

Aspectos petrológicos, geoquímicos y metalogénicos del magmatismo intraplaca en distintos contextos y edades geológicas

Petrologic, geochemical and metallogenic aspects of intraplate magmatism in various geological settings and ages.

F. Gervilla (*), P. Fenoll Hach-Alí (*), A. García-Casco (*), P. Higuera (**), J.F. Molina (*), D. Morata (***), E. Puga (*) y A. Sánchez-Anguila (****)

(*) Departamento de Mineralogía y Petrología, y/o Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (Universidad de Granada-CSIC). Facultad de Ciencias. Avda. Fuentenueva, s/n, 18002 Granada.

(**) Departamento de Ingeniería Geológica y Mineralogía. Universidad de Castilla-La Mancha, E.U.P. de Almadén. 13400 Almadén, Ciudad Real.

(***) Departamento de Cristalografía, Mineralogía, Estratigrafía, Geodinámica, Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real, Cádiz.

(****) APLITEG S.L. Colonia de San Sebastián, 6-6ªA, 18007 Granada.

ABSTRACT

Different occurrences of basic-ultrabasic rocks ranging in age from Precambrian to Mesozoic reveal that intraplate magmatism is a suitable target for exploration of Ni-Cu-PGE ores (and locally, Hg ores). Long travels of these magmas across the continental crust favours the assimilation of enclosing siliceous rocks, promoting their saturation in sulfur and segregation of immiscible sulfide melts. This can generate a primary Ni-Cu-PGE ore which can be remobilized and reconcentrated during later hydrothermal or tectonometamorphic processes. The latter are obviously more probable in old than in young rocks, thus explaining the current association of world-grade, Ni-Cu-PGE deposits to Precambrian and Paleozoic rocks.

Key words: *Intraplate magmatism, Ni-Cu-PGE ores, Hg ores, crustal contamination, hydrothermal/metamorphic remobilization.*

*Geogaceta, 20 (7) (1996), 1653-1656
ISSN: 0213683X*

Introducción

El diseño original del proyecto P.I.C.G. nº 336 estaba orientado al establecimiento de criterios útiles para la evaluación del potencial metalogénico del magmatismo intraplaca en distintas regiones, y a lo largo del tiempo geológico. Durante el desarrollo del proyecto, este objetivo se ha focalizado hacia los importantes depósitos de Cr, Ni, Cu y elementos del grupo del platino (EGP), asociados a basaltos de plataforma y a grandes complejos estratificados. No obstante, la presencia en España de un caso único de mineralización de Hg a escala mundial, ha permitido ampliar el espectro de yacimientos y procesos metalogénicos que se asocian al volcanismo intraplaca. Así, los distintos equipos del grupo de trabajo español han centrado su actividad investigadora en Argentina y en España, so-

bre rocas ígneas básicas y ultrabásicas con diferente grado, y tipo, de mineralización, distribuidas a lo largo de un intervalo de tiempo geológico que va desde el Precámbrico al Mesozoico. Las rocas estudiadas afloran en: la Cordillera Frontal, (Mendoza, Argentina); el Basamento Cristalino de las Sierras Pampeanas (San Luís, Argentina); el sinclinal de Almadén, (Ciudad Real, España) y las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas (sur de España).

El distrito minero Salamanca (Argentina).

El distrito minero Salamanca se localiza en la Cordillera Frontal de Mendoza, Departamento de Tupungato, e incluye diversas minas (Salamanca, Barrera y Luisa) alineadas de norte a sur, a lo largo de una zona de falla que desplaza el flanco occidental de la estructura sinforme, cuyo nú-

cleo está ocupado por rocas básicas y ultrabásicas: serpentinitas, gabros y anfibolitas con facies de albíta-epidota. La mineralización metálica consiste en calcopirita, pirrotina y esfalerita, con menores cantidades de pentlandita cobaltífera, cubanita, pirita, violarita, mackinawita, bornita, calcosina, vallerita, altaíta y oro nativo; y encaja en serpentinitas y anfibolitas silicificadas y/o carbonatizadas. Los procesos de silicificación/carbonatación no afectan sólo a las rocas con mineralización metálica (restringida a la zona de falla), sino que son de mayor escala, originando los depósitos de talco, con niveles de magnesita subordinados, que se explotan en la actualidad a lo largo de un cinturón de varios kilómetros (Gregori y Bjerg, 1992).

La sucesión de procesos de alteración hidrotermal observables en la región tras el metamorfismo en facies de anfibolitas de

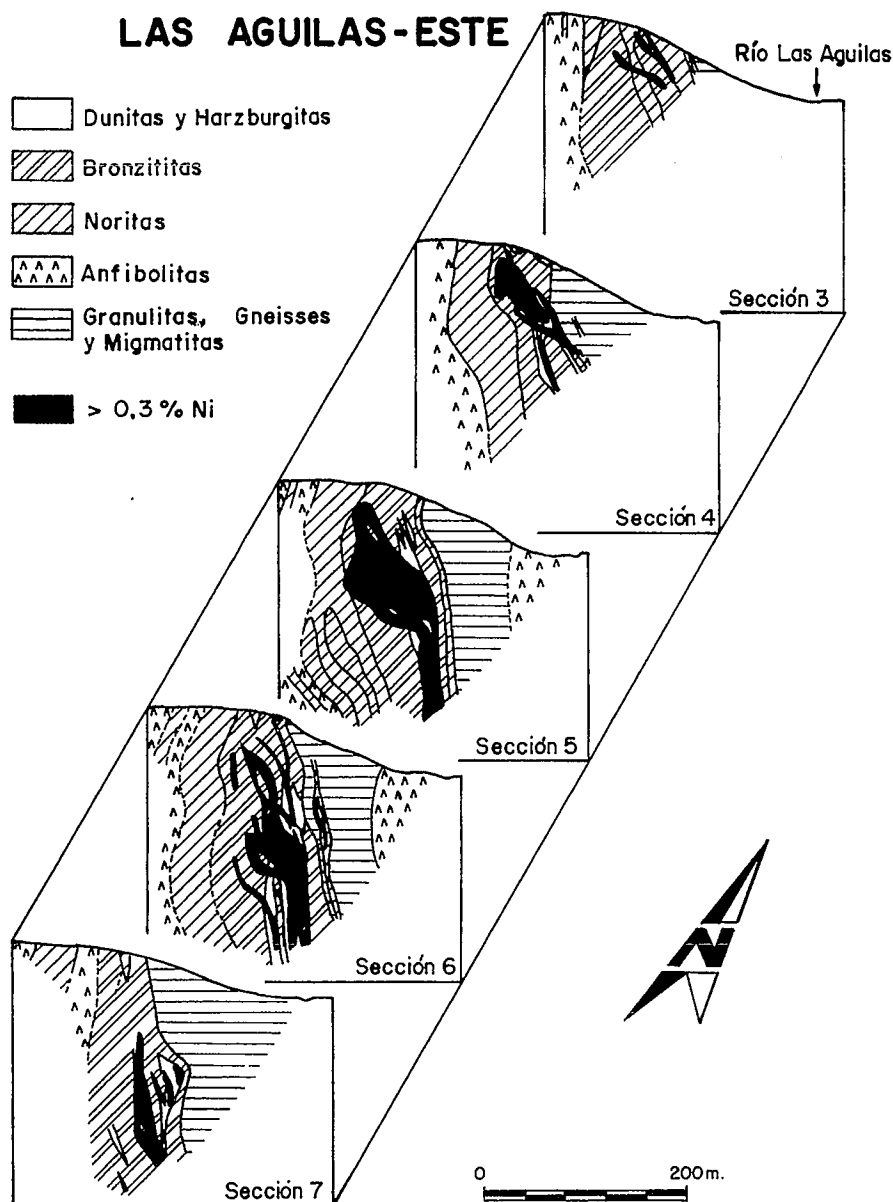


Fig. 1.- Relación entre la mineralización de Ni-Cu, las rocas básicas-ultrabásicas encajantes y la estructura del depósito de Las-Aguilas Este. Bloque diagrama elaborado a partir de los datos de Sabalúa (1986).

Fig. 1.- Geometric relationships among the Ni-Cu sulfide ore, the basic-ultrabasic rocks and the fold structure, at the Las Aguilas-East. Data from Sabalúa (1986).

albita-epidota, dió lugar a la retrogradación de estas paragénesis, con la aparición de clorita, y a la formación de asociaciones compuestas por lizardita + magnetita + brucita (\pm antigorita \pm tremolita \pm clorita) en las serpentinitas (Acevedo *et al.*, 1994). Las soluciones hidrotermales, probablemente relacionadas con las intrusiones de granodioritas próximas, lixiviaron una mineralización diseminada de sulfuros de Fe-Ni-Cu existente en las rocas ultrabásicas, reconcentrándola en la zona de falla. Este hecho explica las variaciones composicionales de la cobaltopentlandita (Sánchez-Anguila *et al.*, 1995), así como los bajos contenidos en

EGP y los altos contenidos en Au de la mineralización (Bjerg, 1994).

Mina Las Aguilas (Argentina).

Esta mina se localiza a unos 40 km al NE de la ciudad de San Luis, en el Basamento Cristalino de las Sierras Pampeanas. La mineralización de Ni-Cu-EGP aparece asociada a una secuencia de rocas básicas-ultrabásicas de edad precámbrica, constituida por dunitas, harzburgitas, bronzitas y noritas, parcialmente metamorfizada. Las rocas encajantes son granulitas, gneisses y migmatitas que

muestran una evolución retrograda casi isobárica desde unas condiciones próximas a 7,5 Kb y 800°C. La mineralización de sulfuros está formada principalmente por pirrotina, pentlandita y calcopirita, con una asociación de minerales de EGP constituida por sperrilita, sulfoarseniuros de Ir y Rh (irarsita, hollingworthita y cobaltita níquelífera rica en Rh), y bismutotelururos de Pd (merenskyita con Ni y Bi, melonita con Bi y Pd, y michenerita). Estas menas se localizan en dunitas, harzburgitas y, sobre todo, a lo largo de zonas de cizalla en bronzitas, donde reemplazan los pequeños subgranos de las milonitas (Fig. 1).

Durante la cristalización fraccionada de un magma basáltico, contaminado por la asimilación de material cortical, se segregó un líquido sulfurado inmiscible que dió lugar a la formación de una mineralización primaria de sulfuros de Fe-Ni-Cu. Asociada a esta etapa se formaron los arseniuros y sulfoarseniuros de EGP. En una etapa sin-a post metamórfica, se desarrollaron zonas de cizalla que favorecieron la canalización de fluidos metamórficos y la removilización de la mineralización primaria. Los sulfoarseniuros de EGP se movilizaron como cristales sólidos, sufriendo importantes procesos de disolución y fracturación. Por el contrario, los bismutotelururos de Pd, de acuerdo con sus relaciones de fase en el sistema Pd-Te-Bi (Hoffman y McLean, 1976), cristalizaron durante los estadios finales de esta etapa, en condiciones metamórficas retrogradadas, desde facies de anfibolitas a facies de esquistos verdes.

Las mineralizaciones de mercurio del sinclinal de Almadén (España).

Los yacimientos de este distrito contienen del orden del 30% de las reservas mundiales de Hg. Las mineralizaciones aparecen encajadas en rocas detríticas y magmáticas de edad Ordovícico Inferior-Devónico Superior y se pueden agrupar en dos grandes conjuntos (Higueras *et al.*, 1995; Jébrak y Hernández, 1995): 1) mineralizaciones estratoligadas, encajadas en la denominada «cuarcita de Criadero», de edad Silúrico inferior, y 2) mineralizaciones epigenéticas encajadas en rocas de edades y litologías muy variadas. Las primeras constituyen diseminaciones monominerálicas de Hg correlacionadas con el grado de alteración de las rocas ígneas (Higueras, 1993, 1994). Las segundas corresponden a rellenos de fracturas ó a *stockworks*, como resultado de una removilización tectonometamórfica de las mineralizaciones estratoligadas (Jébrak y Hernández, 1995; Higueras *et al.*, 1995).

El quimismo mineral de las rocas ígneas (Higueras y Morata, 1994), sus contenidos en elementos traza (fig. 2) y su contexto geodinámico característico de un ambiente de **rif-**

ting incipiente abortado, permiten establecer un modelo genético para las mineralizaciones estratoligadas del distrito de Almadén integrado en un proceso magmático evolutivo que implicaría varios episodios: 1) un metasomatismo mantélico, 2) un magmatismo de cierta afinidad kimberlítica, 3) un magmatismo de afinidad alcalina, y 4) un magmatismo toleítico. La formación de estas mineralizaciones de mercurio coincide con las primeras manifestaciones volcánicas alcalinas importantes y está asociada a los procesos de alteración hidrotermal de tales rocas.

El magmatismo básico de las zonas externas de las Cordilleras Béticas.

El magmatismo básico de las Zonas Externas de las Cordilleras Béticas (sur de España) está representado por: (i) afloramientos de pequeñas dimensiones («*afittas*») intercalados entre las formaciones arcilloso-evaporíticas del Trías Suribérico y (ii) coladas de lavas submarinas, sills y diques, intercalados entre sedimentos jurásicos. Las relaciones de campo y las dataciones K/Ar permiten definir dos eventos magmáticos: el primero a finales del Triásico superior, y el segundo desde el Liásico hasta el final del Jurásico, alcanzando su *climax* en el Tithónico (Puga *et al.*, 1988, 1989; Portugal-Ferreira *et al.*, 1995).

Las paragénesis primarias, así como sus características composicionales (Morata, 1993; Morata y Puga, 1993) permiten precisar la afinidad magmática de ambos eventos. El magmatismo triásico se caracteriza por presentar cuarzo e hiperstena normativos, elevados contenidos de K, Ba y Th, y valores de Nb/Y=0,5, Ti/V<50, y (La/Lu)_n=3,5-4,2, indicativos de una afinidad toleítica. Por el contrario, las rocas volcánicas jurásicas muestran altos contenidos de Ti en sus clinopiroxenos, nefelina normativa (< 5%), menores valores de SiO₂ y Th, y

Fig. 3.- Diagrama Nb/Y vs. SiO₂ (Winchester y Floyd, 1976) para la clasificación de rocas volcánicas. SiO₂ en base anhidra. Los límites entre toleítico (Tol), transicional (Tr) y alcalino (Alc) están tomados de Pearce (1982). Cuadrados huecos: Magmatismo toleítico triásico. Cuadrados rellenos: Magmatismo transicional-alcalino jurásico.

Fig. 3.- Classification of volcanic rocks in the Nb/Y versus SiO₂ (anhydrous silica) diagram of Winchester and Floyd (1976). Boundaries among tholeiitic field (Tol), transitional field (Tr) and alkaline field (Alc) come from Pearce (1982). Open squares: triassic tholeiitic magmatism. Black squares: jurassic transitional-alkaline magmatism.

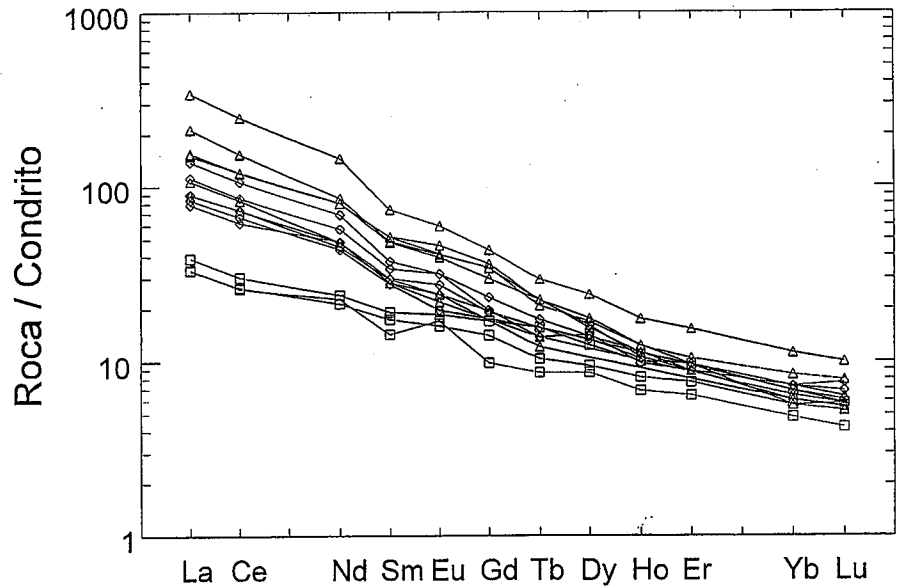
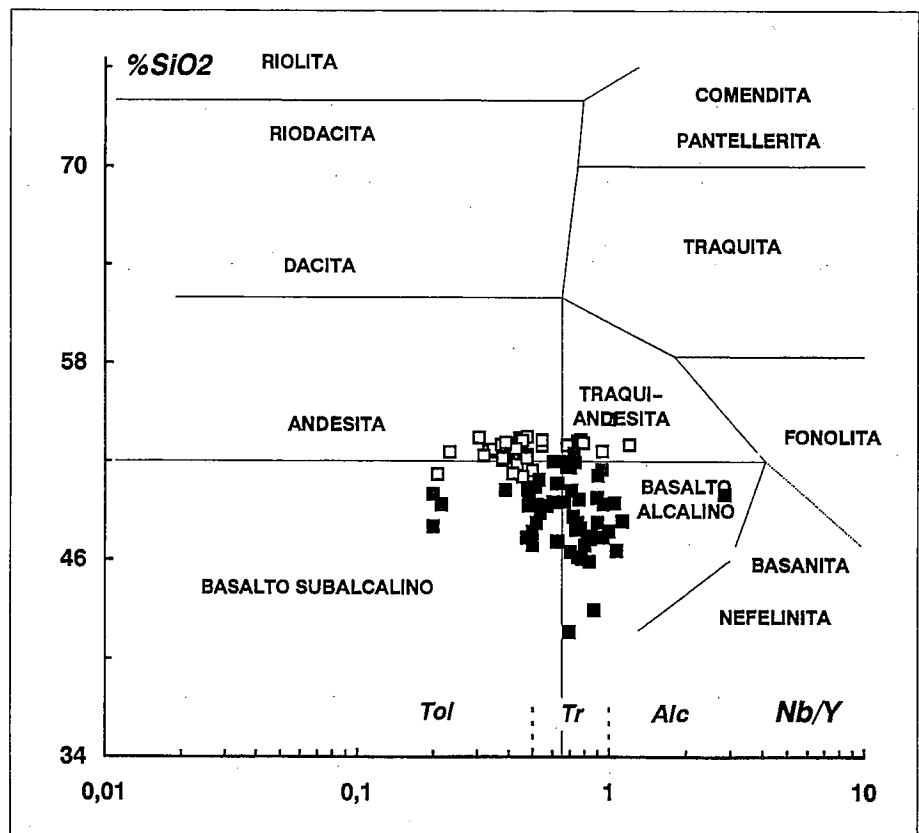


Fig. 2.- Diagrama de tierras raras normalizadas a condrito para las rocas básicas del sinclinal de Almadén. Triángulos: rocas silúricas. Rombos: rocas devónicas. Cuadrados: rocas intrusivas cuarzodiabásicas. La disminución progresiva de la pendiente desde las rocas basálticas de edad silúrica, a las de edad devónica, y a las rocas intrusivas cuarzodiabásicas refleja, según White y McKenzie (1995), un proceso de ascenso del área fuente mantélica.

Fig. 2.- Chondrite-normalized rare earth element patterns of the basic rocks from the Almadén sincline. Triangles: siluric rocks. Diamonds: devonic rocks. Squares: intrusive quartz-dabasic rocks. The progressive decrease of the slope in the patterns from siluric basaltic rocks to those of devonian age and furthermore to the intrusive quartz-dabasic rocks shows, according to White and McKenzie (1995), a progressive raising of the mantle source.



mayores contenidos de TiO_2 , P_2O_5 , Nb y Ce, con relaciones Nb/Y=0,5-1,5, Ti/V >50 y $(La/Lu)_n=4,7-5,2$, lo que permite clasificarlos como basaltos de afinidad transicional a alcalina. La composición química de los magmas es coherente con un ambiente genético de intraplaca continental, y con un modelo petrogenético que implica diferentes fuentes mantélicas para los distintos tipos de magmas, y la influencia de procesos de contaminación (de intensidad decreciente desde el Triásico al Jurásico) debidos al paso de los líquidos basálticos a través de la corteza continental (Morata y Puga, 1996; Morata *et al.*, *in press*). La contaminación cortical produjo la saturación de determinados magmas en azufre, dando lugar a la segregación de un líquido sulfurado inmisible que generó, localmente, una mineralización diseminada de sulfuros de Fe-Ni-Cu (Morata *et al.*, 1993).

Consideraciones finales

Los resultados expuestos vienen a corroborar aún más, si cabe, la importancia metalogénica del volcanismo intraplaca a lo largo del tiempo geológico, resaltando el papel jugado por dos factores clave en la génesis de este tipo de mineralizaciones: los procesos de contaminación cortical de los líquidos basálticos y los de alteración hidrotermal a partir, tanto de fluidos magmáticos, como metamórficos. Los distintos trabajos experimentales recopilados por Buchanan y Nolan (1979) y Naldrett (1981), coinciden en asignar al contenido en sílice de los magmas básicos un papel decisivo en el control de la solubilidad del azufre. Por consiguiente, la asimilación de rocas metapelíticas, frecuentemente ricas en piritita, favorece la saturación de los magmas en azufre y la segregación de líquidos sulfurados inmiscibles susceptibles de formar mineralizaciones de Ni-Cu-EGP. Asimismo, se han publicado recientemente numerosos trabajos que conceden a los fluidos una importancia decisiva en la movilización y concentración de los metales nobles (p.ej: Wood *et al.*, 1992; Stumpfl, 1993).

En los yacimientos y áreas geológicas estudiadas por el equipo español del proyecto

PICG nº336, considerando independientemente el caso particular del yacimiento de Hg de Almadén, se observa como la asimilación de las rocas corticales por los magmas basálticos dio lugar a una protomineralización (de mayor envergadura, probablemente, en Las Águilas) que pudo ser removilizada y/o reconcentrada por soluciones hidrotermales durante eventos orogénicos posteriores, tal y como se observa en las minas Salamanca y Las Águilas.

Agradecimientos

Esta revisión es una contribución al proyecto PICG nº 336. La investigación desarrollada ha sido financiada por la DGICYT (proyectos AMB95-0512, PB92-0931 y PB92-0952), la Junta de Andalucía (Grupos 4028 y 4072), la Universidad de Castilla-La Mancha (Programa «Líneas Precompetitivas»). Los autores agradecen a la Dirección General de Fabricaciones Militares (Argentina) y especialmente al Coronel J.C. Delucchi, las facilidades dadas para nuestra investigación, y por el permiso para la publicación de datos procedentes de informes inéditos.

Referencias

- Acevedo, R.D.; Carrillo, R.; Fenoll Hach-Alí, P.; Gervilla, F. y Martín-Ramos, J.D. (1994): *II Jornadas de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de Rocas Ultrabásicas. Publicaciones del Instituto de Recursos Minerales*. Universidad Nacional de la Plata. N 3, 477-482.
- Bjerg, E.A. (1994): *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 49(1-2), 48-54.
- Buchanan, D.L. y Nolan, J. (1979): *Can. Miner.*, 17, 483-494.
- Gregori, D.A. y Bjerg, E.A. (1992): *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 47(1), 55-59.
- Higuera, P.L. (1993): En: *Current research in geology applied to ore deposits*. Eds: P. Fenoll Hach-Alí, J. Torres-Ruiz y F. Gervilla. Universidad de Granada. 131-134.
- Higuera, P.L. (1994): En: *Depósitos hidrotermales submarinos*. Eds: J. Martínez-Frias, J. Rey y R. Lunar. Publ. Esp. del Inst. Esp. de Oceanografía., 18, 21-30.
- Higuera, P.L. y Morata, D. (1994): *Geogaceta*, 16, 19-22.
- Higuera, P.L.; Parras, J. y Sánchez, C. (1995): *Bol. Soc. Esp. Min.* 18, 191-200.
- Hoffman, E. y MacLean, W.H. (1976): *Econ. Geol.* 71, 1461-1468.
- Jébrak, M. y Hernández, A.M. (1995): *Mineral. Deposita*, 30, 413-423.
- Morata, D. (1993): *Tesis Doctoral*. Univ. Granada, 342 pp.
- Morata, D., Morales, S. y Gervilla, F. (1993): *Bol. Soc. Esp. Min.*, 16-1, 152-153.
- Morata, D. y Puga, E. (1993): *Bol. Soc. Esp. Min.*, 15, 175-187.
- Morata, D. y Puga, E. (1996): *IV Cong. Geol. España*.
- Morata, D.; Puga, E.; Demant, A. & Aguirre, L. (*in press*): *Chem. Geol.*
- Naldrett, A.J. (1981). *Econ. Geol.* 75th anniv. vol., 628-685.
- Portugal-Ferreira, M.; Morata, D.; Puga, E.; Demant, A. y Aguirre, L. (1995): *Estudios Geol.*, 51, 109-118.
- Puga, E.; Portugal, M.; Díaz de Federico, A.; Bargossi, G. y Morten, L. (1989): *Geodinámica Acta*, 3, 253-266.
- Puga, E.; Van de Fliert, J.R.; Torres-Roldán, R.L. y Sanz de Galdeano, C. (1988): *Estudios Geol.*, 44, 47-59.
- Pearce, J.A. (1982): En: *Andesites*. Ed. R.S. Thorpe, John Wiley & Sons, 525-548.
- Sabalúa, J.C. (1986): Dirección General de Fabricaciones Militares. Mendoza, Argentina. 32 pp. (Informe inédito).
- Sánchez-Anguita, A.; Gervilla, F.; Fenoll Hach-Alí, P. y Acevedo, R.D. (1995): *Bol. Soc. Esp. Min.* 18-2, 29-30.
- Stumpfl, E.F. (1993): En: *Current research in geology applied to ore deposits*. Eds: P. Fenoll Hach-Alí, J. Torres-Ruiz y F. Gervilla. Universidad de Granada. 15-22.
- White, R.S. y McKenzie, D. (1995): *Jour. Geophys. Res.*, 100, 17543-17585.
- Winchester, J.A. y Floyd, P.A. (1976): *Earth Planet. Sci. Lett.*, 28, 459-469.
- Wood, S.A.; Mountain, B.W. y Pan, P. (1992): *Can. Miner.* 30, 955-982.