

Fitoextracción de metales desde suelos contaminados: ¿Oportunidad o utopía?

Phytoextraction of metals from contaminated soils: Chance or utopia?

Neaman, A.^{a,*}, Verdejo, J.^{b,c}, Ramírez, M.^{a,c}, Pinochet, D.^a

^a Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

^b Instituto de Producción y Sanidad Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

^c Escuela de Graduados, Facultad de Ciencias Agrarias y Alimentarias, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 05.10.2020

Accepted 21.12.2020

Keywords:

Phytoextraction

Metal

Metalloid

Remediation

Phytoremediation

Bioavailable

Contaminant stripping

Viewpoint,

Soil Science

*Corresponding author:

Alexander Neaman

E-mail address:

alexander.neaman@uach.cl

Palabras clave: Fitoextracción, metal, metaloide, remediación, fitorremediación, fracción biodisponible.

FITOEXTRACCIÓN: ¿UN MÉTODO DE BAJO COSTO PARA LIMPIAR SUELOS CONTAMINADOS?

Las técnicas de fitoextracción apuntan a la remoción de contaminantes de los suelos, por ejemplo, metales o metaloides, a través de la absorción de éstos por las raíces y su acumulación en los órganos cosechables de las plantas. Para simplificar la discusión del presente artículo, el término “metales” también incluye a metaloides (por ejemplo, arsénico).

A partir del trabajo de Baker *et al.* (1994), muchos artículos han propuesto la fitoextracción como un método de bajo costo para limpiar suelos contaminados. No obstante, la fitoextracción generalmente no es factible debido a los plazos poco realistas requeridos para el éxito en este proceso (Mertens *et al.*, 2005; Van Nevel *et al.*, 2007; Neaman *et al.*, 2017). El plazo de la

limpieza del suelo será denominado como “duración de fitoextracción” en el presente artículo.

Es importante considerar que la duración de fitoextracción es una función de la tasa de extracción del metal, la cual a su vez es la multiplicación de la biomasa de órganos cosechables de la planta por la concentración del metal en órganos cosechables de la planta (Figura 1). A su vez, esta última variable depende principalmente de los siguientes factores: (1) la biodisponibilidad de metales en el suelo, (2) la capacidad de la planta para absorber y acumular metales en órganos cosechables, y (3) el contacto de las raíces con los metales.

Por ejemplo, en suelos contaminados, los metales tienden a acumularse en la primera estrata de unos pocos centímetros (por ejemplo, 0–5 cm) (Ulriksen *et al.*, 2012), mientras que las raíces crecen en estratas más profundas y, por lo tanto, no están en el contacto con los metales. Respecto a la capacidad de la planta para absorber metales y acumularlos en órganos cosechables, las especies hiperacumuladoras son preferibles para lograr fitoextracción más eficiente (González *et al.*, 2008). Por ejemplo, Xia *et al.* (2013) proponen a *Sauropus androgynus* (L.) Merr. como una especie útil para técnicas de fitoextracción. La limpieza de zinc en los suelos con esta especie podría tener una duración menor de 25 años, es decir, menor a una generación humana. Sin embargo, la extracción de plomo con la misma especie duraría más de 1000 años.

Aunque una planta puede ser capaz de absorber metales y acumularlos en órganos cosechables, la biodisponibilidad de metales en el suelo puede limitar este proceso, por ejemplo, en suelos alcalinos. A su vez, la biodisponibilidad de metales en el suelo puede ser aumentada al usar agentes quelantes, es decir, sustancias que forman complejos con iones de metales en la solución del suelo. Los agentes quelantes comúnmente utilizados en la agricultura son el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), el ácido penténico (DTPA) y el ácido N,N'-etilendiamino-bis(2-hidroxifenil) acético (EDDHA) (González *et al.*, 2014). Al aumentar la biodisponibilidad de metales en el suelo, los quelantes aumentan también la absorción del metal por la planta, lo que a su

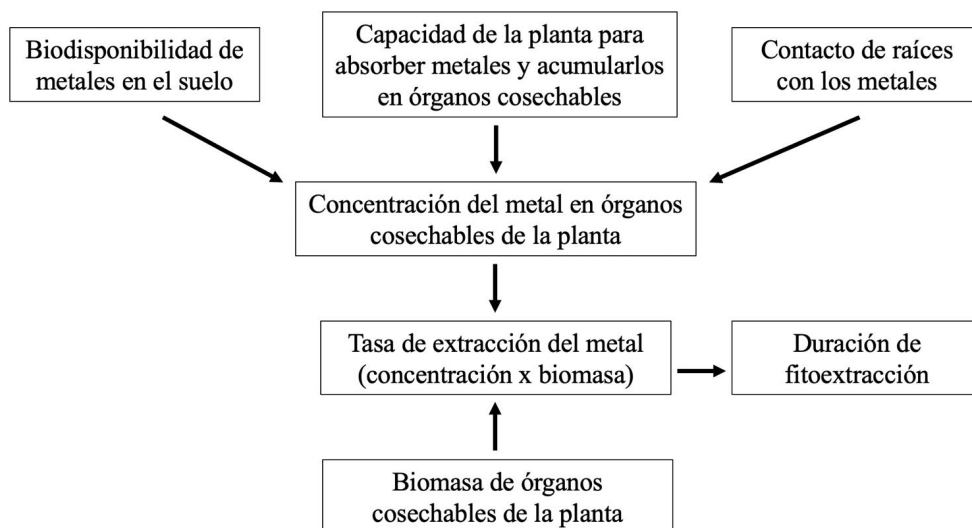


Figura 1. Factores que afectan a la duración de fitoextracción.

Figure 1. Factors affecting phytoextraction duration.

vez disminuye la duración de la limpieza de suelos. Sin embargo, dicha aplicación de quelantes inevitablemente conduce a la contaminación de aguas subterráneas, a menos que se realice *ex situ* o en clima árido (Nowack et al., 2006). Por lo tanto, el uso de quelantes tradicionales no es recomendable en la técnica de fitoextracción. Aunque quelantes biodegradables, como por ejemplo el ácido metilglicinodiacético (MGDA), pueden reducir la lixiviación de los metales, estos quelantes biodegradables son costosos y aún requieren tiempos largos para realizar una limpieza (González et al., 2014).

Por lo tanto, se sugiere a autores, revisores y editores a ser más estrictos con los artículos de fitoextracción, incluyendo información relevante sobre las tasas de fitoextracción de metales y los tiempos necesarios para llevar a cabo este proceso.

CONCEPTO DE ELIMINACIÓN DE LA FRACCIÓN BIODISPONIBLE

La eliminación de la fracción biodisponible (conocida en inglés como *bioavailable contaminant stripping*, BCS) se define como el método para eliminar solamente la fracción lábil de metales de un suelo contaminado (Hamon and McLaughlin, 1999). Cuando el objetivo principal se enfoca en la eliminación de la fracción biodisponible, la fitoextracción puede ser factible debido a una menor duración del proceso (Herzig et al., 2014, Li et al., 2014). Por ejemplo, Mench et al. (2018) encontraron que la remoción anual de cobre varió en el rango de 2,6–9%, considerando la fracción intercambiable del cobre en el suelo. Por lo tanto, serán requeridos entre 5 a 20 años para reducir a la mitad el contenido del cobre intercambiable (y potencialmente biodispo-

nible) en el suelo. Este tiempo es más factible que el tiempo requerido para reducir a la mitad el contenido total de cobre en el suelo.

No obstante, un aspecto clave de la eliminación de la fracción biodisponible es determinar los factores de capacidad, intensidad y cantidad (Figura 2) que gobiernan la disponibilidad del metal de interés en el suelo (Echevarría et al., 1998; Song et al., 2004; Prudnikova et al., 2020). El factor de cantidad hace referencia al contenido total de metal en el suelo. La intensidad es la fracción que se encuentra inmediatamente disponible para las raíces en un momento dado. A su vez, la capacidad es la propiedad amortiguadora del suelo para suministrar iones metálicos desde la fase sólida a la solución del suelo. Estos factores son conocidos por gobernar la fitodisponibilidad de los nutrientes en los suelos, como ya se ha discutido anteriormente en la bibliografía (Beckett, 1964; Shirvani et al., 2005; Taiwo et al., 2010; Marschner, 2012). Es decir, la absorción del elemento por las plantas depende no sólo de la concentración del elemento en la solución del suelo (intensidad), sino que también del contenido total del elemento en el suelo (cantidad) y de la cinética del suministro del elemento (capacidad) (Marschner, 1993). Finalmente, se debe considerar también los efectos rizosféricos, particulares de diferentes especies de plantas, debido a su importancia en la absorción de elementos por las plantas desde la solución del suelo (Hinsinger et al., 2009; Lynch, 2019).

ASPECTOS LEGISLATIVOS

En países donde las leyes se basan únicamente en los contenidos totales de metales en el suelo, la eliminación de la fracción biodisponible no es considerada

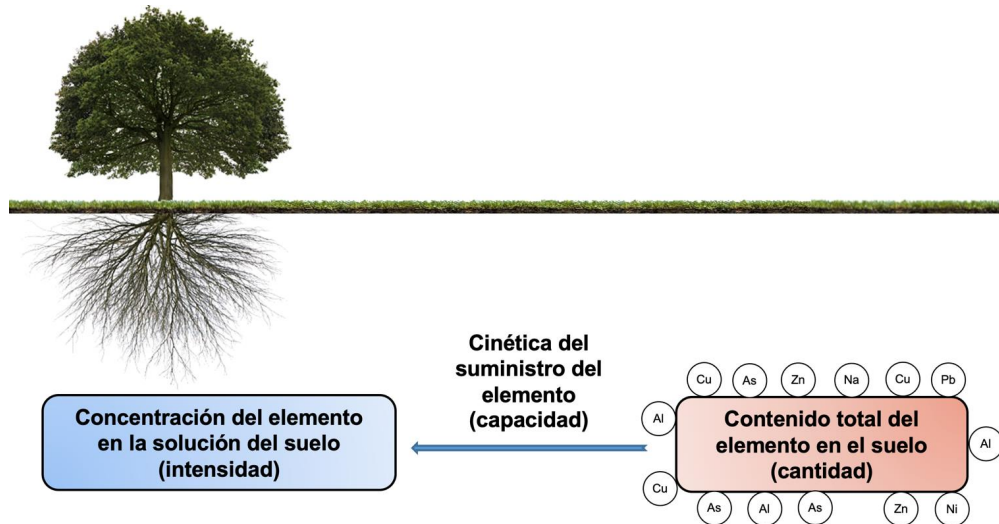


Figura 2. Factores de intensidad, cantidad y capacidad de la biodisponibilidad de elementos en el suelo (adaptado de Marschner, 1993).

Figure 2. The intensity, quantity and capacity factors of element bioavailability in soils (adapted from Marschner, 1993).

como una técnica de remediación del suelo (Neaman *et al.*, 2020). Es decir, para aplicar el concepto de la eliminación de la fracción biodisponible en la práctica, debe existir el respaldo de la legislación para que las leyes consideren a la fracción biodisponible de los metales en el suelo, en vez de su contenido total. Por ejemplo, la ley suiza toma en consideración la fracción lábil de metales en el suelo (Karlagnis, 2001).

Por otro lado, es importante enfatizar que las regulaciones relacionadas con la contaminación del suelo, a nivel internacional, han evolucionado hacia normativas basadas en evaluaciones de riesgo para la biota y/o la salud humana (por ejemplo, Reinikainen *et al.*, 2016), en vez de valores umbrales específicos basados en los contenidos totales o parciales de metales en el suelo. De esta manera, se puede llevar a cabo, por ejemplo, una evaluación de riesgo sitio-específica utilizando hortalizas. Si los contenidos de metales en las partes comestibles de las hortalizas están por debajo de los valores umbrales, puede que no sea necesario remediar este suelo. Sin embargo, la tasa de consumo de hortalizas y otras vías de exposición (por ejemplo, ingesta accidental del suelo por colocar manos sucias en la boca) también deben considerarse en esta evaluación (Lizardi *et al.*, 2020).

CONCLUSIÓN

Muchos artículos han propuesto la fitoextracción como un método de bajo costo para la limpieza de suelos contaminados. No obstante, la fitoextracción generalmente no es factible debido a los plazos poco realistas requeridos para el éxito en este proceso.

Por otro lado, cuando el objetivo principal se enfoca en la eliminación de la fracción biodisponible, la fitoextracción puede ser factible debido a una menor duración del proceso. No obstante, para aplicar el concepto de la eliminación de la fracción biodisponible en la práctica, debe existir el respaldo de la legislación para que las leyes consideren a la fracción biodisponible de los metales en el suelo, en vez de su contenido total.

Finalmente, los más avanzados programas de remediación de suelos están considerando el concepto de gestión del territorio basado en el riesgo, para alcanzar un nivel aceptable de riesgos en una evaluación sitio-específica, acorde al futuro uso del territorio.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a Isabel González y Rosanna Ginocchio por sus valiosos comentarios. Asimismo, se agradece a Andrei Tchourakov por la revisión del texto en inglés.

REFERENCIAS

- Baker, A.J.M., McGrath, S.P., Sidoli, C.M.D., Reeves, R.D., 1994. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants. *Resources, Conservation and Recycling* 11, 41–49.
- Beckett, P.H.T., 1964. Studies on soil potassium. *Journal of Soil Science* 15, 1–8. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1964.tb00239.x>.
- Echevarria, G., Morel, J.L., Fardeau, J.C., Leclerc-Cessac, E., 1998. Assessment of phytoavailability of nickel in soils. *Journal of Environmental Quality* 27, 1064–1070. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700050011x>.
- González, I., Muena, V., Cisternas, M., Neaman, A., 2008. Cop-

- per accumulation in a plant community affected by mining contamination in Puchuncavi valley, central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 81, 279–291. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2008000200010>
- González, I., Neaman, A., Cortés, A., Rubio, P., 2014. Effect of compost and biodegradable chelate addition on phytoextraction of copper by *Oenothera picensis* grown in Cu-contaminated acid soils. *Chemosphere* 95, 111–115.
- Hamon, R.E., McLaughlin, M.J., 1999. Use of the Hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* for Bioavailable Contaminant Stripping, in: Wenzel, W.W., Adriano, D.C., Alloway, B., Doner, H., Keller, C., Lepp, N.W., Mench, M., Naidu, R., Pierzynski, G.M. (Eds.), 5th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements. Vienna, pp. 908–909.
- Herzig, R., Nehnevajova, E., Pfistner, C., Schwitzguebel, J.P., Ricci, A., Keller, C., 2014. Feasibility of labile Zn phytoextraction using enhanced tobacco and sunflower: results of five- and one-year field-scale experiments in Switzerland. *International Journal of Phytoremediation* 16, 735–754.
- Hinsinger, P., Bengough, A.G., Vetterlein, D., Young, I.M., 2009. Rhizosphere: biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. *Plant and Soil* 321, 117–152. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9885-9>.
- Karlaganis, G., 2001. Swiss concept of soil protection. *Journal of Soils and Sediments* 1, 239–254. <https://doi.org/10.1007/bf02987732>.
- Li, Z., Wu, L.H., Hu, P.J., Luo, Y.M., Zhang, H., Christie, P., 2014. Repeated phytoextraction of four metal-contaminated soils using the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*. *Environmental Pollution* 189, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.034>.
- Lizardi, N., Aguilar, M., Bravo, M., Fedorova, T.A., Neaman, A., 2020. Human Health Risk Assessment from the Consumption of Vegetables Grown near a Copper Smelter in Central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 1–8. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00226-w>.
- Lynch, J.P., 2019. Root phenotypes for improved nutrient capture: an underexploited opportunity for global agriculture. *New Phytologist* 223, 548–564. <https://doi.org/10.1111/nph.15738>.
- Marschner, H., 1993. Zinc Uptake from Soils, in: Robson, A.D. (Ed.), *Zinc in Soils and Plants*. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp. 59–77.
- Marschner, P., 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
- Mench, M.J., Dellise, M., Bes, C.M., Marchand, L., Kolbas, A., Le Coustumer, P., Oustrière, N., 2018. Phytomanagement and remediation of Cu-contaminated soils by high yielding crops at a former wood preservation site: sunflower biomass and ionome. *Frontiers in Ecology and Evolution* 6. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00123>.
- Mertens, J., Luysaert, S., Verheyen, K., 2005. Use and abuse of trace metal concentrations in plant tissue for biomonitoring and phytoextraction. *Environmental Pollution* 138, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.002>.
- Neaman, A., Ginocchio, R., Yáñez, C., 2017. Restoration and Conservation Actions: Chilean Studies on Phytoremediation of Metal-Polluted, Acidic Soils, in: Araújo, C., Shinn, C. (Eds.), *Ecotoxicology in Latin America*. Nova Publishers, Hauppauge, NY, USA, pp. 551–562.
- Neaman, A., Robinson, B., Minkina, T.M., Vidal, K., Mench, M., Krutyakov, Y.A., Shapoval, O.V., 2020. Feasibility of metal(loid) phytoextraction from polluted soils: The need for greater scrutiny. *Environmental Toxicology and Chemistry* 39, 1469–1471. <https://doi.org/10.1002/etc.4787>.
- Nowack, B., Schulin, R., Robinson, B.H., 2006. Critical assessment of chelant-enhanced metal phytoextraction. *Environmental Science & Technology* 40, 5225–5232. <https://doi.org/10.1021/es0604919>.
- Prudnikova, E.V., Neaman, A., Terekhova, V.A., Karpukhin, M.M., Vorobeichik, E.L., Smorkalov, I.A., Dovletyarova, E.A., Navarro-Villarroel, C., Ginocchio, R., Peñaloza, P., 2020. Root elongation method for the quality assessment of metal-polluted soils: Whole soil or soil-water extract? *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 20, 2294–2303. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00295-x>.
- Reinikainen, J., Sorvari, J., Tikkanen, S., 2016. Finnish policy approach and measures for the promotion of sustainability in contaminated land management. *Journal of Environmental Management* 184, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.046>.
- Shirvani, M., Shariatmadari, H., Kalbasi, M., 2005. Phosphorus buffering capacity indices as related to soil properties and plant uptake. *Journal of Plant Nutrition* 28, 537–550. <https://doi.org/10.1081/pln-200049235>.
- Song, J., Zhao, F.J., Luo, Y.M., McGrath, S.P., Zhang, H., 2004. Copper uptake by *Elsholtzia splendens* and *Silene vulgaris* and assessment of copper phytoavailability in contaminated soils. *Environmental Pollution* 128, 307–315. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.09.019>.
- Taiwo, A.A., Adetunji, M.T., Azeez, J.O., Bamgbose, T., 2010. Potassium supplying capacity of some tropical Alfisols in southwest Nigeria as measured by intensity, quantity and capacity factors. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 86, 341–355. <https://doi.org/10.1007/s10705-009-9296-1>.
- Ulriksen, C., Ginocchio, R., Mench, M., Neaman, A., 2012. Lime and compost promote plant re-colonization of metal-polluted, acidic soils. *International Journal of Phytoremediation* 14, 820–833.
- Van Nevel, L., Mertens, J., Oorts, K., Verheyen, K., 2007. Phytoextraction of metals from soils: how far from practice? *Environmental Pollution* 150, 34–40. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.05.024>.
- Xia, B.C., Shen, S.L., Xue, F., 2013. Phytoextraction of heavy metals from highly contaminated soils using *Sauropus androgynus*. *Soil & Sediment Contamination* 22, 631–640. <https://doi.org/10.1080/15320383.2013.756452>.