



XII CONGRESO NACIONAL Y XI IBÉRICO DE GEOQUÍMICA  
Investigar los recursos cuidando el ambiente

# PROPUESTA DE UN MODELO DE MINERÍA CIRCULAR A PARTIR DE DATOS HIDROGEOQUÍMICOS ASOCIADOS A ESCOMBRERAS DE LA FAJA PIRÍTICA IBÉRICA (SW ESPAÑA)

Grande José Antonio<sup>a</sup>, Santisteban, María<sup>a</sup>, de la Torre, María Luisa<sup>a</sup>, Valente, Teresa<sup>b</sup>, de Miguel Eduardo<sup>c</sup>, Barrio-Parra, Fernando<sup>c</sup>, Izquierdo, Miguel<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad de Huelva. Campus La Rábida. Ctra. Palos de la Frontera s/n. 21819. Palos de la Frontera. Huelva. Email: [grangil@uhu.es](mailto:grangil@uhu.es)

<sup>b</sup> Institute of Earth Sciences, Pole of the University of Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal.

<sup>c</sup> Laboratorio de Investigación e Ingeniería Geoquímica Ambiental (LI2GA). Universidad politécnica de Madrid. c/ Alenza 4. 28003. Madrid.

## RESUMEN

El agua es uno de los receptores más afectados por los impactos causados, especialmente en el caso de la minería de sulfuros y, en menor medida, del carbón. El drenaje de las minas de ácido (A.M.D.) es el principal problema asociado a estas operaciones mineras, produciendo impactos ambientales extremadamente altos, y en muchos casos irreversibles, hasta ahora. Un nuevo concepto de minería puede hacer que esta actividad sea compatible con la preservación ambiental y también con la recuperación del medio ambiente afectado por las antiguas operaciones mineras. Este nuevo concepto implica el paradigma de la Minería Circular como derivado del concepto de Economía Circular, considerado como una estrategia que pretende

reducir tanto la entrada de materiales como la producción de residuos virgen, cerrando los "bucles" o flujos económicos y ecológicos de los recursos. El presente trabajo discute el paradigma de la minería circular, enfocado la Faja Pirítica Ibérica, una de las regiones metalogénicas más paradigmáticas del mundo. Basados en algunos ejemplos, los cálculos muestran la posibilidad de recuperar metales básicos, así como elementos estratégicos del drenaje ácido de la mina, obteniendo importantes activos económicos.

Palabras clave: Drenaje ácido de mina, Faja Pirítica Ibérica, Metales, Minería Circular, Economía Circular.

## ABSTRACT

Water is one of the receptors most affected by the impacts caused, especially in the case of mining sulphides and, in a lesser extent, of coal. Acid Mine Drainage (A.M.D.) is the main problem associated with these mining operations, producing extremely high impacts, and in many cases irreversible until now. A new concept of mining can make this activity compatible with the environmental preservation and also to the recovery of the environment affected by the old operations in the process of reopening. This new concept implicates the paradigm of Circular Mining as derivative of the concept of Circular Economy, considered as a strategy that aims to reduce both the entry of materials and the

production of virgin waste, closing the "loops" or economic and ecological flows of resources. The present work discusses the paradigm of circular Mining, focused on the Iberian Pyrite Belt, one of the most paradigmatic metallogenetic regions in the world. Based on some examples, expeditious calculations show the possibility of recovering base metals as well as strategic elements from acid mine drainage, obtaining important economic assets.

## 1. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los receptores más afectados por los impactos provocados por la minería de sulfuros y en menor medida de carbón. El Drenaje Acido de Mina (A.M.D.) es el principal problema asociado a estas explotaciones mineras al provocar afecciones

extraordinariamente altas y en muchos casos hasta ahora irreversibles que degradan miles de kilómetros de ríos, embalses y estuarios.

El A.M.D. es un problema global que afecta a los 5 continentes, siendo el SW de Europa uno de los sectores más afectados del

## SESIÓN 2. HIDROGEOQUÍMICA Y GEOQUÍMICA

Propuesta de un modelo de minería circular a partir de datos hidrogeoquímicos asociados a escombreras de la Faja Pirítica Ibérica (SW España)

TABLA.1. SUMARIO ESTADÍSTICO DE VARIABLES ANALIZADAS EN EL RÍO TINTO (GRANDE ET AL., 2010).

	Mean	Mínimum	Máximum
pH	2,30	1,70	3,00
Conductivity (mS/cm)	9,67	3,40	12,57
Temperature (°C)	12,40	6,00	20,00
Redox (mV)	466,03	419,00	513,00
Cd (µg/L)	1157,61	183,20	2386,00
Cu (mg/L)	236,53	49,99	625,10
Fe (mg/L)	1348,42	290,00	3042,00
Zn (mg/L)	248,18	43,76	604,16
Mn (mg/L)	95,26	10,08	235,00
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	7800,94	55,00	15100,00
As (mg/L)	1877,03	134,60	42,59
Rainfall (mm/h)	2,36	0,00	64,80

planeta como consecuencia de una dilatada historia minera con más de 4500 años de actividad desarrollada sin medidas de prevención ni control de la contaminación hídrica. El resultado final observable hoy, tan solo en la Faja Pirítica Ibérica (SW Spain) (Figura 1) es un legado de más de 4000 ha de superficies afectadas por la minería histórica y no restauradas, que se traducen en la aparición de miles de kilómetros de cauces que presentan unos

niveles de contaminación extraordinariamente elevados (Tabla 1). Mean Minimum Máximum pH 2,30 1,70 3,00 Conductivity (mS/cm) 9,67 3,40 12,57 Temperature (°C) 12,40 6,00 20,00 Redox (mV) 466,03 419,00 513,00 Cd (µg/L) 1157,61 183,20 2386,00 Cu (mg/L) 236,53 49,99 625,10 Fe (mg/L) 1348,42 290,00 3042,00 Zn (mg/L) 248,18 43,76 604,16 Mn (mg/L) 95,26 10,08 235,00 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L) 7800,94 55,00 15100,00 As (mg/L) 1877,03 134,60 42,59 Rainfall (mm/h) 2,36 0,00 64,80

Tabla.1. Sumario estadístico de variables analizadas en el Río Tinto (Grande et al., 2010).

Hasta el momento, las administraciones y organismos responsables de la gestión del territorio en Europa no han sido capaces de dar solución a este problema, ya que una vez contaminada el agua, los tratamientos de descontaminación son muy costosos económicamente o no alcanzan unos resultados estándares de calidad hídrica deseable, prueba de ello son los valores relativos a la hidroquímica actual de estos cauces recogidos en la abundante literatura científica.

El desarrollo socioeconómico y los avances tecnológicos provocan una demanda creciente de materias primas necesarias para la fabricación de útiles, herramientas y elementos de confort indispensables para la creación de escenarios que proporcionan una vida cada vez más cómoda para el ser humano. La base de las cadenas de producción de estos materiales necesarios para el desarrollo es la minería, que por otra parte, provoca en muchos casos severas afecciones al medio ambiente en el caso de explotacio-

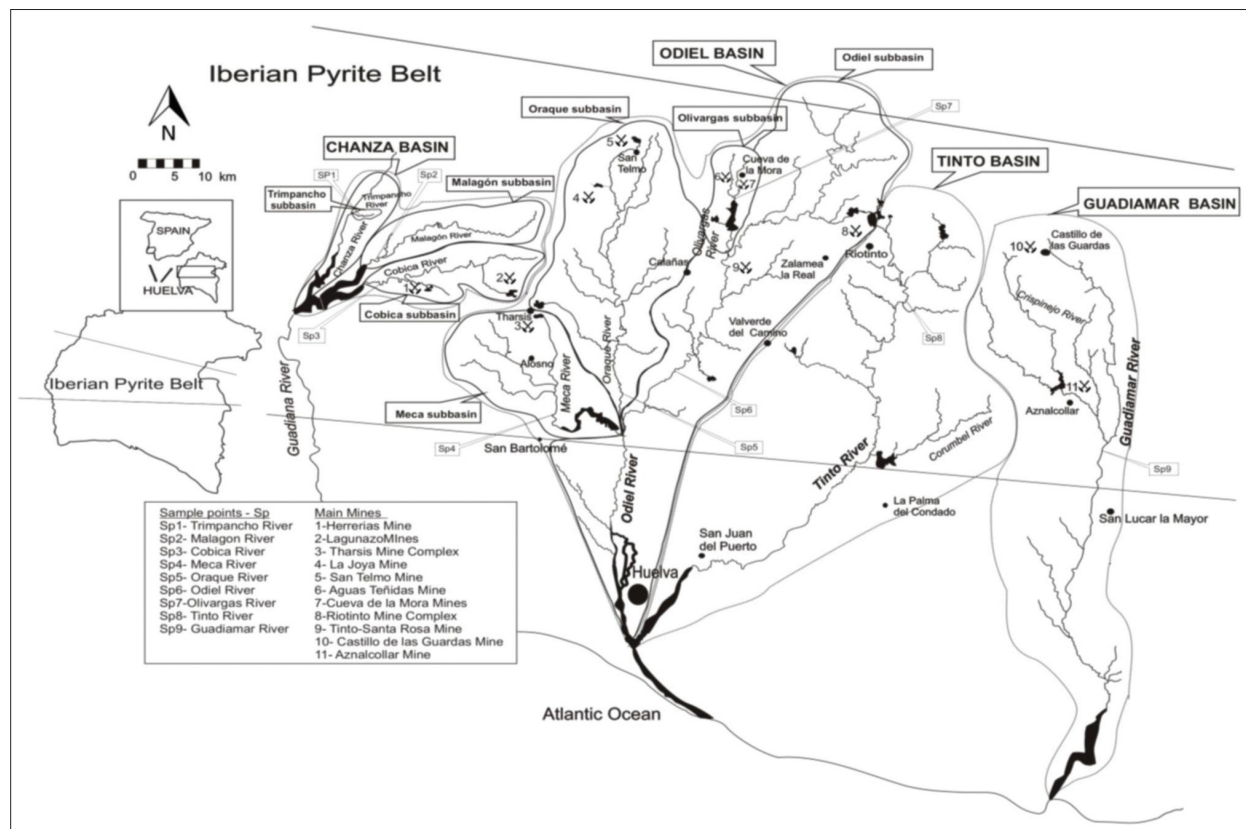
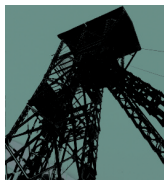


Figura 1. Mapa de localización.



## XII CONGRESO NACIONAL Y XI IBÉRICO DE GEOQUÍMICA

Investigar los recursos cuidando el ambiente

nes mineras que no se ajusten a las normativas ambientales. La generación de residuos mineros es el principal vector de producción de impactos, generando en ocasiones gigantescos pasivos ambientales.

Una nueva concepción de la minería puede llevarnos a hacer compatible esta actividad con la preservación ambiental de los espacios mineros en fase de apertura o de explotación (ya sometidos a las normativas reguladoras de la actividad que obligan a las empresas a una actividad de "vertido contaminante cero") y también a la recuperación del medio afectado por antiguas explotaciones en fase de reapertura. Esta nueva concepción nos conduce al paradigma de la Minería Circular como alternativa que cumpla con el trinomio regulador de la posibilidad de desarrollo, por el cual una explotación minera debe ser: 1). Técnicamente viable, 2). Económicamente rentable, 3). Ambientalmente sostenible.

La Minería Circular, concepto que aquí introducimos, no es más que una derivada del concepto de economía circular (Circular Economy, CE) considerada como una estrategia que tiene por objetivo reducir tanto la entrada de los materiales como la producción de desechos vírgenes, cerrando los «bucles» o flujos económicos y ecológicos de los recursos. El término "economía circular" se utilizó por primera vez en la literatura occidental a finales del S-XX, (Pearce y Turner, 1990) para describir un sistema cerrado de las interacciones entre economía y medio ambiente. La economía circular es parte del estudio de retroalimentación de sistemas no lineales, sistemas vivos. Un resultado importante de este es la idea de optimizar sistemas más que componentes, o la idea de 'diseño a medida'.

### 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se propone un cálculo sencillo de aproximación a los valores de potencial de recuperación de cauces afectados por AMD en forma de beneficios económicos brutos para la totalidad de las cuencas afectadas en la FPI.

Los ríos Tinto y Odiel transportan entre ambos la mayor parte de los contaminantes producidos por AMD en la Iberian Pyrite Belt. Éstos atraviesan de Norte a Sur la Faja Pirítica Ibérica y desembocan en el Océano Atlántico formando un estuario conocido como La Ría de Huelva. El río Odiel, con 140 km de longitud, posee una cuenca vertiente de 2300 km<sup>2</sup> y un caudal medio anual de 460 hm<sup>3</sup>/año (Sáinz et al., 2003). El río Tinto, con una longitud mucho menor, no llega a superar los 100 km de longitud y su cuenca vertiente apenas supera los 720 km<sup>2</sup>, mientras su caudal medio se estima en 90 hm<sup>3</sup>/año. Las aguas de estops río descienden con valores de pH medio inferior a 2,5, hasta la zona de influencia mareal con una enorme carga metálica disuelta (de la Torre, 2013). En un solo día el río Odiel transporta más metales pesados a la plataforma Atlántica que el total de los vertidos por el desastre de Aznalcollar (Sáinz et al., 2003).

Para una aproximación al conocimiento del potencial económico derivado de la recuperación de los elementos presentes en las cuencas de los ríos Tinto y Odiel, se toman como base los datos publicados por Grande en 2016, donde se recoge con detalle la superficie afectada por la presencia de escombreras en la F.P.I.,

más de 3000 ha, consideradas éstas como principal foco productor de AMD en minería de sulfuros en la gran provincia metalogénica.

En este contexto, consideramos unos aportes pluviométricos medios para todas las cuencas en estudio de 650 mm/año. Es un valor medio aproximado del que cabe decir que existen numerosos estudios en detalle a nivel de subcuencas (de la Torre et al., 2016; Grande et al., 2015; Santisteban et al., 2016). Se trata en todo caso de una región con un claro balance hídrico negativo, al llegar las tasas de ETP a valores cercanos a los 900 mm/año (Jiménez, 2009) y un coeficiente de infiltración prácticamente nulo, al discurrir ambos cauces hasta su desembocadura por terrenos impermeables.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se propone, a modo de ejemplo, inicialmente el cálculo de beneficios económicos brutos para un pequeño caudal de 10 litros/segundo que podríamos tratar de forma constante a partir de cualquier balsa de aguas de proceso de las que encontramos en las explotaciones mineras.

- Concentración media Cu Tinto River (medio generador) 326 mg/L
- Precio Cu 5611USD/T
- Para un caudal "tipo" de 10 litros/segundo se transportan 0.28 T/día de Cu.
  - Valor de mercado actual del Cu recuperable
  - 0.28T/día x 5611 Euros/T = 1571 USD/día
  - 47132 dolares/mes = 565588 USD/año

Proponemos en segundo caso, para la Faja Pirítica Ibérica, mediante el cálculo de aportes totales de algunos metales base y otros elementos estratégicos presentes (Tablas 2 y 3). En base exclusivamente a los metales base estudiados, se podrían recuperar activos económicos cercanos a 60 M.USD, a lo que hemos de sumar otros elementos de interés estratégico actual que, aun estando en pequeñas concentraciones como material disuelto en los cauces afectados por AMD representan un activo importante por su alto valor de mercado. Algunos de ellos no cotizan en la bolsa de los metales, por lo que los precios se rigen por cotizaciones privadas.

### 4. CONCLUSIONES

- La presencia de miles de ha de escombreras en la Faja Pirítica Ibérica constituye el principal foco contaminante de la red fluvial, esto es consecuencia de una historia minera dilatada e intensa anterior a la entrada en vigor de Normativas Reguladoras.
- No se trata de un hecho aislado, sino que este problema afecta a los cinco continentes en áreas donde la minería de sulfuros y carbón se ha desarrollado sin medidas preventivas ni correctoras.
- Resulta evidente la necesidad de conservación y recuperación del medio hídrico afectado al constituir un recurso cada vez más valioso y escaso.

## SESIÓN 2. HIDROGEOQUÍMICA Y GEOQUÍMICA

Propuesta de un modelo de minería circular a partir de datos hidrogeoquímicos asociados a escombreras de la Faja Pirítica Ibérica (SW España)

**TABLA 2. CÁLCULO DE APORTES TOTALES DE ALGUNOS METALES BASE**

Escombrera (m <sup>2</sup> )	Precipitación (L/m <sup>2</sup> año)	Flujo total afectado por AMD (m <sup>3</sup> /año)	Elemento	Concentración (mg/L)	Contribuciones de este elemento (T/año)	Precio (USD/T)	Valor recuperable anual (USD)
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	Cu	325	6378	5611	35,786,958
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	Zn	248	4884	2600	12,698,400
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	Al	189	3722	1928	7,176,016
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	Mn	96	1890	1940	3,666,660
Valor recuperable anual (USD)							59,328,034

**TABLA 3. CÁLCULO DE APORTES TOTALES DE OTROS ELEMENTOS DE INTERÉS**

Escombrera (m <sup>2</sup> )	Precipitación (L/m <sup>2</sup> año)	Flujo total afectado por AMD (m <sup>3</sup> /año)	Elemento	Concentración (mg/L)	Contribuciones de este elemento (T/año)	Precio (USD/T)	Valor recuperable anual (USD)
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	In	0,67x10 <sup>-6</sup>	13,2	5429	34,626,162
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	La	2,446 x10 <sup>-6</sup>	48,17	7000	337,217
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	Sc	0,09 x10 <sup>-6</sup>	1,77	213	377
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	Y	0,180 x10 <sup>-6</sup>	3,55	53000	187,890
3030 x 10 <sup>4</sup>	650	1969500	Ce	0,060 x10 <sup>-6</sup>	1,18	8000	9,453
Valor recuperable anual (USD)							35,161,101

- Se constata la presencia en las escombreras de “sustancias” de interés económico en el marco socioeconómico actual y al amparo de tecnologías que actualmente deben reorientarse a hacer compatible la recuperación del medio hídrico de manera sostenible y con resultados financieros positivos. Entendemos prioritaria la necesidad de buscar una solución al problema AMD que sea exportable a cualquier escenario afectado.
- La demanda de Cu y otros metales base desde países emergentes, unido al alto valor de mercado de otras sustancias presentes en las escombreras justifican inversiones en esta dirección. Tan sólo para la F.P.I., nos acercamos a una cifra próxima a los 100 Millones USD de elementos recuperables sin actividad extractiva, tan sólo desde la óptica de la Minería Circular aplicada a los residuos presentes.
- Grande, J.A., Andújar, J.M., Aroba, J., de la Torre, M.L. (2010). Presence of As in the fluvial network due to AMD processes in the Riotinto mining area (SW Spain): A fuzzy logic qualitative model. *Journal of Hazardous Materials*, 176 (1-3), 395-401.
- Jiménez, A., Aroba, J., de la Torre, M.L., Andújar, J.M., Grande, J.A. (2009). Model of behaviour of conductivity versus pH in acid mine drainage water, based on fuzzy logic and data mining techniques. *Journal of Hydroinformatics*, 11 (2), 147-153.
- Pearce, D.W. y Turner, R.K. (1990): *Economics of Natural Resources and the Environment*. Johns Hopkins Press, Baltimore.
- Sáinz A., Grande J.A., de la Torre M.L. (2003) Odiel river, acid mine drainage and current characterisation by means of univariate analysis. *Environment International*. 29, 51-59.
- Santisteban, M., Grande, J.A., De La Torre, M.L., Valente, T., Perez-Ostalé, E., Garcia-Pérez, M (2016) Study of the transit and attenuation of pollutants in a water reservoir receiving acid mine drainage in the Iberian pyrite belt (SW Spain). *Water Science and Technology*. doi: 10.2166/ws.2015.122.

### 7. BIBLIOGRAFÍA

- de la Torre M.L., Grande J.A., Valente T., Santisteban M., Pérez-Ostalé, Aroba J. (2016). Statistical determination of the transit speed of pollutants in a water reservoir affected by acid mine drainage of the Iberian Pyrite Belt. *Mine Water and the Environment*, DOI:10.1007/s10230-016-0390-8.
- de la Torre, M.L., Grande, J.A., Santisteban, M., Valente, T., Borrego, J., Salguero, F. (2013). Statistical Contrast Analysis of Hydrochemical Parameters Upstream of the Tidal Influence in Two AMD-Affected Rivers. *Mine Water and the Environment*. DOI 10.1007/s10230-013-0258-0.
- Grande J.A., de la Torre M.L., Santisteban M., Valente T., Fernández J., Pérez-Ostalé E. (2015). Spatial evolution of an AMD stream in the Iberian Pyrite Belt: process characterization and control factors on the hydrochemistry. *Hydrological Science Journal*. DOI: 10.1080/02626667.2014.983515.