

Distribución espacial de metales contaminantes procedentes de la minería

Spatial distribution of polluting metals from mining

M. González-Morales, I. Gago, J. Urbano, L. Fernández-Pozo & M.A. Rodríguez*

Grupo de investigación Análisis de Recursos Ambientales. Universidad de Extremadura. Avda. Elvas, s.n. 06071, Badajoz, España
(*E-mail: marodgon@unex.es)

<https://doi.org/10.19084/rca.28761>

RESUMEN

Las actividades extractivas de recursos metálicos generan gran cantidad de residuos que se acumulan en escombreras sólidas en las proximidades de la explotación. En este trabajo se ha estudiado la contaminación generada tras el abandono de la mina San Rafael, uno de los más de 60 yacimientos que fueron explotados en el entorno de Azuaga (Badajoz). Se estudiaron 320 ha alrededor de la mina, recogiendo 40 muestras de lodo y suelo a 30 cm de profundidad, tanto en los alrededores del pozo (foco principal de contaminación) como en la escombrera y zonas más alejadas. El contenido total de elementos tóxicos presentes se determinó mediante ICP-MS tras digestión ácida (HNO_3 y HCl). El estudio geoestadístico mediante krigeado marcó los niveles de contaminación existentes en toda la zona estudiada, deduciéndose que el entorno minero se encuentra altamente contaminado por elementos como Zn, Pb y Tl, al superar las concentraciones de los Niveles de Referencia Genéricos (NGR) establecidos para la salud de los ecosistemas (DOE, 2015; CCME, 2006). A la vista de estos resultados se aconseja acometer diferentes actuaciones que conduzcan a la minimización de dicha contaminación a fin de evitar la transferencia a la cadena trófica.

Palabras clave: Minería, Contaminación, metal(oídes), Krigeado

ABSTRACT

The extractive activities of metal resources generate a large amount of waste that accumulates in solid dumps in the vicinity of the operation. In this work, the contamination generated after the abandonment of the San Rafael mine, one of the more than 60 deposits that were exploited in the area of Azuaga (Badajoz), has been studied. 320 ha around the mine were studied, collecting 40 mud and soil samples at a depth of 30 cm, both in the surroundings of the well (main source of contamination) and in the dump and more distant areas. The total content of toxic elements present was determined by ICP-MS after acid digestion (HNO_3 and HCl). The geostatistical study using kriging marked the existing contamination levels throughout the studied area, deducing that the mining environment is highly contaminated by elements such as Zn, Pb and Tl, exceeding the concentrations of the Generic Reference Levels (NGR) established for ecosystem health (DOE, 2015; CCME, 2006). In view of these results, it is advisable to undertake different actions that lead to the minimization of said contamination in order to avoid transfer to the food chain.

Keywords: Mining, Pollution, metal(oídes), Kriging

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las minas explotadas en el siglo pasado dejaron, tras el cese de su actividad, acúmulos importantes de minerales metálicos expuestos a la intemperie y susceptibles de meteorización, lo cual influye de manera significativa en la salud del medio ambiente circundante.

El declive de la minería metálica en Extremadura desde 1940, ha ocasionado el abandono de muchas explotaciones mineras durante el siglo pasado. En la mayoría de los casos, los residuos no fueron gestionados adecuadamente tras el cese de las actividades extractivas, siendo acumulados en las proximidades de las explotaciones. Esto ha convertido estas zonas en lugares contaminados por metal(oídes) (Alloway, 1995). Los metales y metaloides se consideran problemáticos en términos de contaminación ambiental y toxicidad (Anjos *et al.*, 2012). Elementos como Pb, Cd, Hg o Sb pueden ser altamente tóxicos para los ecosistemas y para la salud humana (Alcalá *et al.*, 2009) incluso en concentraciones bajas (Li *et al.*, 2019).

La mina San Rafael es uno de los más de 60 yacimientos que fueron explotados en el entorno de Azuaga (Badajoz). Aunque los minerales explotados fueron sulfuros de plomo y cinc, se han encontrado concentraciones significativas de otros elementos potencialmente tóxicos, tales como Sb, As, Cr, Cu, Ni, Co y Tl, especialmente en las proximidades del pozo extractivo y las escombreras.

En este trabajo se ha determinado la distribución de Pb, Zn, Sb, As, Cr, Cu, Ni, Co y Tl, a lo largo de 320 ha alrededor de la mina abandonada San Rafael, utilizando el índice de geoacumulación Igeo (Müller, 1969).

El área de estudio es una zona agrícola, parcialmente deforestada, con grandes extensiones de encinar y otras especies arbustivas. Dado que la economía se basa en la agricultura y la ganadería, es probable que la contaminación alcance la cadena trófica, con las repercusiones que ello tendría sobre la salud. Por ello es importante conocer la distribución espacial de los contaminantes en toda la aureola de dispersión alrededor de la mina.

Se recogieron 40 muestras de lodo y suelo a 30 cm de profundidad, tanto en los alrededores del pozo (foco principal de contaminación) como en la escombrera y zonas más alejadas. El contenido total de elementos tóxicos presentes se determinó mediante ICP-MS tras digestión ácida (HNO₃ y HCl).

El estudio geoestadístico mediante krigado marcó los niveles de contaminación existentes en toda la zona estudiada, de los que se deduce que para metales como Zn, Pb y Tl, el entorno minero se encuentra altamente contaminado, pues sus concentraciones superan los Niveles de Referencia Genéricos (NGR) establecidos para la salud de los ecosistemas (DOE, 2015). A la vista de estos resultados se aconseja acometer diferentes actuaciones que conduzcan a la minimización de dicha contaminación a fin de evitar la transferencia a la cadena trófica.

MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio está ubicada en el complejo minero Azuaga-Berlanga, al SW de la Península Ibérica, abandonada desde mediados del siglo XX. Esta mina supone uno de los yacimientos de Pb-Zn más importantes del entorno.

El depósito está formado por filitas arenosas con intercalaciones de cuarcitas y grauvacas. Presenta mineralización hipoabisal asociada al Cámbrico Medio-Inferior, cuya paragénesis consiste en esferlerita (ZnS), galena (PbS), pirita (FeS₂) y calcopirita (CuFeS₂), así como minerales traza de potencial toxicidad (Cu o Tl) y ganga de cuarzo y calcita (Santos *et al.*, 2007).

Por la zona discurren dos arroyos estacionales que desembocan en el río Bembézar. La región tiene un clima mediterráneo con influencia atlántica, escasas precipitaciones (promedio de 514 mm/año) y marcadas variaciones térmicas entre invierno y verano (8°C y 26°C). Los inviernos son cortos, pero con heladas intensas. Las temperaturas de primavera y otoño son suaves.

Se recogieron 40 muestras a 30 cm de profundidad, 2 muestras de residuos minerales en los alrededores del pozo de extracción, 5 de lodos en la escombrera y las 33 restantes fueron muestras de suelos

en zonas más alejadas del foco principal de contaminación (pozo extractivo), denominadas zona 1, zona 2 y zona 3 (Figura 1). El muestreo se realizó de manera semidirigida, en función de la ubicación de la vegetación presente. Los suelos dominantes son Regosoles eútricos. Previo a la cuantificación de los metal(oides), las muestras fueron secadas a temperatura ambiente, molidas y tamizadas a 0,25 mm.

El contenido total de elementos tóxicos presentes se determinó por ICP-MS utilizando un sistema Agilent Tech modelo 7900. Para ello, las muestras fueron sometidas a digestión ácida (HNO₃ y HCl) utilizando una relación suelo:extractante de 1:10 (m:v).

Utilizando la escala cualitativa que determina el índice de geoacumulación (I_{geo}), se calcularon los intervalos para los cuales el suelo se considera contaminado. Se utilizó la escala de Müller (1969) según la ecuación:

Donde C_n : concentración del metal n en el suelo y B_n : fondo geoquímico para el metal(oides) encontrados en la corteza terrestre.

Según los valores medidos de I_{geo} , los suelos se clasifican como: No contaminados ($I_{geo} \leq 0$), No contaminados a moderadamente contaminados ($0 \leq I_{geo} \leq 1$), Moderadamente contaminados ($1 \leq I_{geo} \leq 2$), Moderado a fuertemente contaminados ($2 \leq I_{geo} \leq 3$), Fuertemente contaminados ($3 \leq I_{geo} \leq 4$), Fuerte a extremadamente contaminado ($4 \leq I_{geo} \leq 5$), Extremadamente contaminados ($I_{geo} \geq 5$),

A partir de los datos de I_{geo} , la distribución espacial de la contaminación se modeló utilizando el software ArcGIS (2019). Se construyó un semivariograma de los datos, seguido de kriging ordinario (Goovaerts, 1997; Gallardo *et al.*, 2000). Los mapas se construyeron utilizando ArcMap v. 10.7.1 (ESRI, 2019).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se representa la distribución de la contaminación para todos los metales estudiados en el área minera objeto de estudio, a partir de los

datos recogidos en la Tabla 1, donde se muestran también los valores genéricos de referencia para suelos de Extremadura (NGR). Se observa que la contaminación por Co, Cu, Ni y As no es significativa, ni siquiera en las zonas más próximas al foco de contaminación (pozo extracción y escombreras). La presencia de algunos de estos elementos puede deberse al uso de fertilizantes o abonos de origen animal (Smith & Bradshaw, 1996) utilizados en las labores agrícolas del entorno.

| Elemento | Concentración (mg/kg) | | | | | |
|----------|-----------------------|------------|--------|--------|--------|-----------------|
| | Pozo | Escombrera | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | NGR ecosistemas |
| Pb | 11740 | 322 | 5875 | 390 | 1903 | 48 |
| Zn | 12853 | 1869 | 4570 | 781 | 782 | 281 |
| Sb | 27 | 10 | 22 | 2 | 2 | 1 |
| As | 11 | 4 | 14 | 31 | 32 | 61 |
| Cr | 38 | 426 | 190 | 240 | 141 | 95 |
| Tl | 177 | 93 | 276 | 258 | 374 | 1 |
| Co | 20 | 17 | 33 | 33 | 33 | 33 |
| Cu | 94 | 12 | 78 | 59 | 53 | 67 |
| Ni | 28 | 230 | 112 | 124 | 92 | 56 |

Tabla 1 - Concentración de metal(oides) en el área minera estudiada

El Sb es un elemento habitual en depósitos minerales de Pb-Zn, y aunque el contenido en Sb encontrado es relativamente bajo, el grado de contaminación I_{geo} muestra contaminación de moderada a alta en los alrededores de la escombrera, especialmente hacia el NE, seguramente arrastrado por lixiviación hacia un arroyo estacional que se encuentra en dicha localización.

La contaminación por Pb-Zn se extiende más allá del principal foco de contaminación (pozo extractivo), alcanzando zonas adyacentes (zona 3) donde se llevan a cabo actividades agropastoriles y cinegéticas. El origen de esta contaminación es claramente geológico, dada la mineralización de esta mina (sulfuros metálicos de Pb y Zn).

El área de estudio se muestra extremadamente contaminada por talio. A pesar de que este metal es altamente tóxico, se encuentra retenido en las arcillas y materia orgánica de estos suelos, lo que dificulta su movilidad y lixiviación por escorrentías

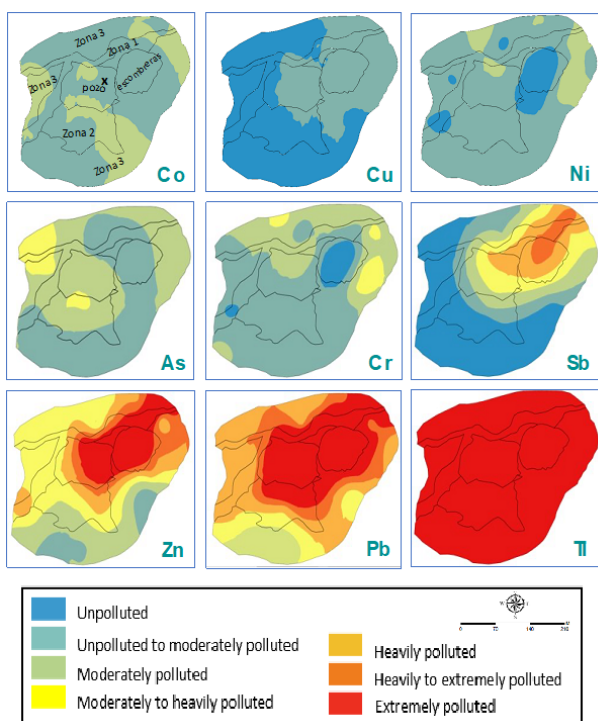


Figura 1 - Distribución espacial de los contaminantes metálicos según Igeo.

pluviales. El origen de la contaminación por talio no es geológico, atribuyéndose a una contaminación difusa procedente de una central eléctrica

próxima a la zona que ha trabajado hasta hace unos pocos años (Vaněk *et al.*, 2016).

A la vista de estos resultados, se puede afirmar que el abandono sin control de actividades extractivas provoca contaminación del entorno, pudiendo verse acentuada por las características edafoambientales del territorio y las aguas de lluvia. Esta situación conduce a la degradación de la salud de los suelos y, por lo tanto, impacta negativamente en sus servicios ecosistémicos.

CONCLUSIONES

Los contenidos de metales pesados en el área minera superan los niveles de toxicidad permitidos para suelos de Extremadura (NGRs), alcanzándose cantidades especialmente elevadas para Pb, Zn y Tl. Sería aconsejable implementar programas de manejo/(fito)remediación que eviten el paso de la contaminación a la cadena trófica y garanticen la seguridad tanto del ecosistema como de la salud humana.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha contado con el apoyo de la Junta de Extremadura/FEDER, a través del proyecto IB18074.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcalá, J.; Sosa, M.; Moreno, M.; Rodríguez, J.; Quintana, C.; Terrazas, C. & Rivero, O. (2009) - Metales pesados en suelo urbano como un indicador de la calidad ambiental: ciudad de Chihuahua, México. *Multequina*, vol. 18, p. 53-59.
- Alloway, B.J. (1995) - *Heavy Metals in Soils*. London: Blackie Academic and Professional, Chapman and Hall.
- Anjos, C.; Magalhães, M.C. & Abreu, M.M. (2012) - Metal (Al, Mn, Pb and Zn) soils extractable reagents for available fraction assessment: Comparison using plants, and dry and moist soils from the Braçal abandoned lead mine area, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 113, p. 45-55. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.07.004>
- DOE (2015) - Decreto 49/2015, de 30 de marzo, por el que se regula el régimen jurídico de los suelos contaminados en la Comunidad Autónoma de Extremadura. *Diario Oficial de Extremadura (DOE)*, de 06 de abril de 2015, núm. 64.
- ESRI (2019) - *Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales*. [cit. 2020.02.12] <https://www.esri.es/es-es/home>
- Gallardo, A.; Rodríguez-Saucedo, J.; Covelo, F. & Fernández-Alés, R. (2000) - Soil nitrogen heterogeneity in a Dehesa ecosystem. *Plant and Soil*, vol. 222, p. 71-82. <https://doi.org/10.1023/A:1004725927358>
- Goovaerts, P. (1997) - *Geostatistics for natural resources evaluation*. United States, New York: Oxford University Press.
- Li, C.; Zhou, K.; Qin, W.; Tian, C.; Qi, M.; Yan, X.; et al. (2019) - A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, vol. 28, n. 4, p. 380-394. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1592108>
- Muller, G. (1969) - Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River. *GeoJournal*, vol. 2, p. 109-118.
- Smith, R. & Bradshaw, A. (1996) - The Use of Metal Tolerant Plant Populations for the Reclamation of Metalliferous Wastes. *Journal of Applied Ecology*, vol. 16, n. 2, p. 595-612. <https://doi.org/10.2307/2402534>
- Vaněk, A.; Grösslová, Z.; Mihaljevič, M.; Trubač, J.; Ettlér, V.; Teper, L.; Cabala, J.; Rohovec, J.; Zádorová, T.; Penížek, V.; Pavlů, L.; Holubík, O.; Němeček, K.; Houška, J.; Drábek, O. & Ash, C. (2016) - Isotopic tracing of thallium contamination in soils affected by emissions from coal-fired power plants. *Environmental Science and Technology*, vol. 50, p. 9864-9871. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01751>