.org/0000-0002-8986-1661>
 Y. Munive  <https://orcid.org/0000-0002-9535-8165>
 F. Puertas  <https://orcid.org/0000-0001-8119-2638>
 L. Valdiviezo  <https://orcid.org/0000-0002-8200-4640>
 R. Cabello  <https://orcid.org/0000-0002-9965-9678>

Referencias bibliográficas

- Agnello, A.C.; Potysz, A.; Fourdrin, C.; et al. 2018. Impact pyrometallurgical slags on sunflower growth, metal accumulation and rhizosphere microbial communities. *Chemosphere* 208: 626-639.
- Ahmadreza, Y.; Seyed, A.; Seyed, V.; et al. 2020. Heavy Metals Uptake of Salty Soils by Ornamental Sunflower, Using Cow Manure and Biosolids: A Case Study in Alborz city, Iran. *Air, Soil and Water Research* 13: 1-13.
- Alaboudi, K.A.; Ahmed, B.; Brodie, G. 2018. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences* 63(1): 123-127.
- Alberio, C.N.G.; Izquierdo, L.A.N.; Aguirrezábal. 2015. Sunflower Crop Physiology and Agronomy. In *Chemistry, Production, Processing, and Utilization*, 53-91.
- Ali, H.; Khan, E.; Sajad, M.A. 2013. Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere* 91: 869-881.
- Beltrán, F.A.; García, J.L.; Ruiz, F.H.; et al. 2016. Efectos de sustratos orgánicos en el crecimiento de seis variedades de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 3(7): 143-149.
- Burges, A.; Fievet, V.; Oustriere, N.; et al. 2020. Long-term phytomanagement with compost and a sunflower – Tobacco rotation influences the structural microbial diversity of a Cu-contaminated soil. *Science of the total Environment* 700: 15.
- Cameselle, C.; Gouveia, S. 2019. Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current. *Journal of Hazardous Materials* 361: 95-102.
- Chabukdhara, M.; Nema, A.K. 2012. Heavy metals assessment in urban soil around industrial clusters in Ghaziabad, India: probabilistic health risk approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 87: 57-64.
- Delgadillo, A.E.; González, C.A.; Prieto, F.; et al. 2011. Revisión. Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Tropical and subtropical agroecosystems* 14-2: 597-612.
- Delgado, A.V.; González, F.; Hunter, R.J.; et al. 2006. Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena. *Journal of Colloid and Interface Science* 309: 194-224.
- Deng, H.; Ye, Z.H.; Wong, M.H. 2004. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal contaminated sites in China. *Environmental Pollution* 132: 29-40.
- Gao, Y.; Zhu, L. 2004. Plant uptake, accumulation and translocation of phenanthrene and pyrene in soils. *Chemosphere* 55: 1169-1178.
- Gomes, M.A.; Hauser, R.A.; De Souza, A.N.; et al. 2016. Metal phytoremediation: General strategies, genetically modified plants and applications in metal nanoparticle contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 134: 133-147.
- Gómez, L.; Contreras, A.; Bolonio, D.; et al. 2018. Phytoremediation with threes. *Advances in Botanical Research* 89: 281-321.
- Goudriaan, J.; Van Laar, H. 2012. *Modelling potential crop growth processes: textbook with exercises*. Springer Science & Business Media 411 pp.
- Govarthana, M.; Mythilib, R.; Selvakumar, T.; et al. 2018. Myco-phytoremediation of arsenic- and lead-contaminated soils by *Helianthus annuus* and wood rot fungi, *Trichoderma* sp. isolated from decayed Wood. *Ecotoxicology Environmental Safety* 151: 279-284.
- January, M.C.; Cutright, T.J.; Van Keulen, H.; et al. 2008. Hydroponic phytoremediation of Cd, Cr, Ni, As, and Fe: can *Helianthus annuus* hyperaccumulate multiple heavy metals. *Chemosphere* 70: 531-537.
- Li, X.; Wang, X.; Chen, Y.; et al. 2019. Optimization of combined phytoremediation for heavy metal contaminated mine tailings by a field-scale orthogonal experiment. *Ecotoxicol* 168: 1-8.
- Lu, X.Y.; He, C.Q. 2005. Tolerance, uptake and accumulation of cadmium by *Ricinus communis* L. *Journal of Agro-Environment Science* 24(4): 674-677.
- Malkowski, E.; Kurtyka, R.; Kita, A.; et al. 2005. Accumulation of Pb and Cd and its effect on Ca distribution in Maize seedlings. *Polish Journal of Environmental Studies* 14(2): 203-207.
- Marmiroli, M.; Antonioli, G.; Maestri, E.; et al. 2005. Evidence of the involvement of plant ligno-cellulosic structure in the sequestration of Pb: an X-rayspectroscopy-based analysis. *Environmental Pollution* 134: 217-227.
- Mudd, G.M. 2010. The environmental sustainability of mining in Australia: key mega-trends and looming constraints. *Resource Policy* 35(2): 98-115.
- Munive, R.; Loli, O.; Azabache, A.; et al. 2018. Fitorremediación con Maíz (*Zea mays* L.) y compost de *Stevia* en suelos degradados por contaminación con metales pesados. *Scientia Agropecuaria* 9(4): 551-560.
- Navarro, J.P.; Aguilar, A.I.; López, J.R. 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. *Asociación Española de Ecología Terrestre. Ecosistemas revista científica de ecología y medio ambiente* 16(2): 10-25.
- Naveedullah, M.Z.; Yu, Ch.; Shen, H.; et al. 2013. Risk Assessment of Heavy Metals Pollution in Agricultural Soils of Siling Reservoir Watershed in Zhejiang Province, China. *BioMed Research International*. 10 pp.
- Nigam, R.; Srivastava, S.; Prakash, S.; et al. 2001. Cadmium mobilization and plant availability - the impact of organic acids commonly exuded from roots. *Plant Soil*. 230: 107-113.
- Niu, Z.X.; Sun, L.N. 2017. Evaluation of the cadmium and lead phytoextraction by castor bean (*Ricinus communis* L.) in hydroponics. *Earth and Environmental Science* 69: 1-6.
- Prasetya, H.; Sakakibara, M.; Takehara, A.; et al. 2017. Heavy metals accumulation by *Athyrium yokoscense* in a mine area, Southwestern Japan. In *Conf. Series: Earth and Environmental Science* 71: 012025.

- Rog-Young, K.; Jeong-Ki, Y.; Tae-Seung, K.; et al. 2015. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation-a critical review. *Environ Geochem Health* 37(6): 1041-1061.
- Rostami, S.; Azhdarpoor, A. 2019. The application of plant growth regulators to improve phytoremediation of contaminated soils: A review. *Chemosphere* 220: 818-827.
- Rubenacker, A.; Campitelli, P.; Sereno, R.; et al. 2011. Recuperación Química de un suelo degradado mediante la utilización de un vermicompost. *Avances en Ciencias e Ingeniería* 2(2): 83-95.
- Saavedra, M. 2017. Biodegradación de Alperujo utilizando hongos del género *Pleurotus* y anélidos de la especie *Eisenia foetida*. Tesis de doctorado, Universidad de Granada. Departamento de Biotecnología, Granada, España. 195 pp.
- Shahid, M.; Arshad, M.; Kaemmerer, M.; et al. 2012. Long-Term Field Metal Extraction by *Pelargonium*: Phytoextraction Efficiency in Relation to Plant Maturity. *International Journal of Phytoremediation* 14: 493-505.
- Tapia, Y.; Loch, B.; Castillo, B. 2020. Accumulation of Sulphur in *Atriplex nummularia* Cultivated in Mine Tailings and Effect of Organic Amendments Addition. *Water Air Soil Pollut* 231: 8.
- Upadhyay, N.; Verma, S.; Singh, P.; et al. 2016. Soil ecophysiological and microbiological indices of soil health: a study of coal mining site in Sonbhadra, Uttar Pradesh. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16(3): 778-800.
- Yang, W.; Wang, S.; Ni, W. 2019. Enhanced Cd-Zn-Pb-contaminated soil phytoextraction by *Sedum alfredii* and the rhizosphere bacterial community structure and function by applying organic amendments. *Plant Soil* 444: 101-118.
- Yoon, J.; Cao, X.; Zhou, Q.; et al. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment* 368: 456-464.
- Zhang, Y.; Tian, Y.; Hua, D.; et al. 2019. Is vermicompost the possible in situ sorbent, Immobilization of Pb, Cd and Cr in sediment with sludge derived vermicompost, a column study. *Journal of Hazardous Materials* 367: 83-90.
- Zhao, X.; Joo, J.C.; Lee, J.K.; et al. 2019. Mathematical estimation of heavy metal accumulations in *Helianthus annuus* L. with a sigmoid heavy metal uptake model. *Chemosphere* 220: 965-973.
- Zhi-Xin, N.; Li-Na, S.; Tie-Heng, S.; et al. 2007. Evaluation of phytoextracting cadmium and lead by sunflower, ricinus, alfalfa and mustard in hydroponic culture. *Journal of Environmental Sciences* 19(8): 961-967.