

# Aspectos composicionales de los piroxenos ígneos del magmatismo básico del sinclinal de Almadén. Implicaciones petrogenéticas

## *Compositional constraints of igneous pyroxenes from the basic magmatism in the Almadén syncline. Petrogenetic implications*

P. Higuera (\*) y D. Morata (\*\*)(\*\*\*)

(\*) Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Univ. Castilla-La Mancha. E.U.P Almadén. 13400 Almadén (Ciudad Real).

(\*\*) Instituto Andaluz de Geología Mediterránea y Departamento de Mineralogía-Petrología. C.S.I.C.-Universidad de Granada. 18002 Granada.

(\*\*\*) Dirección actual: Dpto. Estructuras y Propiedades de los Materiales. Fac. Ciencias del Mar. Universidad de Cádiz. 11510 Puerto Real (Cádiz).

### ABSTRACT

*Chemical composition of igneous pyroxenes in the basic rocks from the Almadén syncline shows important differences between basaltic lavas and olivine diabases (Silurian to Devonian in age), and quartzdiabases on the other hand. Higher CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> and lower SiO<sub>2</sub> contents in pyroxenes from the first group are characteristics of alkaline magmas. Lower CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and TiO<sub>2</sub> and higher SiO<sub>2</sub> in pyroxene from quartzdiabases are indicative of a subalkaline (tholeiitic) affinity. These chemical differences are consistent with whole-rock chemistry, with higher Nb/Y and (La/Lu)<sub>cn</sub> ratios in the first group. Alkaline and tholeiitic magmatism are a consequence of different partial melting rates, lower for the alkaline liquids.*

**Key words:** within-plate continental magmatism, Paleozoic, pyroxenes, Almadén syncline.

*Geogaceta*, 16 (1994), 19-22

ISSN: 0213683X

### Introducción

El sinclinal de Almadén, situado en el sector meridional de la Zona Centro Ibérica del Macizo Hespérico (Dallmeyer y Martínez García, 1990), se caracteriza por la presencia de materiales paleozoicos, de edad comprendida entre el Ordovícico Superior (Arenigiense) y el Devónico Superior (fig. 1). Estos materiales son de naturaleza fundamentalmente detrítica, como en el resto de la Zona Centro Ibérica (Gutiérrez Marco *et al.*, 1990), pero presentan aquí como peculiaridad la presencia de abundantes intercalaciones volcánicas a partir del Silúrico, y de mineralizaciones de mercurio, interpretadas como coetáneas (Saupé, 1973 y 1990; Hernández, 1984; Borrero y Higuera, 1990; Ortega y Hernández, 1992). Las relaciones entre los procesos petrogenéticos y de mineralización en este sinclinal están siendo objeto del estudio de uno de los autores (P.H.).

### Características petrológicas del magmatismo

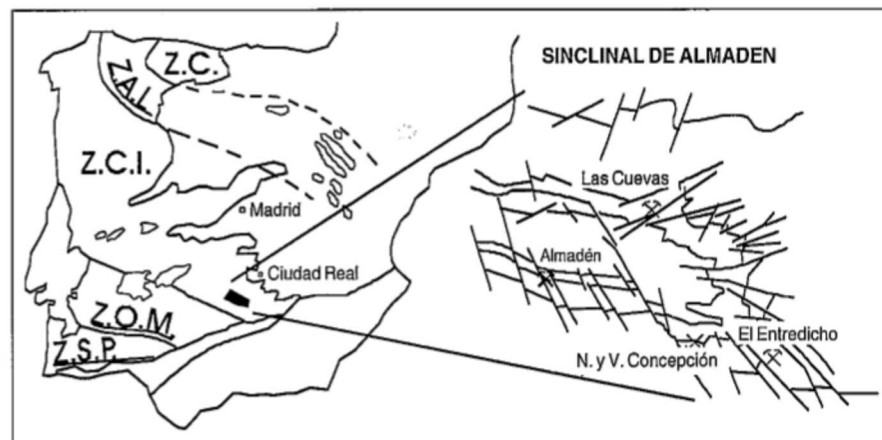
El magmatismo en el sinclinal de Almadén está representado por una serie compleja de rocas ígneas, que compren-

de rocas piroclásticas (la *roca frailesca* de Almadén), lavas de composición variada (con un predominio de términos basálticos, con diferenciados traquíticos a riolíticos minoritarios), rocas de tipo subvolcánico, y enclaves de peridotitas incluidos en algunas lavas basálticas (Sainz de Baranda y Lunar, 1989; Hi-

guera y Monterrubio, 1992; Higuera y Munhá, 1993). Las lavas básicas presentan composiciones que varían desde basanitas/nefelinitas hasta traquibasaltos o basaltos con plagioclasa, con basaltos olivínicos como término intermedio y más abundante en la secuencia. Las rocas subvolcánicas son de tipo diabásico,

Fig. 1.— Situación geográfica y geológica del sinclinal de Almadén. Z.C.: Zona Cantábrica. Z.A.L.: Zona Asturoccidental-Leonesa. Z.C.I.: Zona Centro Ibérica. Z.O.M.: Zona de Ossa-Morena. Z.S.P.: Zona Surportuguesa.

Fig. 1.— Geographical and geological setting of the Almadén syncline. Z.C.: Cantabrian Zone. Z.A.L.: West Asturian-Leonese Zone. Z.C.I.: Central-Iberian Zone. Z.O.M.: Ossa-Morena Zone. Z.S.P.: South Portuguese Zone.



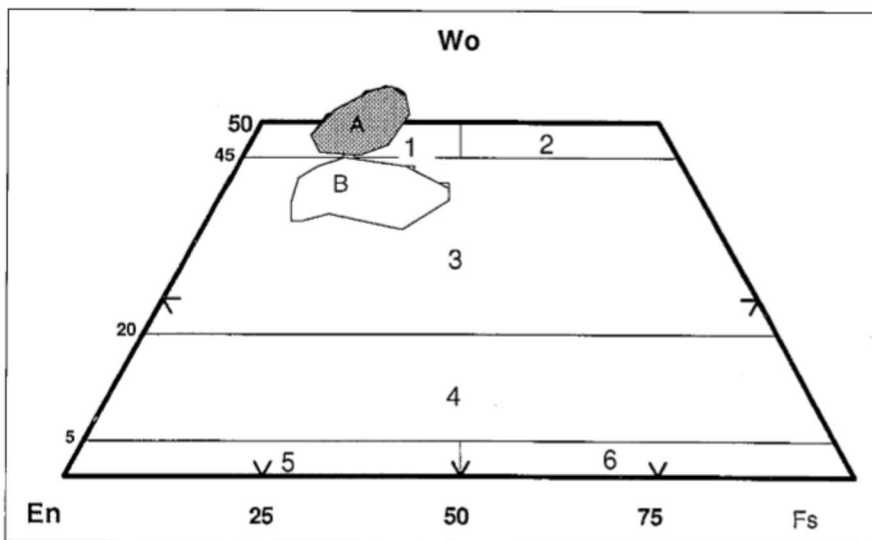


Fig. 2.— Diagrama Wo:En:Fes correspondiente a los piroxenos de las rocas básicas del sinclinal de Almadén. 1: diópsido; 2: hedenbergita; 3: augita; 4: pigeonita; 5: clinoenstatita; 6: clinoferosilita (según Morimoto et al., 1988). Campo A = piroxenos de lavas basálticas y diabasas olivínicas. Campo B = piroxenos de cuarzodiabasas.

Fig. 2.— Wo:En:Fes diagram of pyroxenes from basic rocks of the Almaden syncline. 1: diopside; 2: hedenbergite; 3: augite; 4: pigeonite; 5: clinoenstatite; 6: clinoferosilite (after Morimoto et al., 1988). Field A = pyroxenes from basaltic lavas and olivine diabases. Field B = pyroxenes from quartzdiabasas.

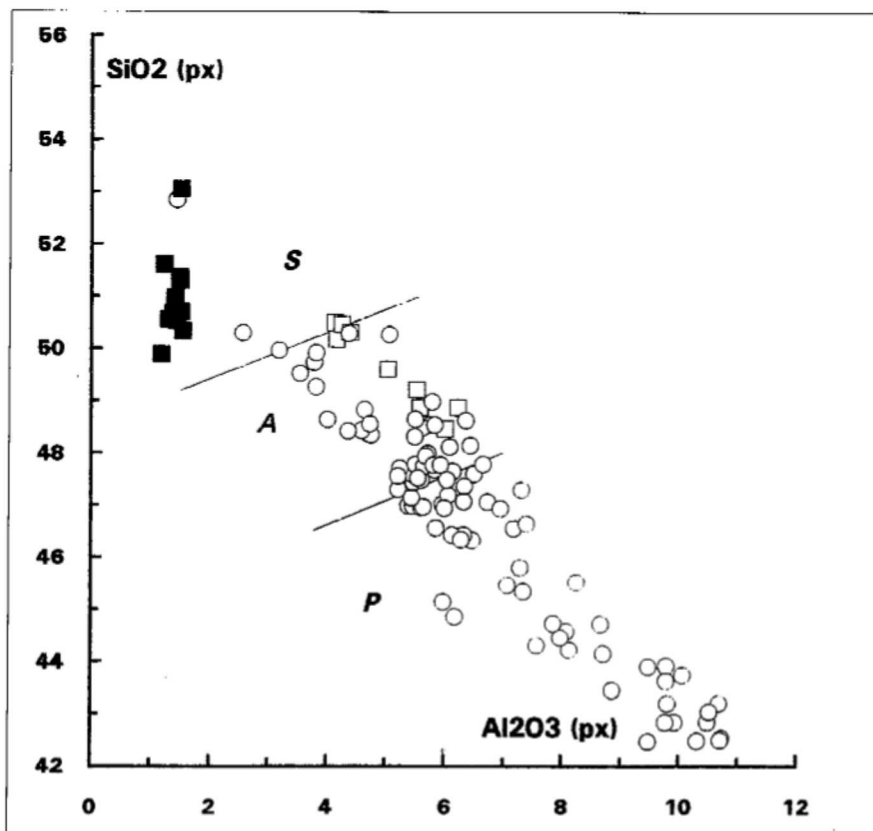


Fig. 3.— Diagrama Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. SiO<sub>2</sub> de Le Bas (1962). S: piroxenos subalcalinos; A: piroxenos alcalinos; P: piroxenos hiperalcalinos. Círculos vacíos = lavas basálticas; cuadrados vacíos = diabasas olivínicas; cuadrados llenos = cuarzodiabasas.

Fig. 3.— Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. SiO<sub>2</sub> diagram (Le Bas, 1962). S: subalkaline pyroxenes; A: alkaline pyroxenes; P: peralkaline pyroxenes. Open circles = basaltic lavas; open squares = olivine diabases; filled squares = quartzdiabasas.

observándose desde diabasas olivínicas hasta cuarzodiabasas, con términos intermedios de diabasas con piroxeno.

Estas rocas magmáticas están afectadas por procesos de alteración de extensión regional: una hidratación previa, con destrucción de los minerales ferromagnesianos y lixiviación de Mg, Ca, Ni y Si y enriquecimiento relativo en Al, y una carbonatación, que produce la destrucción total de la paragénesis ígnea, con lixiviación de Si y Na, y enriquecimiento en CO<sub>2</sub> y Rb (Higueras, 1993). Además, en estas rocas se aprecian los efectos de un metamorfismo de grado bajo, en facies de prehnita-pumpellyita, posiblemente relacionado con la orogenia hercínica (Higueras y Munhá, 1993; Higueras et al., en prep.).

Estos procesos postmagmáticos han afectado de forma heterogénea a las rocas básicas del sinclinal. Sin embargo, la utilización de elementos inmóviles ha permitido una caracterización geoquímica de las mismas, de manera que las lavas basálticas y diabasas olivínicas presentan una afinidad alcalina (Nb/Y = 1.5-5.0; (La/Lu)<sub>cn</sub> = 11.0-30.8), mientras que las cuarzodiabasas presentan una afinidad subalcalina (Nb/Y = 0.5-1.2; (La/Lu)<sub>cn</sub> = 5.6-7.2) (Higueras y Monterrubio, 1992; Higueras, 1993; Higueras & Munhá, 1993). Las características geoquímicas de ambos tipos de magmas se corresponden con las de un magmatismo generado en un ambiente tectónico de intraplaca continental.

### Quimismo de los piroxenos

Numerosos autores han puesto de manifiesto la utilidad del estudio del quimismo de los piroxenos en rocas ígneas básicas para la caracterización magmática de las mismas, máxime en el caso de rocas fuertemente alteradas, en las que la paragénesis ígnea está parcialmente transformada, como es el caso que nos ocupa. Por tal motivo, se realizaron análisis mediante microsonda electrónica de piroxenos en diferentes muestras, representativas de los diversos litotipos encontrados. En la Tabla I se recogen los valores medios de los piroxenos analizados. El cálculo de la relación entre Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> se ha realizado según el método propuesto por Droop (1987).

La proyección del quimismo de los piroxenos en el diagrama Wo:En:Fes (fig. 2) pone de manifiesto las diferencias geoquímicas previamente mencionadas. En concreto, los piroxenos de las

MUESTRA	TP-5	PL-6	SBUR5	CA-1	SGAR1	CA-7	CA-10	AJ-1
T.Roca	DO	Bt/Nef	Bt/Nef	BO	BOPx	BO	TB	QD
Edad	Sil. Inf	Sil.	Sil. Sup.	Dev. Inf.	Dev. Inf.	Dev. Sup.	Dev. Sup.	
n° análisis	8	19	20	6	19	21	6	11
SiO <sub>2</sub>	49,59	46,32	47,18	48,52	47,70	43,89	47,73	50,97
TiO <sub>2</sub>	2,04	2,83	2,63	2,03	3,00	4,08	2,10	0,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,04	6,47	6,06	5,84	5,25	9,49	5,65	1,41
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	0,17	0,05	0,80	0,25	0,22	0,05	0,04
FeO	6,30	7,43	7,36	5,94	7,37	7,00	7,82	11,98
MgO	13,57	11,73	11,84	13,37	12,54	11,23	13,50	14,13
MnO	0,14	0,13	0,14	0,10	0,10	0,10	0,16	0,24
CaO	22,93	23,36	23,65	22,98	22,72	22,86	21,95	19,09
Na <sub>2</sub> O	0,29	0,48	0,48	0,27	0,37	0,41	0,39	0,25
K <sub>2</sub> O	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
NiO	0,05	0,03	0,02	0,02	0,05	0,03	0,02	0,04
SUMA	100,33	98,96	99,42	99,89	99,36	99,32	99,38	99,07
n° oxig.	6	6	6	6	6	6	6	6
n° cat.	4	4	4	4	4	4	4	4
Si	1,836	1,760	1,782	1,805	1,798	1,661	1,797	1,937
Al(IV)	0,164	0,240	0,218	0,195	0,202	0,339	0,203	0,063
Ti	0,057	0,081	0,075	0,057	0,085	0,116	0,059	0,026
Al(VI)	0,055	0,050	0,052	0,061	0,031	0,084	0,048	0,001
Fe <sup>3+</sup>	0,010	0,088	0,077	0,023	0,032	0,070	0,095	0,043
Cr	0,011	0,005	0,001	0,024	0,007	0,007	0,001	0,001
Fe <sup>2+</sup>	0,185	0,148	0,156	0,162	0,200	0,151	0,151	0,338
Mn	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,005	0,008
Ni	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001
Mg	0,748	0,664	0,667	0,741	0,705	0,634	0,758	0,800
Ca	0,909	0,951	0,957	0,916	0,918	0,927	0,885	0,777
Na	0,021	0,036	0,035	0,019	0,027	0,030	0,028	0,019
K	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001
SUMA	4,003	4,029	4,026	4,008	4,011	4,024	4,032	4,014
[mg]	0,802	0,818	0,811	0,820	0,779	0,807	0,834	0,703
En	40,616	37,664	37,469	40,745	38,662	37,015	42,231	41,775
Fs	10,048	8,407	8,753	8,915	10,995	8,844	8,423	17,653
Wo	49,336	53,929	53,778	50,340	50,344	54,141	49,346	40,573

Abrev.: DO: diabasa olivínica; Bt/Nef: basanita/nefelinita; BO: basalto olivínico; BOPx: basalto olivínico-piroxénico; TB: traquibasalto; QD: cuarzodiabasa.

[mg] = Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>), en proporciones atómicas.

Análisis realizados en una microsonda electrónica CAMECA SX-50. Univ. Oviedo.

Tabla 1.- Valores medios de análisis químicos representativos de piroxenos de los diversos litotipos de las rocas básicas del sinclinal de Almadén.

Table 1.- Average chemical representative analyses of pyroxenes of the different lithotypes of basic rocks from the Almadén syncline.

lavas y diabasas olivínicas presentan mayores contenidos en Ca que los de las cuarzodiabasas. Esto hace que los primeros se proyecten en el campo de los diópsidos, superando en algunos casos el límite de Wo=50% (ver Tabla 1 y fig. 2), mientras que las cuarzodiabasas se proyectan en el campo de las augitas. Estas diferencias composicionales son características de piroxenos de series alcalinas y subalcalinas (toleíticas), respectivamente (Asthana, 1991; Azambre et al., 1992; Barberi et al., 1971; Lubala et al., 1987; Mellini et al., 1988; Morata

y Puga, 1993; Wass, 1979). Análogas conclusiones se obtienen con la proyección del quimismo de piroxenos en los diagramas de Le Bas (1962) y Leterrier et al. (1982), mostrados en las figuras 3 y 4. En ambos casos, los piroxenos de las cuarzodiabasas se proyectan en el campo subalcalino, mientras que los menores contenidos en SiO<sub>2</sub> y mayores contenidos en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ti y (Ca+Na) de las lavas basálticas y diabasas olivínicas hacen que se proyecten en el campo de los piroxenos alcalinos. Los contenidos en TiO<sub>2</sub> (>1%), SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de las la-

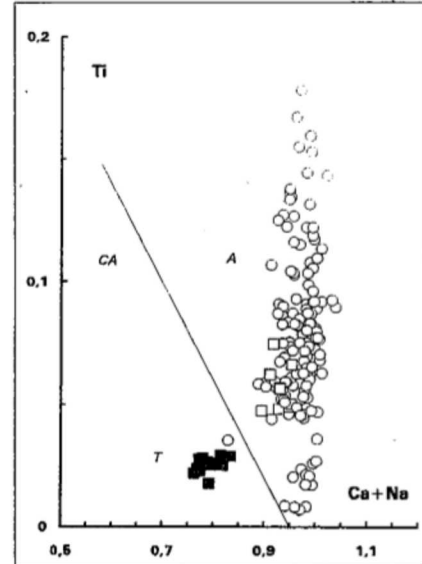


Fig. 4.— Diagrama (Ca+Na) vs. Ti (en proporciones atómicas) de Leterrier et al. (1982), para la discriminación de piroxenos de basaltos alcalinos (campo A) de otros tipos de basaltos (campos CA y T). Símbolos como en fig. 3.

Fig. 4.— (Ca+Na) vs. Ti diagram (in atomic proportions) after Leterrier et al. (1982), for discrimination between pyroxenes of alkaline basalts (field A) and other basalts (fields CA and T). Symbols as in fig. 3.

vas basálticas y diabasas olivínicas son propios de piroxenos generados a partir de la cristalización de líquidos alcalinos (Le Bas, 1962).

### Discusión de los resultados

Las diferencias químicas puestas de manifiesto en los piroxenos de las rocas básicas del sinclinal de Almadén parecen ser un fiel reflejo de los diferentes tipos de magmas presentes en este área, tal como se pone de manifiesto mediante el uso de elementos trazas inmóviles, incluyendo las tierras raras.

En base a los datos químicos presentados en este trabajo, el magmatismo del sinclinal de Almadén habría comenzado en el Silúrico con manifestaciones muy poco diferenciadas y ricas en volátiles, que dan origen a un volcanismo explosivo de carácter alcalino, representado por rocas volcánicas fragmentarias y lávicas, y minoritariamente rocas subvolcánicas, al que sucedería un magmatismo toleítico representado por manifestaciones subvolcánicas (cuarzodiabasas). La génesis de estos magmas estaría relacionada con diferentes grados de fusión parcial a partir de una fuente mantélica

enriquecida, relativamente homogénea: los magmas alcalinos representarían bajas tasas de fusión parcial (del 3 al 5% para las rocas de edad Silúrica y del 4 a 11% para las del Devónico), mientras que las cuarzodiabasas toleíticas se generarían como consecuencia de mayores tasas de fusión parcial (>15%) (Higueras y Munhá, 1993).

Las bajas tasas de fusión parcial darían origen a líquidos alcalinos, con baja  $a_{\text{SiO}_2}$ , lo que se traducirá en bajos contenidos en  $\text{SiO}_2$  en los mismos y, consecuentemente, bajos valores de  $\text{SiO}_2$  en los piroxenos que cristalizarían a partir de ellos. Estos bajos contenidos en Si implicarán un aumento de  $\text{Al}^{\text{IV}}$ , necesi-tándose equilibrar el balance de cargas con la entrada de Ti en posiciones octaédricas (Nisbet y Pearce, 1977). Por tal motivo, la proyección de los contenidos en  $\text{Al}^{\text{IV}}$  vs. Ti pone bien de manifiesto las diferencias existentes entre ambos tipos de magmas (fig. 5). Como consecuencia de las diferencias en las tasas de fusión parcial descritas, el valor de [mg] en los piroxenos será diferente (tabla I), siendo mayor para el caso de los líquidos alcalinos, indicando su menor grado de diferenciación respecto a los líquidos toleíticos.

### Conclusiones

El magmatismo del sinclinal de Almadén tuvo lugar en diferentes períodos a lo largo del desarrollo del orógeno Hercínico en el área, evolucionando en el tiempo desde alcalino (lavas basálticas y diabasas olivínicas del Silúrico y Devónico) a toleítico (cuarzodiabasas). Esta evolución temporal se pone de manifiesto tanto en la caracterización de estos magmas mediante el quimismo de los piroxenos, como mediante el de roca total, considerando elementos traza inmóviles, incluyendo las tierras raras. Esta evolución de la afinidad química del magmatismo puede ser interpretada como un reflejo del ascenso de una pluma mantélica durante un proceso de *rifting* intracontinental en el Paleozoico, dando lugar al aumento en las tasas de fusión parcial de un manto enriquecido, que generaría líquidos de afinidad alcalina y toleítica.

### Agradecimientos

Los autores agradecen a los Servicios Comunes de Investigación de la Universidad de Oviedo las facilidades

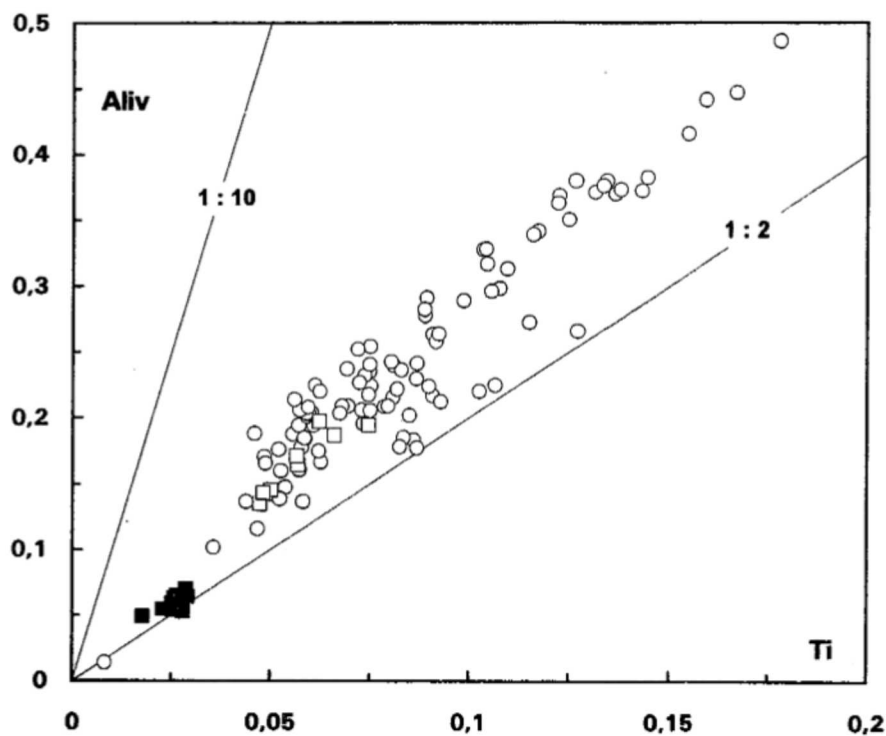


Fig. 5.—Proyección de los contenidos atómicos de Ti vs. AlIV en los piroxenos de las rocas básicas del sinclinal de Almadén. Símbolos como en la fig. 3.

Fig. 5.—Atomic Ti vs. AlIV projection in pyroxenes from the basic rocks of the Almadén syncline. Symbols as in fig. 3.

prestadas en el uso de la microsonda. Este estudio se integra en el Proyecto IGCP/UNESCO n° 336 (Intraplate magmatism and metallogeny).

### Referencias

- Asthana, D. (1991). *Mineral. Mag.*, 55, 549-561.
- Azambre, B.; Rossy, M. & Albarède, F. (1992). *Eur. J. Mineral.*, 4, 813-834.
- Barberi, F.; Bizouard, H. & Varet, J. (1971). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 33, 93-107.
- Borrero, J. & Higueras, P. (1990). *Bol. Geol. Min.*, 101-6, 48-65.
- Dallmeyer, D. & Martínez García, E., Eds. (1990). *Springer-Verlag*, Berlín, 525 pp.
- Droop, G.T.R. (1987). *Mineral. Mag.*, 55, 431-435.
- Gutiérrez Marco, J.C.; San José, M.A. de & Pieren, A. (1990). in: Dallmeyer & Martínez García (eds.), 160-171.
- Hernández, A.M. (1984). *Tesis Univ. Salamanca*, 120 pp.
- Higueras, P. (1993). in: Fenoll, Gervilla & Torres (eds.), Univ. Granada, 131-134.
- Higueras, P. & Monterrubio, S. (1992). in: Gutiérrez Marco, Saavedra & Rábano (eds.), CSIC-Univ. Extremadura, 535-543.
- Higueras, P. & Munhá, J. (1993). *Terra Abstracts*, 6, 12-13
- Le Bas, M.J. (1962). *Amer. Jour. Sci.*, 260, 267-288.
- Leterrier, J.; Maury, R.C.; Thonon, P.; Girard, D. & Marchal, M. (1982). *Earth Planet. Sci. Letters*, 59, 139-154.
- Lubala, R.T.; Kampunzu, A.B.; Caron, J.Ph & Vellutini, P.J. (1987). *Geol. Jour.*, 22, 515-535.
- Mellini, M.; Carbonin, S.; Dal Negro, A. & Piccirillo, E.H. (1988). *Lithos*, 22, 127-134.
- Morata, D. & Puga, E. (1993). *Bol. Soc. Esp. Min.*, 16, 175-187.
- Morimoto, N.; Fábries, J.; Ferguson, A.K.; Ginzburg, I.V.; Ross, M.; Seifert, F.A.; Zussman, J.; Aoki, K. & Gottardi, G. (1988). *Amer. Miner.*, 73, 1123-1133.
- Nisbet, E.G. & Pearce, J.A. (1977). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 63, 149-160.
- Ortega, E. & Hernández, A. (1992). *Chron. Rech. Min.*, 506, 3-24.
- Sainz de Baranda, B. & Lunar, R. (1989). *Estudios Geol.*, 45, 337-348.
- Saupé, F. (1973). *Mem. Sci. Terre*, 29, 342 pp.
- Saupé, F. (1990). *Econ. Geol.*, 85, 482-510.
- Wass, S.Y. (1979). *Lithos*, 12, 115-132.