

Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación

J.M. Becerril, O. Barrutia, J.I. García Plazaola, A. Hernández¹, J.M. Olano², C. Garbisu³

(1) Dpto. Biología Vegetal y Ecología, Universidad del País Vasco, Apartado 644, E-48080 Bilbao.

(2) Escuela de Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, E-42003, Soria

(3) NEIKER-Tecnalia, c/Berreaga 1, E-48160 Derio.

Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. Las especies nativas que sobreviven en suelos contaminados con metales (metalofitas y pseudometalofitas) han desarrollado unos mecanismos fisiológicos especiales para tolerar la presencia de metales: (i) la exclusión que impide la entrada de metales en la raíz y/o su transporte a la parte aérea de la planta, (ii) la acumulación en la parte aérea mediante su inmovilización o compartimentación en las vacuolas. Debido a que viven en zonas muy limitadas y pueden ser afectadas directamente por las actividades mineras su conservación debería ser prioritaria, no sólo por la pérdida de una biodiversidad tan especial sino por su posible utilización en fitotecnologías ambientales de revegetación, fitoestabilización y fitoextracción de entornos contaminados con metales. En el apartado final se presenta un estudio llevado a cabo con especies nativas procedentes de suelos mineros con altos niveles de Zn, Pb y Cd del Norte de España.

Palabras clave: tolerancia a metales pesados, metalofitas, revegetación

Native species from contaminated soils: Ecophysiological aspects and their use on phytoremediation. Native plants that evolved to colonize contaminated soils with heavy metals (metalophytes and pseudometalophytes) may use two basic strategies to deal with high metal concentration: (i) exclusion mechanisms by which uptake of roots and root to shoot transport is restricted, (ii) accumulation using several mechanisms to immobilize and compartmentalize metals in vacuoles. Due to their endemism and mining activities special care should be taken to avoid destruction of the metalophyte habitats and the associated loss of species. These plants offer a huge potential for the development of environmental phytotechnologies as revegetation, phytoestabilization and phytoextraction of metal-polluted areas. Finally a study of native plants from metalliferous soils from Northern Spain, with high levels of Zn, Pb and Cd, is presented.

Key words: heavy metal tolerance, metalophytes, revegetation

Los suelos contaminados: un grave problema ambiental y una oportunidad para algunas especies vegetales

Una de las consecuencias más negativas de la revolución industrial ha sido la dispersión de los contaminantes en el agua, atmósfera y suelo. De éstos, el suelo es el medio más estático, donde los contaminantes pueden permanecer durante mucho tiempo. Esta permanencia a largo plazo es especialmente grave en el caso de contaminantes inorgánicos como los metales pesados, que no pueden ser degradados. Su persistencia, acumulación progresiva y/o su transferencia a otros sistemas supone una amenaza para la salud humana y la de los ecosistemas. La minería y actividades asociadas generan una gran cantidad de residuos pétreos y lodos ricos en metales pesados que son depositados en la superficie del entorno minero. Así, el suelo original de la mina se degrada o se pierde irreversiblemente. El "nuevo suelo" sufre un grave impacto durante la explotación minera, es frecuentemente inestable, y está formado por materiales poco aptos para el desarrollo de las actividades biológicas y los procesos formadores de suelo. Incluso después de desaparecida la actividad industrial estas condiciones adversas persisten durante mucho tiempo por el bajo nivel de materia orgánica y nutrientes, elevada y periódica erosión, gran fluctuación de temperatura superficial, sequía, condiciones de pH, etc., sin olvidar el elevado nivel de metales presentes en el sustrato.

La consecuencia directa de esta contaminación del suelo es una ausencia inicial de vegetación o la pérdida de su productividad, la disminución de la biodiversidad e indirectamente la contaminación del aire, y aguas superficiales y subterráneas (Wong, 2003). Sin embargo, las poblaciones de una gran variedad de especies de plantas son capaces de colonizar estos suelos degradados por actividades mineras, si les damos la oportunidad y el tiempo necesario; son las especies metalofitas.

Las metalofitas son especies de plantas que han desarrollado los mecanismos fisiológicos para resistir, tolerar y sobrevivir en suelos con altos niveles de metales y, por ello, son endémicas de suelos con afloramientos naturales de minerales metálicos. Estas rarezas botánicas tienen muy difícil su supervivencia, por una parte, por su especialización para sobrevivir en entornos contaminados con unos minerales concretos, y por otra, por su restringida supervivencia en zonas no mineralizadas. Además, el propio desarrollo de la minería de la zona afecta y puede eliminar la vegetación nativa durante el desarrollo continuado de la actividad, y por la deposición de materiales y residuos en la superficie del entorno. En este caso estaremos perdiendo la biodiversidad de unas especies que han tardado cientos, miles o millones de años en desarrollar mecanismos para sobrevivir en suelos metalíferos (Shaw, 1990). Pero no sólo eso, sino que si no actuamos a tiempo, con la pérdida de estas especies habremos perdido unas herramientas biológicas fundamentales para la revegetación y la recuperación de suelos contaminados por actividades industriales y mineras.

Además de las especies metalofitas también encontramos otras especies, de un ámbito de distribución más extenso, pero que por la presión selectiva son capaces de sobrevivir en suelos metalíferos; son las especies pseudometalofitas. Aunque la presencia de genes para la tolerancia a metales es baja en especies no metalofitas, la alta presión selectiva de estos suelos posibilita la selección de poblaciones en especies normales con tolerancias mucho mayores que otras poblaciones de su misma especie. Además las poblaciones tolerantes a metales normalmente son capaces de tolerar otros factores edafoclimáticos adversos de estos entornos.

Lejos de suponer una desventaja, la presencia de suelos metalíferos representa una oportunidad para la supervivencia de las especies metalofitas y las poblaciones de pseudometalofitas (**Fig. 1**). Esta biocenosis tan especial se completa con microorganismos y fauna que también se ha especializado en evitar o tolerar los efectos tóxicos de los metales.



Figura 1. Entorno de una mina de Pb y Zn en el extremo occidental de Bizkaia.

El dilema de la tolerancia de las plantas a los metales: excluir o acumular

La propia inmovilidad de las plantas les obliga a desarrollar estrategias muy precisas para sobrevivir en los suelos con altos niveles de metales. La mayor parte de las especies que toleran la presencia de metales son especies que impiden su entrada en la raíz y su transporte a los tejidos fotosintéticos, son las especies exclusoras.

Las más raras y escasas entre las tolerantes son las especies que acumulan metales en sus tejidos aéreos, incluso cuando la concentración de los metales en suelo es muy baja; son las especies hiperacumuladoras. Su concentración final en los tejidos aéreos depende del metal y de la especie, llegando a superar el 2% de su peso seco (Brooks, 1998). Las especies más comunes son las hiperacumuladoras de Ni siendo más escasas las de Co, Cu, Zn, Cr, Pb y Cd. La habilidad para concentrar

metales en los tejidos se ha relacionado con una función defensiva frente al estrés biótico (Poschenrieder et al., 2006) y con la disminución de la competencia con otras especies vegetales mediante interacción alelopática (alelopatía elemental) (Boyd y Martens, 1998). En cualquier caso estas especies deben tener garantizados unos mecanismos de tolerancia interna para inmovilizar, compartimentar y desintoxicar los metales que llegan al interior celular. Los mecanismos más eficientes son la formación de complejos metálicos en el citosol mediante compuestos orgánicos producidos por las plantas, y la compartimentación de los metales en las vacuolas. Los estudios de los últimos años han permitido conocer algunos de los mecanismos de tolerancia y acumulación de metales, especialmente en la especie *Thlaspi caerulescens* (J. y C. Presl), una especie hiperacumuladora de Zn. Esta especie es considerada como una especie modelo en los estudios de tolerancia a metales y de fitoextracción.

Debido a las características especiales de las especies tolerantes a metales, éstas han estado en el punto de mira de las tecnologías innovadoras y ecológicas para la restauración de suelos contaminados con metales, como las tecnologías de fitorremediación.

Aprovechamiento de las peculiaridades de las especies nativas tolerantes a metales: tecnologías de fitoextracción y fitoestabilización

La fitorremediación supone el uso de las plantas para eliminar o reducir la toxicidad de los contaminantes del medio ambiente. Las tecnologías principales para la fitorremediación de metales son: (i) la fitoextracción - el uso de plantas para extraer los metales del suelo, transportarlos y acumularlos en los órganos de la parte aérea, (ii) fitoestabilización - el uso de plantas para minimizar la movilidad de los metales mediante su acumulación en la raíz o su precipitación en la rizosfera (Alkorta et al., 2004).

Las especies metalofitas presentan un potencial enorme para el desarrollo de fitotecnologías medioambientales (rehabilitación, revegetación, fitoestabilización, fitoextracción, etc). Como ya hemos indicado, gran parte del conocimiento desarrollado sobre este tema se ha centrado en el estudio de las especies hiperacumuladoras, y la posibilidad de promover la fitoextracción como fitotecnología comercial. Sin embargo, debemos tener una visión mucho más amplia para conocer y conservar todas las especies metalofitas, desde las pseudometalofitas hasta las hiperacumuladoras. De hecho las estrategias de revegetación y estabilización de escombreras mineras más efectivas se han realizado con poblaciones de pseudometalofitas, utilizando varias especies de gramíneas de carácter excluser (Johnson et al., 1994). En este caso, el bajo coste de mantenimiento y la restricción de los metales a la cadena trófica son ventajas añadidas.

Debemos ser conscientes de la importancia de la caracterización fisiológica de las especies nativas de suelos metalíferos, ya que entre ellas hay unos candidatos excelentes para la conservación, restauración ecológica de minas y el desarrollo de fitotecnologías ecológicas de bajo impacto ambiental que reducen la contaminación metálica de los suelos.

Estudio de especies nativas de suelos mineros contaminados con Pb, Zn y Cd en el norte de España: selección, tolerancia y aplicación potencial

La región de Las Encartaciones en Bizkaia (Norte de España) está caracterizada por una gran tradición minera. Además de la minería del hierro en la parte occidental, en el valle de Karrantza, han existido muchas explotaciones relacionadas con la minería del Pb y del Zn, todas ellas abandonadas desde hace décadas. Nuestro estudio se centró en las escombreras mineras y terrenos adyacentes de una mina de galena abandonada desde la década de los 60, en una zona kárstica y montañosa, con un suelo del tipo acrisol gleico (**Fig. 1**). El suelo tenía un pH de 6,9, contenido en materia orgánica 3%, una relación de C/N de 15 y niveles medios de Zn 51.304 (5.990- 159.157) mg Zn kg⁻¹, Pb 28.203 (8.350- 69.803) mg Pb kg⁻¹, Cd 42 (4-163) mg Cd kg⁻¹. Como puede comprobarse, la zona presentó una gran heterogeneidad en la distribución y en la concentración de los metales. Inicialmente se realizó un inventario florístico del entorno, para posteriormente tomar varios ejemplares de una misma especie en varias zonas del mismo, así como una muestra del suelo de la rizosfera de cada ejemplar. En el suelo recogido y en la materia seca de la plantas se analizó el contenido de metales.

Las 50 especies identificadas pertenecen a 29 géneros de 18 familias. La abundancia de especies y de cobertura vegetal disminuía con el nivel de metal en el suelo. La vegetación del entorno minero estaba constituida mayoritariamente por pseudometalofitas, algunas con niveles muy bajos de metales en sus tejidos aéreos (*Festuca rubra* L., *Agrostis capillaris* L., *Pteridium aquilinum* L.). Además se encontraron especies hipertolerantes en lugares con alta concentración de metales: *Thlaspi caerulescens*, *Jasione montana* L., *Rumex acetosa* L. y *Festuca rubra* L. (**Fig. 2**). De éstas, algunas presentaban altos niveles de metales en sus hojas, como *R. acetosa* y *J. montana*. Sin embargo, los niveles más altos se encontraron en la especie hiperacumuladora de Zn *T. caerulescens* (14.000 mg kg⁻¹ materia seca). Esta acumulación es comparable a la de otros ecotipos europeos de esta especie. A esta población de *T. caerulescens* la hemos denominado "Lanestosa" por el pueblo de procedencia.

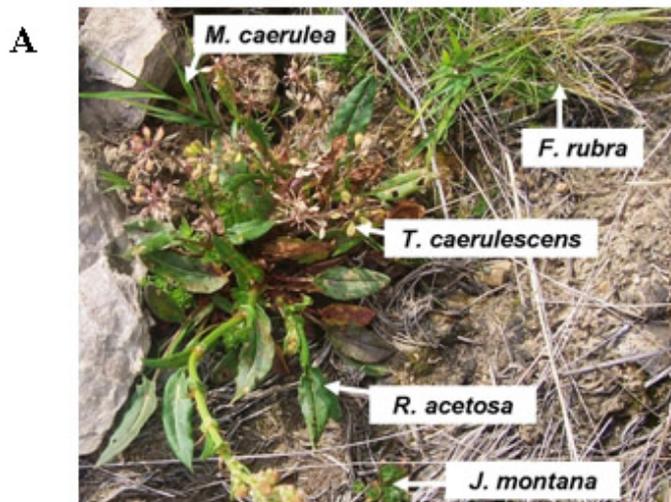
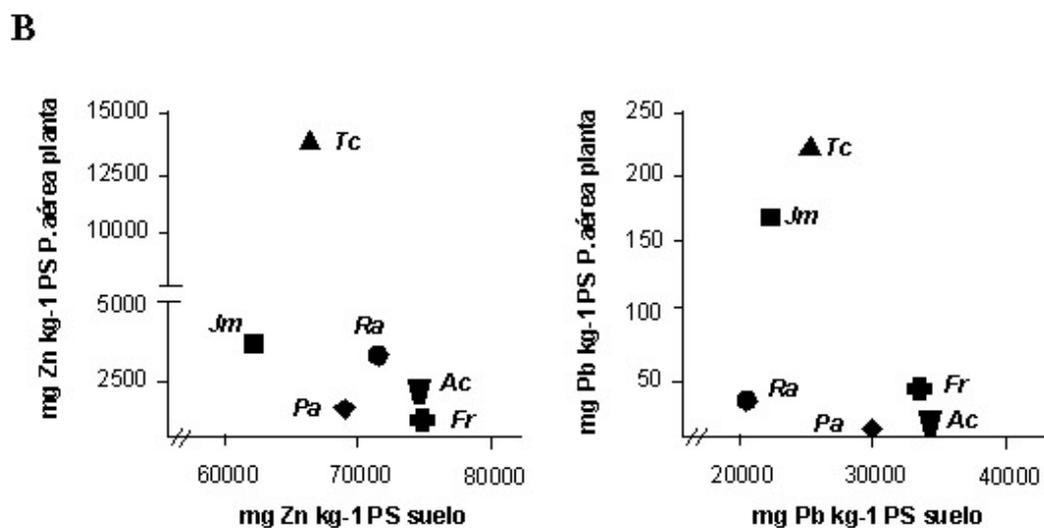


Figura 2. A) Especies de plantas comunes en el entorno de una mina de Zn y Pb. **B)** Niveles de Zn y Pb (mg kg^{-1} de materia seca) en varias de estas especies. Tc: *Thlaspi caerulescens*; Ra: *Rumex acetosa*; Jm: *Jasione montana*; Fr: *Festuca rubra*; Ac: *Agrostis capillaris*; Pa: *Pteridium aquilinum*.



Debido a la amplia distribución de *R. acetosa*, su elevada concentración y tolerancia a los metales el estudio se prosiguió en esta población denominada "Lanestosa, LAN" y se comparó con otra población de *R. acetosa* procedente de un entorno rural no contaminado de Larrauri (Bizkaia) denominada "Larrauri, LAR". En este estudio se comprobó la tolerancia a los metales de ambas poblaciones al cultivarlas en condiciones controladas de invernadero sobre un substrato artificial contaminado con 500 mg kg^{-1} de Pb, 250 mg kg^{-1} de Zn y 1 mg kg^{-1} de Cd. Así pudimos determinar que la población LAN de *R. acetosa* era mucho más tolerante a la presencia de los metales Zn, Pb y Cd, que la población LAR en todas las variables analizadas (biomasa foliar y radical, tasa de fotosíntesis neta, conductancia estomática, y concentración de pigmentos fotosintéticos, sistemas de fotoprotección y antioxidantes lipofílicos, **Fig. 3**). De hecho, esta población pseudometalofita toleró muy bien la presencia de metales en el suelo, a pesar de tener mayores contenidos de metales en sus tejidos aéreos. Este aspecto la hace muy interesante para su utilización en fitotecnologías de fitoextracción.

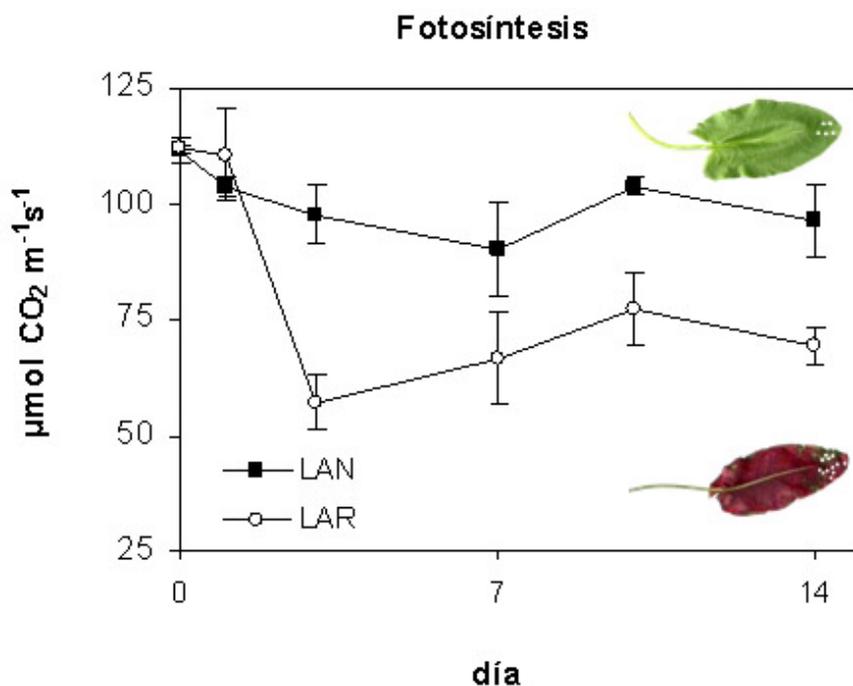


Figura 3. Efecto de la contaminación por metales (Pb, Zn y Cd) en % respecto al control, sobre la fotosíntesis neta de dos poblaciones de *R. acetosa* procedentes de un entorno minero (LAN) y de un entorno no contaminado (LAR). Se muestran las medias \pm errores estándar.

En un estudio en el que las plantas crecieron en un suelo contaminado con 5 000 mg kg⁻¹ de Pb, 19 000 mg kg⁻¹ de Zn y 15 mg kg⁻¹ de Cd durante 3 meses, la población LAN de *R. acetosa* alcanzó niveles de Zn muy altos (3500 mg kg⁻¹ de materia seca), y el nivel de metal en los tejidos y la tolerancia de las plantas incrementaba con los sucesivos cortes de la parte aérea, así los rebrotes después de 5 meses presentaban una acumulación de Zn de 6 700 mg kg⁻¹ de materia seca (Fig. 4). Por el contrario la población rural LAR no sobrevivió en estas condiciones. Tanto el crecimiento como la extracción total de metales se incrementó sustancialmente si el suelo era fertilizado (hasta 10 300 mg kg⁻¹ de materia seca). De hecho en estas condiciones los niveles de fitoextracción fueron comparables a los de la hiperacumuladora *T. caerulescens*.

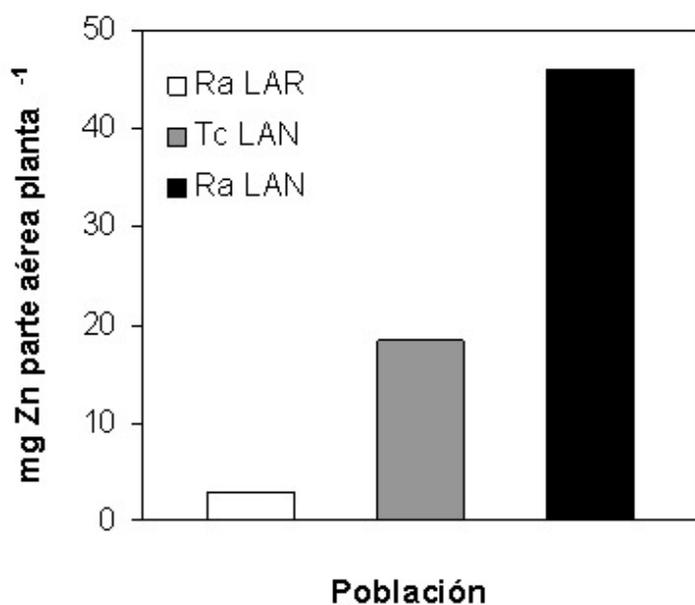


Figura 4. Tasa de fitoextracción de Zn de dos poblaciones de *R. acetosa* creciendo durante 5 meses y de *T. caerulescens* durante 4 meses en un suelo minero contaminado.

Conclusión

Nuestros resultados indican que existe un gran potencial de germoplasma en las escombreras mineras de nuestro país con posibilidad para ser utilizado en fitorremediación. En nuestro caso destacamos la presencia de *T. caerulescens* 'lanestosa' y de *R. acetosa* 'lanestosa'. La población LAN de *R. acetosa* procedente de una escombrera minera, fue muy tolerante a la contaminación metálica, acumuló concentraciones moderadas de Zn, y respondió bien a tratamientos de fertilización y otros sistemas de manejo de los cultivos, presentando un gran potencial para su utilización en la fitorremediación de suelos mineros contaminados con Zn y Pb.

Referencias

- Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J. M., Amezaga, I., Albizu, I., Garbisu, C. 2004. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead and arsenic. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technol.* 3: 71-90.
- Boyd, R. S., Martens, S.N. 1998. The significance of metal hyperaccumulation for biotic interactions. *Chemoecology* 8: 1-7.
- Brooks RR, ed., *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals*. Oxon, UK: CAB International.
- Johnson, M. S. , Cooke, A. y Stevenson, J.K. 1994. Revegetation of metalliferous wastes and land after metal mining. En *Mining and its environmental impact*. (eds Hester, R. E. y Harrison, R. M.) pp 31-48. Royal Soc Of Chemistry, Letchworth, UK.
- Poschenrieder, C. Tolrà, R. Barceló. 2006. Can metals defend plants against biotic stress? *Trends in Plant Science* 11: 288-295.
- Shaw, A. 1990. *Heavy metal tolerance in plants: evolutionary aspects*. CRC Press, Boca raton, Florida.
- Wong, M. H. 2003. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils. *Chemosphere* 50: 775-780.