

La fitorremediación de suelos afectados por la actividad cinegética: lecciones aprendidas, retos y futuras oportunidades

Phytoremediation of soils affected by shooting practises: lessons learned, challenges and future opportunities

María Teresa Gómez-Sagasti^{1,*}, Unai Artetxe¹, Diego Tazueco¹, Antonio Hernández¹, Carlos Garbisu² & José María Becerril¹

¹ Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad del País Vasco (UPV/EHU), E-48080 Bilbao, España

² NEIKER-BRTA, Departamento de Conservación de Recursos Naturales, C/Berreaga 1, E-48160 Derio, España
(*E-mail: mariateresa.gomez@ehu.eus)

<https://doi.org/10.19084/rca.28750>

RESUMEN

La contaminación por metal(oid)es de los suelos dentro de o cercanos a las instalaciones de tiro recreativas es un problema ambiental que se ha agravado en las últimas décadas. La caída constante de munición (compuesta esta principalmente por plomo -Pb-) a los suelos y su dispersión ha dado lugar a zonas con altas concentraciones totales de Pb, oscilando entre miles a decenas de miles de mg kg⁻¹ de peso seco suelo según nos acercamos a la línea de tiro o bermas. Una vez depositados en el suelo, los fragmentos de la munición son muy susceptibles a los procesos de meteorización, que hacen que se libere el Pb en sus formas químicas más móviles y potencialmente tóxicas. En los últimos años la fitorremediación ha cogido fuerza como alternativa a los tratamientos físico-químicos para el control y la gestión de la contaminación por Pb en los campos de tiro debido a su fácil aplicación, beneficios ambientales y bajo coste. En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es revisar el estado del arte de la fitorremediación de los suelos afectados por las prácticas de tiro y, además, reflexionar sobre los retos actuales y futuros a abordar para su óptima remediación.

Palabras clave: contaminación, plomo, fitoextracción, fitoestabilización, vegetación espontánea.

ABSTRACT

Metal(oid)-contamination of soils within or near recreational shooting ranges is an environmental problem that has worsened in recent decades. The constant fall of ammunition (composed mainly of lead -Pb-) into soils and its dispersal has resulted in areas with high total Pb concentrations, ranging from thousands to tens of thousands of mg kg⁻¹ dry weight of soil as one approaches the firing line or berms. Once deposited in the soil, ammunition fragments are highly susceptible to weathering processes, which release Pb in its more mobile and potentially toxic chemical forms. Phytoremediation has gained momentum in recent years as an alternative to physico-chemical treatments for the control and management of Pb contamination in shooting ranges, due to it is environmentally friendly, easy to apply and low cost. In this context, the main objective of this work is to review the state of the art of phytoremediation of soils affected by shooting practices and, in addition, to reflect on the current and future challenges to be addressed for their optimal remediation.

Keywords: contamination, lead, phytoextraction, phytostabilisation, spontaneous vegetation.

EL PLOMO (Pb) EN LOS CAMPOS DE TIRO Y SU IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

Las actividades de tiro son una fuente importante de contaminación de suelos por Pb, ya que este es el principal componente de las balas y perdigones tradicionales, constituyendo más del 90% de su masa (Sanderson *et al.*, 2018). Aunque el uso de munición libre de Pb es cada vez más popular, la munición tradicional sigue siendo la preferida por su eficacia balística (Rodríguez-Seijo *et al.*, 2016).

Las concentraciones totales de Pb en los suelos de los campos de tiro suelen superar con frecuencia los 1.000 mg kg⁻¹. Incluso se han detectado concentraciones muy superiores a los 20.000 mg kg⁻¹ (Dinake *et al.*, 2019). Las instalaciones civiles de tiro suelen localizarse cerca de zonas urbanas y/o agrícolas (Bandara & Vithanage, 2016). Por lo tanto, la presencia de elementos tóxicos como el Pb en esos suelos representa una grave amenaza para el funcionamiento del ecosistema circundante, pudiendo incluso afectar a la salud humana.

El impacto medioambiental de los campos de tiro ha pasado inadvertido durante mucho tiempo, pensando que el Pb metálico de la munición permanecía relativamente inerte en el suelo (Rodríguez-Seijo *et al.*, 2016). Sin embargo, los fragmentos de bala y perdigones disparados se acumulan en los horizontes superficiales del suelo (0-15 cm), donde el Pb metálico superficial sufre procesos de meteorización (oxidación y carbonatación), dando lugar a la formación de minerales secundarios como la cerusita -PbCO₃- y la hidrocerusita -Pb₃(CO₃)₂(OH)₂-. En suelos ácidos, estos minerales se transforman luego en especies iónicas del Pb más móviles y biodisponibles (Pb²⁺, Pb⁴⁺). Son precisamente estas especies químicas las que pueden ser tóxicas para la biota del suelo, además de entrar y transferirse a lo largo de la cadena trófica a través de su acumulación en las plantas (Bandara & Vithanage, 2016). Es esencial, por consiguiente, comprender el comportamiento geoquímico del Pb en los suelos de los campos de tiro con el fin de gestionar, y preferiblemente reducir, los riesgos potenciales para los seres humanos y el medio ambiente (Gómez-Sagasti *et al.*, 2021).

LA GESTIÓN DE LOS SUELOS CONTAMINADOS DE LOS CAMPOS DE TIRO

Los manuales de buenas prácticas para la gestión de los suelos contaminados de los campos de tiro se centran principalmente en (i) el reciclaje de la munición usada (estrategia: eliminación física), (ii) la prevención de la migración del Pb a las aguas subterráneas y superficiales (estrategia: inmovilización o estabilización química), y en (iii) la remediación de esos suelos (estrategia: movilización) (Sanderson *et al.*, 2018) (Figura 1).

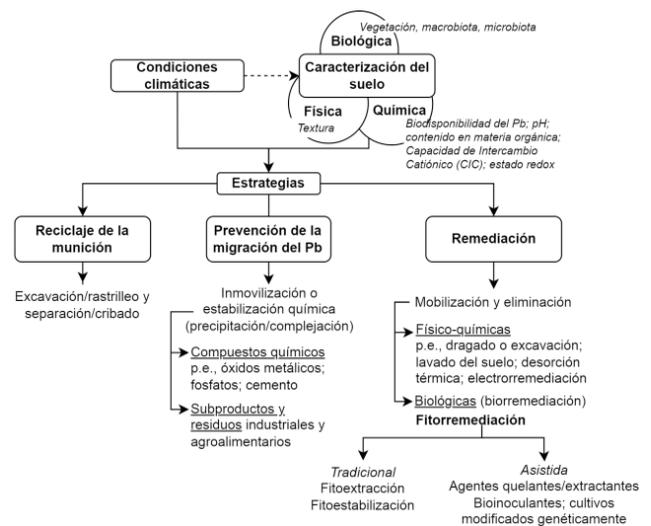


Figura 1 - Estrategias de gestión de suelos contaminados por Pb en los campos de tiro.

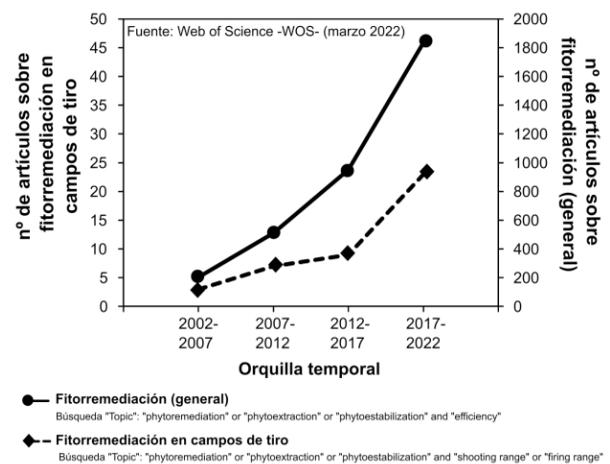


Figura 2 - Número de artículos publicados en los últimos 20 años sobre fitorremediación (línea sólida, eje Z) y en los que ésta ha sido aplicada en suelos de campos de tiro (línea punteada, Eje Y).

Para la selección de la tecnología de remediación más adecuada se deben tener en cuenta tanto las propiedades físico-químicas como las biológicas del emplazamiento (ver detalle de la Figura 1). En la actualidad, la inmovilización química *in situ* mediante el uso de subproductos y residuos industriales y agroalimentarios como enmiendas del suelo es la técnica más utilizada, ya que además está alineada con las estrategias de economía circular europeas (Gómez-Sagasti *et al.*, 2021). Junto a ella, la fitorremediación de suelos de los campos de tiro está teniendo un gran auge (Figura 2).

LA FITORREMEDIACIÓN EN LOS CAMPOS DE TIRO

La fitorremediación se define como el uso de plantas (y microorganismos asociados) para minimizar los efectos tóxicos de uno o varios contaminantes en el medio ambiente. En el caso del Pb, las plantas pueden extraerlo y acumularlo en su parte aérea (fitoextracción) y/o inmovilizarlo en el suelo (fitoestabilización).

Especies como el maíz (*Zea mays*) y el guisante (*Pisum sativus*) (Tariq & Ashraf, 2016), el pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) (Bandara & Vithanage, 2016), o la agróstide común (*Agrostis capillaris*) (Rodríguez-Seijo *et al.*, 2016) han propiciado la remediación de suelos contaminados con Pb en campos de tiro. De hecho, para los emplazamientos con contaminación crónica como los situados en los campos de tiro, la fitorremediación puede ser la única tecnología *in situ* económicamente viable (Kim *et al.*, 2010).

¿QUÉ LECCIONES HEMOS APRENDIDO?

Es indudable que un buen acondicionamiento del suelo que incluya el laboreo mecánico del terreno, la adición de enmiendas y/o fertilizantes (a ser posible, orgánicos), fortalece el proceso de fitorremediación al mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas.

La selección de las especies vegetales o cultivares adecuados es clave también para garantizar el éxito de la fitorremediación. Idealmente, las especies remediadoras deben tener una tasa de crecimiento rápida, producir una gran biomasa, tolerar estreses bióticos y abióticos del emplazamiento, además de

tolerar altos niveles de Pb y preferiblemente tener la capacidad de absorber y acumular el Pb en la parte aérea. Alternativamente, su inmovilización en la rizosfera también puede reducir la ecotoxicidad y mejorar la salud del suelo. En la biodisponibilidad del Pb influyen enormemente las condiciones edafoclimáticas y el estado de la comunidad microbiana rizosférica.

La eficiencia de fitorremediación de diferentes plantas se han mejorado significativamente mediante la aplicación de bacterias endófitas y hongos micorrícicos resistentes al Pb (Bandara & Vithanage, 2016). El mecanismo implicado en ello podría ser la actividad de promoción del crecimiento vegetal (actividad PGPR) de las cepas microbianas que, al fomentar el crecimiento de las plantas y la producción de biomasa, mejoran a su vez el estado nutricional del suelo, regulando las propiedades físico-químicas y el sistema antioxidante de las plantas.

RETOS Y PERSPECTIVAS DE TRABAJO

Uno de los primeros retos (o limitaciones) a los que debe hacer frente la fitorremediación de los suelos de los campos de tiro es la baja biodisponibilidad natural del Pb en la rizosfera, que hace que el proceso se alargue mucho en el tiempo. En caso de ser aplicable, la fitoextracción asistida por agentes quelantes debe ser optimizada y controlada para limitar la movilidad de estos agentes. El ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) moviliza eficazmente el Pb del suelo, pero su escasa biodegradabilidad lo hace además de ecotóxico, muy persistente en el suelo y, por consiguiente, potencialmente lixiviable. Como alternativa, se han empleado agentes quelantes biodegradables como el ácido etilendiaminoinosuccínico (EDDS), o ácidos orgánicos como el ácido cítrico, que también promueven la fitoextracción (Tariq & Ashraf, 2016; Cámara *et al.*, 2020).

Muchas de las plantas con potencial fitorremediador probadas en los suelos de los campos de tiro son cultivares agrícolas. Es necesario evaluar la vegetación espontánea con moderada o alta biomasa que crece en esos suelos, dado que está mejor adaptada en términos de supervivencia, crecimiento y reproducción bajo el estrés ambiental que las plantas introducidas de otros entornos (Bandara & Vithanage, 2016).

En los últimos años, la ingeniería genética ha posibilitado la mejora de la fitorremediación. El cruzamiento (*crossbreeding*) es un método de mejora tradicional útil para optimizar aspectos relativos a la producción de biomasa. La inclusión de genes exógenos mediante la recombinación de DNA puede mejorar la captación, transporte y acumulación de Pb. Sin embargo, el uso de plantas modificadas genéticamente para la fitoextracción *in situ* esta aun hoy rodeado de limitaciones normativas y de escasa aceptación pública.

Finalmente, se debe hacer frente al reto que supone la eliminación o reutilización de la biomasa vegetal rica en Pb sin producir contaminantes secundarios. La clave puede estar en la combinación del compostaje, la pirólisis y la incineración además de evaluar diferentes métodos de extracción.

CONCLUSIONES

Los gestores de suelos contaminados en los campos de tiro deben conocer las condiciones

edafoclimáticas específicas del emplazamiento que influyen en la meteorización y las transformaciones químicas del Pb para poder aplicar la estrategia de gestión más adecuada. La estabilización química y la fitorremediación han demostrado su potencial en campos con contaminación crónica, pero su aplicación *in situ* debe ser optimizada para cada emplazamiento particular. Se necesitan con urgencia proyectos de fitorremediación en los propios campos de tiro y/o terrenos colindantes afectados que demuestren su aplicabilidad y eficiencia y que convezcan a gestores, reguladores y al público en general.

AGRADECIMENTOS

Este trabajo se ha financiado con el Grupo de Investigación Consolidado del Gobierno Vasco (GV ITO18-16), el proyecto PRADA (PID2019-110055RB-C22) del MINECO, y el proyecto Phy2SU-DOE (SOE4/P5/E1021), y el proyecto Phy2SUDO (SOE4/P5/E1021) con cargo al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER, Comisión Europea).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bandara, T. & Vithanage, M. (2016) - Phytoremediation of shooting range soils. In: *Phytoremediation*, p. 469-488. Springer, Cham.
- Cámara, A. (2020) - *Evaluación de la estrategia de fitoextracción en continuo con Brassica juncea y Plantago lanceolata e inducida por diferentes agentes extractantes en suelos de un campo de tiro*. Trabajo Fin de Grado. UPV/EHU.
- Dinake, P.; Kelebemang, R. & Sehube, N. (2019) - A comprehensive approach to speciation of lead and its contamination of firing range soils: a review. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, vol. 28, n. 4, p. 431-459. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1597831>
- Gómez-Sagasti, M.T.; Anza, M.; Hidalgo, J.; Artetxe, U.; Garbisu, C. & Becerril, J.M. (2021) - Recent trends in sustainable remediation of Pb-contaminated shooting range soils: Rethinking waste management within a circular economy. *Processes*, vol. 9, n. 4, art. 572. <https://doi.org/10.3390/pr9040572>
- Kim, S.; Baek, K. & Lee, I. (2010) - Phytoremediation and microbial community structure of soil from a metal-contaminated military shooting range: Comparisons of field and pot experiments. *Journal of Environmental Science and Health, Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, vol. 45, n. 3, p. 389-394. <https://doi.org/10.1080/10934520903467832>
- Rodríguez-Seijo, A.; Lago-Vila, M.; Andrade, M.L. & Vega, F.A. (2016) - Pb pollution in soils from a trap shooting range and the phytoremediation ability of *Agrostis capillaris* L. *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, n. 2, p. 1312-1323. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5340-7>
- Sanderson, P.; Qi, F.; Seshadri, B.; Wijayawardena, A. & Naidu, R. (2018) - Contamination, fate and management of metals in shooting range soils-a review. *Current Pollution Reports*, vol. 4, n. 2, p. 175-187. <https://doi.org/10.1007/s40726-018-0089-5>
- Tariq, S.R. & Ashraf, A. (2016) - Comparative evaluation of phytoremediation of metal contaminated soil of firing range by four different plant species. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 9, n. 6, p. 806-814. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.09.024>