

Composición isotópica del Pb en galenas de la región de la Falla de Azuaga. Aportaciones al modelo plumbotectónico de la Zona de Ossa-Morena

Pb isotopic composition of galenas from the Azuaga Fault region. Contribution to the plumbotectonic model of the Ossa-Morena Zone

J.F. Santos Zalduegui ⁽¹⁾, A. Guinea ⁽¹⁾, B. Ábalos ⁽²⁾ y J.I. Gil Iburguchi ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Dpto. Mineralogía y Petrología, Facultad Ciencia y Tecnología, Univ. del País Vasco, ap. 644. 48080 Bilbao. josefrancisco.santos@ehu.es

⁽²⁾ Dpto. Geodinámica, Facultad Ciencia y Tecnología, Univ. del País Vasco, ap. 644. 48080 Bilbao.

ABSTRACT

New Pb isotopic analyses have been obtained on twenty samples of galena from the Azuaga area. In spite of the overall homogeneity, the results for samples to the North of the Azuaga Fault are perceptible different from those to the South. The observed difference is tentatively related to the nature of the host rocks on both sides of the fault. The new data are consistent with previous values of Pb isotopic composition for galenas from the same region. Yet, these results reveal some incongruity in previous models as regards the origin of Pb in the Azuaga area. We favour a model involving the participation of lower crustal or equivalent rock units rather than a mantle-related source for the Pb.

Key words: Pb isotopic composition, galena, Azuaga Fault, Ossa-Morena Zone.

Geogaceta, 43 (2007), 7-10

ISSN: 0213683X

Introducción

En los últimos años se ha incrementando notablemente el número de estudios sobre composición isotópica del Pb en rocas y minerales de diferentes áreas españolas, relacionadas tanto con aspectos geológicos (p.e. Arribas y Tosdal, 1994; Velasco *et al.*, 1996; Canals y Cardellach, 1997; Marcoux 1998; Tornos y Chiaradia, 2004) como arqueológicos (p.e. Stos-Gale *et al.*, 1995; Hunt Ortiz, 2003; Santos Zalduegui *et al.*, 2004). En línea con las investigaciones de tipo geológico, se han muestreado 45 antiguas minas en el área de Azuaga (Badajoz), de entre las cuales se han seleccionado 20 para determinar la composición isotópica del Pb en galenas con los siguientes objetivos: (i) establecer el rango de variación de la composición isotópica del Pb en esa zona minera y la posible influencia del encajante en los yacimientos situados al Norte y Sur de la Falla de Azuaga; (ii) determinar la naturaleza del área fuente del Pb en los yacimientos; y (iii) precisar el modelo vigente de evolución del Pb para la Zona de Ossa-Morena.

Contexto Geológico-Minero

La Zona de Ossa-Morena posee unos tipos litológicos y una evolución tectónica claramente diferentes de las del resto del Macizo Ibérico. No obstante, la definición

y configuración de los dominios que la constituyen, así como el número y características de las fases de deformación que se pueden reconocer son aún objeto de discusión (cf. síntesis en Gibbons y Moreno, 2002, Apalategui *et al.*, 2004; Vera, 2004).

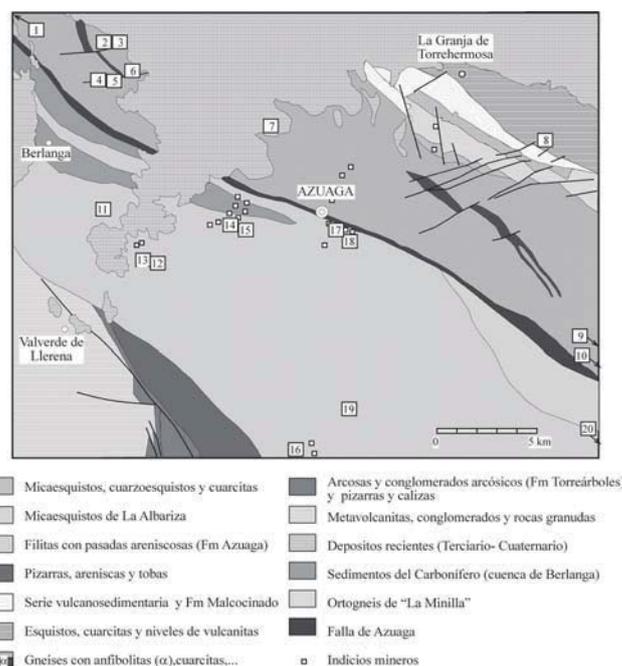
La zona estudiada se sitúa entre las poblaciones de Berlanga y Azuaga de la Hoja 878 (Azuaga) del Mapa Geológico Nacional 1:50.000 atravesada en dirección NO-SE por la falla de Azuaga (Fig. 1) y se pone en con-

tacto hacia el SE con el núcleo metamórfico de alto grado de la Sierra Albarrana.

Al Norte de la Falla de Azuaga (en adelante Subzona Norte) afloran rocas metamórficas de grado medio y alto intensamente deformadas incluyendo gneises, anfibolitas, eclogitas y materiales de la Serie Negra. Los datos de edad, metamorfismo y deformación de estas unidades apuntan a una evolución compleja con episodios tectonotérmicos anteriores

Fig. 1.- Esquema geológico modificado de la hoja 878 (Azuaga) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000 con las minas muestreadas. Los números corresponden a las galenas analizadas (Tabla I). Las minas con una flecha (1, 9, 10, 20) se localizan en las cercanías pero fuera de la hoja 878.

Fig. 1.- Geological sketch modified after the sheet 878 (Azuaga) of the Mapa Geológico Nacional 1:50.000 with the sampled mines. The numbers correspond to analysed galenas (Table I). Mines with an arrow (1, 9, 10, 20) are located nearby but outside the sheet 878.



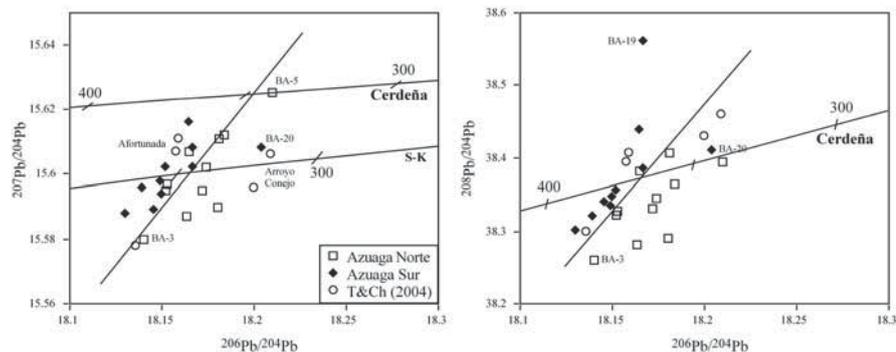


Fig. 2.- Composición isotópica del Pb en galenas de las dos subzonas respecto a la Falla de Azuaga. T&Ch (2004): muestras del «Azuaga Vein field» de Tornos y Chiaradia (2004). S-K: evolución del Pb entre ca. 300 y 400 Ma según el modelo de Stacey y Kramers (1975). Cerdeña: Id. para galenas de esta isla según Ludwig et al. (1989).

Fig. 2.- Pb isotopic composition of galenas from the two subzones related to the Azuaga Fault. T&Ch (2004): samples from the «Azuaga Vein field» of Tornos and Chiaradia (2004). S-K: Pb model evolution between ca. 300 and 400 Ma after Stacey and Kramers (1975). Cerdeña: Id. for galenas from Sardinia after Ludwig et al. (1989).

al emplazamiento de rocas ígneas ordovícicas, así como eventos posteriores variscos.

Al Sur de la Falla de Azuaga (en adelante Subzona Sur) afloran principalmente metapelitas de grado medio-bajo. Se trata de una potente serie de pizarras y filitas con intercalaciones grauváquicas, raros niveles de carbonatos y rocas volcánicas retrabajadas, para la que se ha propuesto una edad precámbrica a Cámbrico Inferior-Medio.

La mayoría de los yacimientos de Pb de la zona de Berlanga-Azuaga presentan paragénesis de blenda-pirita-galena-calcopyrita (BPGC ± Ag) con ganga de cuarzo, carbonatos y, a veces, barita, similares a otros de la Zona Centro-Ibérica, tanto en Extremadura (Castuera) como en Castilla-La Mancha (Valle de Alcudia). En las proximidades de la Falla de Azuaga la mineralización es de tipo filoniano y su emplazamiento presenta un claro control tectónico, rellenando fracturas tardi- a post-variscas de dirección N050-080°E y N020-045°E, siendo el primero más frecuente.

En el entorno de Azuaga existen además otros tipos de mineralizaciones, como: (i) de Pb-Zn-V en filones de relleno de fallas de extensión, probablemente de origen secundario, supergénico; (ii) de Pb-Zn-Cu estratiformes y estratoligadas; y (iii) de Pb-Zn muy similares a las de Azuaga del noroeste de Berlanga que encajan en rocas metamórficas milonitizadas (Aplategui et al., 1985).

Muestras analizadas y método analítico

De entre las 45 muestras de galena obtenidas en diferentes escombreras de mi-

nas de la zona de Azuaga (Fig. 1), se han seleccionado 20 para el análisis isotópico del Pb en el Servicio de Geocronología y Geoquímica Isotópica de la UPV/EHU (cf. Santos et al., 2001 para detalles de preparación y medida). La corrección para la fraccionación de masas se efectuó por comparación con medidas repetidas del estándar NBS-981 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18,897 \pm 0,002$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15,437 \pm 0,003$ y $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36,531 \pm 0,009$; $n = 4$) tomando como valor de referencia los datos de Todt et al. (1981). Las edades modelo y los valores m_2 y w_2 (Tabla I) se han calculado a partir de los parámetros propuestos por Stacey y Kramers (1975) para la evolución isotópica del Pb en una corteza media.

Resultados

Los relaciones isotópicas del Pb en las 20 muestras analizadas son bastante homogéneas con rangos de: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.130-18.204$; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.580-15.625$; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.260-38.560$. Esta homogeneidad también se repite para los diferentes parámetros calculados, p.e. las edades modelo varían entre 315 y 380 Ma, mientras que los valores de m_2 y w_2 son 9.7 a 9.8, y 38.1 a 40, respectivamente (Tabla I, Fig. 2).

En detalle, se aprecia que los indicios mineros de la Subzona Norte presentan valores medios de las relaciones $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ algo superiores a los de la Subzona Sur: 18.170 vs. 18.157. Dos muestras de la Subzona Sur, BA-19 para la relación $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y, en menor medida, BA-20 para $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, presentan valores anómalos, aunque los datos de esta última se solapan con los de las muestras de la Subzona Norte.

En el diagrama $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ se observa que los datos obtenidos se

aproximan a una evolución del Pb según la curva modelo para la corteza media de Stacey y Kramers (1975) y con la establecida para galenas de la isla de Cerdeña (Ludwig et al., 1989) (Fig. 2). También, y aunque no se muestra en la figura 2, existe una coincidencia con la del modelo del orógeno de Zartman y Doe (1981). En el diagrama $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Fig. 2) se aprecia de nuevo la coincidencia con los datos de Cerdeña (así como con el orógeno de Zartman y Doe, 1981; no mostrado), mientras que difieren claramente de la curva de Stacey y Kramers, con valores muy inferiores a los aquí obtenidos y situada fuera (en la parte baja) de la figura.

Estos nuevos datos son, por otra parte, concordantes con los publicados por Tornos y Chiaradia (2004) para el «Azuaga Vein field» de donde se infiere que las muestras de Arroyo Conejo coinciden con los nuestros de la Subzona Norte, mientras que los de las muestras de Afortunada lo hacen con los aquí obtenidos para la Subzona Sur (Fig. 2).

Discusión y modelo Plumbotectónico

Clásicamente se ha considerado que la mayoría de los filones de la región de Azuaga tenían origen, paragénesis, orientación y edad muy similares. Los datos obtenidos en este trabajo apuntan, en efecto, a la existencia de un área fuente de Pb muy homogénea, la cual, durante el periodo tardi- a post-varisco y en relación con movimientos a lo largo de la Zona de Cizalla Badajoz-Córdoba, habría proporcionado el Pb para las mineralizaciones de dicha región.

De hecho, excepto las muestras BA-19 y BA-20, que necesitarían un estudio minucioso del yacimiento y su encajante, el resto de resultados forman un conjunto homogéneo en el que las diferencias menores de la composición isotópica del Pb entre yacimientos de la Subzona Norte y de la Subzona Sur (Fig. 2) podrían deberse a los diferentes tipos de encajante a ambos lados de la Falla de Azuaga: tectonitas gneísicas al norte vs. pizarras y filitas al sur (Fig. 1). Obviamente, para verificar de forma precisa esta hipótesis sería necesario analizar de forma exhaustiva los diferentes tipos de encajante, algo fuera del alcance del presente trabajo. No obstante, cabe mencionar que la participación de materiales del encajante en las mineralizaciones de esta región ya ha sido propuesta para los filones con Pb-Zn-V en relleno de fallas de extensión con vanadatos y carbonatos de Pb secundarios supergénicos (minas San Miguel y Gerty). Dichos filones, que en profundidad pasan a mineralizaciones filonianas de tipo BPG,

encajan en anfibolitas intercaladas en los Gneises de Azuaga y su origen se relacionaría con el elevado contenido en V de las rocas básicas (Apalategui *et al.*, 1985).

Los datos obtenidos en el presente trabajo permiten precisar el modelo vigente de evolución plumbotectónica para la Zona de Ossa-Morena, considerada como resultado de un evolución metalogénica polifásica durante los ciclos orogénicos Cadomiense y Varisco (Tornos y Chiaradia, 2004). Para estos autores existirían al menos dos áreas fuente de Pb en esta zona, una mantélica y otra cortical, diferenciándose hasta siete grupos de mineralizaciones teniendo en cuenta aspectos como la geología, edad de los depósitos y sus características isotópicas.

En detalle los nuevos datos concuerdan en general con los del grupo «Venas de Pb-Zn post-variscas asociadas espacialmente a la Zona de Cizalla Badajoz-Córdoba» de Tornos y Chiaradia más concretamente al subgrupo sin relación clara con los granitoides variscos y que habría sufrido una contribución significativa de Pb desde una fuente primitiva (p.e. Arroyo Conejo y Afortunada).

En su modelo general, Tornos y Chiaradia (2004) proponen la mezcla de Pb de, al menos, dos reservorios diferentes, uno mantélico con $\mu=9.3$ y $w=36$, y otro tipo corteza superior con $\mu=10.1$ y $w=42$. Estos autores sugieren que las bajas relaciones $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ en la Zona de Ossa-Morena estarían relacionadas con el IRB (Iberseis Reflective Body), supuesto cuerpo estratiforme de naturaleza máfica cuya presencia se reflejaría en los perfiles sísmicos profundos (Simancas *et al.*, 2003, 2004).

No obstante, este modelo deja algunas cuestiones sin resolver de entre las que cabe señalar: (i) El IRB no aparece bajo la Zona Sud-Portuguesa, pero sí lo hace de forma discreta por debajo de lo que Simancas *et al.* (2003, 2004) consideran Zona Centro-Ibérica (dominio de Obejo-Valsequillo-Puebla de la Reina y valle de Los Pedroches). En ese caso quedaría por explicar la ausencia de firmas mantélicas en los yacimientos del valle de Los Pedroches (isotópicamente análogos a los de la zona de Alcudía, Santos *et al.*, 2004). (ii) El escenario geológico sugerido para la intrusión tardi-varisca del IRB es una pluma mantélica o una anomalía térmica en el manto hace ca. 330-350 Ma. Sin embargo, Tornos y Chiaradia (2004) citan firmas primitivas en minas asociadas al ciclo Cadomiense, con valores incluso menos radiogénicos que los de las minas relacionadas con el IRB. No se puede excluir, por tanto, que el reservorio que originó las mineralizaciones ‘cadomienses’ pudiera ser también el responsable de la firma

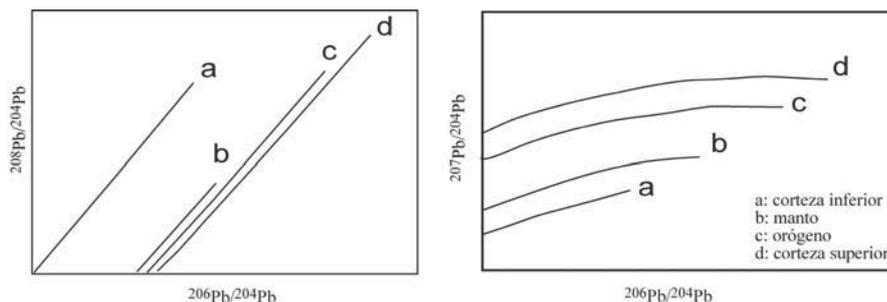


Fig. 3.- Evolución del Pb según el modelo de Zartman y Doe (1981) para diferentes reservorios terrestres.

Fig. 3.- Pb evolution after the model of Zartman and Doe (1981) for different reservoirs in the Earth.

mantélica en las mineralizaciones variscas. (iii) En el modelo de Simancas *et al.* (2003, 2004) el contacto entre las Zonas de Ossa-Morena y Centro Ibérica está representado por la denominada Unidad Central cuyo límite sur es la falla de Azuaga. Por otra parte, y de acuerdo con los datos del perfil sísmico, en la vertical de dicha falla se aprecia una discontinuidad en el IRB a ambos lados de la misma, lo que sugiere su actividad posterior al emplazamiento de este cuerpo. Este hecho contrasta significativamente con la práctica ausencia de firmas mantélicas en el Pb de la región de la falla de Azuaga como veremos a continuación.

Los valores de μ_2 y w_2 para la zona de Azuaga: 9.7 - 9.8 y 38.1 - 40, respectivamente, son muy parecidos a los del modelo

de corteza media de Stacey y Kramer (1975): 9.7 y 36.84, respectivamente, pudiendo interpretarse como el resultado de un prolongado reciclaje cortical con extracción polifásica a partir de un reservorio en el cual la relación U-Pb sería constante. Los valores algo más elevados de w apuntan a una pérdida de Pb tórogénico en la corteza inferior, si bien para algunos autores podrían deberse también a una separación de U/Th durante procesos de alteración y erosión (Koppel, 1983). En cualquier caso, estos valores de w concuerdan con los observados en yacimientos variscos del Sur de Europa y sugieren la existencia de una provincia plumbífera varisca sudeuropea con características y evolución isotópica particulares (p.e.

Muestra	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Edad (Ma)	μ_2	w_2
Subzona Norte, yacimientos asociados a gneises con intercalaciones anfibolíticas						
BA-1	18.180	15.590	38.290	315	9.7	38.1
BA-2	18.163	15.587	38.282	322	9.7	38.2
BA-3	18.140	15.580	38.260	326	9.7	38.1
BA-4	18.184	15.612	38.365	357	9.8	39.0
BA-5	18.210	15.625	38.394	363	9.8	39.2
BA-6	18.172	15.595	38.331	332	9.7	38.5
BA-7	18.174	15.602	38.346	344	9.7	38.7
BA-8	18.153	15.597	38.328	350	9.7	38.7
(duplicado)	18.152	15.595	38.322	347	9.7	38.6
BA-9	18.165	15.607	38.383	361	9.8	39.1
BA-10	18.181	15.611	38.406	358	9.8	39.2
Subzona Sur, yacimientos asociados a la Fm. Azuaga						
BA-11	18.150	15.594	38.347	347	9.7	38.8
BA-12	18.146	15.589	38.339	339	9.7	38.6
BA-13	18.152	15.602	38.356	361	9.8	39.0
BA-14	18.130	15.588	38.301	350	9.7	38.5
BA-15	18.139	15.596	38.320	359	9.7	38.7
BA-16	18.165	15.616	38.438	380	9.8	39.6
BA-17	18.149	15.598	38.334	354	9.7	38.8
BA-18	18.167	15.608	38.385	361	9.8	39.1
BA-19	18.167	15.602	38.560	350	9.7	40.0
BA-20	18.204	15.608	38.410	333	9.8	39.0

Tabla I.- Composición isotópica del Pb en galenas de la región de la Falla de Azuaga.

Table I.- Pb isotopic composition of galenas from the Azuaga Fault region.

Brevart *et al.*, 1982; Köppel., 1983; Ludwig *et al.*, 1989). La concordancia de los datos $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ entre Azuaga y otros yacimientos variscos del Sur de Europa es obvia si consideramos el modelo evolutivo del Pb para galenas de Cerdeña (Ludwig *et al.*, 1989; Fig. 2). Según esto, las mineralizaciones de Azuaga reflejarían la extracción de Pb a partir de materiales con una evolución para el Pb uranogénico típico de una corteza media, aunque no tan evolucionada como la de Cerdeña, presentando un aporte de Pb torogénico más elevado que el del modelo de corteza media y parecido al del modelo de Cerdeña.

Para explicar los valores relativamente altos de $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ respecto al modelo de Stacey y Kramers (1975), hemos recurrido al modelo de Zartman y Doe (1981). En este caso se proponen tres grandes reservorios terrestres: corteza superior, corteza inferior y manto, además de otro transitorio: orógeno, muy similar en su evolución a la corteza media de Stacey y Kramers. En el diagrama $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Fig. 3) se aprecia que el manto presenta una evolución muy similar a la corteza superior y al orógeno, mientras que la corteza inferior da valores más radiogénicos. De ahí que valores elevados de $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ se atribuyan con frecuencia a una contribución de corteza inferior. En el diagrama $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (Fig. 3), vemos que los valores bajos de $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ efectivamente se pueden atribuir a una contaminación importante con material mantélico; sin embargo, se observa que la corteza inferior puede tener valores significativamente menos radiogénicos que los del manto, por lo que sería suficiente con una contribución moderada de este reservorio para reducir el valor $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. En definitiva, composiciones típicas de corteza media (orógeno) como las obtenidas podrían resultar de la mezcla de materiales de la corteza superior con un componente de corteza inferior que modificaría tanto los valores de $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ como los de $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, mientras que la mezcla con materiales mantélicos modificaría preferentemente los valores de $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ y no explicaría los altos valores de $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ observados.

En la zona de Azuaga no hay evidencia directa de la participación de materiales mantélicos o de la corteza inferior en la génesis de los yacimientos. No obstante, los datos disponibles indican que los gneises y metabasitas al norte de la Falla de Azuaga recrystalizaron en condiciones de alta presión y temperatura media a alta, típicas de zonas profundas en un contexto orogénico. En esas condiciones, no se pueden descartar cambios significativos

en los contenidos de Pb, Th y U, entre otros elementos, que podrían llegar a afectar a la composición del Pb en rocas cercanas con características más propias de corteza superior (p.e. Fm. Azuaga). En cualquier caso, y para contrastar esta hipótesis de modo riguroso sería necesario disponer de datos isotópicos y de concentraciones de U, Pb y Th en las rocas mencionadas.

Conclusiones

Las composiciones isotópicas del Pb en galenas de las mineralizaciones filonianas tardi- a post-variscas de la región de la Falla de Azuaga definen campo composicional relativamente homogéneo. En detalle, los yacimientos situados al norte de la Falla (Subzona Norte) presentan ligeras diferencias respecto a los situados al sur de la falla que pueden estar relacionadas con los distintos tipos de materiales encajantes: gneises y metabasitas en la parte norte, vs. pizarras, filitas y metavolcanitas (Fm. Azuaga) en la parte sur. La interpretación convencional del origen del Pb en estas mineralizaciones como resultado de la mezcla de dos reservorios, uno cortical y otro mantélico, en relación con la intrusión del IRB (Tornos y Chiaradia, 2004) plantea algunos problemas. Los nuevos datos obtenidos en el presente trabajo permiten revisar algunos aspectos del modelo plumbotectónico regional. Así, los valores de μ_2 y w_2 (9.7 a 9.8 y 38.1 a 40 respectivamente) sugieren que el Pb de las mineralizaciones deriva de materiales constitutivos de una corteza media en los que hubo aporte de Pb torogénico. Para ello se propone la participación de materiales no mantélicos, posiblemente relacionados con las unidades de gneises y metabasitas situadas al norte de la Falla de Azuaga que, por sus características petrológicas y estructurales, pudieron haber sufrido importantes cambios en los contenidos de Pb, Th y U.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CGL2005-03157/BTE (Responsable: B. Ábalos). Asimismo agradecer la colaboración del Ayuntamiento de Azuaga y en particular a M^a Carmen Gordón por su compañía durante el muestreo de las diferentes minas

Referencias

Apalategui, O., Borrero, J., Delgado-Quesada, M., Roldán, F.J. y Eguiluz, L.,

- (1985). *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 878 (Azuaga)*. IGME.
- Apalategui, O., Carracedo, M., Eguiluz, L., Gil-Ibarguchi, J.I., Martínez Torres, L.M., Palacios, T. y Sarrionandia, F. (2004). *Geotemas*, 6, 175-179.
- Arribas A. Jr. y Tosdal, R. M. (1994). *Economic Geologic*, 89, 1074-1093.
- Brevart, O., Dupré, B. y Allegre, C.J. (1982). *Economic Geology*, 77, 564-57.
- Canals, A. y Cardellach, E. (1997). *Mineralium Deposita*, 32, 243-249.
- Gibbons, W. y Moreno, F (Eds.).(2002). *The Geology of Spain, Geological Society of London*, 649 p.
- Hunt Ortiz, M.A. (2003). *Prehistoric mining and metallurgy in South West Iberian Peninsula*. Oxford. Archaeopress. Publishers of British Archaeological Reports, 1188, 418 p.
- Köppel, V. (1983). En: *Mineral deposits of the Alps and of the Alpine epoch in Europe* (H.J. Schneider, Ed.). Springer Verlag, 162-168.
- Ludwig, K.R., Vollmer, R., Turi, B., Simmons K. R. y Perna G. (1989). *European Journal of Mineralogy*, 1, 657-666.
- Marcoux, E. (1998). *Mineralium Deposita*, 33, 45-58.
- Santos Zalduegui, J.F., García de Madina-beitia, S. y Gil Ibarguchi, J.I. (2001). En: *III Congreso Ibérico, VIII de España, de Geoquímica*. Libro de Actas, 443-446.
- Santos Zalduegui, J.F., García de Madina-beitia, S., Gil Ibarguchi, J.I. y Palero, F. (2004). *Archeometry*, 46, 625-634.
- Simancas, J.F., Carbonell, R., Gonzalez Lodeiro, F., Perez Estaun, A., Juhlin, C., Ayarza, P., Kashubin, A., Azor, A., Martínez Poyatos, D., Almodovar, G.R., Pascual, E., Saez, R. y Exposito, I. (2003). *Tectonics*, 22, 1062, doi:10.1029/2002TC001479.
- Simancas J.F. y Azor A. (2004) En: *Geología de España* (J.A. Vera Ed.). SGE-IGME, 224-230.
- Stacey, J.S. y Kramers, J.D. (1975). *Earth Planetary and Science Letters*, 26, 207-221.
- Stos-Gale, Z., N.H. Gale, J. Houghton y Speakman, R. (1995). *Archeometry*, 37, 407-415.
- Todt, W., Cliff, R.A., Hanser, A. y Hofmann, A.W. (1993). En: *VII Congreso EUG*. Terra Abstract, 5, p 396.
- Tornos, F., y Chiaradia, M., (2004). *Economic Geology*, 99, 965-985.
- Velasco, F., Pesquera, A. y Herrero J.M. (1996). *Mineralium Deposita*, 31,84-92.
- Vera, J.A. (Ed.). (2004). *Geología de España*, SGE-IGME, Madrid, 890 p.
- Zartman, R.E., y Doe, B.R. (1981). *Tectonophysics*, 75, 135-162.