

## **Geología ambiental del río Tinto a través de un mapa conceptual**

**J.C. Fernández Caliani<sup>1</sup>, C. Barba Brioso<sup>2</sup>, A. Romero<sup>2</sup>, I. González<sup>2</sup>,  
E. Galán<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Dpto. de Geología, Universidad de Huelva. <sup>2</sup>Dpto. de Cristalografía, Mineralogía y  
Química Agrícola, Universidad de Sevilla  
[caliani@uhu.es](mailto:caliani@uhu.es), [cbarba@us.es](mailto:cbarba@us.es), [aromero@us.es](mailto:aromero@us.es), [igonza@us.es](mailto:igonza@us.es), [egalan@us.es](mailto:egalan@us.es)

### **RESUMEN**

En esta ponencia se presenta un mapa conceptual sobre las condiciones geoambientales del río Tinto (Huelva), uno de los ecosistemas más singulares de nuestro planeta debido a la extrema acidez y a las elevadas concentraciones de sulfatos y metales pesados que transportan sus aguas. El mapa conceptual se ha elaborado con la herramienta FreeMind (software libre basado en Java) y aborda conceptos troncales, como el origen y las fuentes de contaminación hídrica, que derivan de forma progresiva y jerárquica hacia aspectos más específicos y complejos, como el proceso de generación de aguas ácidas, el impacto ambiental sobre el medio físico, biológico y socioeconómico, y la composición química y mineralógica de los sedimentos y suelos afectados.

**Palabras clave:** Geología ambiental, río Tinto, mapa conceptual

### **SUMMARY**

*Environmental Geology of the Tinto river using concept mapping technique.*

In this paper, we present a concept map for organizing and representing knowledge about geo-environmental conditions of the Tinto River (Huelva), a unique ecosystem on Earth due to the extreme acidity and high concentrations of sulphates and heavy metals dissolved in the water. The concept map was drawn with the software FreeMind (a mind-mapping tool based on Java) showing how that specific topics, such as processes of acid mine drainage formation, environmental impacts, and chemical and mineralogical composition of sediments and soils affected, stemming from the main concepts (origin, sources and effects of water pollution).

**Keywords:** Environmental Geology, Tinto river, concept map

## **INTRODUCCIÓN**

El río Tinto nace en la cuenca minera de Riotinto, uno de los distritos minero-metalúrgicos más importantes del mundo, y desemboca junto con el río Odiel en la Ría de Huelva. A pesar de su corta longitud (92 km), el Tinto es uno de los ríos españoles más conocidos por la belleza cromática de sus pintorescas aguas rojizas y por el interés que suscitan sus condiciones biogeoquímicas en la comunidad científica internacional. De hecho, el curso alto es un espacio natural protegido (Paisaje Protegido del Río Tinto), declarado como tal por la Junta de Andalucía en 2005 para preservar sus valores paisajísticos, mantener la singularidad de sus aguas y promover la investigación científica, entre otras acciones. Recientemente se ha solicitado el estatus de Geoparque Europeo para integrar el río Tinto en este programa auspiciado por la Unesco.

En este trabajo se pretende crear un mapa de conceptos fundamentales, interrelacionados, para comprender y fijar el conocimiento geoambiental de este peculiar ecosistema fluvial. Los principales aspectos que se abordarán son: las fuentes de contaminación, la generación de aguas ácidas por disolución oxidativa de pirita, los parámetros indicadores de contaminación hídrica, el impacto sobre el medio ambiente, la composición química y mineralógica de los sedimentos fluviales y la movilidad relativa de sus contaminantes metálicos.

## **METODOLOGÍA**

Los mapas conceptuales son instrumentos de representación gráfica del conocimiento que permiten organizar y transmitir con claridad ideas o conceptos complejos y jerárquicamente relacionados, facilitando tanto la enseñanza como el aprendizaje. Esta técnica fue desarrollada en la década de 1970 por J.D. Novak (Novak y Gowin, 1984), basándose en las teorías del aprendizaje significativo de D.P. Ausubel (1963). Algunas aplicaciones educativas de los mapas conceptuales son: trazado de una ruta de aprendizaje, preparación de trabajos escritos o de exposiciones orales, exploración del conocimiento previo de los alumnos y técnica de evaluación, entre otras.

El mapa conceptual se ha elaborado con la herramienta FreeMind (software libre basado en Java) y aborda conceptos troncales, como el origen y las fuentes de contaminación hídrica, que derivan de forma progresiva y jerárquica hacia aspectos más específicos y complejos, como el proceso de generación de aguas ácidas, el impacto ambiental sobre el medio físico, biológico y socioeconómico, y la composición de los sedimentos contaminados.

## RESULTADOS

Las figuras 1, 2 y 3 constituyen el mapa conceptual del río Tinto cuya explicación textual se resume a continuación.

### *Origen y fuentes de contaminación*

Los yacimientos minerales de Riotinto albergan una de las masas de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) más grandes del mundo, formada como consecuencia de la actividad hidrotermal submarina que aconteció hace unos 350 millones de años en la Faja Píritica Ibérica (Almodóvar y Sáez, 2004). La exposición subaérea de las masas provocó la meteorización química (disolución oxidativa) de la pirita y la consiguiente formación de un depósito supergénico de oxi-hidróxidos de hierro (gossan), liberando de modo natural (drenaje ácido de roca) una ingente cantidad de aguas ácidas y metales en disolución. Recientes investigaciones realizadas por el Centro Español de Astrobiología en colaboración con la NASA (Amils y cols., 2008) sugieren que el río Tinto constituye el sistema de desagüe de los productos generados por la oxidación de la pirita en una especie de biorreactor subterráneo, debido a la actividad microbológica del subsuelo.

En cualquier caso, la frenética actividad industrial desarrollada en las minas de Riotinto multiplicaron los focos de contaminación y amplificaron los efectos hidroquímicos del drenaje ácido natural. Las principales fuentes de contaminación derivadas de las operaciones minero-metalúrgicas fueron (Fernández-Caliani, 2008): las escorrentías de las labores a cielo abierto, los desagües de galerías subterráneas, los efluentes de procesos industriales, las escombreras de estériles, las balsas de decantación y lixiviación, los residuos y cenizas de tostación, las escorias de fundición, etc.

### *Oxidación de pirita y drenaje ácido de minas*

La disolución oxidativa de la pirita es un proceso biogeoquímico complejo, que implica a numerosas reacciones interrelacionadas (Nordstrom, 1982). En una etapa inicial, la pirita se oxida en condiciones aerobias de acuerdo con la reacción:  $2\text{FeS}_2 + 7\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 2\text{Fe}^{2+} + 4\text{SO}_4^{2-} + 4\text{H}^+$ . El proceso tiene un carácter esencialmente abiótico, y la tasa de oxidación química aún es baja. Conforme aumenta la acidez, el proceso de oxidación se acelera debido a la acción catalizadora de microorganismos quimiolitótrofos acidófilos, y la oxidación microbológica prevalece sobre la química, dando lugar a la transformación del hierro ferroso en férrico:  $2\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + 2\text{H}^+ = 2\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$ . El hierro férrico sustituye al oxígeno como agente oxidante e interacciona con la pirita, acelerando su disolución, según la reacción:  $\text{FeS}_2 + 14\text{Fe}^{3+} + 8\text{H}_2\text{O} = 15\text{Fe}^{2+} + 2\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}^+$ . El agua de drenaje se caracteriza por elevadas concentraciones de sulfatos y metales disueltos, y una relación  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  alta.

El drenaje ácido de minas se refiere al agua contaminada resultante de la disolución oxidativa y lixiviación de sulfuros metálicos 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.

Las aguas del río Tinto, desde su cabecera hasta su desembocadura, se caracterizan por una acidez extrema, con valores de pH muy bajos (2-4),

concentraciones elevadas de sulfatos que se traducen en una acusada conductividad eléctrica, y altos contenidos de elementos traza potencialmente tóxicos en aguas y sedimentos, tales como As, Cd, Cu, Pb y Zn, entre otros metales pesados. Estos parámetros son indicativos de una contaminación severa.

#### *Impacto ambiental*

El drenaje ácido de las minas ha producido alteraciones físicas, químicas y biológicas en el medio natural, que se manifiestan en la pérdida de la calidad original del agua y en la contaminación de los sedimentos fluviales. Como resultado de la acidificación y de las elevadas concentraciones de metales pesados, no existe vida piscícola y el agua no es apta para ningún tipo de uso, lo que puede comportar riesgos sanitarios para la población ribereña. No obstante, las aguas del río Tinto mantienen una sorprendente biodiversidad microscópica formada por bacterias, algas y hongos que se han adaptado a vivir en condiciones extremas (Amaral-Zettler y cols. 2002). Atendiendo a su interés astrobiológico (el conocimiento de estos extremófilos podría ser clave para explorar rastros de vida extraterrestre), algunos investigadores se oponen a cualquier proyecto de descontaminación del río para preservar este peculiar sistema geomicrobiológico.

#### *Mineralogía y geoquímica de los sedimentos contaminados*

Los sedimentos del Tinto están compuestos por minerales neoformados a partir de las reacciones oxidativas de la pirita, inducidas por la actividad metabólica de los microorganismos quimiolitotrófos (Fernández-Remolar y cols., 2005), junto con los minerales detríticos heredados de las rocas erosionadas por el río, tales como cuarzo, feldspatos, moscovita, caolinita y pirita (Galán y cols., 1996).

Los principales productos de oxidación de la pirita son oxi-hidroxi-sulfatos de hierro (jarosita, schwermannita, goethita, ferrihidrita) que forman depósitos superficiales, de tonalidades ocreas, muy característicos en el cauce del río Tinto. En verano, las riberas del río se cubren de costras y eflorescencias de sulfatos hidratados de hierro que precipitan por evaporación, debido a la elevada carga iónica de las aguas.

Por lo tanto, el hierro es un componente químico esencial de los sedimentos del Tinto, especialmente en su cabecera, donde la concentración de hierro total es dominante (hasta 56%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Así pues, el ecosistema está basado en el ciclo del hierro, razón por la cual el río Tinto es considerado un análogo geoquímico de Marte (Amils y cols., 2007).

Los sedimentos del río Tinto también contienen elevadas concentraciones de metales y metaloides pesados (principalmente As, Cu, Pb, Zn y Cd), que superan en varios órdenes de magnitud los valores normales de los sedimentos fluviales (Galán y cols., 2003). Estos elementos traza potencialmente tóxicos se encuentran distribuidos desigualmente en diferentes fracciones geoquímicas del sedimento, según los resultados analíticos de la extracción química secuencial realizada por Galán y cols. (op. cit.). Los óxi-hidróxidos de hierro (fracción geoquímica reducible) juegan un papel fundamental en la retención de arsénico y metales pesados, si bien una proporción significativa de Zn, Cu y Cd está en forma de especies intercambiables y solubles en ácido, por lo que pueden

movilizarse fácilmente por procesos de disolución, desorción o reacciones de intercambio iónico.

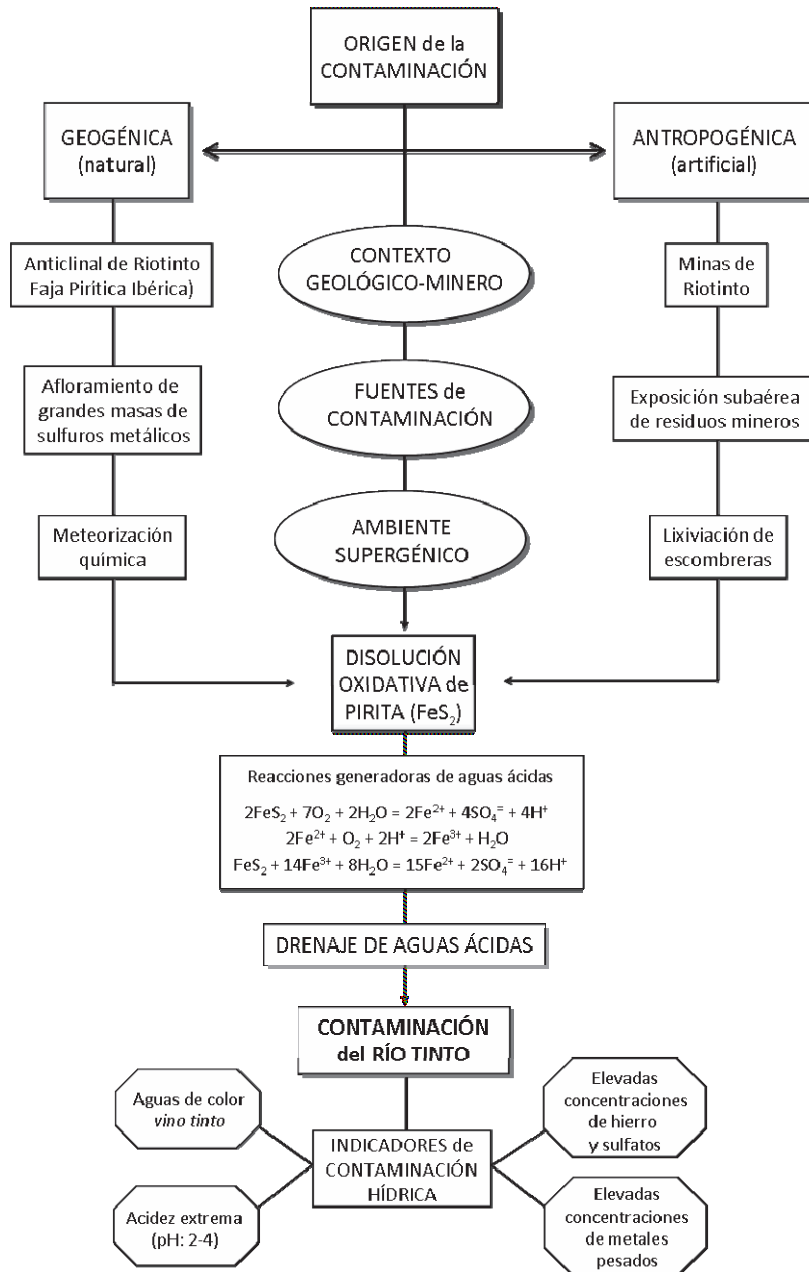


Figura 1. Mapa conceptual sobre el origen de la contaminación hídrica del río Tinto.

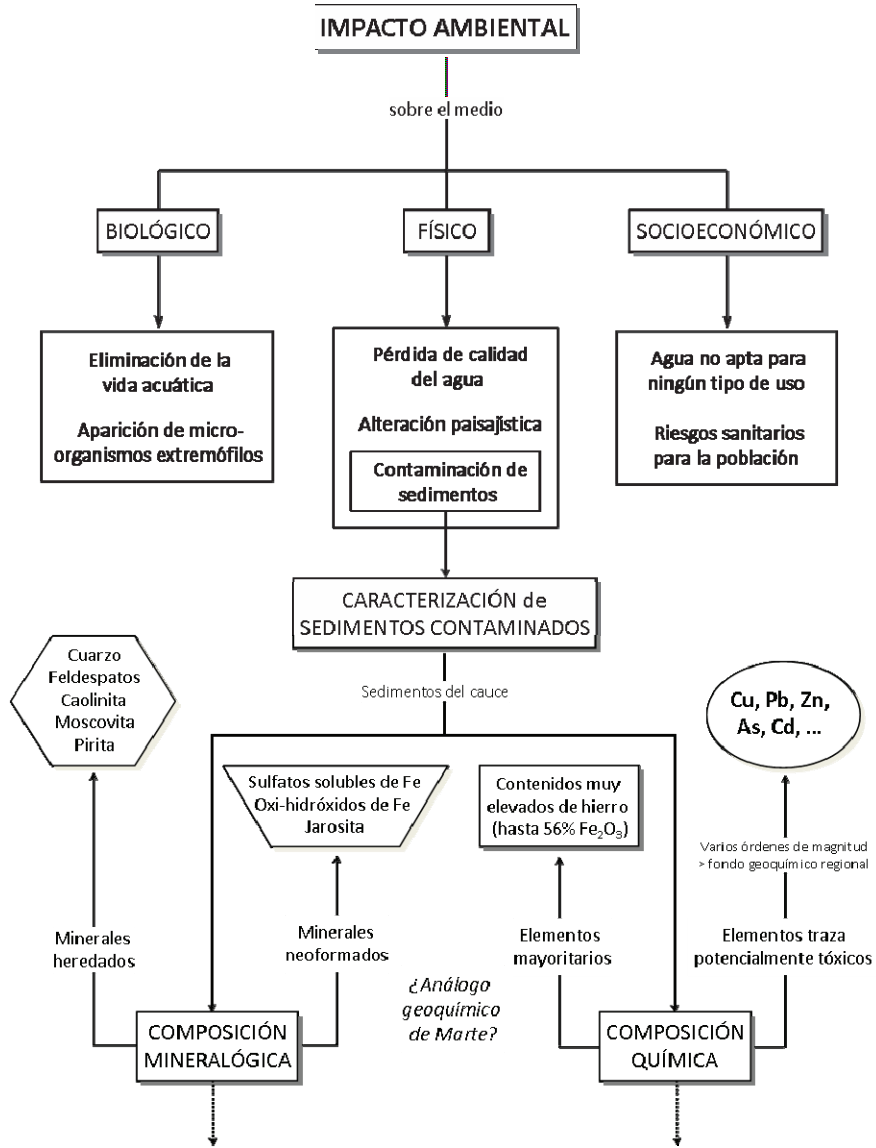


Figura 2. Mapa conceptual sobre el impacto ambiental de la contaminación del río Tinto, particularmente sobre los sedimentos de su cauce.

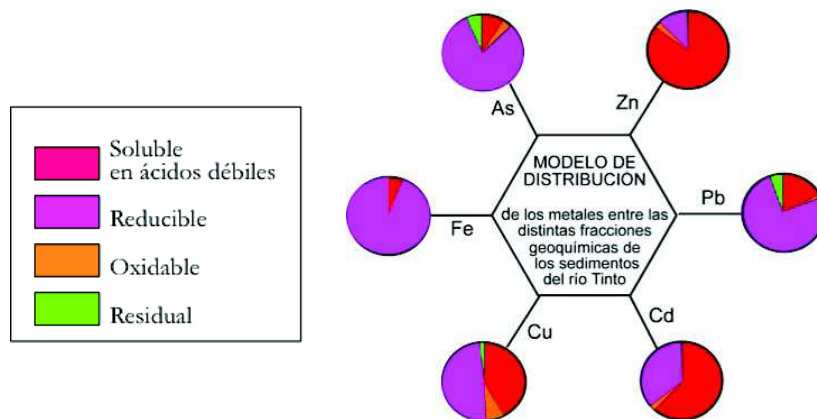
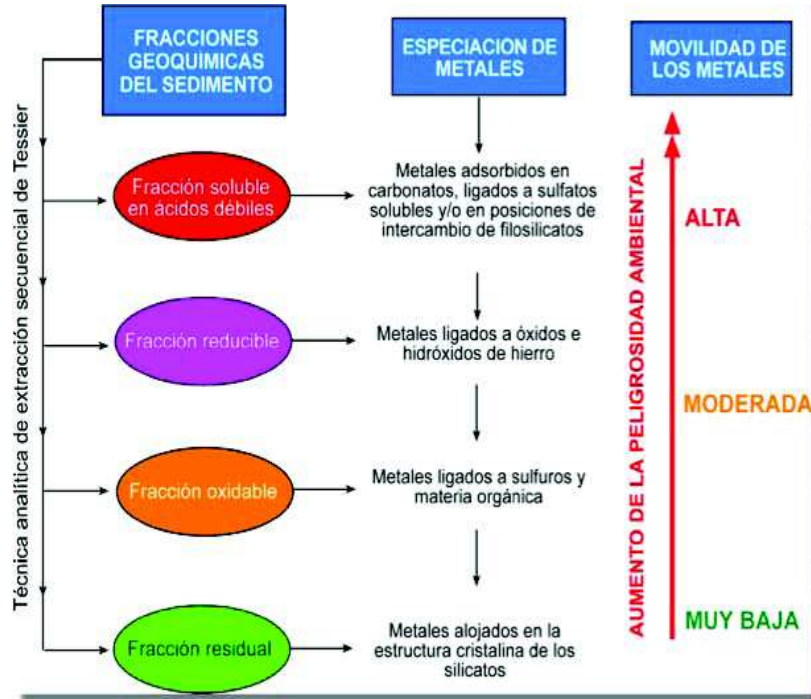


Figura 3. Mapa conceptual sobre el reparto geoquímico, movilidad relativa y peligrosidad ambiental de los metales pesados concentrados en los sedimentos del río Tinto.

## **REFERENCIAS**

Almodóvar, G.R. y Sáez, R. (2004). Los sulfuros masivos de la Faja Pirítica Ibérica. En: *Geología de España*. (Vera, J.A., ed.). Sociedad Geológica de España – Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 207-209.

Amaral-Zettler, L. y cols. (2002). Eukaryotic diversity in Spain' River of Fire. *Nature*, 417, 137-137.

Amils, R. y cols. (2007). Extreme environments as Mars terrestrial analogs: The Río Tinto case. *Planetary & Space Science*, 55, 370-381.

Amils, R. y cols. (2008). Subsurface geomicrobiology of the Iberian Pyrite Belt. En: *Microbiology of Extreme Soils*. (Dion, P. y Nautiyal, C.S., eds.). Springer, 205-223.

Ausubel, D.P. (1963). *The Psychology of Meaningful Verbal Learning*. New York: Grune and Stratton.

Fernández-Caliani, J.C. (2008). Una aproximación al conocimiento del impacto ambiental de la minería en la Faja Pirítica Ibérica. *Macla*, 10, 24-28.

Fernández-Remolar y cols., (2005). The Río Tinto basin, Spain: Mineralogy, Sedimentary Geobiology, and implications for interpretation of outcrop rocks at Meridiani Planum, Mars. *Earth & Planetary Science Letters*, 240, 149-167.

Galán, E. y cols. (1996). Provenance and evolution of suspended clay minerals in the Río Tinto (SW Spain). *Geologica Carpathica – Clays*, 5, 33-38.

Galán, E. y cols. (2003). Heavy metal partitioning in river sediments severely polluted by acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt. *Applied Geochemistry*, 18, 409-421.

Nordstrom, D.K. (1982). Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. En: *Acid Sulfate Weathering*. (Kittrick, J.A. ed.). Soil Science of America, Special Publication, 10, 37-56.

Novak, J.D. y Gowin, D.B. (1984). *Learning how to Learn*. Cambridge: Cambridge University Press.