

# Estudio hidroquímico comparativo en dos sectores con minas abandonadas de sulfuros metálicos: distrito de Linares-La Carolina (Jaén).

Comparative hydrochemical study in two sectors with abandoned metallic sulfide mines: Linares – La Carolina mining district (Jaén).

M.C. Hidalgo Estévez <sup>(1)</sup>, J. Benavente Herrera <sup>(2)</sup>, K. El Mabrouki <sup>(2)</sup> y J. Rey Arrans <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geología, Universidad de Jaén, Escuela Politécnica Superior de Linares, c/ Alfonso X El Sabio, 28, 23700-Linares, España. chidalgo@ujaen.es, jrey@ujaen.es

<sup>(2)</sup> Instituto del Agua, Universidad de Granada, c/ Ramón y Cajal, nº 4, Edif. Fray Luis de Granada, 18071-Granada, España. jbenaven@ugr.es, kaltoum@ugr.es

## ABSTRACT

The Linares-La Carolina abandoned sulfide mines are partially flooded at present and the demand of water resources have led to the pumping of groundwater directly from the old shafts. There is a scarce mobilisation of heavy metals into the waters in the Linares area, which are characterized by net alkaline conditions (pH values from 6.7 to 8.2). Nevertheless, acid mine drainage is detected in La Carolina mining district, where pH values range from 3.4 to 7.3 and mine waters are characterized by a wide range of mineralization (from 300 mS/cm to 5500 mS/cm, approximately). In addition, Fe and Mn reach tens of mg/l, not only in acid mine drainage adits but also in some alkaline waters. These different hydrochemical types are interpreted as being due to the influence of the particular lithologies and hydrodynamic conditions of these mines.

Key words: acid mine drainage, abandoned mines, Linares-La Carolina mining district.

Geogaceta, 39 (2006), 123-126  
ISSN: 0213683X

## Introducción

El distrito minero de Linares-La Carolina (localizado al N de la provincia de Jaén, Fig. 1) engloba numerosas minas subterráneas de sulfuros metálicos, principalmente galena, en filones, actualmente abandonadas.

La explotación de los yacimientos mediante minería subterránea ha sido una actividad importante desde el tiempo de la dominación romana, pero abandonada en la actualidad. La extracción de galena alcanzó su mayor desarrollo a comienzos del siglo XX, cuando este distrito llegó a ser el primer productor mundial, con aproximadamente 65.000 toneladas de Pb por año (Gutiérrez-Guzmán, 1999). A lo largo de la historia del distrito minero han sido frecuentes los aportes de agua subterránea a las labores. De hecho, los periodos de mayor esplendor de la minería estuvieron asociados al desarrollo de métodos efectivos de drenaje de minas, primero mediante máquinas de vapor y luego por motores de explosión eléctricos.

Los dos principales sectores que integran el distrito presentan algunas diferen-

cias. El sector de La Carolina (o de La Carolina-El Centenillo) se caracteriza por un relieve relativamente abrupto, con alternancia de cerros y valles, el cual ha condicionado que las labores de desagüe hayan generado en el transcurso del tiempo una densa red de galerías de drenaje que, en la actualidad, descargan el agua a los principales cauces fluviales. Por el contrario, la topografía del sector de Linares es más suave y el paisaje se caracteriza en su conjunto por una morfología de tipo mesa. Ello dificultaba las tareas de drenaje, ya que durante la pasada década de los cincuenta, algunas explotaciones de Linares necesitaban bombear agua desde más de 500 m de profundidad. Para minimizar los costes de elevación, fue construida una galería de drenaje de 12 km de longitud y profundidad media de 200 m, con objeto de conectar los principales pozos mineros y conducir por gravedad el caudal de drenaje hacia el río Guadalimar, situado en el SE del área (Fig. 1). Esta galería (también llamada «socavón general») de desagüe se diseñó para drenar 600 l/s. Sin embargo, solo fue operativa durante un periodo corto de tiempo, puesto que a finales de la década

de los 80 las últimas actividades mineras cesaron. La parada de las operaciones de bombeo motivó que un importante volumen de los huecos mineros quedara inundado hasta el nivel del socavón.

La génesis de los yacimientos del distrito Linares-La Carolina está asociada a la generación de filones como consecuencia de un episodio distensivo al final de la orogenia hercínica. El basamento paleozoico está constituido por una sucesión de rocas metasedimentarias del Ordovícico al Carbonífero (Azcárate, 1997; Fontboté, 1982). Un aspecto relevante del distrito es la presencia de un macizo granitoide emplazado al final del ciclo Hercínico (Fig. 1). La deformación tectónica en las últimas etapas de este ciclo orogénico produjo una red de fracturas que condicionó el emplazamiento de los filones metalíferos, constituidos principalmente por galena, esfalerita, calcopirita, pirita, barita, cuarzo, ankerita, y calcita encajados en el basamento paleozoico (Lillo, 1992a). El granito intruyó en pelitas carboníferas intensamente plegadas e indujo una aureola metamórfica en esta roca encajante. Otros materiales que afloran alrededor del gra-

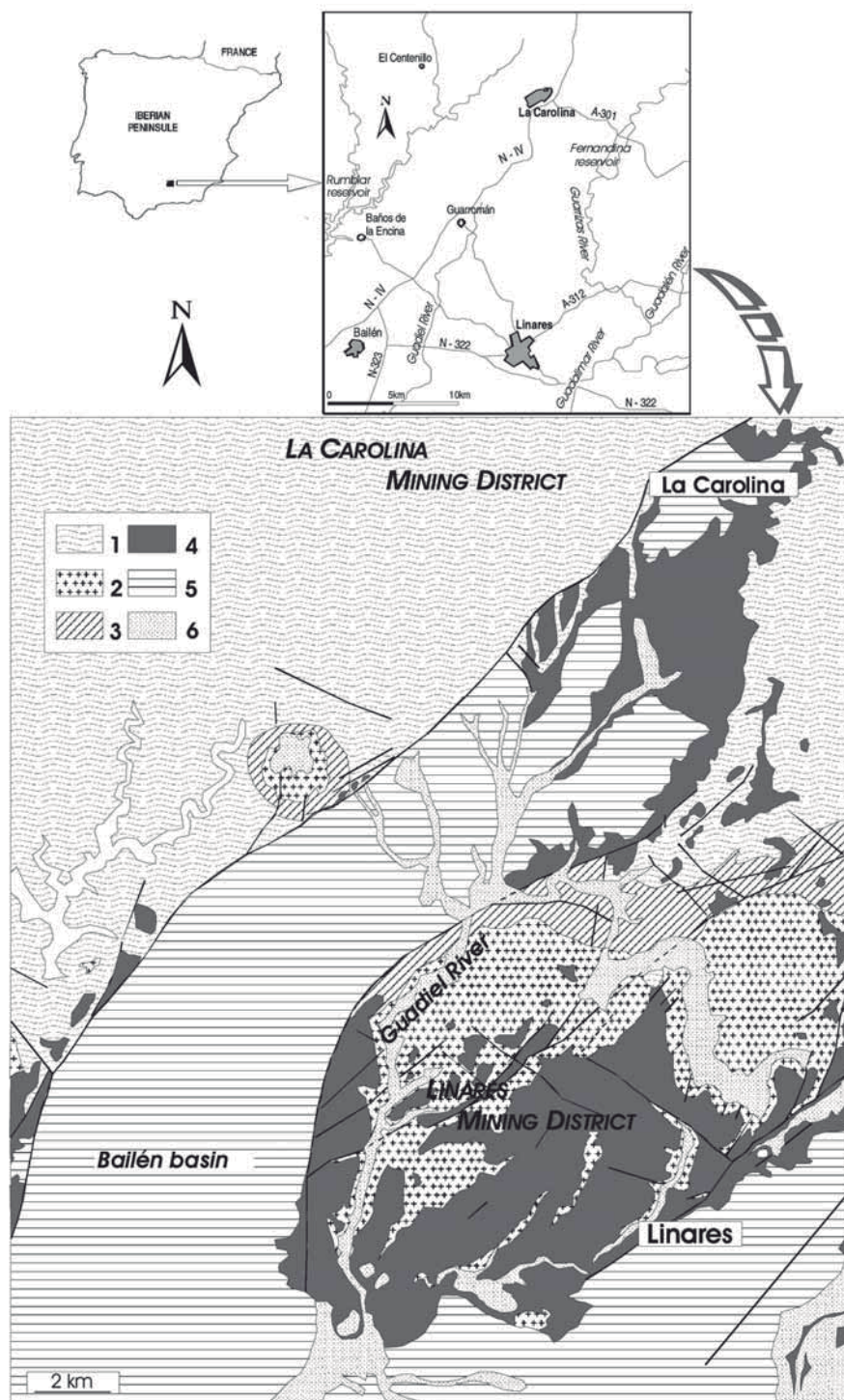


Fig. 1.- Localización y mapa geológico del área estudiada: 1, basamento paleozoico; 2, granito; 3, aureola metamórfica; 4, conglomerados y lutitas triásicas; 5, margas y arenas miocenas; 6, relleno aluvial cuaternario.

Fig. 1.- Location and geological map of the studied area: 1, Palaeozoic basement; 2, granite; 3, metamorphic aureole; 4, Triassic conglomerates and lutites; 5, Miocene marls and sands; 6, Quaternary alluvial infillings.

nito (Fig. 1) son arcillas triásicas y margas limosas con niveles de arenas del Mioceno (Azcárate, 1997). Ambas formaciones son subhorizontales. Además del denso enjambre de filones mineralizados subverticales, el batolito granítico está limitado y atravesado por fallas tensionales

que han sido activas durante la orogenia Alpina.

El batolito de Linares está atravesado en dirección aproximadamente N-S por el río Guadiel -afluente del Guadalquivir por su margen derecha, al igual que el ya citado río Guadalquivir- hacia el que se

produce la mayor parte del drenaje superficial de este sector del distrito minero.

En la actualidad, el socavón general de drenaje actúa como un manantial que drena la mayor parte del macizo granítico y condiciona el nivel piezométrico en las inmediaciones de su traza. Las crecientes necesidades de recursos hídricos subterráneos para el riego de olivar en el área han inducido el bombeo en los pozos de mina abandonados (Benavente *et al.*, 2002). Esto afecta a la descarga del socavón, que en la actualidad raramente supera los 100 l/s.

En el sector de La Carolina la viabilidad de las explotaciones estuvo controlada por el comportamiento geomecánico de los materiales paleozoicos, de manera que solo resultaba interesante la minería cuando la roca encajante presentaba abundantes niveles de cuarcita o estaba afectada por el metamorfismo de contacto.

Las minas explotadas en el sector de la Carolina están situadas a lo largo de los cursos de agua que drenan hacia el embalse del Rumblar (Fig. 1), destinado para el control de avenidas y para el abastecimiento. Hay que señalar la presencia en la cabecera de la cuenca de este embalse de numerosas escombreras mineras, aunque la descarga procedente de las antiguas galerías de drenaje representa una aportación poco significativa respecto al caudal total de los cauces durante la mayor parte del año.

### Objetivos

El objetivo general es caracterizar la calidad química de los recursos hídricos, particularmente en lo relativo a la concentración de metales pesados, así como considerar el impacto ambiental de las labores mineras en tales recursos al cabo de 20-30 años desde que fueron clausuradas. Para el caso del sector de Linares, algunos resultados previos se han presentado en Hidalgo *et al.* (1999) e Hidalgo y Benavente (2001), aunque este trabajo es el primero en que se establece la comparación entre ambos sectores.

Se han llevado a cabo diferentes campañas de control hidroquímico desde 1998, tanto en aguas superficiales como en subterráneas ligadas a las antiguas labores mineras, comenzando en el tiempo por el sector de Linares.

Para las aguas de superficie del sector de Linares se han tomado muestras en el río Guadiel en dos estaciones, situadas aproximadamente en la intersección con las carreteras que unen Linares con Baños de La Encina y con Bailén (Fig. 1). En el sector de



Pozos de mina y socavones de drenaje de La Carolina													
N = 45	Temp.(°C)	E.C.(µS/cm)	pH	Pb	Fe	Mn	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
MAX	24,3	5380	7,3	1	95	40	647	531	167	28	145	3687	627
MIN	7,5	269	3,4	0	0,04	0,01	13	2	8	3	5	9	0
AVER	17,7	1418	6,3	0,07	18,5	5,1	149	88	27	9	22	723	242
SD	4,1	1052	1,0	0,2	28	8,8	139	120	27	6	27	795	180
VC(%)	23	74	15	299	149	174	93	136	100	70	123	110	74
Aguas superficiales de La Carolina													
N = 18	Temp.(°C)	E.C.(µS/cm)	pH	Pb	Fe	Mn	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
MAX	19,8	1892	8,0	0,01	24,2	0,85	158	178	60	13	60	1159	440
MIN	6,3	63	6,5	0	0,05	0,007	4	3	4	0	3	9	20
AVER	11,9	571	7,1	0,003	2,7	0,34	50	34	18	3	15	223	136
SD	4,6	483	0,4	0,005	7,1	0,3	45	44	17	4	17	272	122
VC(%)	38	85	5	150	264	91	91	128	95	132	111	122	89
Pozos de mina de Linares													
N = 19	Temp.(°C)	E.C.(µS/cm)	pH	Pb	Fe	Mn	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
MAX	28,0	1600	8,1	0,2	1,9	6	240	55	80	9	120	740	491
MIN	16,5	310	6,9	0	0,01	0,003	53	8	3	1	4	13	103
AVER	22,4	1050	7,5	0,04	0,3	1	122	32	48	4	51	297	258
SD	2,9	400	0,3	0,05	0,5	1,7	57	15	25	2	29	222	97
VC(%)	13	38	4	129	163	47	47	53	53	57	75	37	37
Socavón general de drenaje de Linares													
N = 10	Temp.(°C)	E.C.(µS/cm)	pH	Pb	Fe	Mn	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
MAX	23,6	910	8,2	0,008	0,1	0,04	117	42	47	4	50	296	262
MIN	20,0	813	6,8	0,002	0,02	0,003	67	22	31	3	40	200	180
AVER	21,5	862	7,5	0,005	0,05	0,015	84	29	40	3	45	238	242
SD	1,1	28	0,6	0,002	0,03	0,01	16	6	5	0	4	30	24
VC(%)	5	3	8	51	65	77	19	22	13	9	8	12	10
Aguas superficiales de Linares													
N = 26	Temp.(°C)	E.C.(µS/cm)	pH	Pb	Fe	Mn	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
MAX	37,7	1126	8,3	0,26	1,3	1,9	124	49	79	10	101	210	394
MIN	8,2	75	6,1	0,003	0,1	0,08	7	3	3	1	4	10	21
AVER	18,4	845	7,4	0,04	0,4	0,6	84	28	47	5	55	120	304
SD	7,8	264	0,6	0,1	0,3	0,5	28	11	22	2	26	37	91
VC(%)	42	31	8	171	68	77	33	40	47	45	47	31	30

Tabla I.- Características físico-químicas de las aguas del distrito minero de Linares-La Carolina (concentraciones expresadas en mg/l).

Table I.- Physical-chemical characteristics of water samples from the Linares-La Carolina mining district (concentrations expressed in mg/l).

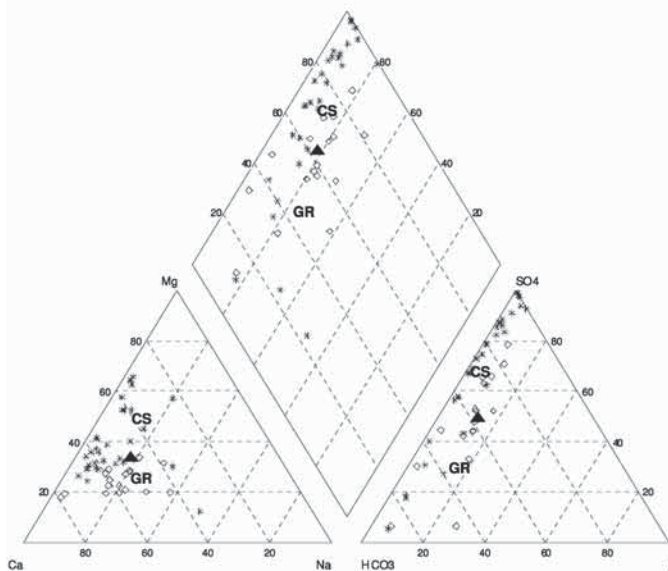


Fig. 2.- Diagrama de Piper con las principales facies hidroquímicas del distrito minero estudiado: los asteriscos corresponden a las aguas de mina de La Carolina; los romboedros a las minas de Linares; el triángulo negro representa la composición media del socavón general de desagüe, CS es la media de las aguas superficiales de La Carolina y GR es el valor medio del río Guadiel.

Fig. 2.- Piper diagram showing the main water types in the studied mining district: samples from La Carolina mines represented with stars; Linares mines represented by rhomboidra; the black triangle represents the average composition of the main drainage adit; CS, average composition of La Carolina surface waters; GR, average composition of the Guadiel River.

La Carolina se han muestreado los dos principales cursos fluviales que drenan el área y que luego afluyen al embalse del Rumblar (Fig. 1). Se han seleccionado secciones de muestreo aguas arriba y debajo de los principales restos de actividades mineras.

**Resultados**

En la tabla I se presenta un resumen estadístico de las variables hidroquímicas más significativas, tanto para las aguas de mina como para las aguas de superficie en cada uno de los sectores considerados. En el sector de Linares se ha distinguido entre las muestras obtenidas en los antiguos pozos de mina (objeto de bombeos en el presente) y las que se han tomado a la salida del socavón minero.

En la figura 2, se han representado en un diagrama de Piper distintas muestras del área de estudio. La figura 3 muestra algunos gráficos de dispersión de las variables físico-químicas más significativas de la tabla I.

Aunque el muestreo en puntos individuales se ha producido de manera más o menos espaciada a lo largo de un periodo de entre 3 y 5 años, hay que indicar que las características hidroquímicas identificadas en cada punto son muy constantes. Esto puede ilustrarse con los valores relativamente bajos de los coeficientes de variación para el caso del socavón de Linares (Tabla I).

En lo que respecta a la variabilidad espacial de los parámetros hidroquímicos, los valores del sector de La Carolina muestran una dispersión considerablemente mayor en la mayoría de las variables físico-químicas (Tabla I). Algunos aspectos particulares de los resultados indicados en la tabla I merecen ser destacados. Valores bajos de pH, inferiores a 4, solo se han identificado en el sector de La Carolina, mientras que en el sector de Linares tanto los pozos como el socavón presentan un carácter netamente alcalino, con valores de pH ≥ 6,7.

En lo relativo a concentraciones individuales, el sector de La Carolina presenta contenidos medios mucho más elevados de sulfatos (723 mg/l), Mg (88 mg/l), Fe (18 mg/l) y Mn (5 mg/l) que el sector de Linares. Dentro de éste último, las muestras obtenidas en los pozos mineros muestran generalmente valores más altos que en el socavón. También las aguas de mina de La Carolina son las más mineralizadas entre los grupos de la tabla I. Esto es particularmente patente en algunas muestras que superan los 5000 mS/cm, lo cual es aproximadamente cuatro veces el valor medio. La temperatura del agua es mayor en las minas de Linares, lo cual refleja el efecto de la profundidad de las labores muestreadas.

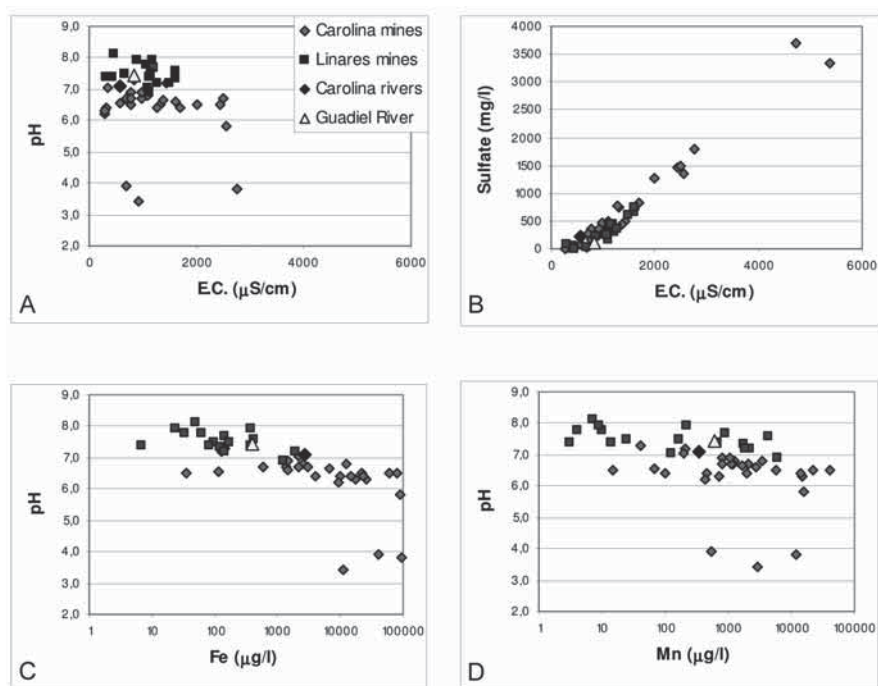


Fig. 3.- Relación entre parámetros físico-químicos de las aguas de Linares-La Carolina: C.E. vs pH (A) y sulfatos (B); pH vs hierro (C) y manganeso (D) (escala horizontal logarítmica en C y D).

Fig. 3.- Hydrochemical plots of Linares-La Carolina water samples: electrical conductivity vs pH (A) and sulfates (B); pH vs iron (C) and manganese (D) contents (note logarithmic horizontal scale in C and D).

El diagrama de Piper (Fig. 2) indica que dos aniones (bicarbonatos y sulfatos) son los predominantes en ambos sectores, dependiendo de la localización específica de los puntos. La proporción de cloruros es menor del 20% en todas las muestras. En el campo de cationes de este diagrama se comprueba que las aguas de la mina de La Carolina están caracterizadas por una mayor proporción de Mg mientras que las de Linares presentan una mayor proporción de Na. La proporción de Ca es variable en un amplio rango (20-80 %) en ambos casos. Esta característica está de acuerdo con la alteración de los minerales que constituyen las rocas encajantes de los filones en cada caso.

El diagrama de dispersión de la conductividad eléctrica respecto del pH (Fig. 3a) indica claramente la homogeneidad de las muestras del sector de Linares. Por otra parte, puede observarse que las aguas de mayor salinidad del sector de la Carolina no corresponden con las de mayor acidez.

Una clara relación directa entre concentración de sulfatos y conductividad eléctrica es deducible de la figura 3b. Según esto, la causa principal de mineralización de las aguas es el resultado de la oxidación de sulfuros en los antiguos huecos mineros. Los dos diagramas restantes de la figura 3 ilustran acerca de la relación de los dos principales metales analizados respecto del pH.

En ambos casos parece manifestarse una relación general inversa entre las variables. En estos diagramas, así como en el de la figura 3a, las aguas ácidas aparecen claramente diferenciadas en la nube de puntos representados.

Las aguas del río Guadiel, aunque presentan facies bicarbonatada cálcica y conductividad moderada (en torno a 800 mS/cm), se caracterizan por contenidos en Mn (600 mg/l) que superan el límite máximo admisible en cauces. En los arroyos de La Carolina, sin embargo, la hidrofacies es de tipo sulfatado magnésico (Fig. 2), con menor mineralización (570 mS/cm) pero contenidos en Fe sensiblemente elevados, con una media próxima a 3 g/l.

### Conclusiones

En el área de estudio la calidad de las aguas subterráneas muestra el efecto de la oxidación de sulfuros. En el sector de Linares no se ha identificado generación de acidez asociada a este proceso, mientras que en el sector de La Carolina si aparecen aguas ácidas.

En lo que respecta a la mineralogía de los filones en ambos sectores, la composición de las galenas es muy semejante (Lillo, 1992b). Teniendo en cuenta esta semejanza en el tipo de sulfuros, la generación de acidez se supone relacionada

con la diferente capacidad neutralizadora de los materiales encajantes -granitos frente a pizarras más o menos metamorfozadas- y de la abundancia de carbonatos en la ganga asociada.

Además, los sistemas de drenaje de las antiguas labores mineras difieren significativamente en los dos sectores estudiados, tanto en longitud como en profundidad e interconexión de los huecos generados. Esta circunstancia debe influir también en las diferencias mencionadas acerca de la capacidad de generación de aguas ácidas, aunque es un aspecto que necesita investigaciones adicionales.

Finalmente, aunque algunas aguas de mina del sector de La Carolina son ácidas y sobrepasan largamente los límites de vertido a cauces para una serie de metales pesados, los pequeños volúmenes de efluentes mineros son diluidos de manera rápida y eficiente por las aguas de escorrentía superficial, lo que minimiza considerablemente su impacto ambiental en la calidad de los recursos hídricos.

### Agradecimientos

Esta investigación ha sido subvencionada por el Instituto de Estudios Giennenses (Proyecto 3-2003) y la Agencia Española de Cooperación Internacional (Proyecto 153-04/R/E)

### Referencias

- Azcárate, J.E. (1977). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 905 (Linares)*. IGME.
- Benavente, J., Hidalgo, M.C., Marín-Lechado, C. y Rubio-Campos, J.C. (2002). *Geogaceta*, 32, 187-189.
- Fontboté, J.M. (1982). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 70 (Linares)*. IGME.
- Gutiérrez-Guzmán, F. (1999). *Las minas de Linares. Apuntes históricos*. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos de Minas de Linares.
- Hidalgo, M.C., Benavente, J. y Rey, J. 1999. En: *Mine, Water and Environment*, IMWA Congress.
- Hidalgo, M.C. y Benavente, J. (2001). En: *New approaches characterizing groundwater flow, vol. 2* (K.-P. Seiler y S. Wohnlich, Eds.). Balkema, 1199-1202.
- Lillo, F.J. (1992a). *Geology and Geochemistry of Linares-La Carolina Pb-ore field (Southeastern border of the Hesperian Massif)*. Tesis Doctoral, Univ. Leeds, 377 pp.
- Lillo, F.J. (1992b). *European Journal of Mineralogy*, 4, 337-343.