

Fitorremediación de suelo contaminado con arsénico, cobre y plomo empleando *Echeveria elegans* y *Crassula ovata*

Guzmán Guerrero Alexis^{1*}, Bautista García José Alfredo¹, Vaca Mier Mabel¹, Rojas Valencia María Neftalí²

¹Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de energía. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200. México.

²Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. Circuito Escolar, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510. México.

*Autor para correspondencia: aleguzgue@gmail.com

Recibido:

15/marzo/2020

Aceptado:

11/diciembre/2020

Palabras clave:

Fitoextracción,
factor de bioconcentración,
factor de translocación

Keywords:

Phytoextraction,
bioconcentration factor,
translocation factor

RESUMEN

Se realizó la evaluación del proceso de fitorremediación (fitoextracción) en un suelo contaminado con As, Cu y Pb, proveniente de una industria del sector metal mecánico, mediante el uso de 2 especies vegetales: *Echeveria* (*Echeveria elegans*) y Árbol de jade (*Crassula ovata*). El objeto de estudio fue determinar los factores de bioconcentración (FBC) de As, Cu y Pb y los factores de translocación (FT) de las especies vegetales. Las concentraciones de metales iniciales fueron: 2471.40 mg/kg de As, 3847.15 mg/kg de Cu, y 20,690.14 mg/kg de Pb, las cuales sobrepasan los límites máximos permisibles de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. La concentración de metales después de 3 meses para *Echeveria* fue: 1655.06 mg/kg de As, 2029.50 mg/kg de Cu, 10,410.27 mg/kg de Pb. Asimismo, para Árbol de jade fue: 2120.84 mg/kg de As, 2958.59 mg/kg de Cu, 10,811.71 mg/kg de Pb. Los FBC y FT determinados para cada especie vegetal fueron menor a 1, por lo que se consideran tolerantes.

ABSTRACT

We assessed the phytoremediation process (phytoextraction) in a soil contaminated with As, Cu and Pb, which is from an industry of the mechanical metal sector, through 2 plant species: *Echeveria* (*Echeveria elegans*) and Jade plant (*Crassula ovata*). We aimed to determine Bioconcentration Factors (BCF) of As, Cu and Pb and the Translocation Factors (TF) of these species. The initial metal concentrations were: 2471.40 mg/kg As, 3847.15 mg/kg Cu, and 20,690.14 mg/kg Pb, which exceed the maximum permissible limits of Mexican normativity NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. After 3 months, we found metal concentration in *Echeveria*, which were: 1655.06 mg/kg As, 2029.50 mg/kg Cu, 10,410.27 mg/kg Pb. Also, we found metal in the Jade plant, which were: 2120.84 mg/kg As, 2958.59 mg/kg Cu, 10,811.71 mg/kg Pb. The BCF and FT determined for each plant specie were less than 1, so they are considered tolerant.

Introducción

La contaminación del suelo por metales pesados y metaloides es un problema debido al manejo inadecuado de residuos generados por la industria y a su persistencia en el suelo por años, ya que no son biodegradables, pero pueden mantenerse de un estado de oxidación a otro (Garbisu y Alkorta, 2003; Shah y Daverey, 2020), movilizándose en el ambiente, provocando efectos toxicológicos para plantas y animales, así como problemas de salud en poblaciones aledañas a áreas contaminadas (Donati et al., 2018). Los metales pesados y metaloides como Pb, Hg, Cr, As, Se y Sb son altamente tóxicos para los humanos incluso en pequeñas cantidades y algunos son considerados como sustancias muy peligrosas (Ullah et al., 2015).

En México un suelo está contaminado si la concentración de As y Pb es mayor a 260 mg/kg y 800 mg/kg respectivamente, conforme a la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007). En el caso del Cu no está regulado.

La fitorremediación es una técnica de biorremediación que utiliza una gran variedad de especies de plantas (pastos, arbustos y árboles) en asociación con microorganismos para remediar el ambiente (suelo, agua y aire) a través de la degradación, acumulación y estabilización de contaminantes (metales pesados, contaminantes orgánicos, etc.), logrando ser una alternativa rentable y amigable con el ambiente (Ali et al., 2013; Gomes, 2012; Pilon-Smits, 2005; Rajkumar et al., 2012). Las especies *Echeveria elegans*, y *Crassula ovata* pertenecen a la familia Crassulaceae, poseedora de un Metabolismo Ácido de las Crasuláceas (MAC), correlacionado con diversas características morfológicas que minimizan la pérdida de agua, como vacuolas con gran capacidad de almacenamiento de agua (suculencia) (Cushman, 2001), en las cuales pueden acumular contaminantes (Pilon-Smits, 2005).

El objetivo del presente estudio fue evaluar el proceso de fitoextracción de As, Cu, y Pb de las especies *Echeveria elegans*, y *Crassula ovata*. Se evaluaron las especies mediante el factor de bioconcentración (FBC), que indica la eficiencia de una especie vegetal para acumular un metal o metaloide en sus tejidos provenientes del suelo, y el factor de translocación (FT), indica la eficiencia de la planta para transportar un metal o metaloide acumulado en la raíz a la parte aérea (Ali et al., 2013).

Metodología

Muestra de suelo y fitorremediación

El suelo se obtuvo de una industria metal mecánica, el cual estaba contaminado con metales pesados y

metaloides (As, Cu y Pb). Se consiguieron plántulas de las especies vegetales (Tabla 1). Se aclimataron durante cuatro semanas en un invernadero. Las plántulas de ambas especies se trasplantaron a macetas con 500 g de suelo cada una. Se regaron una vez a la semana de acuerdo con la capacidad de campo del suelo. Se realizaron muestreos destructivos (por triplicado) cada 30 días, durante 90 días.

Tabla 1. Especies vegetales.

Espece	Familia, Género	Imagen
<i>Echeveria elegans</i>	Crassulaceae, <i>Echeveria</i>	
<i>Crassula ovata</i>	Crassulaceae, <i>Crassula</i>	

Análisis de Suelo y Plantas

Se realizó la caracterización física y química del suelo conforme a la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Así mismo, se obtuvo la concentración inicial de los metales en el suelo de acuerdo con lo descrito posteriormente. Para la determinación de metales y metaloides, se secó el suelo a temperatura ambiente, mientras que las especies (raíz y parte aérea) se colocaron en una estufa a 50°C durante 3 días. Posteriormente se trituraron las especies y se tomó una muestra representativa de suelo, raíz y parte aérea para llevar a cabo su digestión ácida por microondas utilizando los métodos descritos en EPA 3051^a (U.S. EPA, 2007; NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004; SEMARNAT, 2007). Finalmente, para determinar Cu y Pb se procedió a analizar las digestiones obtenidas (suelo, raíz y parte aérea de las especies) por el método por espectrometría de absorción atómica por flama (aspiración directa), mientras que el método analítico por generación de hidruros se utilizó para determinar As.

Factores de bioconcentración y translocación

Los factores de bioconcentración y translocación se obtuvieron mediante las siguientes operaciones (Ali et al., 2013):

$$FBC = \frac{\text{Concentración en planta}}{\text{Concentración en suelo}}$$

$$FT = \frac{\text{Concentración en parte aérea}}{\text{Concentración en raíz}}$$

Análisis estadístico

Las concentraciones de As, Cu y Pb en las especies vegetales se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y cuando fue necesario se compararon ambas plantas mediante el método de diferencia mínima significativa (LSD).

Resultados y discusión

Características del suelo

Las características del suelo se pueden apreciar en la Tabla 2, el pH 7.46 es neutro en el cual las especies vegetales pueden desarrollarse y ser modificado por la presencia de exudados de la raíz (ácidos orgánicos) y materia orgánica (Gonzaga et al., 2009; Zeng et al., 2011). La biodisponibilidad y fitodisponibilidad de metales pesados y metaloides en el suelo, dependen de factores como la fisiología de la planta, características del suelo y la interacción planta/microorganismo (Yadav et al., 2018). La concentración de Pb (20,690 mg/kg) era ocho veces mayor a la concentración del As (2,471 mg/kg), y cinco veces mayor a la concentración de Cu (3,847 mg/kg). Las concentraciones de As y Pb, sobrepasaban el límite máximo permisible establecido en la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (SEMARNAT, 2007). El Cu no está incluido en la normatividad mexicana.

Tabla 2. Caracterización y concentración inicial del suelo.

Parámetro	Resultado
pH	7.46 ± 0.02
Densidad aparente (g/ml)	1.51 ± 0.02
Densidad real (g/ml)	2.44 ± 0.07
Porosidad (%)	38.38 ± 0.87
Humedad (%)	28.36 ± 0.81
Humedad a capacidad de campo (%)	39.68 ± 5.35
Textura	Franco arcilloso arenoso
Carbono (%)	2.3 ± 0.31
Materia orgánica (%)	3.9 ± 0.53
Nitrógeno total (%)	0.19 ± 0.10
Nitrógeno inorgánico (%)	0.0039 ± 0.0005
Fósforo aprovechable (%)	0.014 ± 0.001
Cuenta microbiológica (UFC/g)	3x10 ⁴ ± 5x10 ³
Concentración de As (mg/kg)	2,471 ± 132
Concentración de Cu (mg/kg)	3,847 ± 266
Concentración de Pb (mg/kg)	20,690 ± 538

Concentración de As, Cu y Pb en el suelo y las especies vegetales

Durante el proceso de fitorremediación del suelo, se apreció una disminución de concentración de los metales a lo largo del tiempo (Figura 1). Se logró una concentración de 1,655 mg/kg de As, 2,029 mg/kg de Cu y 10,410 mg/kg de Pb con la *Echeveria elegans*. Asimismo, 2,120 mg/kg de As, 2,958 mg/kg de Cu y 10,811 mg/kg de Pb con la *Crassula ovata*. A pesar de la gran concentración de metales pesados y metaloides en el suelo, su absorción está influida por la fracción biodisponible (Vamerli et al., 2010). Los metales pesados y metaloides pueden causar toxicidad severa en plantas por inhibición de enzimas, alterando el mecanismo de defensa como resultado de la producción de especies reactivas del oxígeno (ROS proveniente del inglés *Reactive Oxygen Species*), causantes de estrés oxidativo (Babula et al., 2009; Chaffai y Koyama, 2011; Van Assche y Clijsters, 1990). Según Hu et al, (2012) para afrontar la toxicidad, se incrementa la actividad de enzimas antioxidantes (Peroxidasa y Superóxido dismutasa) de las plantas.

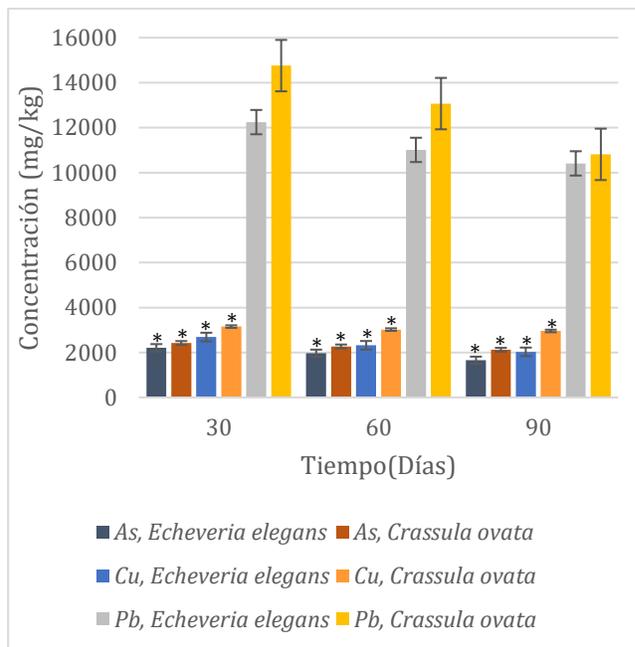


Figura 1. Concentración de As, Cu y Pb en el suelo durante el proceso de fitorremediación. El asterisco representa una diferencia (LSD).

En la Figura 2 se muestra la concentración de As, Cu y Pb en las raíces, donde *Echeveria elegans* absorbió 537 mg/kg de As, 416 mg/kg de Cu y 492 mg/kg de Pb, mientras que *Crassula ovata* absorbió 1,065 mg/kg de As, 630 mg/kg de Cu y 597 mg/kg de Pb en 90 días. El contenido de As, Cu y Pb en las especies vegetales se concentró en las raíces, no hubo gran translocación hacia

la parte aérea. Anteriormente se ha observado esta misma tendencia en las especies *Aloe vera L.* para el As, *Sedum plumbizincicola* para el Cu, y *Ricinus communis L.* para el Pb (Bian et al., 2018; Elhag et al., 2018; Romeiro et al., 2006).

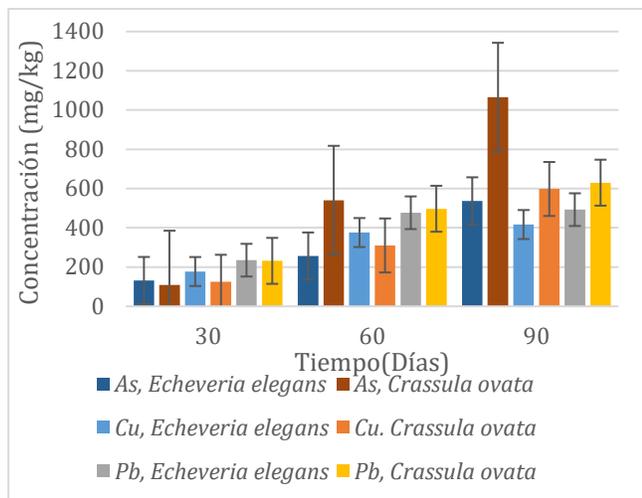


Figura 2. Concentración de metales en la raíz de las especies vegetales.

Durante los primeros 30 días las especies vegetales no transportaron Pb hacia la parte aérea (Figura 3). Posteriormente se observaron las concentraciones de 140 mg/kg de As, 104 mg/kg de Cu y 148 mg/kg de Pb en *Echeveria elegans*, y respecto a *Crassula ovata* 101 mg/kg de As, 90 mg/kg de Cu y 179 mg/kg de Pb a los 90 días de contacto. De acuerdo a Koeppe et al. (1977) la translocación depende de la fisiología de la especie. En las especies la baja capacidad de translocar As, Cu y Pb es un mecanismo de defensa para minimizar la fitotoxicidad (Schmoger et al., 2000).

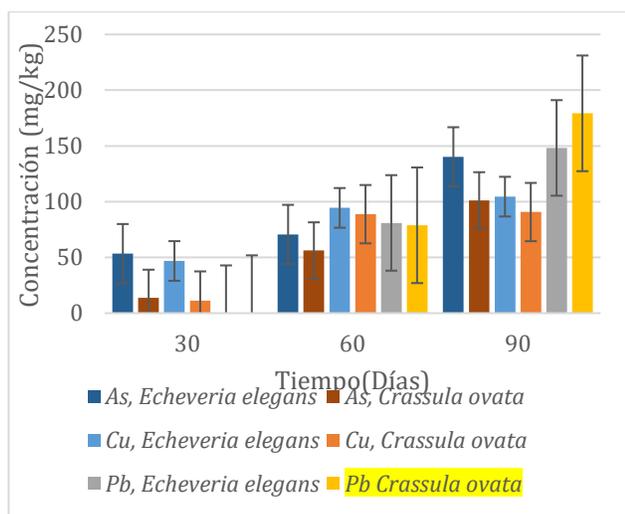


Figura 3. Concentración de metales en la parte aérea de las especies vegetales.

Biomasa generada por las especies vegetales

La generación de biomasa (Figura 4) por *Echeveria elegans* fue de 1.61 g mientras que *Crassula ovata* generó 1.45 g al término del tiempo de exposición. Los valores indican una inhibición de crecimiento al compararlos con su respectivo blanco (especie en suelo sin contaminantes al inicio de la experimentación). Bajo estrés oxidativo es probable que se inhiba el crecimiento y se obtenga un bajo rendimiento de biomasa de la planta (Rehman et al., 2017).

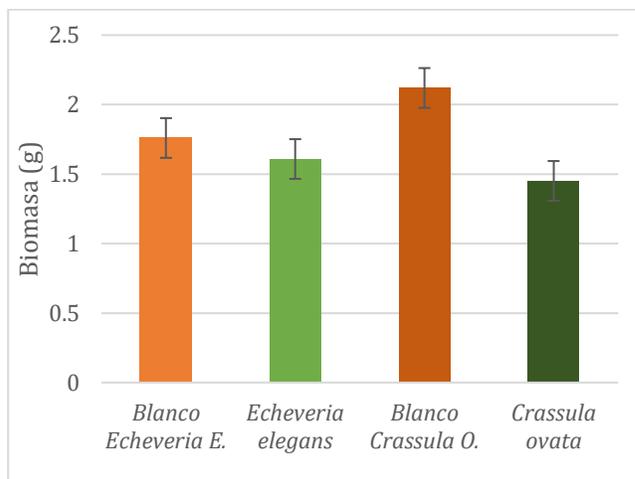


Figura 4. Biomasa generada por las especies vegetales.

Factores de bioconcentración y translocación

Los valores de FBC y FT calculados son menores que 1 (Tabla 3). *Crassula ovata* muestra el más alto FBC para el As de 0.47, mientras que *Echeveria elegans* de 0.27. También es importante mencionar que cuando la concentración de metales pesados y metaloides en el suelo es alta se puede obtener un FBC <1 (Ali et al., 2013). Por otro lado, los valores de FT más altos fueron para el Pb, en la *Echeveria elegans* se obtuvo de 0.30 y 0.28 para *Crassula ovata*. Las plantas con FBC y FT >1 tienen potencial para la fitoextracción, en contraste con las especies con FT <1 y FBC >1 tienen potencial para ser fitoestabilizadoras (Mendez y Maier, 2008; Yoon et al., 2006).

Tabla 3. Factor de bioconcentración y Factor de translocación.

Especie vegetal	Metal / Metaloides	FBC	FT
<i>Echeveria elegans</i>	As	0.27 ± 0.11	0.26 ± 0.41
	Cu	0.14 ± 0.06	0.25 ± 0.17
	Pb	0.03 ± 0.01	0.30 ± 0.12
<i>Crassula ovata</i>	As	0.47 ± 0.30	0.09 ± 0.19
	Cu	0.18 ± 0.15	0.15 ± 0.10
	Pb	0.04 ± 0.01	0.28 ± 0.15

La importancia de estas especies suculentas es que son tolerantes a la sequía y a varios metales pesados y metaloides (Zhang et al., 2015), a pesar de los factores de bioconcentración y de translocación arrojados en este estudio.

Conclusiones

Este estudio expone que las dos especies vegetales *Echeveria elegans* y *Crassula ovata* son tolerantes a altas concentraciones de As, Cu y Pb, debido a la reducción de la concentración de metales pesados y metaloides en el suelo. Los resultados observados del FBC indican que *Crassula ovata* es más eficiente para extraer As, Cu y Pb del suelo que *Echeveria elegans*. Estas especies pueden ser útiles para la fitoestabilización de As, Cu y Pb. Además, son especies suculentas capaces de resistir en suelos con altos niveles de salinidad y poca agua disponible.

Agradecimientos

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de este proyecto.

Referencias

- Ali H., Khan E., Sajad M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869-881.
- Babula P., Adam V., Opatrilova R., Zehnalek J., Havel L., Rene K. (2009). Uncommon Heavy Metals, Metalloids and Their Plant Toxicity: A Review. In *Organic Farming, Pest Control and Remediation of Soil Pollutants*, 276-299.
- Bian F., Zhong Z., Wu S., Zhang X., Yang C., Xiong X. (2018). Comparison of heavy metal phytoremediation in monoculture and intercropping systems of *Phyllostachys praecox* and *Sedum plumbizincicola* in polluted soil. *International Journal of Phytoremediation*, 20(5), 490-498.
- Chaffai R., Koyama H. (2011). Heavy metal tolerance in *Arabidopsis thaliana*. In *Advances in Botanical Research (1st ed., Vol. 60)*. Elsevier Ltd.
- Cushman J.C. (2001). Crassulacean Acid Metabolism. A Plastic Photosynthetic Adaptation to Arid Environments. *Plant Physiology*. American Society of Plant Biologists.
- Donati E.R., Lima M.A., Urbietta M.S. (2018). Heavy metals in the environment Microorganisms and Bioremediation. In E. R. Donati & N. U. of La Plata (Eds.), Taylor & Francis Group (pp. 3-14). CRC Press Taylor & Francis Group.
- Elhag M., Al-Ghamdi A.A.M., Galal H.K., Dahlan A. (2018). Evaluation of aloe vera l. As phytoremediator of heavy metals contaminated soils in arid environments. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(5), 6033-6045.
- Garbisu C., Alkorta I. (2003). Basic concepts on heavy metal soil bioremediation. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 3(1), 58-66.
- Gomes H.I. (2012). Phytoremediation for bioenergy: challenges and opportunities. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 59-66.
- Gonzaga M.I.S., Ma L.Q., Santos J.A.G., Matias M.J.S. (2009). Rhizosphere characteristics of two arsenic hyperaccumulating *Pteris ferns*. *Science of the Total Environment*, 407(16), 4711-4716.
- Hu R., Sun K., Su X., Pan Y.X., Zhang Y.F., Wang X. P. (2012). Physiological responses and tolerance mechanisms to Pb in two xerophils: *Salsola passerina* Bunge and *Chenopodium album* L. *Journal of Hazardous Materials*, 205-206, 131-138.
- Koeppel D. E. (1977). The uptake, distribution, and effect of cadmium and lead in plants. *Science of the Total Environment*, 7(3), 197-206.
- Kumar Yadav, K., Gupta N., Kumar, A., Reece L.M., Singh N., Reznia S., Ahmad Khan, S. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecological Engineering*, 120(May), 274-298.
- Mendez M.O., Maier R. M. (2008). Phytostabilization of mine tailings in arid and semiarid environments - An emerging remediation technology. *Environmental Health Perspectives*, 116(3), 278-283.
- Pilon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15-39.
- Rajkumar M., Sandhya S., Prasad M.N.V., Freitas H. (2012). Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1562-1574.
- Rehman M.Z., Rizwan M., Ali S., Ok Y.S., Ishaque W., Saifullah, ... Waqar, M. (2017). Remediation of heavy metal contaminated soils by using *Solanum nigrum*: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 143(January), 236-248.
- Romeiro S., Lagôa A.M.M.A., Furlani P.R., De Abreu C.A., De Abreu M.F., Erismann N.M. (2006). Lead uptake and tolerance of *Ricinus communis* L. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(4), 483-489.

- Schmoger M.E. V., Oven M., Grill E. (2000). Detoxification of arsenic by phytochelatins in plants. *Plant Physiology*, 122(3), 793–801.
- SEMARNAT. Norma Oficial Mexicana. NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario oficial de la Federación (2002).
- SEMARNAT. Norma Oficial Mexicana. NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece los criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación (2007).
- Shah V., Daverey A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology and Innovation*, 18, 100774.
- U.S. EPA. (2007). EPA 3051A Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils. Washington, DC.
- Ullah A., Mushtaq H., Ali H., Munis M.F.H., Javed M.T., Chaudhary H.J. (2015). Diazotrophs-assisted phytoremediation of heavy metals: a novel approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(4), 2505–2514.
- Vamerali T., Bandiera M., Mosca G. (2010). Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(1), 1–17.
- Van Assche F., Clijsters H. (1990). Effects of metals on enzyme activity in plants. *Plant, Cell & Environment*, 13(3), 195–206.
- Yoon J., Cao X., Zhou Q., Ma L.Q. (2006). Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment*, 368(2–3), 456–464.
- Zeng F., Ali S., Zhang H., Ouyang Y., Qiu B., Wu F., Zhang G. (2011). The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants. *Environmental Pollution*, 159(1), 84–91.
- Zhang C., Sale P.W.G., Clark G.J., Liu W., Doronila A.I., Kolev S.D., Tang C. (2015). Succulent species differ substantially in their tolerance and phytoextraction potential when grown in the presence of Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, and Zn. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(23), 18824–18838.