

Edad mínima del gossan de Las Cruces: implicaciones sobre la edad del inicio de los ecosistemas extremos en la Faja Pirítica Ibérica.

A minimum age for the Las Cruces gossan: inferences about the beginning of extreme ecosystems at the Iberian Pyrite Belt

C. Moreno ⁽¹⁾, M.A. Capitán ⁽¹⁾, M. Doyle ⁽²⁾, J.M. Nieto ⁽¹⁾, F. Ruiz ⁽³⁾ y R. Sáez ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Depto. de Geología, Universidad de Huelva. Av. Fuerzas Armadas S/N, 21071 Huelva. E-mail: carmor@uhu.es

⁽²⁾ Cobre Las Cruces, S.A. Av. El Garrobo, 4, 41860 Gerena (Sevilla)

⁽³⁾ Depto de Geodinámica y Paleontología, Universidad de Huelva. Av. Fuerzas Armadas S/N, 21071 Huelva

ABSTRACT

The micropalaeontological study of glauconite sands overlying Las Cruces massive sulfide deposit (Iberian Pyrite Belt) indicates an Upper Tortonian minimum age for oxidation and the gossan genesis. Sulfide oxidation, both natural and anthropic, give acid waters which are characterized by low pH values as well as high sulphate and metals concentration. Extreme environments, controlled by acidic waters, have been developed in the Iberian Pyrite Belt including the Rio Tinto ecosystem, which have been enhanced recently by an unexpected level of biodiversity. Importance of such type of environments are related with the origin of life on Earth and even other Solar system scenarios. Time consideration for natural acidic water pollution at the Rio Tinto system have been suggested of about 0,5 m.y. However, the minimum age of the Las Cruces gossan predate on about 6 m.y the previously reported age for the Rio Tinto acidic ecosystem.

Key words: Las Cruces, Iberian Pyrite Belt, Gossan, Extreme ecosystems.

Geogaceta, 33 (2003), 67-70
ISSN:0213683X

Introducción

Los ecosistemas extremos con gran diversidad biótica del río Tinto y otros lugares similares de la Faja Pirítica Ibérica (FPI) (Amaral-Zettler *et al.*, 2002) están caracterizados por la acidez extrema y la alta concentración de elementos contaminantes en sus aguas. En ellos se han descrito gran abundancia de organismos cuyo metabolismo está controlado por las reacciones de oxidación de S y Fe (Fernández-Remolar *et al.*, 2001; Amils *et al.*, 2000). Se considera que este tipo de medios pudieran ser representativos de las condiciones primigenias en que se originó la vida en La Tierra y, posiblemente, en otros escenarios del Sistema Solar (Fernández-Remolar *et al.*, 2001, 2002).

Los estudios ambientales realizados en la FPI suponen que el origen de sus aguas ácidas está asociado a la actividad minera que, de manera casi ininterrumpida, vienen realizándose en la región desde hace 4.500 años (Leblanc *et al.*, 2000). Sin embargo, los datos publicados respecto a la edad de los ecosistemas extre-

mos de la FPI citan como referencia una antigüedad de hasta 0,5 m.a. (Fernández-Remolar *et al.*, 2000; Amaral-Zettler *et al.*, 2002). Esta edad es, evidentemente, muy anterior al inicio de la minería prehistórica en la región. Por tanto, en la FPI, la génesis de los ecosistemas tipo Rio Tinto ha de relacionarse con procesos naturales de oxidación de los sulfuros masivos.

No existen datos de edad absoluta respecto al inicio de los procesos de oxidación que dieron lugar al gossan de los yacimientos de la FPI. La única referencia conocida hasta la fecha (Phillips, 1880) atribuye al gossan de Riotinto una edad miocena deducida a partir de fósiles de plantas, aunque estos fueron encontrados en formaciones de "gossan transportado" en un área próxima a los yacimientos. Nuestro trabajo sobre el gossan de Las Cruces propone una edad mínima para los procesos de oxidación de los yacimientos de sulfuros de la FPI que pudiera servir de referencia en el estudio de la evolución de los organismos que caracterizan los ecosistemas extremos tipo "Rio Tinto".

Marco Geológico

El yacimiento de Las Cruces se localiza en el extremo oriental de la FPI, en el término municipal de Gerena, a unos 15 kilómetros al NO de Sevilla (Fig.1). La FPI es mundialmente reconocida por la enorme concentración de yacimientos de sulfuros masivos que contiene (Leistel *et al.*, 1998). Las mineralizaciones se encuentran asociadas a la actividad magmática que tuvo lugar durante el Devónico terminal y el Carbonífero Inferior (Sáez *et al.*, 1996) y han sido fuente de materias primas, desde tiempos prehistóricos hasta la actualidad, en distritos tan emblemáticos como Riotinto, Tharsis, Aljustrel o Neves-Corvo y en multitud de minas de diversa magnitud (Pinedo Vara, 1963, Almodóvar y Sáez., 1992). Los materiales aflorantes en la FPI comprenden rocas del Devónico medio hasta el Carbonífero inferior, constituyendo tres grupos litológicos principales denominados por Schermerhorn (1971) como Grupo Pizarroso y Cuarcítico (PQ), Complejo Vulcano-Sedimentario (CVS) y Grupo Culm (Fig.1).

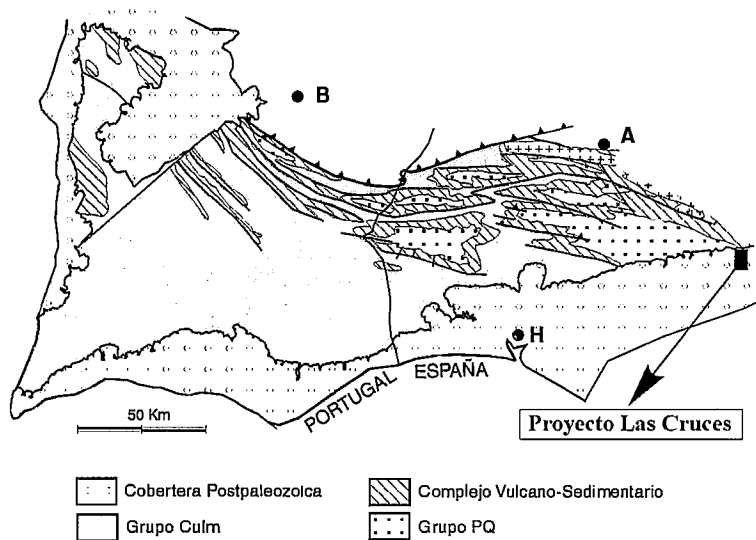


Fig. 1.- Localización geológica del proyecto “Las Cruces” en la Faja Pirítica Ibérica

Fig. 1.- Geological setting of the “Las Cruces” project in the Iberian Pyrite Belt

El grupo PQ comprende fundamentalmente materiales detríticos de edad devónica depositados en una plataforma siliciclástica que evolucionó en el tiempo hacia ambientes más someros (Moreno *et al.*, 1996). El CVS esta compuesto por rocas sedimentarias y magmáticas con edades comprendidas desde el Famenien-

se superior hasta el Visense inferior. El magmatismo es bimodal e incluye una serie máfica con basaltos subalcalinos a alcalinos y una serie félsica con dacitas y riolitas como rocas dominantes (Mitjavi-lla *et al.*, 1997; Tiéblemont *et al.* 1998). El grupo Culm se define como una secuencia detrítica con las características típi-



Fig. 2.- Sección geológica representativa del yacimiento de Las Cruces. 1) Rocas detríticas y magmáticas del zócalo paleozoico; 2) sulfuros masivos; 3) mineralización oxidada (gossan); 4) niveles de base de la cobertera neógeno-cuaternaria compuestos, en el área de Las Cruces por conglomerados con cantos de gossan y arenas glauconíticas; 5) Formación Arcillas de Gibralferrón compuesta por margas azules con una potencia media en esta área de 150 m. (Modificada de Doyle y Ovejero, 2002)

Fig. 2.- Representative cross-section of the La Cruces ore body. 1) Detritic and magmatic rocks of the Palaeozoic substrate; 2) massive sulfide body; 3) oxidized ore (gossan); 4) basal horizon of the Neogene-Quaternary cover, including gossan bearing conglomerates and glauconite sands; 5) Arcillas de Gibralferrón Formation constituted by blue marls, the medium thickness at the Las Cruces area is about 150 meters. (Modified after Doyle and Ovejero, 2002)

cas de las facies de tipo Flysh (Moreno, 1993). Todos estos materiales fueron deformados y ligeramente metamorfizados durante la fase Astúrica de la orogenia Hercínica. Discordantes sobre la serie paleozoica, se depositaron secuencias detríticas y carbonatadas con edades comprendidas entre el Triásico y el Cuaternario reciente (Orla Mesozoica del Algarve, Cuenca del Sado y Depresión del Guadalquivir). Localmente la sedimentación de esta cobertera fue interrumpida por una débil actividad magmática asociada a la apertura del Atlántico (Sierro *et al.*, 1997).

Geología del yacimiento de Las Cruces

El yacimiento de Las Cruces está encajado en materiales paleozoicos de la FPI, en contacto con sedimentos neógenos de la Depresión del Guadalquivir. Está constituido por una masa de sulfuros masivos y una mineralización en venas (stockwork), como los que son comunes en la FPI (Sáez *et al.*, 1999). La parte superior del yacimiento se encuentra oxidada y, asociada a esta alteración superficial, existe una zona de enriquecimiento supergénico con alta ley de Cu (Fig. 2). Esta zona enriquecida constituye el objetivo económico del proyecto “Cobre Las Cruces”. Las reservas medidas son de 15,8 mT con una ley media de 5,94% de Cu (Doyle y Ovejero, 2002).

La mineralización primaria está asociada a pizarras negras y vulcanitas félsicas de la base del CVS. Las rocas a muro de la mineralización presentan una intensa alteración hidrotermal y aparecen cortadas por un retículo de venas formando un stockwork que, en algunos puntos, presenta contenidos metálicos próximos a las leyes que se consideran económicas en otros yacimientos de la FPI. Tanto la mineralización primaria como las rocas encajantes están intensamente deformadas. Las estructuras más evidentes son pliegues, fallas y zonas de cizalla. Asociada a la deformación, se observa una foliación, localmente milonítica, y un ligero metamorfismo. Como consecuencia de la deformación, se observan estructuras de removilización de metales que dan lugar a concentraciones locales de cobre, plomo y otros elementos. Los procesos de removilización afectan tanto al sulfuro masivo como a la mineralización de tipo stockwork. La edad de esta deformación, aunque no ha sido definida para el entorno del yacimiento, a escala regional se considera que ocurrió durante el Carbonífero medio (Schermmerhorn, 1971; Sáez *et al.*, 1996).

El levantamiento de la cadena hercínica, asociado a los procesos tectónicos, y la erosión consecuente hicieron exhumar las rocas paleozoicas hasta poner el cuerpo mineralizado en contacto con la atmósfera. El resultado del cambio de condiciones reductoras a oxidantes provocó la oxidación de los sulfuros y su transformación a fases estables en condiciones subaéreas. El resultado visible del proceso es el gossan que recubre la parte superior del yacimiento. Algunos de los metales lixiviados durante la oxidación, y sobre todo el Cu, se fijaron en la zona de cambio red-ox dando lugar al enriquecimiento supergénico que constituye el objetivo fundamental del proyecto minero "Cobre las Cruces".

La composición mineral de las zonas oxidadas de los yacimientos de sulfuros masivos es compleja, pero existe un gran predominio de los oxi-hidróxidos de Fe. En menor medida, se encuentran sulfuroarseniatos diversos y minerales residuales no afectados por la alteración (Au, circón, casiterita, etc). Esta alteración se produce en un sistema abierto en el que el balance químico está controlado por equilibrios cuyas variables fundamentales son composición, Eh y pH (Taylor and Thornber, 1995). El resultado del proceso implica pérdida de azufre en forma de SO_4^{2-} y un amplio espectro de elementos entre los que se incluyen Cu, Zn, Cd, As, Sb y Hg.

El yacimiento está cubierto por sedimentos neógenos mediante una discordancia angular y erosiva que pone en contacto las series paleozoicas de la FPI con materiales de la Depresión del Guadalquivir en una relación zócalo/cobertera que implica un hiato del orden de 300 millones de años. La columna estratigráfica local de la cobertera en Las Cruces ha sido definida por Doyle y Ovejero (2002), comprende una formación basal compuesta por conglomerados, brechas y arenas glauconíticas equivalentes al Mioceno Transgresivo de Base de Sierro *et al.*, (1990), una serie de margas (Formación Arcillas de Gibrleón de Civis *et al.*, 1987), y el Cuaternario aluvial compuesto por arenas gravas y limos.

El estudio detallado de los testigos de sondeos pone de manifiesto la existencia de cantos de gossan en las formaciones basales de la cobertera, lo cual indica que la mineralización oxidada se generó y fue sometida a erosión con anterioridad a estos depósitos. Teniendo en cuenta el carácter transgresivo de la formación basal, puede afirmarse que el gossan estaba expuesto en superficie con anterioridad a la sedimentación de la cobertera y, por tanto, los procesos de oxidación se produjeron en condiciones subaéreas en tiempos, obviamente, anteriores a la edad de los sedimentos suprayacentes.

Estudio micropaleontológico

El objetivo de asignar una edad mínima al proceso de oxidación de la mineralización de Las Cruces se ha abordado mediante el análisis micropaleontológico de los sedimentos de la cobertera que aparecen en contacto directo con el gossan. Las muestras se han obtenido de los sondeos CR-21, CR-108 y CR-226. Todas ellas corresponden a arenas glauconíticas de la base de la columna correspondiente a la cobertera. El contenido micropaleontológico ha sido obtenido mediante levigado de la fracción de tamaño de grano superior a 63 μ . Aunque el material resultante ha sido escaso (tabla I), característica habitual de las arenas glauconíticas, sí que ha facilitado una asociación de foraminíferos que permite asignar las muestras estudiadas a la biozona de *Turborotalia humerosa*, correspondiente al Tortonense Superior (Sierro, 1984). Esta biozona también ha sido asignada al Nivel Inferior de Glauconita observado por Civis *et al.* (1987) y Baceta y Pendón (1999) en la base de la Formación "Arcillas de Gibrleón". Los datos de edad absoluta determinados mediante el método K/Ar en concentrados de glauconita de este nivel indican una edad de $6,7 \pm 0,3$ m.a. (Galán *et al.*, 1995).

Consecuencias paleoambientales

Los resultados obtenidos indican que la mineralización de Las Cruces estuvo

expuesta a procesos de oxidación atmosférica antes del Tortonense Superior, que es la edad deducida de las asociaciones de microfósiles de las formaciones que recubren el gossan. La edad absoluta de las arenas glauconíticas, correlacionables con otros puntos de la región, es próxima a 7 m.a.

La exposición de los sulfuros masivos en condiciones superficiales da lugar a procesos geoquímicos complejos cuya consecuencia más importante, desde el punto de vista ambiental, es la génesis de aguas ácidas cuya capacidad de transporte de elementos disueltos está en general controlada por el pH. Este problema, ampliamente documentado en todo el mundo (Azcue, 1999), es de especial relevancia en la Faja Pirítica Ibérica por dos motivos esenciales: a) las aguas ácidas de mina aportan una gran cantidad de metales al Golfo de Cádiz siendo la FPI uno de los principales focos de contaminación de la región Suratlántica, y b) el río Tinto, a través del cual se canaliza la escorrentía de una extensa área en la parte española de la FPI, constituye un sistema fuertemente afectado por el bajo pH y por la concentración de elementos contaminantes de sus aguas. A pesar del carácter fuertemente tóxico de sus aguas, la evolución temporal del río ha dado lugar al desarrollo de un ecosistema peculiar caracterizado por la abundancia de organismos extremófilos cuyo metabolismo está controlado por las reacciones de oxidación de S y Fe (Fernández-Remolar *et al.*, 2001; Amils *et al.*, 2000.). El carácter peculiar del ecosistema "Río Tinto", incluso si se compara con otros que drenan aguas de quimismo similar, ha generado un gran interés en la comunidad científica internacional. Parte de este interés está en el origen de la vida en la Tierra y, posiblemente, en Marte y otros escenarios del Sistema Solar (Fernández-Remolar *et al.*, 2001, 2002). Los datos publicados hasta ahora se basan en la consideración de un periodo evolutivo corto al asociar el origen de la contaminación del río con el inicio de la actividad minera del distrito de Riotinto (4500 años según datos de

Foraminíferos planctónicos

Globorotalia suteriae Catalano y Sprovieri
Globorotalia cultrata D'Orbigny
Globorotalia merotumida Blow y Banner
Globorotalia plesiotumida Banner y Blow
Turborotalia humerosa (Takayanagi y Saito)

Foraminíferos bentónicos

Nodosaria hispida D'Orbigny
Uvigerina peregrina CUSHMAN
Cibicides pseudoungerianus CUSHMAN
Planularia ariminensis D'Orbigny
Bulimina costata D'Orbigny

Ostrácodos

Krithe spp.
Parakrithe spp.
Henryhowella asperrima

Tabla I.- Contenido micropaleontológico de las muestras estudiadas

Table I.- Micropalaeontological content of the studied samples

Leblanc *et al.*, 2000). Este periodo de permanencia de las condiciones de extrema acidez ha sido recientemente ampliado hasta 0,3-0,5 m.a (Fernández-Remolar *et al.*, 2000; Amaral-Zettler *et al.*, 2002). Nuestros datos ponen de manifiesto que, en el caso del yacimiento de Las Cruces la oxidación de los sulfuros tuvo lugar en tiempos mucho más remotos, hace más de 7 millones de años, y que la configuración de posibles ecosistemas dominados por la presencia de aguas ácidas en la región es muy anterior a los datos publicados hasta ahora. La única referencia disponible, respecto a la edad del gossan de Riotinto, se basa en la presencia de ciertos fósiles de plantas del Mioceno en formaciones de gossan transportado del entorno de Riotinto (Phillips, 1880). A pesar de la escasa precisión de la datación, es evidente que la edad asignada es compatible con los datos obtenidos del yacimiento de Las Cruces y por tanto, sugerimos que el ecosistema "Río Tinto" podría haberse mantenido en evolución desde al menos el Tortonense superior (hace aproximadamente 7 m.a.). Las consecuencias sobre la ocupación del medio y el periodo evolutivo de los organismos extremófilos que lo ocupan escapa a los objetivos de este trabajo. No obstante, consideramos este dato cronológico importante para el enfoque de futuros trabajos de investigación sobre el Río Tinto y otros espacios similares.

Conclusiones

El estudio micropaleontológico de la base del Neógeno transgresivo en contacto con el gossan del yacimiento de Las Cruces ha permitido datar estas formaciones como Tortonense superior. Esta datación permite asignar una antigüedad mínima de 7 m.a. aproximadamente al proceso de oxidación de sulfuros y generación de aguas ácidas en dicho yacimiento. Nuestros datos sugieren que el inicio de la contaminación natural en la FPI y la aparición de ecosistemas extremos (bajo pH y alta concentración de metales y sulfatos) si-

milares a los que se pueden observar en la actualidad en los ríos Tinto y Odiel es bastante más antiguo de lo que se había considerado hasta ahora y, consecuentemente, el periodo de evolución de estos ecosistemas debe de ser más amplio.

Agradecimientos

Este trabajo ah sido financiado en el marco del proyecto PB98-0960. Los autores agradecen a la empresa Cobre las Cruces S.A. las facilidades dadas para el estudio y muestreo de los testigos de sondeos.

Referencias

- Almodóvar, G. y Sáez, R. (1992): En: *Recursos Minerales de España* (García Guinea y Martínez Frías eds.) CSIC, Madrid, 1309-1324
- Amaral-Zettler, L.; Gómez, F.; Zettler, E.; Keenan, B.G.; Amils, R. and Sogin, M.L. (2002): *Nature*, 417, 137
- Amils, R.; Gómez, F.; González-Toril, E. and Marín, I. (2000): In: *First Astrobiology Science Conference Abstract*. Moffet Field, CA.
- Azcue, J.M. (1999): *Springer Verlag*, Berlin, 300 pp.
- Baceta, J. I. y Pendón, J. G. (1999): *Rev. Soc. Geol. España*, 12, 419-438.
- Civis, J., Sierro, F. J., González Delgado, J. A., Flores, J. A., Andrés, I., De Porta, J. y Valle, M. F. (1987). En: *Paleontología del Neógeno de Huelva (W Cuenca del Guadalquivir)*. Ed. Universidad de Salamanca, 9-21.
- Doyle, M. y Ovejero, G. (2002): *Actas del XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia*, Zaragoza.
- Fernandez-Remolar, D.C.; Rodríguez, N and Amils, R. (2000): In: *First Astrobiology Science Conference Abstract* . Moffet Field, CA.
- Fernández-Remolar, D.C.; Prieto, O.; Rodríguez, N.; Kargel, J.S. and Amils, R. (2001): *32th Lunar and Planet. Sci. Abstract*, Houston, TX.
- Fernández Remolar, D.C.; Amils, R.; Morris, R.V. and Knoll, A.H.(2002): *33th Lunar and Planet. Sci. Abstract*, League City, TX
- Galán, E., González, I, Mayoral, E. y Muñiz, F. (1995): *Abstracts Euroclay'95*. Leuven, Bélgica, 311-312.
- Leblanc, M.; Morales, J.A.; Borrego, J. and Elbaz-Poulichez, F. (2000): *Econ. Geol.*, 95, 655-662
- Leistel, J.M.; Marcoux, E.; Thiéblemont, D.; Quesada, C.; Sánchez, A.; Almodóvar, G.; Pascual, E. and Sáez, R. (1998): *Mineral. Deposita*, 33, 2-30
- Mitjavilla, J.; Martí, J. and Soriano, C. (1997): *J. Petrol.*, 38, 727-755
- Moreno, C. (1993): *J. Sediment. Petrol.*, 63, 1118-1128
- Moreno, C.; Sierra, S. and Sáez, R. (1996): In: *Recent Advances in Lower Carboniferous Geology* (Strogen, Somerville and Jones eds.), *Geol. Soc. Spec. Publication*, 107, 153-162
- Phillips, J.A. (1880): *Quat. Jour. Geol. Soc. London*, 37, 1-5
- Pinedo Vara, I. (1963): *Summa*, Madrid. 1003 pp.
- Sáez, R.; Almodóvar, G. and Pascual, E. (1996): *Ore Geol. Rev.*, 11, 429-451
- Sáez, R.; Pascual, E.; Toscano, M. and Almodóvar, G. (1999): *Mineral. Deposita*, 34, 549-570
- Schermerhorn, J.L.G. (1971): *Bol. Geol. Min. Esp.*, 82, 239-268
- Sierro, F. J. (1984). *Tesis Doctoral. Univ. Salamanca*. 474 pp.
- Sierro, F.J.; González-Delgado, J.A.; Flores, J.A.; Dabrio, C. y Civis, J. (1990): *Paleont. Evolucio. Mem. Spec.*, 2, 209-250
- Sierro, F.J.; González-Delgado, J.A.; Flores, J.A.; Dabrio, C. y Civis, J. (1997): In, *The Guadalquivir Basin and Algarve (Spain Portugal)* (González-Delgado, Sierro y Pais Coords), *Field-Trip Guide of the 2nd Excursion, 2nd Congress R.C.A.N.S. Salamanca*, 11-34.
- Taylor GF and Thornber MR, 1995. In: *Proceeding of the 17th International Geochemical Exploration Symposium*, Townsville, Queensland, Australia. 115-138.
- Tiéblemont, D.; Pascual, E. and Stein, G. (1998): *Mineral. Deposita*, 33, 98-110