

Las actividades minero-metalúrgicas a gran escala que se han desarrollado en la Faja Pirítica Ibérica desde mediados del siglo XIX han dejado un territorio muy degradado, con innumerables escombreras y labores mineras abandonadas que producen un fuerte impacto paisajístico, y aún continúan generando aguas ácidas, sulfatadas, cargadas con metales pesados. Los drenajes ácidos de las minas contaminan los suelos circundantes y, finalmente, son descargados en el cauce de los ríos Tinto y Odiel. El enorme déficit ambiental de la región requiere la ejecución de proyectos que traten de recuperar el medio físico hasta niveles admisibles, conservando los restos materiales de una minería y metalurgia milenarias.

The large-scale mining and smelting activities developed in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain), particularly since the middle of the 19th century, have left a legacy of huge quantities of mine wastes that cause landscape impact and serious environmental damage. Most of the mine sites are found in the catchment area of the Odiel-Tinto fluvial system, which receive the acid, sulfate and metal waters emanating from the mine works. Contamination arising from acid mine drainage not only affects the water quality but also cause soil degradation and environmental hazards. Remediation of the abandoned mine sites should be of major concern to environmental authorities, requiring investment of large financial and human resources.

Una Aproximación al Conocimiento del Impacto Ambiental de la Minería en la Faja Pirítica Ibérica

/ JUAN CARLOS FERNÁNDEZ CALIANI

Departamento de Geología. Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva. Campus de El Carmen s/n. 21071 – Huelva

INTRODUCCIÓN

La Faja Pirítica Ibérica es una de las provincias metalogénicas más importantes del mundo, pero no sólo por el volumen de sus depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos sino también por la historia de su minería. Las reservas totales se han estimado en unos 1700 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente el 20% ya se ha explotado, y entre el 10 y el 15% se ha desmantelado por la erosión (Barriga & Carvalho, 1997).

Las primeras evidencias arqueometalúrgicas de actividad minera se remontan al comienzo de la Edad de los Metales (e.g. Blanco & Rothenberg, 1981; Pérez Macías, 1998), aunque los períodos de máximo esplendor coincidieron con la época de la dominación romana (ss. I y II d.C.), y sobre todo con el tránsito del siglo XIX al XX, al compás de la segunda revolución industrial europea. Por consiguiente, es fácil comprender que el desarrollo económico y sociocultural de esta zona del suroeste peninsular ha dependido históricamente de la minería, si bien a cambio de soportar una degradación prácticamente irreversible

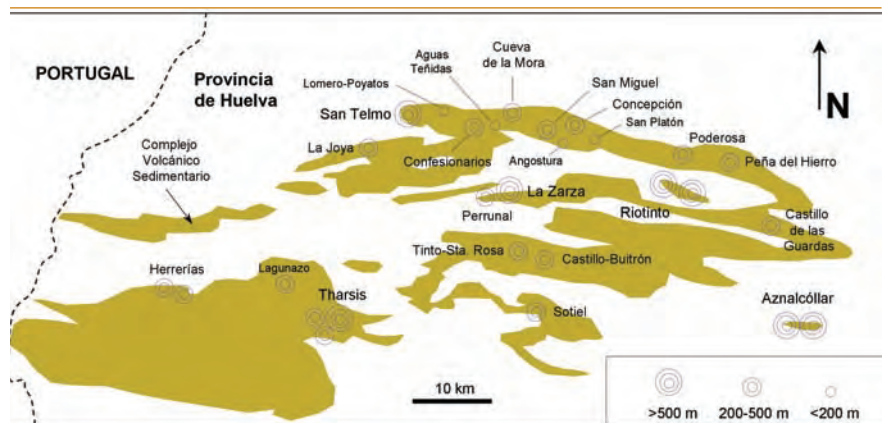


fig 1. Localización de las principales explotaciones a cielo abierto de la Faja Pirítica en su parte española, con indicación del diámetro de las cortas

de su medio natural.

En particular, Riotinto y su entorno fue uno de los focos mineros y metalúrgicos más importantes del mundo antiguo (Salkield, 1987; Flores Caballero, 1981a). La frenética actividad minera desarrollada en las minas de Riotinto desde mediados del siglo XIX hasta finales del XX, ha tenido una incidencia devastadora sobre el medio ambiente (Fernández-Caliani & Galán, 1996; Van Geen et al. 1997), debido a la explotación intensiva e indiscriminada de los

recursos minerales, especialmente entre 1873 y 1954, cuando las minas fueron adquiridas en propiedad por la compañía inglesa Río Tinto Company Ltd. (Avery, 1974; Flores Caballero, 1981b). Los ingleses pusieron los recursos financieros, los medios técnicos y las relaciones exteriores para elevar las piritas de Huelva a una posición hegemónica en los mercados internacionales, desarrollando una minería típicamente colonial que más tarde daría paso a un modelo de producción sujeto a los efectos de la globalización económica (Ferrero, 2000).

palabras clave: minería, impacto ambiental, drenaje ácido de minas, degradación de suelos, Faja Pirítica Ibérica.

key words: mining, environmental impact, acid mine drainage, soil degradation, Iberian Pyrite Belt.

Aunque Riotinto es el distrito minero más conocido de la Faja Pirítica (Fig. 1), existen más de 60 minas que operaron en algún período del siglo pasado (Pinedo Vara, 1963; IGME, 1982), y actualmente se encuentran abandonadas debido a la crisis estructural de la pirita como materia prima para fabricar ácido sulfúrico, y al declive de las leyes y cotizaciones de los metales básicos, entre otras razones de índole económica y ambiental. La explotación y clausura de las minas tuvo lugar antes de la entrada en vigor del RDL 1302/1986, que obliga legalmente a las empresas mineras a desarrollar un plan de restauración ambiental que integre el espacio afectado en el medio natural. En consecuencia, las minas fueron cerradas sin adoptar medidas correctivas para atenuar los impactos ambientales, cuyos posibles efectos adversos para la salud humana y los ecosistemas se prolongan hasta la actualidad.

No obstante, en los últimos años se vislumbra un cierto renacimiento de una actividad minera más sostenible, con la ejecución de proyectos como Aguas Teñidas y Las Cruces (Carrasco, 2004; Ovejero, 2004), diseñados con criterios técnicos y económicos que contemplan también la dimensión ambiental en sus estudios de viabilidad. Al mismo tiempo, desde diferentes administraciones públicas de la comunidad andaluza, se han promovido algunos proyectos de rehabilitación y protección ambiental (Serrano et al. 1995), y diversas actuaciones para la revalorización del patrimonio geominero e industrial (Alguacil et al. 2007; Pérez López & Romero Macías, 2008).

Con este artículo se pretende realizar una aproximación sintética al conocimiento general de los principales impactos ambientales que han producido las actividades mineras y metalúrgicas, poniendo especial énfasis en la transformación del paisaje, el drenaje ácido de minas y la degradación de los suelos, sin olvidar la impronta socioeconómica y cultural que ha dejado la minería en el devenir histórico de las comarcas mineras de la Faja Pirítica.

LA TRANSFORMACIÓN DEL PAISAJE

De acuerdo con las características geomorfológicas y bioclimáticas de la región, el paisaje original debió estar dominado por un suave relieve alomado, de media altitud, cubierto por vegetación autóctona de bosque mediterráneo. Según el volumen de escorias romanas y prerromanas halladas en el

entorno de Riotinto, estimado en 6,6 millones de toneladas (Rothenberg et al. 1990), la deforestación del territorio fue, probablemente, una de las principales consecuencias ambientales de la minería antigua, debido a la tala masiva de grandes extensiones de encinas y alcornoques, ya que el carbón de leña era el único combustible disponible para alimentar los hornos de fundición.

En cambio, el relieve no se transformó significativamente hasta finales del siglo XIX, con el desarrollo de la minería a cielo abierto. Con anterioridad, las minas se explotaron casi exclusivamente por minería subterránea, mediante pozos y galerías que no alteraban las formas del relieve. No obstante, los procesos metalúrgicos empleados, especialmente las calcinaciones efectuadas al aire libre para beneficiar el cobre contenido en los sulfuros generó un gran volumen de cenizas de tostación que fueron abandonadas en extensos terrenos (Fig. 2). Además, los procesos de calcinación, que emitían diariamente a la atmósfera hasta 600 toneladas de gases sulfurosos y arsenicales, contribuyeron a la desertización de las comarcas mineras debido a los efectos de la lluvia ácida (Pérez López, 1994).



fig 2. Antigua plaza de calcinación, donde aún se conservan algunos montones de pirita tostada al aire libre y restos de los canales de cementación.

Los impactos paisajísticos más severos se producen en el último tercio del siglo XIX, con la llegada de compañías mineras extranjeras que disponían del capital y la maquinaria pesada necesaria para la excavación de profundas cortas con numerosos bancos de explotación. La Corta Atalaya, cuya apertura se inició en 1907, con el paso del tiempo llegó a convertirse en la mina a cielo abierto más grande de Europa, con 1200 m de diámetro mayor y 350 m de profundidad (Fig. 3). Al mismo tiempo que se excavaban las cortas para acceder a las masas de pirita, se iban generando cantidades colosales de materiales estériles que eran apilados, junto con las escorias de fundición, en voluminosas escombreras con abruptas pendientes y formas geométricas que desfiguran la línea de horizonte (Fig. 4). De otro lado, los tratamientos hidrome-

talúrgicos aplicados motivaron la construcción de numerosas balsas o diques de decantación, lixiviación y canales cementación. Según el inventario nacional de balsas y escombreras del IGME (en Sánchez-España et al. 2005), sólo en la provincia de Huelva existen 57 escombreras con un volumen total de 107 Hm³ de residuos mineros, si bien otras estimaciones elevan el volumen hasta 133 Hm³ (ATP, 1988). En cualquier caso, se trata de una de las acumulaciones de residuos piríticos más importantes del mundo.



fig 3. Vista aérea de la Corta Atalaya, Minas de Riotinto (Foto Airplus, cortesía de E. Romero).



fig 4. Escombreras de materiales estériles procedentes de la explotación Cerro Colorado, Minas de Riotinto.

Otro rasgo singular del paisaje minero que se iba configurando era su extraordinario dinamismo, puesto que el progresivo agotamiento de los yacimientos requería la explotación de nuevas áreas mineralizadas, provocando así una constante modificación de los componentes y elementos visuales del paisaje. La reordenación del territorio en función de los intereses de la minería llegó hasta al extremo de reubicar algunos núcleos de población, como Riotinto, dado que su emplazamiento original dificultaba el avance de la explotación minera de Filón Sur.

En definitiva, el sistema de explotación a cielo abierto provocó una transformación radical de la fisiografía original de los enclaves mineros, hasta convertirlo en un paisaje yermo, con predominio casi absoluto de elementos antrópicos y abióticos, y marcado por intensos contrastes cromáticos y formas topográficas artificiales. La percepción de los



fig. 5. Paisaje minero de Zarandas, con el río Tinto discurrendo entre residuos piríticos y los restos de un ferrocarril minero (foto R. Garrido).

espacios mineros abandonados produce actualmente un fuerte impacto visual ambivalente, con dos emociones o sentimientos opuestos que resultan de contemplar un medio natural profundamente degradado, que aún conserva los restos de antiguas estructuras e infraestructuras minero-industriales de gran valor patrimonial (Fig. 5). De hecho, con la finalidad de preservar sus peculiares valores plásticos y culturales, la Junta de Andalucía ha declarado una parte de la cuenca minera de Riotinto como paisaje protegido (BOJA 10/2005, de 17 de enero).

EL DRENAJE ÁCIDO DE LAS MINAS

El drenaje ácido de minas se refiere al agua contaminada resultante de la disolución oxidativa y lixiviación de sulfuros metálicos, particularmente pirita, cuando se exponen artificialmente, por la actividad minera, a las condiciones físico-químicas que prevalecen en la superficie terrestre, es decir en presencia de abundante agua y gases atmosféricos (Fernández Caliani, 2003). No obstante, el drenaje ácido también puede ser un fenómeno natural que tiene lugar en ambientes supergénicos, cuando las rocas contienen sulfuros, o bien éstos afloran en masas expuestas a la meteorización. Probablemente, muchos depósitos de sulfuros metálicos de la Faja Pirítica se descubrieron en la antigüedad por la presencia de estas montañas de oxidación, y de aguas ácidas y rojizas que denotaban la existencia de masas de sulfuros aflorantes.

Las minas abandonadas de la Faja Pirítica presentan una gran diversidad de fuentes potenciales de aguas ácidas, entre las cuales destacan los desagües de socavones y galerías subterráneas, las escorrentías superficiales de las labores mineras a cielo abierto, las escombreras de materiales estériles, las escorias de fundición, los residuos y cenizas de pirita, las balsas de decantación, lixiviación y flotación. La mayoría

de estos focos de contaminación hídrica son históricos, y por tanto para comprender su existencia es necesario conocer los procesos minero-metalúrgicos que se desarrollaron en el pasado para beneficiar los minerales (véase Salkield, 1987).

Los antiguos socavones y galerías subterráneas son focos de contaminación puntual, pero permanente, ya que el desagüe se produce durante casi todo el año. Las aguas ácidas que drenan estas labores subterráneas salen a la superficie por gravedad, de forma espontánea, contaminando los cursos fluviales de su entorno con metales pesados, del mismo modo que las aguas de escorrentía que discurren libremente por las labores mineras a cielo abierto. No obstante, los principales vertidos de aguas ácidas tienen su origen en los procesos de lixiviación de los residuos mineros, que se encuentran abandonados a la intemperie en las escombreras, terreros y plazas de calcinación (Fig. 6). De otro lado, el rebose de los antiguos diques que se usaban en el pasado para beneficiar el cobre por cementación artificial, así como las grandes balsas mineras que contienen los residuos de flotación, constituyen otros focos importantes de contaminación hídrica, además de la peligrosidad ambiental asociada al riesgo de rotura que comporta este tipo infraestructuras mineras. El accidente de Aznalcóllar y sus consecuencias socioeconómicas y ambientales es un caso ejemplar a tomar en consideración.



fig. 6. Vista aérea de los terreros de una antigua zona de cementación próxima a Sotiel Coronada, cuyos lixiviados constituyen una importante fuente de contaminación para el río Odiel (Foto Airplus, cortesía de E. Romero).

La mayoría de las minas de la Faja Pirítica española se localizan en las cuencas de drenaje de los ríos Tinto y Odiel, cuyos cauces reciben las aguas contaminadas directamente o bien a través de pequeños arroyos o tributarios. Las aguas de este sistema fluvial se caracterizan por su color rojizo, extrema acidez (valores de pH comprendidos entre 2 y 5), y contenidos anómalos de sulfatos, hierro, manganeso y elementos traza potencialmente tóxicos, como As, Bi, Cd, Cu, Hg, Pb, Sb, Sn, Tl, Zn, entre



fig. 7. Aspecto del cauce de un arroyo de aguas ácidas en época estival, con abundantes precipitados ocreos y eflorescencias de sales sulfatadas.

otros (e.g. Nelson & Lamothe, 1993; Galán et al. 2003; Sánchez-España et al. 2005; Olías et al. 2006). Las concentraciones más elevadas de estos elementos se detectan en verano, cuando el caudal de los ríos es menor y los vertidos de las instalaciones mineras están menos diluidos. Esto conduce a la precipitación de oxi-hidróxi-sulfatos de hierro, como jarosita, schwertmannita, etc., que tiñen de tonalidades ocreas los cauces fluviales, y a la formación de costras y eflorescencias de sulfatos de hierro solubles (Fig. 7), con diferentes estados de oxidación e hidratación, como copiapita, coquimbita, halotriquita, romboclasa, etc. (Hudson-Edwards et al. 1999; Buckby et al. 2003; Romero et al. 2006). Los ciclos de precipitación y disolución de estos minerales secundarios afectan a la composición de las aguas, y especialmente a las concentraciones de elementos pesados adsorbidos por los oxi-hidróxidos de hierro y/o coprecipitados con las sales sulfatadas.

Con respecto al origen de la contaminación de los ríos Tinto y Odiel, parece incuestionable que las operaciones mineras y metalúrgicas a gran escala que se desarrollaron a lo largo de los siglos XIX y XX multiplicaron los focos de contaminación y, por consiguiente, amplificaron los efectos hidroquímicos del drenaje ácido de minas. No obstante, algunas crónicas del siglo XVI (Delgado, 1556; en Salkield, 1987, apéndice 2) ya se referían al río Tinto con su nombre actual, haciendo alusión al color característico de sus aguas, y dejando constancia de que, ya en aquella época, *el río no cría peces ni otra cosa viva*, como consecuencia del drenaje ácido natural de las grandes masas de sulfuros aflorantes, y probablemente también de la intensa actividad extractiva de la minería antigua (Nocete et al. 2005).

A pesar de su apariencia inerte, el río Tinto alberga una gran biodiversidad de algas y microorganismos quimiolitotró-

fos que se han adaptado a la vida en condiciones extremas acidófilas (López-Archilla et al. 2001). Este descubrimiento representan un gran avance científico para comprender los mecanismos de adaptación y evolución de la vida en la Tierra, y aumenta las posibilidades de encontrar vida extraterrestre, de ahí su interés en la exploración astrobiológica de Marte (Fernández-Remolar et al. 2005).

Finalmente, conviene señalar que la incidencia de la minería en la calidad de las aguas (alteración de propiedades físico-químicas, desequilibrios elementales y efectos ecológicos desfavorables) no sólo afecta a los ríos de las cuencas mineras sino también a las aguas del estuario de Huelva y del golfo de Cádiz (e.g. Van Geen et al. 1991; Fernández-Caliani et al. 1997; Braungardt et al. 2003; Nieto et al. 2007).

LA DEGRADACIÓN DE LOS SUELOS

Los suelos predominantes de la Faja Pirítica Ibérica son leptosoles líticos, es decir suelos muy delgados y pobres en materia orgánica, cuyo uso tradicional ha sido forestal. Con la fiebre minera del siglo XIX, y la implantación del sistema de explotación a cielo abierto, se producen enormes movimientos de tierra que conducen a la pérdida irreversible o destrucción del suelo original, debido a la excavación de las cortas y a la acumulación de residuos mineros en escombreras y balsas de grandes dimensiones. Los suelos del entorno de las minas también se encuentran afectados, eventualmente, por aportes de residuos mineros y aguas ácidas (Fig. 8), incluyendo algunos suelos agrícolas de las vegas aluviales próximas (Barba et al. 2005; Chopin et al. 2007; López et al. 2008). En algunas minas abandonadas puede observarse, además, la presencia de suelos muy jóvenes que están desarrollándose, de forma natural, sobre los productos de meteorización de los propios residuos mineros. A partir de ortoimágenes de satélite, se estima aproximadamente



fig 8. Suelo acidificado por los lixiviados de las escombreras de Filón Norte, Minas de Tharsis.

que los suelos destruidos o afectados directamente por las operaciones mineras y metalúrgicas en el sector español de la Faja Pirítica ocupan una extensión superior a 4.200 ha.

En general, los suelos de las minas se caracterizan por una clase textural desequilibrada, pérdida de estructura edáfica, baja capacidad de cambio iónico y de retención de agua, y sobre todo por su acidez y elevado contenido de metales y metaloides potencialmente tóxicos. En efecto, según los análisis edafogeoquímicos realizados en muestras procedentes de más de 20 enclaves mineros (Fernández Caliani et al. 2008), la mayoría de los suelos presentan valores medios de pH en agua inferiores a 5, y concentraciones totales de As, Cu, Pb, Zn y Cd que exceden ampliamente los valores de fondo regional. No obstante, en la misma zona el pH puede variar desde valores extremadamente ácidos hasta neutros o ligeramente alcalinos, dependiendo de si los suelos están afectados por el drenaje ácido de minas o están protegidos de la acidificación, ya sea con barreras físicas (muros de piedra) o químicas (aplicación de enmiendas calizas). La limitada capacidad natural de los suelos para neutralizar la acidez e inmovilizar a los metales constituye un factor de riesgo ambiental particularmente importante en los suelos agrícolas, donde una fracción de los metales más móviles podría transferirse a las plantas en caso de inundación con aguas ácidas (Barba et al. 2007).

La contaminación de los suelos de mina con metales pesados ha sido un proceso lento pero continuo a largo del tiempo, que provocó un cambio de uso y el abandono de la agricultura tradicional. En la mayoría de la población se percibe como una herencia inevitable del pasado, y quizás por ello no es causa aparente de alarma social, en claro contraste con el carácter catastrófico y mediático del episodio contaminante que afectó a los suelos del valle del Guadiamar cuando se vertieron los lodos piríticos de la balsa de Aznalcóllar.

REFLEXIÓN FINAL

Una visión retrospectiva de las relaciones entre la minería y el medio ambiente en el suroeste peninsular, como se ha pretendido mostrar sucintamente este artículo, ofrece una lección ejemplar para evitar posibles errores de gestión geo-ambiental en el futuro.

La minería de la Faja Pirítica ha contribuido al desarrollo industrial de los paí-

ses europeos, aportando buena parte del azufre y los metales básicos necesarios, y ha proporcionado una fuente inapreciable de divisas para el Estado Español que no ha revertido en el progreso socioeconómico de las comarcas mineras. En cambio, como se ha descrito antes, la explotación indiscriminada y esquiladora de los yacimientos minerales ha dejado espacios mineros muy degradados, con profundas huellas en el paisaje, y unos ríos y suelos que probablemente se encuentran entre los más contaminados del mundo.

En los años de paroxismo productivo, algunas minas como Riotinto empleaban a más de 10.000 trabajadores y se obtenían producciones de hasta 2,5 millones de toneladas anuales de pirita, a pesar de la resistencia social que oponían diversos sectores de la población contra la devastación del medio natural y los efectos nocivos que los métodos minero-metalúrgicos causaban a la salud pública (Ferrero, 1998).

Con el despertar de la conciencia ecologista en la sociedad actual, es el momento de abordar el enorme déficit ambiental de esta región, sometida a impactos críticos y recurrentes, mediante la ejecución de proyectos de restauración viables, que traten de recuperar el medio físico hasta niveles admisibles para la salud humana y los ecosistemas, y al mismo tiempo conservar los restos materiales de una minería y metalurgia milenarias.

BIBLIOGRAFÍA

Alguacil, I., Ganado, M. & Vázquez, C. (2007): Mirando a Cielo Abierto. Una Aproximación al Patrimonio Minero de la Provincia de Huelva. Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa, Junta de Andalucía, 93 p.

ATP (1988): Elaboración de un Plan de Saneamiento para los Ríos Tinto y Odiel. Fase II, Tomo 2. Informe Inédito.

Avery, D. (1974): Not on Queen Victoria's Birthday. The Story of the Rio Tinto Mines. Collins, London, 464 p.

Barba, C., Fernández-Caliani, J.C. & Galán, E. (2005): Evaluación de la contaminación potencial por elementos tóxicos relacionados con la minería de la pirita en la provincia de Huelva. 6th Iberian and 3th Iberoamerican Congress of Environmental Contamination and Toxicology, Cádiz (Spain), Book of Abstracts, p. 63.

..., Sánchez, E. & Fernández-Caliani, J.C. (2007): Efectos del drenaje ácido de minas sobre la composición química y mineralógica de suelos agrícolas: una aproximación experimental. En:

- "Tendencias Actuales en la Ciencia del Suelo", Bellinfante, N. & Jordán, A. (Eds.) p. 194-200.
- Barriga, F.J.A.S., & Carvalho, D. (Eds.) (1997): *Geology and VMS Deposits of the Iberian Pyrite Belt*. Society of Economic Geology, Guidebook Series, Vol. 27, 207 p.
- Blanco, A. & Rothenberg, B. (1981): *Exploración Arqueometalúrgica de Huelva*. Labor, Barcelona, 312 p.
- Braungardt, C.B., Achterberg, E.P., Elbaz-Poulichet, F. & Morley, N.H. (2003): Metal geochemistry in a mine-polluted estuarine system in Spain. *Appl. Geochem.*, 18, 1757-1771.
- Buckby, T., Black, S., Coleman, M.L. & Hodson, M.E. (2003): Fe-sulfate-rich evaporative mineral precipitates from the Río Tinto, southwest Spain. *Mineral. Mag.*, 67, 263-278.
- Carrasco, I. (2004): La Faja Pirítica Ibérica ¿crisis terminal o renacimiento de un distrito histórico?. En: "Metallum, la Minería Suribérica", Romero, E. & Pérez Macías, J.A. (Eds.), Universidad de Huelva, p. 203-224.
- Chopin, E.I.B. & Alloway, B.J. (2007): Distribution and mobility of trace elements in soils and vegetation around the mining and smelting areas of Tharsis, Riotinto and Huelva, Iberian Pyrite Belt, SW Spain. *Water Air Soil Pollut.*, 182, 245-261.
- Fernández Caliani, J.C. (2003): Aspectos geoquímicos y mineralógicos del drenaje ácido de minas. En: "Mineralogía Aplicada", Galán, E. (Ed.), Síntesis, Madrid, p. 251-265.
- _, & Galán, E. (1996): Impacto ambiental de la minería en el devenir histórico de la comarca de Riotinto (Huelva). *Geogaceta*, 20, 1168-1169.
- _, Barba-Brioso, C., González, I. & Galán, E. (2008): Heavy Metal Pollution in Soils Around the Abandoned Mine Sites of the Iberian Pyrite Belt (South-West Spain). *Water Air Soil Pollut.* DOI: 10.1007/s11270-008-9905-7
- _, González, I., Aparicio, P., Barba, C. & Galán, E. (2005): Niveles de concentración de arsénico y metales pesados en los suelos del entorno de las minas abandonadas de la Faja Pirítica Ibérica. *Macla*, 3, 73-74.
- _, Ruiz, F. & Galán, E. (1997): Clay mineral and heavy metal distributions in the lower estuary of Huelva and adjacent Atlantic shelf. *Sci. Total Environ.*, 198, 181-200.
- Fernandez-Remolar, D.C., Morris, R.V., Gruener, J.E., Amils, R. & Knoll, A.H. (2005): The Río Tinto basin, Spain: Mineralogy, sedimentary geobiology, and implications for interpretation of outcrop rocks at Meridiani Planum, Mars. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 240, 149-167.
- Ferrero, M.D. (1998): *Capitalismo Minero y Resistencia Rural en el Suroeste Andaluz*. Río Tinto, 1873-1900. Universidad de Huelva, 254 p.
- _, (2000): *Un Modelo de Minería Contemporánea*. Huelva, del Colonialismo a la Mundialización. Universidad de Huelva, 568 p.
- Flores Caballero, M. (1981a): *Las Antiguas Explotaciones de las Minas de Riotinto*. Diputación Provincial de Huelva, 93 p.
- _, (1981b): *La Venta de las Minas de Riotinto*. Diputación Provincial de Huelva, 115 p.
- Galán, E., Gómez-Ariza, J.L., González, I., Fernández-Caliani, J.C., Morales, E. & Giráldez, I. (2003): Heavy metal partitioning in river sediments severely polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt. *Appl. Geochem.*, 18, 409-421.
- Hudson-Edwards, K., Schell, Ch. & Macklin, M.G. (1999): Mineralogy and geochemistry of alluvium contaminated by metal mining in the Río Tinto area, southwest Spain. *Appl. Geochem.*, 14, 1015-1030.
- IGME (1982): *Síntesis Geológica de la Faja Pirítica del SO de España*. Ministerio de Industria y Energía, Madrid, 106 p.
- López, M., González, I. & Romero, A. (2008): Trace elements contamination of agricultural soils affected by sulphide exploitation (Iberian Pyrite Belt, SW Spain). *Environ. Geol.*, 54, 805-818.
- López-Archilla, A.I., Marín, I. & Amils, R. (2001): Microbial community composition and ecology of an acidic aquatic environment: The Tinto River, Spain. *Microb. Ecol.*, 41, 20-35.
- Nelson, C.H. & Lamothe, P.J. (1993): Heavy metal anomalies in the Tinto and Odiel river and estuary system, Spain. *Estuaries*, 16, 496-511.
- Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., Olías, M., Canovas, C.R., Riba, I., Kalman, J. & Delvalls, A. (2007): Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva Estuary. *Environ. Int.*, 33, 445-455.
- Nocete F., Alex, E., Nieto, J.M., Sáez, R. & Bayona, M.R. (2005): An archaeological approach to regional environmental pollution in the south-western Iberian Peninsula related to Third millennium BC mining and metallurgy. *J. Arch. Sci.*, 32, 1566-1576.
- Olías, M., Cánovas, C.R., Nieto, J.M. & Sarmiento, A.M. (2006): Evaluation of the dissolved contaminant load transported by the Tinto and Odiel rivers (South West Spain). *Appl. Geochem.*, 21, 1733-1749.
- Ovejero, G. (2004): Las Cruces, descubrimiento, minería, hidrometalurgia y medio ambiente de un nuevo proyecto de cobre, Faja Pirítica Ibérica. En: "Metallum, la Minería Suribérica", Romero, E. & Pérez Macías, J.A. (Eds.), Universidad de Huelva, p. 225-242.
- Pérez López, J.M. (1994): *Las Calcinaciones al Aire Libre: Las Teleras*. Los Conflictos Sociales de Febrero de 1888. Causas y Consecuencias. Fundación Río Tinto, 59 p.
- _, & Romero, E. (2008): Actuaciones sobre el patrimonio minero-industrial de la provincia de Huelva. *Cuenca Minera de Riotinto*. *Rev. Tur. Patrim. Cult.*, 6, 83-96.
- Pérez Macías, J.A. (1998): *Las Minas de Huelva en la Antigüedad*. Servicio de Publicaciones, Diputación Provincial de Huelva, 234 p.
- Pinedo Vara, I. (1963): *Piritas de Huelva*. Su Historia, Minería y Aprovechamiento. Summa, Madrid, 1003 p.
- Romero, A., González, I. & Galán, E. (2006): The role of efflorescent sulfates in the storage of trace elements in stream waters polluted by acid mine drainage: the case of Peña del Hierro, southwestern Spain. *Canad. Mineral.*, 44, 1431-1446.
- Rothenberg, B., García Palomero, F., Bachman, H.G. & Goethe, J.W. (1990): The Río Tinto enigma. En: "La Minería y la Metalurgia en las Antiguas Civilizaciones Mediterráneas y Europeas", Ministerio de Cultura, Madrid, Vol. 1, p. 57-70.
- Salkield, L.U. (1987): *A Technical History of the Río Tinto Mines*. Some Notes on Exploitation from Pre-Phoenician times to 1950s. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 114 p.
- Sánchez-España, J., López-Pamo, E., Santofimia, E., Aduvire, O., Reyes, J. & Baretino, D. (2005): Acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (Odiel river watershed, Huelva, SW Spain). *Geochemistry, mineralogy and environmental implications*. *Appl. Geochem.*, 20, 1320-1356.
- Serrano, J., Viñas, L. & López, A.J. (1995): *Proyecto de regeneración de los ríos Tinto y Odiel (Huelva)*. *Tecnoambiente*, 53, 53-56.
- Van Geen, A., Adkins, J.F., Boyle, E.A., Nelson, C.H. & Palanqués, A. (1997): A 120-yr record of widespread contamination from mining of the Iberian Pyrite Belt. *Geology*, 25, 291-294.
- _, Boyle, E.A. & Moore, S.W. (1991): Trace elements enrichments in the waters of the Gulf of Cádiz. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 2173-2191.