

Magmatismo Paleozoico en el Macizo del Roc de Frausa (Pirineos Orientales)

Palaeozoic magmatism in the Roc de Frausa Massif (Eastern Pyrenees, NE Spain)

M. NAVIDAD ⁽¹⁾, M. LIESA ⁽²⁾ y J. CARRERAS ⁽³⁾

(1) Departamento de Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. 28040 Madrid. navidad@eucmax.sim.ucm.es

(2) Departament de Geoquímica, Petrologia i Prospecció Geològica. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. Zona Universitària de Pedralbes. 08028 Barcelona. montsel@natura.geo.ub.es.

(3) Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Geologia. 08193 Bellaterra (Barcelona). j.carreras@geologia.uab.es

RESUMEN

En el Macizo del Roc de Frausa se han diferenciado mediante criterios geoquímicos dos tipos diferentes de anfibolitas. El primer tipo lo forman metabasitas de afinidad toleítica y composición próxima a los E-MORB. Proceden de magmas poco evolucionados moderadamente bajos en potasio. Forman sills intercalados entre los metasedimentos cambro-ordovícicos y están asociadas a porfiroides gneísicos. Los porfiroides gneísicos representan términos ácidos subaluminicos de carácter explosivo y afinidad calcoalcalina con un contenido medio en potasio. Su relación genética con las metabasitas es poco clara; se interpretan como diferenciados ácidos de éstas con una importante mezcla de material cortical. Se sugiere para este magmatismo un ámbito geodinámico continental fini-compresivo en relación con cuencas marginales.

El segundo tipo lo forman anfibolitas ricas en hierro y potasio, con una composición primaria probablemente modificada por el aporte hidrotermal que acompaña a la tectónica de fracturación hercínica. Forman también sills emplazados entre los ortogneises del Roc de Frausa y los metasedimentos paleozoicos y aparecen intensamente deformadas.

Palabras clave: Magmatismo paleozoico. Anfibolitas. Gneises microglandulares. Petrología. Geoquímica. Correlaciones.

ABSTRACT

In the Roc de Frausa Massif two different geochemical types of amphibolites have been described. One type is formed by orthoamphibolites of tholeiitic affinity and with composition similar to E-MORB, derived from little evolved magmas low in potassium. They outcrop as

sills interbedded with cambro-ordovician metasediments and are spatially related to augen gneiss levels. A continental marginal basin or continental back-arc is probably the orogenic setting of this magmatism.

The second type is formed by high K and Fe amphibolites placed between the Roc de Frausa orthogneises and the metasediments. They are highly deformed and their primary composition has been probably modified by hydrothermal processes accompanying Hercynian fracturation tectonics.

Keywords: Pre-Hercynian magmatism. Amphibolites. Augen-gneiss. Chemical and petrological characterization. Correlations.

EXTENDED ABSTRACT

The Roc de Frausa Massif is located at the Eastern Pyrenees. It is formed by three main lithological units: pre-Hercynian granites (gneisses), metasedimentary Paleozoic rocks and Hercynian intrusives, mainly granitoids (Fig. 1). The gneisses and the metasediments have been affected by Hercynian polyphasic tectonics and regional metamorphism. Hercynian granites intruded late in the orogenic cycle at medium and high levels of the series and superimposed a contact metamorphism over the regional metamorphism (Fig. 2).

The metasedimentary unit is the lowest outcropping level. Two gneiss sheets divide it into three layers. It is mainly formed by pelitic rocks, though some thin layers

of different lithologies outcrop: marbles, quartzites, amphibolites and gneissic porphyroids. The aim of this work is to characterize, both petrographically and geochemically, the amphibolites and gneissic porphyroids from the metasedimentary layers. From these data, and a comparison with neighbouring areas, the precedence and geodynamical context of these rocks has been established. The amphibolites outcrop as thin and mainly discontinuous layers along the entire Paleozoic series while the gneissic porphyroids only outcrop at the medium and higher levels.

The lower layer amphibolites (Mas Janer amphibolites) form a thick (10 m) and approximately continuous layer located between the lower pelites and gneisses (Fig. 1). They show a granonematoblastic texture and are formed by tschermakitic hornblende in the core to Mg hornblende in the border, unzoned calcic plagioclase (An_{65} - An_{69}) and phlogopite-rich biotite. Magnetite and ilmenite are the main accessory minerals.

Montalbà amphibolites outcrop at medium levels of the series on the western part of the massif. They are located between the Roc de Frausa orthogneisses and the Paleozoic metasediments. They form layers of 1 to 2 meters thick and show a pervasive foliation with blastoporphyratic texture. The amphibole is unzoned Fe-tschermakite and the plagioclase is oligoclasic showing prograde zoning (An_{17} center, An_{24} border). They also contain bi (annite) and almandine garnet (Alm_{50} , Sp_{17} , Gr_{30} , Py_2).

La Vajol amphibolites outcrop in the upper and medium metasedimentary levels at the eastern part of the massif. They form discontinuous layers of variable thickness (centimetric to metric), interbedded with cambro-ordovician metasediments, and are spatially related to the gneissic porphyroids. They consist of small amphibole or plagioclase porphyroblasts in a fine-grained matrix with granonematoblastic texture. The hornblende is tschermakitic at the center and Mg hornblende in the border and the plagioclase is andesine with prograde zoning (An_{36-40}). These amphibolites also contain clinopyroxene and biotite.

The gneissic porphyroids form 1 - 2 m thick layers and are formed by small plagioclase porphyroblasts in a foliated matrix. Plagioclase composition varies from albite to oligoclase (An_{5-17}) both in the porphyroblasts and in the matrix and shows patchy zoning. Other matrix minerals are quartz and biotite.

All the amphibolites can be classified as basalts or basaltic andesites though they can be compositionally

divided into two types: metabasites of tholeiitic affinity and metabasites with high potassium and iron content.

The first type of metabasites corresponds to the lower and higher levels amphibolites (Mas Janer and La Vajol amphibolites, Table 1 MJ, LV)). Mas Janer amphibolites are the less differentiated amphibolites of the massif. They show low content in SiO_2 (45-49%) and Ti (1-1,5%) (Table 1). The proportion of SiO_2 increases in the higher level amphibolites (La Vajol amphibolites) up to 47-53% together with the content of other significant elements indicating, thereby, that they derive from more differentiated magmas. This type of metabasites can be related to E-MORB and continental tholeiites as shown by trace element content (Fig. 4a, b). Their REE content is low though it increases with the degree of differentiation. Their chondrite normalization (Fig. 5) indicates low fractionation suggesting they come from low evolved magmas. This pre-Hercynian magmatism seems to be set in a marginal continental basin related with late-orogenic processes as indicated by projection of the less mobile elements in the Pearce and Cann diagrams (Fig. 7a, b).

The second type of amphibolites corresponds to Montalbà amphibolites. Their major, trace and REE content (Table 1, MB) suggests crustal origin (Fig. 6a, b). Their trace element content shows enrichment in mobile elements. This has been related to secondary processes as a consequence of hydrothermal alteration.

The gneissic porphyroids correspond to subalkaline dacites and rhyolites (Fig. 3a, b). Compositionally they are acid rocks (SiO_2 63-73%) with moderate content in alkaline elements and subaluminic. Their trace element content is moderate and similar to the more differentiated La Vajol amphibolites. Their REE spectra, compared to the spectra of La Vajol amphibolites, suggest fractionation origin from orthoamphibolites with crustal influence.

The amphibolites and gneissic porphyroids can be correlated with similar levels in neighbouring sectors of the Pyrenees, mainly in the Canigó and Albera massifs. However they are scarcer in other areas of the Hercynian massif at the west of the Iberian Peninsula.

INTRODUCCIÓN

El macizo del Roc de Frausa está situado en el segmento oriental de la Zona Axial de la Cordillera Pirenaica. El basamento hercínico, que aflora mayoritariamente a lo largo de la Zona Axial, está formado por tres grandes unidades

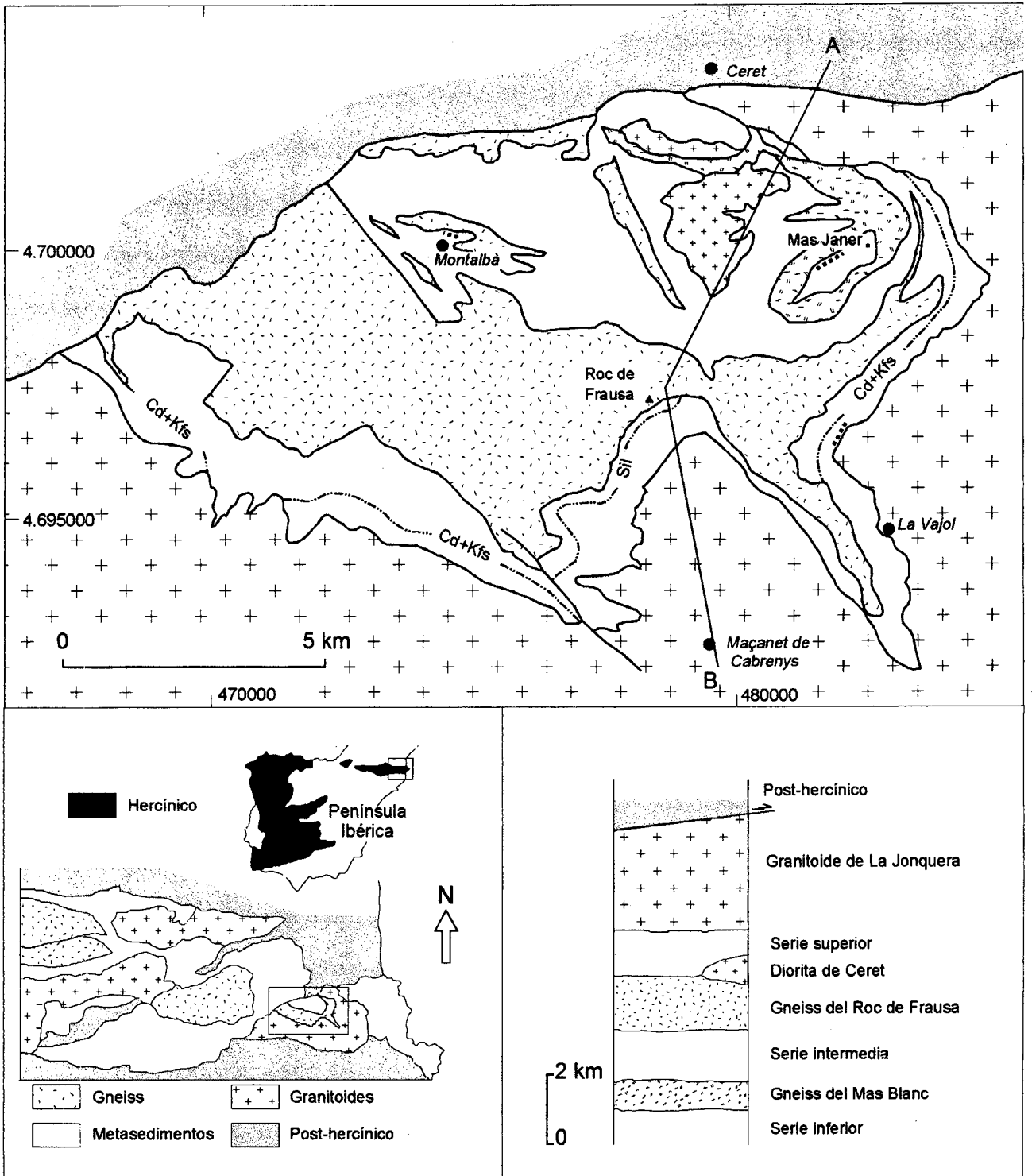


Figura 1. Esquema geológico y columna litológica simplificada del Macizo del Roc de Frausa. En trazos discontinuos se indica la localización de las anfibolitas.

Figure 1. Geological sketch and simplified lithological column of the Roc de Frausa Massif. Location of amphibolites in dashed lines.

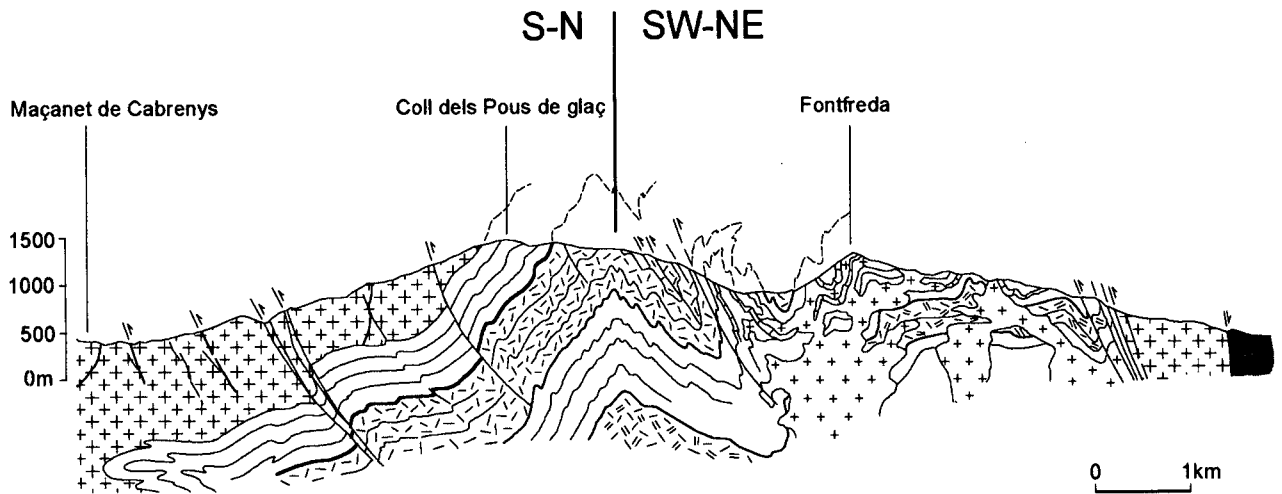


Figura 2. Corte geológico N-S a través del Macizo del Roc de Frausa. La localización del corte está en la figura 1. Leyenda igual que en la figura 1.
 Figure 2. N-S cross section through the Roc de Frausa Massif. Location in fig. 1. Legend as in fig. 1.

litológicas: secuencias metasedimentarias Paleozoicas, rocas ígneas pre-Hercínicas (ortogneises) y granitoides hercínicos (Fig. 1). El Macizo del Roc de Frausa está constituido por rocas metasedimentarias de la parte inferior de la serie azoicas del Paleozoico, atribuidas al Cámbrico por Laumonier (1988). Los metasedimentos conforman una secuencia subdividida en tres tramos por dos láminas de ortogneises. El tramo inferior es esencialmente detrítico (Serie de Mas Janer) aunque en la parte superior de este tramo se localizan sills de anfibolitas perfectamente concordantes con los metasedimentos. Los tramos intermedio (serie de Montalbà) y superior (serie de La Vajol) están formados por materiales pelítico-grauváquicos entre los que se intercalan potentes niveles de mármoles, esquistos ampelíticos, cuarcitas y rocas ortoderivadas (anfibolitas y porfiroides gneísicos, denominados gneis granulés por Guitard, 1970). Esta serie es, en conjunto, equiparable a la Formación de Canavelles (Laumonier y Guitard, 1986). Las dos láminas de gneises, no datadas en la actualidad, corresponden a los gneises del Mas Blanc, la lámina inferior y a los gneises del Roc de Frausa, la lámina superior (Fig. 2). Su significado estructural es controvertido: han sido interpretadas como mantos de zócalo (Autran y Guitard, 1969; Geyssant et al., 1978) o como el resultado de intrusiones laminares (Liesa y Carreras, 1989). Los gneises y los metasedimentos están intruidos por rocas plutónicas hercínicas datadas en 282 ± 5 Ma (Rb/Sr, Cocherie, 1985) que cubren todo el espectro composicional desde los gabros a los leucogranitos, con granodioritas y tonalitas como los términos predominantes.

Este basamento paleozoico está afectado por una tec-

tónica polifásica, metamorfismo y magmatismo hercínicos. Se reconocen dos fases de deformación hercínicas con generación de pliegues y foliación asociadas. Los minerales metamórficos son sin - a post-tectónicos con respecto a estas fases de deformación. Posteriormente, la foliación principal y los minerales metamórficos han sido afectados por dos fases de plegamiento tardías (hercínicas o alpinas ?) que han configurado la geometría actual del macizo (Fig. 2). Las condiciones máximas de P y T del metamorfismo varían entre 3.1Kb de presión y 660°C de temperatura en el tramo superior de la serie (Licsa y Carreras, 1989) a $4,5 \pm 0,5$ Kb y $725^{\circ}\text{C} + 50^{\circ}\text{C}$ en el tramo inferior (Navidad et al., 1996). Un metamorfismo de contacto inducido por granitoides hercínicos se sobrepone al regional con carácter local y puede alcanzar temperaturas de 700°C (Liesa y Carreras, 1989).

En este trabajo se caracterizan, mediante criterios petrológicos y geoquímicos, los diferentes tipos de anfibolitas que afloran en los tres tramos de la serie paleozoica, así como los porfiroides gneísicos asociados. También se establece la procedencia y el contexto geodinámico del conjunto magmático a partir de la comparación con sectores vecinos.

MÉTODOS ANALÍTICOS

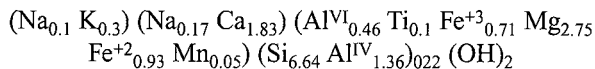
Los análisis químicos en roca total se han realizado en el Servicio de análisis de rocas y minerales del C.N.R.S de Nancy; los elementos mayores y trazas se han obtenido con un espectrómetro de emisión JY 70; para las Tierras

Raras se ha utilizado un espectrómetro de emisión atómica y plasma, previa separación mediante el sistema "LabRob" (Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1987, 2, 615-621). Los análisis de fases minerales se han realizado en el Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microsonda de la UCM con una microsonda JEOL J X A 8900 M y unas condiciones analíticas de 15 Kv, 20 nA y diámetro de A= 5 micras. Los patrones utilizados para la calibración son los de Jarosewich et al. (1980).

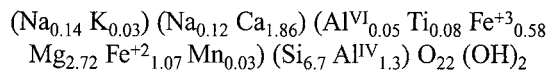
ASPECTOS PETROLÓGICOS DE LAS ANFIBOLITAS Y PORFIROIDES GNEÍSICOS.

Anfibolitas del tramo inferior (Mas Janer)

Afloran en el tramo inferior de la serie paleozoica y forman boudins de anfibolitas masivas entre los esquistos biotíticos y definen un nivel casi continuo. Presentan una textura grano-nematoblástica de grano grueso y está formada por anfíbol ligeramente zonado con una composición que corresponde según Leake (1978), a una hornblenda tschermakítica en el núcleo:



y magnesio hornblenda en el borde:



La plagioclasa es bastante cálcica, sin zonación apreciable (An_{65-69}). La biotita es rica en magnesio y se proyecta, dentro del plano de la biotita, más cercana al polo flogopítico. Los accesorios, magnetita e ilmenita, son abundantes; ambos se encuentran con frecuencia incluidos en anfíbol y, ocasionalmente, la ilmenita intercrecida con titanita. La clorita de composición chamosita es secundaria e incluye en algunos casos rutilo.

Anfibolitas del tramo intermedio (Montalbà)

Afloran exclusivamente en el tramo intermedio de la serie y en el sector occidental del macizo. Se localizan en el contacto basal de los gneises del Roc de Frausa y los

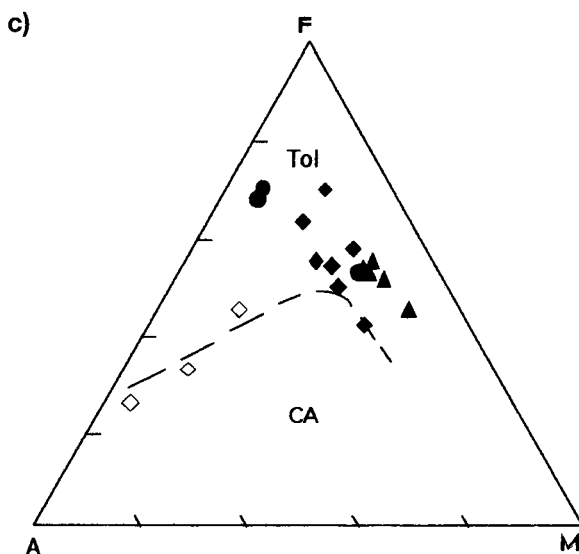
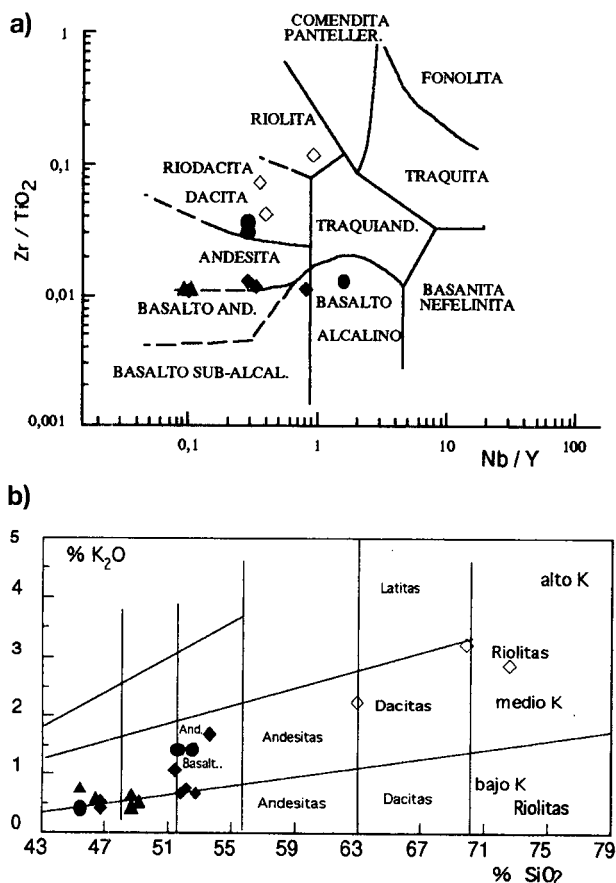


Figura 3. Clasificación del magmatismo paleozoico del Roc de Frausa en: a) diagrama de Winchester y Floyd (1976); b) diagrama de Pecerrillo y Taylor (1976); c) diagrama AFM. Símbolos: triángulos: anfibolitas de Mas Janer; rombos negra: anfibolitas de La Vajol; círculos negra: anfibolitas de Montalbà; rombos blancos: porfiroides gneísicos.

Figure 3. Classification of amphibolites and augen gneisses of the Roc de Frausa Massif in: a) Winchester & Floyd diagram (1976); b) Pecerrillo & Taylor diagram (1976); c) AFM diagram. Symbols: triangles: Mas Janer amphibolites; black diamonds: La Vajol amphibolites; black circles: Montalbà amphibolites; white diamonds: La Vajol augen gneisses.

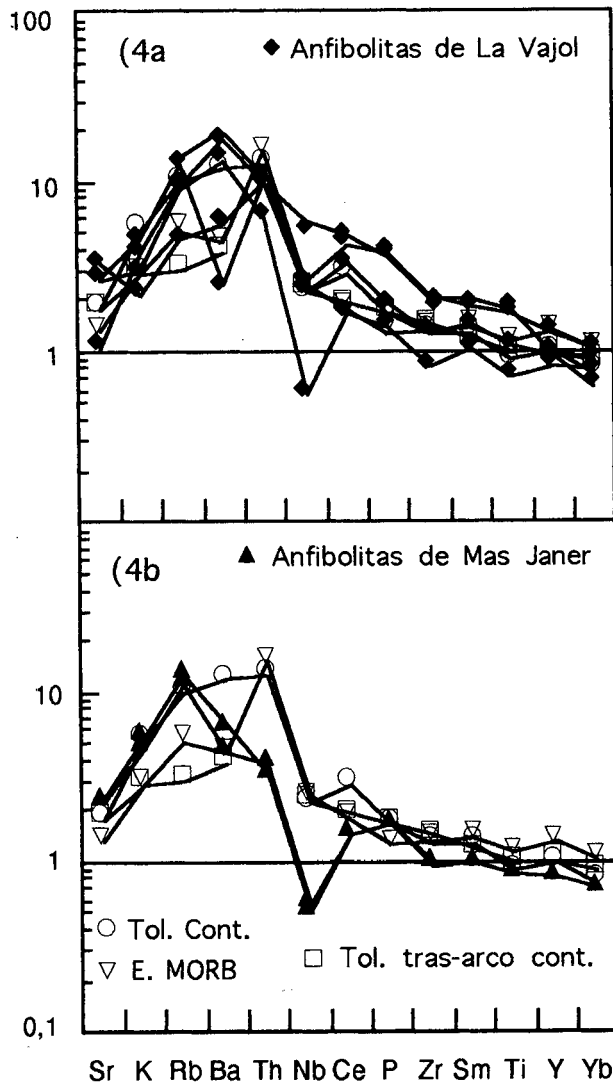


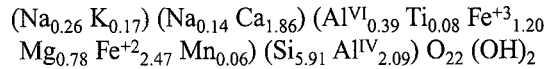
Figura 4. Diagramas de multielementos de las anfibilolitas. a) anfibilolitas de La Vajol; b) anfibilolitas de Mas Janer. Normalización al MORB según Pearce (1983). Composición de basaltos EMORB, toleíticos continentales y tras arco continental según Holm (1985).

Figure 4. Spider diagrams of amphibolites. a) La Vajol amphibolites; b) Mas Janer amphibolites. MORB normalization from Pearce (1983). Compositions of EMORB, continental toleitic and continental back arc basalts according to Holm (1985).

esquistos que forman el tramo intermedio de la serie paleozoica. Presentan un espesor reducido (1 a 2 metros) y se asocian a niveles de esquistos cuarcíticos y cuarcitas granatíferas; todas las litologías presentan una esquistosidad muy penetrativa.

Su textura es blastoporfídica, con granate y plagioclasa sigmoidales sincinemáticos, con una esquistosidad muy penetrativa definida por planos S-C formados por biotita y

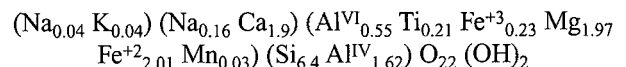
anfíbol lepidoblásticos. La plagioclasa es oligoclásica con un zonado prógrado (An_{17} centro- An_{24} borde), incluye clinzoisita, sericita y cuarzo, en gotas. El anfíbol, de composición ferrotschermakítica, se caracteriza por su elevado contenido en hierro ($Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg) = 0.9$) y bajo en potasio ($0.1 < K_A < 0.2$) y no presenta variación composicional hacia el borde:



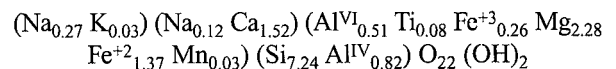
La biotita, al igual que el anfíbol, es rica en hierro y de composición annita y el granate es esencialmente almandínico ($Alm_{50} Sp_{17} Grs_{30} Py_2$). Como accesorios se encuentran apatito, cuarzo y abundante ilmenita.

Anfibilolitas del tramo intermedio y superior (La Vajol)

Descritas anteriormente como anfibilolitas de Les Illes (Liesa, 1988; Navidad et al., 1996), constituyen el tipo de anfibilolitas más abundante en todo el macizo. Afloran de forma discontinua a lo largo de la serie intermedia y superior, al este del macizo; constituyen sills de anfibilolitas masivas de potencia variable (20 cm a 5 metros) y están intercaladas entre niveles de mármoles, metasedimentos grauvacopelíticos y porfiríoides gneisicos dentro de los tramos intermedio y superior de la serie paleozoica (Formación Canavelles, Laumonier y Guitard, 1986). Son rocas de color negro y grano muy fino que localmente contienen porfidoblastos de anfíbol y/o plagioclasa. Al microscopio presentan un fino bandeado, definido por niveles formados esencialmente por anfíbol, alternando con niveles constituidos por un agregado granonematoblástico de anfíbol, plagioclasa y, ocasionalmente, clinopiroxeno e ilmenita. La plagioclasa presenta un ligero zonado prógrado (An_{36-40}) con bordes menos cálcicos, retrógrados (An_{38-20}). El clinopiroxeno es de composición salítica. El anfíbol, de acuerdo con la clasificación de Leake (1978), es cálcico y se trata de una hornblenda tschermakítica:



con un zonado composicional hacia el borde de magnesio-hornblenda y actinolita (Navidad et al., 1996).



La biotita es accesoria en determinados niveles y forma junto al anfíbol un agregado lépido-nematoblástico.

Tabla 1. Análisis químicos de la anfibolitas de Montalbà y Mas Janer.

Table 1. Chemical analyses of Montalbà and Mas Janer amphibolites.

Análisis	Anfibolitas Montalbà				Anfibolitas Mas Janer				
	1MB	2MB	3MB	4MJ	5MJ	6MJ	7MJ	8MJ	9MJ
SiO ₂	52,87	44,92	51,90	46,90	47,69	49,00	49,14	45,73	48,12
TiO ₂	1,54	2,06	1,56	1,13	1,22	1,46	1,22	1,27	1,28
Al ₂ O ₃	14,91	16,92	14,83	13,27	14,71	15,66	15,80	16,42	16,60
Fe ₂ O ₃	15,23	12,64	16,32	2,30	5,43	4,70	4,43	12,03	12,24
FeO				10,29	8,56	7,35	7,07		
MnO	0,28	0,20	0,25	0,17	0,27	0,21	0,23	0,20	0,19
MgO	1,79	7,63	1,86	13,20	10,46	7,80	7,96	7,33	7,40
CaO	6,19	8,03	6,34	7,31	6,40	9,44	9,39	10,03	10,07
Na ₂ O	3,52	0,88	3,29	1,72	1,16	1,60	1,92	1,76	1,72
K ₂ O	1,33	2,08	1,35	0,51	1,36	0,36	0,48	0,69	0,80
P ₂ O ₅	1,54	2,06	0,91	0,16	0,16	0,15	0,16	0,20	0,20
H ₂ O	0,93	2,86	1,10	2,54	3,89	2,28	2,26	1,28	1,16
Total	99,52	98,72	99,71	99,50	101,31	100,01	100,06	98,74	99,78
Ba	363,00	180,00	333,00					89,00	125,00
Be	2,50	2,50	2,20					1,10	1,10
Co	11,00	35,00	16,00					45,00	46,00
Cr	78,00	217,00	77,00					296,00	320,00
Cu	22,00	18,00	24,00					88,00	91,00
Ga	11,00	9,00	17,00					9,00	7,00
Nb	14,00	38,00	14,00					2,00	1,75
Ni	10,00	142,00	12,00					89,00	110,00
Rb	60,001	12,00	58,00					22,00	25,00
Sc	24,78	24,89	25,28					32,78	33,20
Sr	304,00	270,00	305,00					274,00	276,00
Th	7,71	3,22	7,64					0,76	0,64
V	104,00	191,00	118,00					216,00	212,00
Y	60,00	26,00	59,00					24,00	24,00
Zn	236,00	660,00	258,00					99,00	100,00
Zr	338,00	160,00	341,00					87,00	89,00
U	2,33	0,80	2,28					0,17	0,19
La	40,69	30,38	41,58					5,73	5,82
Ce	91,50	60,05	90,86					14,68	14,76
Nd	52,97	27,88	52,10					10,07	10,21
Sm	13,92	6,17	13,39					3,23	3,23
Eu	3,49	2,03	3,45					1,11	1,15
Gd	12,43	5,30	12,58					3,32	3,19
Dy	12,34	5,04	12,69					3,94	3,96
Er	6,92	2,82	6,75					2,40	2,49
Yb	6,18	2,80	6,32					2,39	2,36
Lu	0,96	0,43	0,94					0,36	0,36

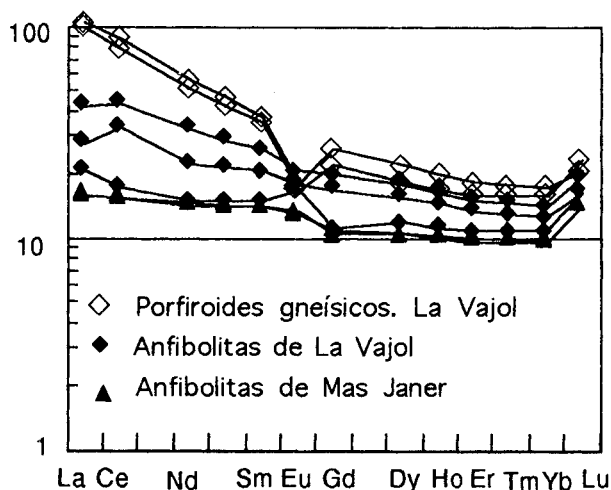


Figura 5. Espectros de Tierras Raras de las anfibolitas de La Vajol y Mas Janer y porfiroides gneísicos. Normalización al condrito según Taylor y MacLennan (1985).

Figure 5. REE amphibolites (La Vajol and Mas Janer) and augen gneisses spectra. Chondrite normalization according to Taylor and MacLennan (1985).

Porfiroides gneísicos

Constituyen niveles de espesor reducido (1 a 2 m) intercalados entre los mármoles, anfibolitas y esquistos del tramo superior e intermedio de la serie paleozoica. Se encuentran bien representados en el NE del macizo y se caracterizan por su aspecto porfiroide, con pequeños ocelos de feldespatos (2 a 5 mm) englobados en una matriz cuarzo feldespática. Presentan textura esquistosa porfidoblástica, con una matriz microcristalina formada por albita y cuarzo recristalizados y por biotita lepidoblástica. La composición de la plagioclasa varía de albita a oligoclasa (An_{5-17}) con zonación a parches e incluye abundante cuarzo en gotas. Como accesorios son frecuentes cristales grandes de apatito, ilmenita, turmalina, circón y clorita vermicular.

CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS ANFIBOLITAS Y PORFIROIDES GNEÍSCOS DEL ROC DE FRAUSA

Anfibolitas

Todas las anfibolitas del Roc de Frausa se clasifican en general como basaltos y andesitas basálticas subalcalinas con un contenido bajo a medio en potasio (Figs. 3a, b) y definen, en conjunto, una tendencia de carácter toleítico (Fig. 3c). Sin embargo, en el tratamiento geoquímico

global, las anfibolitas del tramo intermedio de Montalbà se han discriminado del resto debido a sus caracteres petrológicos y composicionales. Su fábrica indica la fuerte deformación que ha afectado a estas rocas; por otra parte, su elevado grado de alcalinidad y contenido en hierro indican asimismo un importante grado de alteración hidrotermal, que también se manifiesta por la presencia de apatito abundante, cuarzo y corindón normativo. Esta alteración hidrotermal enmascara sus caracteres primarios y dificulta su interpretación.

De todas las anfibolitas presentes en el macizo, los términos menos diferenciados corresponden a las anfibolitas del tramo inferior (anfibolitas de Mas Janer). Estas rocas se caracterizan por contenidos bajos en sílice (45%-49%), titanio entre 1%-1,5%, circón entre 87-89 ppm, hierro total alrededor del 12% y contenidos moderados en magnesio (7%-13%), cromo y níquel (alrededor de 300 ppm y 100 ppm respectivamente) (Tabla 1, MJ).

Las anfibolitas del tramo superior de la serie (anfibolitas de La Vajol) corresponden, por el contrario, a términos algo más diferenciados (Tabla 2, LV). Su composición es análoga a las anteriores, aunque difieren por ser ligeramente más ricas en sílice (47,1%-53,9%), titanio (alrededor del 2%) y en general un contenido más elevado aunque muy variable de circón (75-200 ppm). El contenido en cromo y níquel son también variables. Ambos tipos de anfibolitas se caracterizan por su bajo contenido en niobio (MJ<5 ppm; LV<20 ppm) y normativamente ambas presentan cuarzo e hiperstena y, excepcionalmente, olivino.

Los modelos que se obtienen de la normalización de los elementos traza a las toleitas de tipo MORB (Pearce, 1983; Fig. 4a, b) se caracterizan en ambos tipos de anfibolitas por perfiles aplanados respecto a los elementos menos móviles y ligeramente enriquecidos en relación a los elementos más móviles; ambos tipos presentan una anomalía negativa en niobio que es algo más pronunciada en las anfibolitas del tramo inferior (Mas Janer). Se observa una gran analogía entre estos espectros y los procedentes de basaltos E-MORB y rocas toleíticas continentales (Holm, 1985), sobre todo respecto a sus elementos menos móviles; la anomalía negativa en niobio, indica, por otra parte, una importante componente subductiva que está ausente en rocas procedentes de dominios típicamente extensionales.

El contenido en Tierras Raras es bajo en las anfibolitas de Mas Janer y La Vajol (STR=47,5 y 53 respectivamente) aunque aumenta dentro de estas últimas

Tabla 2. Análisis químicos de las anfíbolitas y porfíroides gneisicos de La Vajol.

Table 2. Chemical analyses of La Vajol amphibolites and augen gneisses.

Análisis	Anfibolitas de La Vajol						Porfíroides La Vajol			
	10 LV	11 LV	12 LV	13 LV	14 LV	15 LV	16 LV	17 LV	18 LV	19 LV
SiO ₂	47,12	51,78	52,23	53,96	53,07	52,50	51,47	70,09	73,00	63,04
TiO ₂	2,70	1,08	0,85	1,75	2,55	2,50	1,62	0,28	0,13	1,08
Al ₂ O ₃	14,16	14,35	13,67	14,75	14,21	14,00	17,28	14,51	14,30	15,21
Fe ₂ O ₃	13,46	10,66	1,36	2,12	3,66	3,27	2,34	2,99	1,75	7,31
FeO			7,65	8,52	10,86	10,43	8,82		1,80	
MnO	0,19	0,17	0,21	0,19	0,28	0,09	0,22	0,04	0,01	0,07
MgO	6,75	6,37	8,9	14,97	4,17	3,98	6,03	0,72	1,50	2,57
CaO	10,03	9,71	9,23	7,47	6,27	6,50	9,00	2,50	1,23	2,56
Na ₂ O	3,58	3,50	2,80	3,12	0,63	3,40	1,53	4,15	2,90	3,58
K ₂ O	0,32	0,44	0,98	0,58	1,59	0,57	0,68	3,15	2,80	2,08
P ₂ O ₅	0,44	0,17	0,07	0,29	0,32	0,46	0,23	0,10	0,10	0,35
H ₂ O	0,68	1,04	1,50	2,13	2,52	2,61	1,38	1,18	0,80	2,4
Total	99,43	99,27	99,46	99,85	100,13	100,51	100,60	99,71	100,32	100,25
Ba	111,00	266,00				343,00	48,00	860,00	68,00	782,00
Be	1,50	1,29				2,90	2,59	0,80		2,70
Co	39,00	34,00				70,00	79,00	6,00	97,00	67,00
Cr	255,00	168,00				20,00	2,44	15,00		84,00
Cu	74,00	51,00				35,00	25,00	4,00	18,00	33,00
Ga	9,00	2,00				25,00	20,00	12,00		19,00
Nb	20,00	2,00				9,00	8,00	2,00	17,00	15,00
Ni	102,00	51,00				23,00	70,00	13,00	10,00	25,00
Rb	9,00	18,00				19,00	25,00	103,00	301,00	64,00
Sc	29,00	41,59				47,50	42,50	4,08		21,00
Sr	388,00	312,00				126,00	322,00	265,00	32,00	259,00
Th	1,95	1,23				2,00	2,00	11,91		11,00
V	263,00	254,00				590,00	268,00	31,00	5,00	135,00
Y	28,00	25,00				38,00	29,00	7,00	21,00	44,00
Zn	113,00	124,00				132,00	104,00	51,00	89,00	88,00
Zr	187,00	73,00				195,00	116,00	110,00	94,00	271,00
U	0,81	0,36						3,36		
La	20,8	97,63				15,43	10,30	36,05		38,03
Ce	47,05	16,44				42,00	32,20	74,21		84,31
Nd	26,82	10,52				23,00	15,79	35,56		38,88
Sm	6,79	3,41				6,00	4,76	8,03		8,74
Eu	2,25	1,47				1,78	1,57	1,47		1,56
Gd	5,89	3,40				6,12	5,16	6,79		8,05
Dy	5,24	4,48				6,83	5,92	6,91		8,31
Er	2,51	2,66				3,74	3,32	3,92		4,60
Yb	2,14	2,64				3,48	3,08	3,95		4,30
Lu	0,31	0,42				0,50	0,42	0,59		0,52

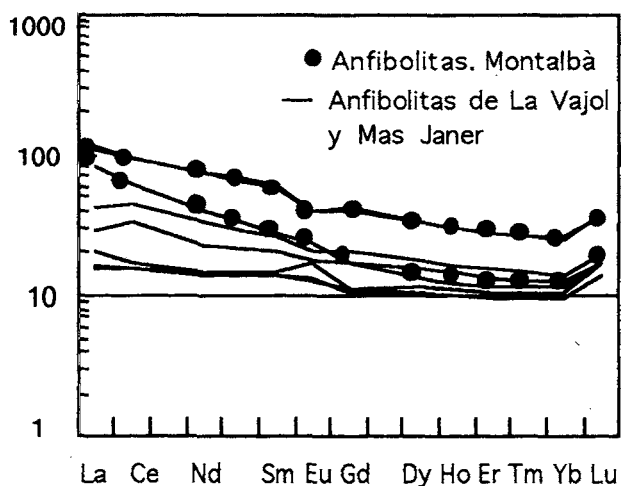
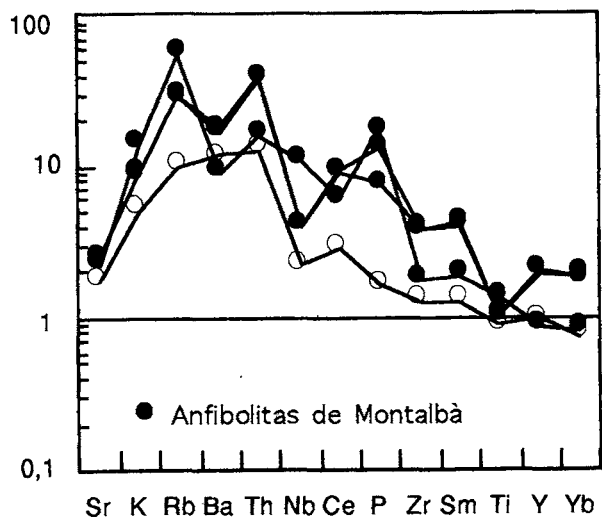


Figura 6. a) Diagramas de multielementos de las anfibolitas de Montalbà; Normalización al MORB según Pearce (1983); b) Espectros de Tierras Raras de las anfibolitas de Montalbà comparados con los de La Vajol y Mas Janer. Normalización como en la Figura 5.

Figure 6. a) Spider diagrams of Montalbà amphibolites. MORB normalization from Pearce (1983); b) REE spectra from Montalbà amphibolites reported with La Vajol and Mas Janer amphibolites. Normalization as in fig. 5.

con la diferenciación (STR=117-119). Los espectros de normalización al condrito según Taylor y McLennan (1985) (Fig. 5) son poco fraccionados ((La/Yb) n =1,10 y 1,20 respectivamente); ello indica la procedencia a partir de magmas poco evolucionados de las anfibolitas de Más Janer y algunas de La Vajol. No obstante, dentro de este último grupo se observa un proceso de diferenciación más avanzado, marcado por la fraccionación de algunos espectros ((La/Yb) n =4,23-4,66) que presentan una anomalía positiva en europio (Eu/Eu*)=0,61, como consecuencia de la acumulación de plagioclasa.

En relación con el ámbito de procedencia de estas anfibolitas, la proyección de los elementos menos móviles (Zr, Ti, Y) en los diagramas de Pearce y Cann (1973; Figs. 7a, b) señalan tendencias situadas entre los dominios compresivos y extensivos, las cuales son características de magmas emplazados en contextos finicompresivos.

Las anfibolitas del tramo intermedio de la serie paleozoica (anfibolitas de Montalbà) (Tabla 1, MB) se clasifican como andesitas. Las conclusiones que se derivan de los tres análisis efectuados deben ser tomadas con precaución, ya que dos de ellos son muy similares (1MB, 3MB) y difieren mucho del tercero (2MB). En general, se diferencian del resto de las anfibolitas por su mayor contenido en hierro (15%-16%) y potasio (1%-2%) destacando los altos y variables valores de bario, rubidio, torio (3-7 ppm), niobio (14-38 ppm), ytrio (26-60 ppm), circonio (160-340 ppm) y uranio (0,8-3 ppm) que son más propios de rocas ácidas de ascendencia cortical.

Los espectros que se obtienen de la modelización de los elementos traza al MORB (Pearce, 1983; fig. 6a) se caracterizan por pautas complejas y formas convexas y verticalizadas originadas por un fuerte enriquecimiento en todos los elementos móviles; solo algunos de los elementos menos móviles se acercan a las pautas de los MORB. Estos espectros, de tendencia convexa, indican una alcalinidad probablemente secundaria como consecuencia de los procesos de alteración hidrotermal que acompañan a la deformación que presentan estas rocas.

Su contenido en Tierras Raras es alto y variable (STR entre 84 y 250) y sus espectros (Fig. 6b) son fraccionados ((La/Yb) n =4,5 y 7); los menos fraccionados presentan una pequeña anomalía negativa en europio (Eu/Eu*)=0,81).

Asimismo, los elementos traza menos móviles discriminan claramente estas anfibolitas de las anteriores (Figs. 7a, b), y las caracterizan como tipos muy transformados de elevada alcalinidad y con fuerte componente cortical.

Los porfiroides gneísicos

Corresponden a dacitas y riolitas subalcalinas con un contenido medio en potasio (Figs. 3a, b). Composicionalmente son rocas ácidas (SiO₂ entre 63% y 73%) (Tabla 2, PLV) con un contenido moderado en álcalis (del 4% al 6,5%) y, en general, subalumínicas.

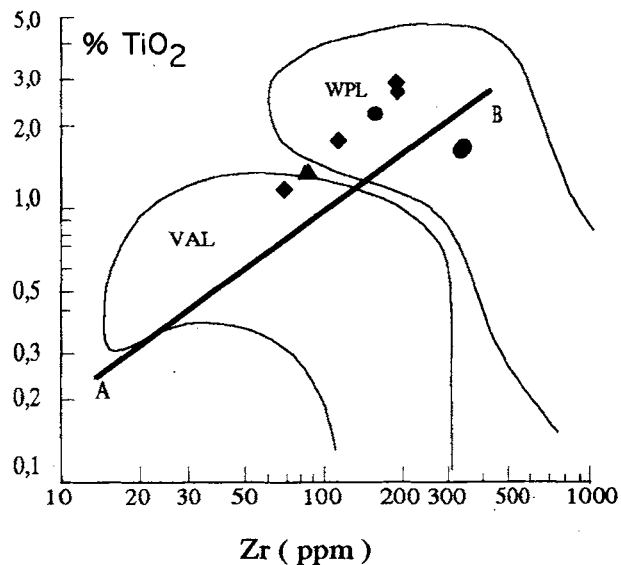
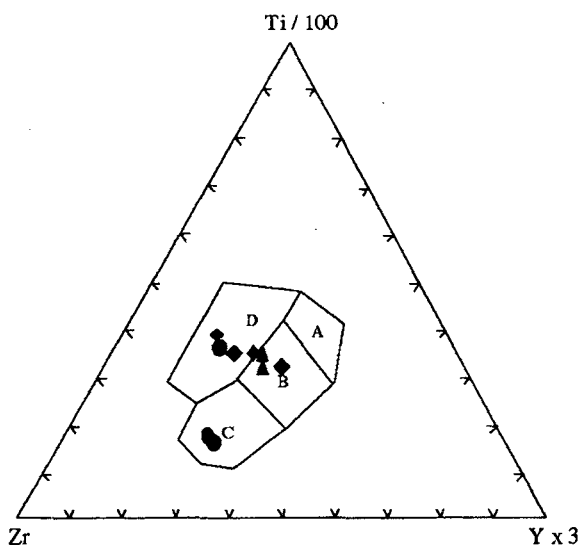


Figura 7. Contexto geodinámico de las anfibolitas del Roc de Frausa. Representación en los diagramas: a) Pearce y Cann (1973): B: Basaltos MORB; C: Basaltos calcoalcalinos; D: Basaltos de intraplaca. b) Pearce et al., 1981; WPL: Basaltos de intraplaca; VAL: Basaltos de arco volcánico. Símbolos como en la fig. 3.

Figure 7. Geodynamic setting of Roc de Frausa amphibolites in Pearce and Cann (1973) diagrams: a) B: MORB basalts; C: calk-alkaline basalts; D: within plate basalts. b) Pearce et al., 1981: WPL: within plate basalts. VAL: volcanic arc basalts. Symbols as in fig. 3.

Respecto a los elementos traza, los contenidos en niobio (<17ppm), ytrio y circonio son similares a los que presentan las anfibolitas más diferenciadas de La Vajol y relativamente bajos comparados con los de rocas de procedencia cortical (Fig. 8) (Thompson et al., 1984). En los espectros de multielementos normalizados al ORG (Pearce et al., 1984) destacan dos caracteres. En primer lugar, están enriquecidos en los elementos más móviles respecto al fuerte descenso en niobio, lo cual sugiere una importante influencia cortical; sin embargo, la pronunciada anomalía negativa en niobio indica un fuerte componente subductivo; esta última característica también se observa en las anfibolitas. En segundo lugar y respecto a los elementos menos móviles, algunos espectros son bastante próximos a los valores de normalización al ORG y granitos de arco (Chile), mientras que los más móviles son más semejantes a los granitos más fraccionados post-orogénicos (Mull). Asimismo, las proyecciones de estas rocas en los diagramas de Pearce et al. (1984, fig. 9) se sitúan en el límite entre los dominios compresivo (granitos sincolisionales) y extensivo (granitos de intraplaca) lo que sugiere un ámbito de generación fini-compresivo para estos magmas ácidos que concuerda con los datos aportados por las anfibolitas.

Los porfiroides se caracterizan por un contenido moderado en Tierras Raras (STR=177-197); sus espectros normalizados (Fig. 5) son fraccionados $(La/Yb)_n=6$ y

presentan una apreciable anomalía negativa en europio $Eu/Eu^*=0,6$. Estos espectros, respecto a las Tierras Raras pesadas, son muy próximos a los de las anfibolitas de La Vajol. Sin embargo, se encuentran enriquecidos en Tierras Raras ligeras respecto a ellas y presentan una

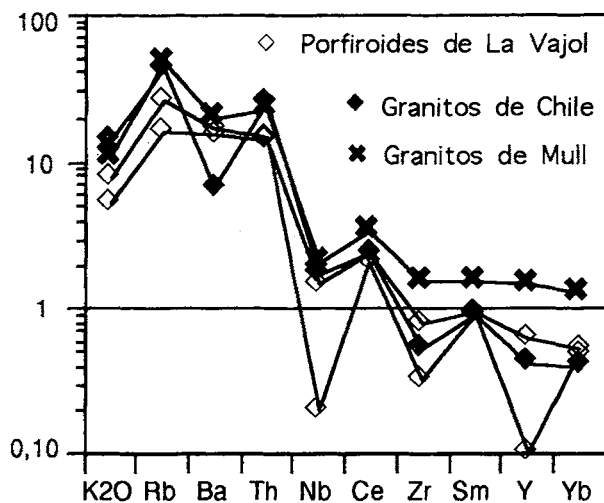


Figura 8. Diagrama de multielementos de los porfiroides gneissicos de La Vajol según normalización al ORG de Pearce et al. (1984).

Figure 8. Spider diagrams of La Vajol augen gneisses. ORG normalization from Pearce et al. (1984).

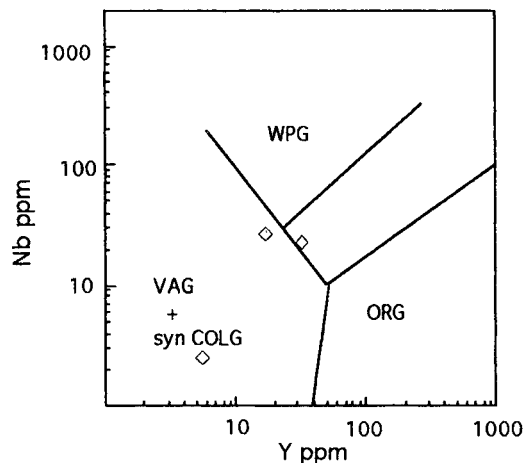
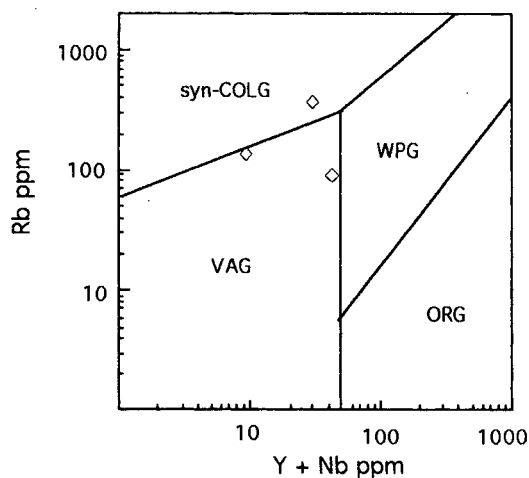


Figura 9. Contexto geodinámico de los porfiroides gneísicos de La Vajol según Pearce et al. (1984).

Figure 9. Geodynamic setting of La Vajol augen gneisses according to Pearce et al. (1984) diagram.

anomalía negativa en europio. Se trata, pues, de rocas algo más diferenciadas que las anfibolitas de La Vajol, característica que es importante en la hipótesis de que estas rocas se hubieran fraccionado a partir de ellas, interviniendo en dicho proceso la plagioclasa y fases que concentren las Tierras Raras ligeras (ferromagnesianos y fases titanadas), sin excluir un cierto aporte cortical.

En este supuesto, las relaciones binarias que se observan entre las anfibolitas y los porfiroides gneísicos respecto a la sílice y elementos mayores y trazas (Fig. 10) no parecen definir una tendencia de correlación clara y, salvo para algunos elementos (MgO, MnO, K₂O), las proyecciones de este conjunto de rocas se distribuyen en dos grupos, ácido y básico, sin composiciones intermedias entre ambos. Sin embargo, tampoco parece existir una bimodalidad clara.

DISCUSIÓN Y CORRELACIÓN CON OTROS SECTORES DEL PIRINEO ORIENTAL

En el Macizo del Roc de Frausa, al igual que sucede en otros macizos paleozoicos del Pirineo Oriental, no existen datos isotópicos y geocronológicos que permitan establecer con objetividad la procedencia y edad de las anfibolitas y de los porfiroides gneísicos que aparecen entre los metasedimentos del paleozoico inferior. El estudio de los afloramientos y la caracterización petrológica y geoquímica de estos materiales ígneos en diferentes macizos Hercínicos del Pirineo nos ha permitido correlacionar y discriminar diferentes tipos de anfibolitas y establecer una hipótesis sobre la naturaleza y el marco geodinámico del magmatismo del

Paleozoico Inferior en este segmento del basamento hercínico.

Las anfibolitas que afloran en el macizo del Roc de Frausa constituyen, en general, sills masivos de tipo intrusivo, emplazados en el tramo inferior y superior de la serie metasedimentaria cambro-ordovícica. Son volumétricamente inferiores a las que afloran en el Macizo del Canigó, al oeste de la zona estudiada (Fig. 1), donde también aparecen tipos lávicos y tobas ignimbríticas dentro de los tramos intermedio y superior de la serie paleozoica (serie de Canavelles, Guitard 1970). En el Macizo de l'Albera, situado al este del Roc de Frausa, el volumen de anfibolitas es menor y tampoco se conocen materiales lávicos. Los porfiroides gneísicos (gneises granulés) también son más abundantes y están mejor representados en el macizo del Canigó en relación a los otros dos macizos. Sin embargo, en l'Albera son más frecuentes los sills ácidos metaporfídicos, prácticamente ausentes en el Roc de Frausa. En otros sectores del Pirineo Oriental (Cap de Creus, Navidad y Carreras, 1995), también existen anfibolitas entre los metasedimentos cambro-ordovícicos, bien como manifestaciones lávicas o como dispositivos subvolcánicos. Así pues, las manifestaciones básicas Pre-Caradoc son bastante abundantes en este sector, a diferencia de otros sectores del Hercínico Peninsular. Los porfiroides ácidos son, sin embargo, comunes a todas las series cambro-ordovícicas hercínicas y corresponden a manifestaciones explosivas de carácter tobáceo y afinidad calcoalcalina que se extienden hasta el Ordovícico superior.

El magmatismo básico prehercínico en el Roc de Frausa está representado por anfibolitas metabasálticas

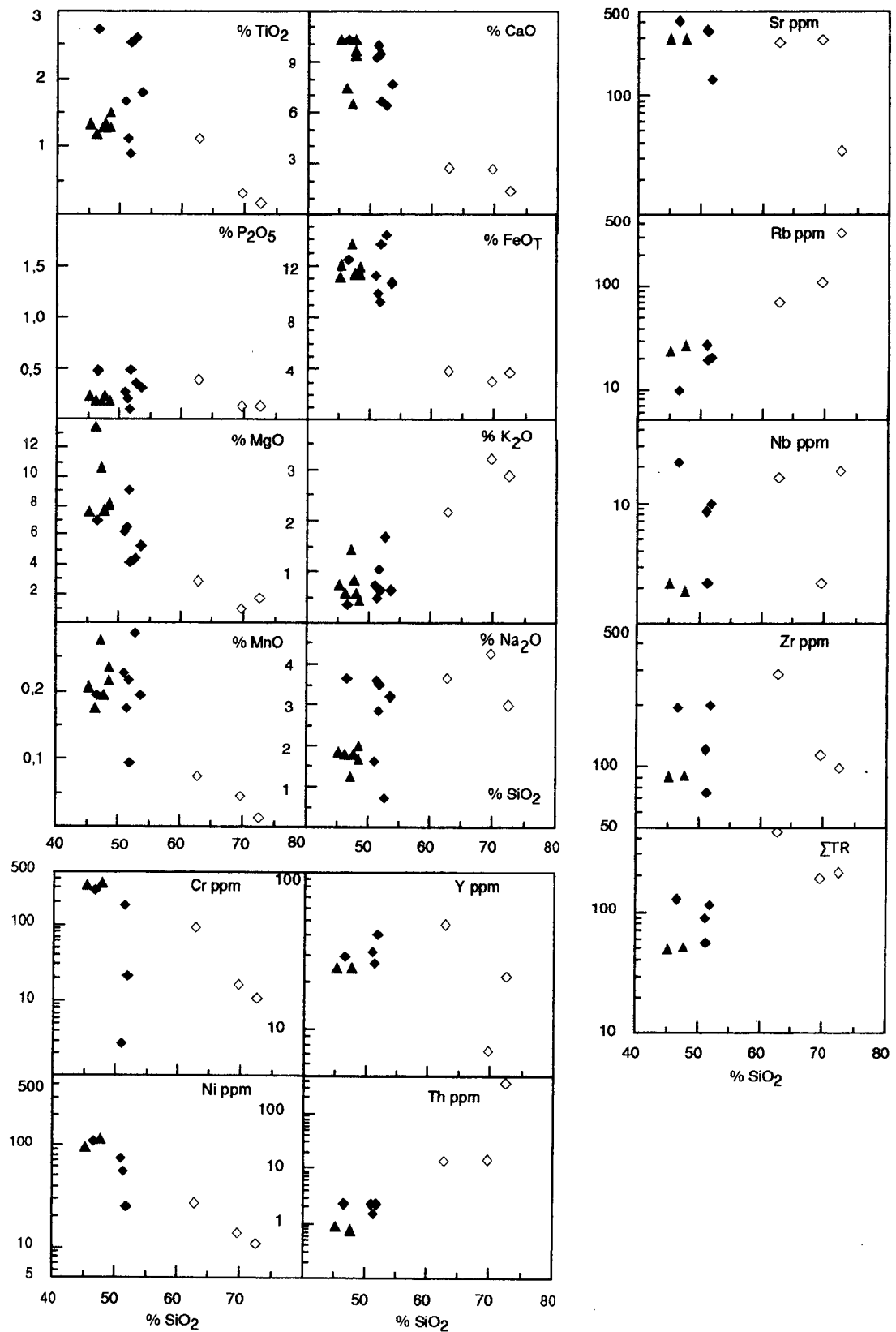


Figura 10. Representación del magmatismo paleozoico del Roc de Frausa en diagramas de correlación binaria SiO_2 /elementos mayores y traza. Símbolos como en la fig. 3.

Figure 10. Binary correlation diagrams of SiO_2 versus major and trace elements of Paleozoic magmatism of the Roc de Frausa massif. Symbols as in fig. 3.

representantes de magmas subalcalinos poco evolucionados de afinidad toleítica y contenido bajo a moderado en potasio. Este magmatismo, en el que los términos intermedios son prácticamente ausentes, se correlaciona con el que aparece en el macizo del Canigó, si bien en este sector, se encuentran localmente términos efusivos andesíticos de afinidad calcoalcalina rica en potasio (Navidad y Guitard in litt). En macizos próximos (Núria y Cap de Creus), las manifestaciones básicas corresponden también a términos primarios o intermedios de afinidad toleítica y contenido bajo en potasio.

Los datos geoquímicos aportados para el macizo del Roc de Frausa son, pues, concordantes con los obtenidos en otros sectores estudiados; por otra parte, el contenido en Tierras Raras de las anfibolitas es bajo, aunque aumenta desde los niveles inferiores a los superiores, al igual que el de elementos traza menos móviles. Estos datos permiten deducir, en términos generales, que las anfibolitas proceden de magmas poco evolucionados, afines a los E-MORB, emplazados en contextos continentales en etapas fini-compresivas, y, probablemente, en relación con cuencas marginales, dado su bajo contenido en niobio; su asociación con mármoles y metasedimentos de carácter grauváquico y series ampelíticas en todos los sectores estudiados apoyan dicho contexto geodinámico.

En el macizo del Roc de Frausa, y también en los del Canigó y Albera, existen otros tipos de anfibolitas, en particular los sills, que se localizan en los contactos tectonizados entre los ortogneises de la lámina superior y los metasedimentos del tramo intermedio de la serie cambro-ordovícica. Estas anfibolitas se caracterizan por estar deformadas y por presentar una mineralogía y composición diferente a la del resto. En el macizo del Roc de Frausa presentan una composición rica en hierro y potasio y una alcalinidad secundaria de origen probablemente hidrotermal. En ausencia de datos geocronológicos es difícil situarlas temporalmente.

Los porfiroides gnéisicos representan magmas ácidos (dacíticos a riolíticos) de carácter explosivo y afinidad calcoalcalina, con un contenido en aluminio y potasio variable a escala regional. Su asociación con las anfibolitas, mármoles y metasedimentos del tramo superior de la serie cambro-ordovícica es constante en los macizos del Pirineo Oriental, no así en el Cap de Creus. Su génesis a partir de las anfibolitas no siempre es clara, sobre todo en los sectores donde los términos intermedios están ausentes y se observa una aparente bimodalidad (Roc de Frausa), o en aquellos en los que no afloran directamente

asociados a las anfibolitas (Cap de Creus). En ausencia de datos isotópicos, y considerando su composición y las relaciones que presentan los elementos menos móviles y REE respecto a las anfibolitas, se interpreta que podrían proceder de diferentes fuentes, interviniendo en su génesis no sólo procesos de diferenciación a partir de acuéllas, sino también fundidos corticales inducidos por el ascenso de un manto sub-litosférico.

AGRADECIMIENTOS

M. Navidad agradece al Profesor Guitard de la Universidad de París VI la cesión de parte de las muestras y análisis utilizados, así como su conocimiento del terreno, ayuda y atención constante, que nos ha permitido abordar esta temática. Agradecemos también al Dr J. Tánago el trabajo de puesta a punto del Servicio de Microsonda Electrónica y a la UCM las facilidades para la utilización de la microsonda.

Agradecemos asimismo a los doctores F. J. Martínez y M. T. Gómez Pugnare las sugerencias aportadas y sus observaciones que han contribuido a mejorar este trabajo.

El presente trabajo se encuadra en los objetivos de los Proyectos CICYT PB-910477, PB 940684 CO2 02 y en la Acción Integrada de Cooperación Franco-Española n° 18 A.

BIBLIOGRAFÍA

Autran, A., Guitard, G., 1969. Mise en évidence de nappes hercyniennes de style pennique dans la série métamorphique du massif du Roc de France (Pyrénées orientales): Liaison avec la nappe du Canigou. C. R. Acad. Sci. Paris, 269, Sér. D, 2497-2499.

Cocherie, A., 1985. Interaction manteau-croûte: son rôle dans la genèse d'associations plutoniques calco-alcalines, contraintes géochimiques. Doc. BRGM. n° 90, 286 p.

Geyssant, J., Grandjacquet, C., Guitard, G., 1978. La terminaison de la nappe de gneiss du Canigou au nord-est du massif du Roc de France (Pyrénées Orientales) et ses replacements tardifs. C. R. Acad. Sci. Paris, 287, Sér. D, 1187-1190.

Guitard, G., 1970. Le métamorphisme hercynien mesozonal et les gneiss ocellés du massif du Canigou (Pyrénées Orientales). Mem. B.R.G.M., 63, 317 p.

Holm, P., 1985. The geochemical fingerprints of different tectonomagmatic environments using hygromagmatophile element abundances of tholeiitic basalts and basaltic andesites. Chemical Geology, 51, 303-323.

Jarosewich, E. J., Nelen, J. A., Norberg, J. A., 1980. Reference samples for electron microprobe analysis. Geostandards Newsletters, 4 (43-47), 257-258.

Laumonier, B., 1988. Sur l'attribution à Cambrien des groupes de Canaveilles et de Jujols (Pyrénées Catalanes, Espagne). Abstract from the Symposium on the Geology of the Pyrenees and Betics. Barcelona. April. 51-52.

Laumonier, B., Guitard, G., 1986. Le Paléozoïque inférieur de la moitié orientale de la zone axiale des Pyrénées. Essai de synthèse. C. R. Acad. Sci. Paris, 302 (2), 473-478.

Leake, B. E., 1978. Nomenclature of amphiboles. Can. Mineral., 16, 501-520.

- Licsa, M., 1988. El metamorfisme del vessant sud del Massís del Roc de Frausa (Pirineu oriental). Tesi doctoral. Universitat de Barcelona. 233p.
- Licsa, M., Carreras, J., 1989. On the structure and metamorphism of the Roc de Frausa Massif (Eastern Pyrenees). *Geodinamica Acta*, 3 (2), 149-161.
- Mullen, E. D., 1983. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Letters*, 62, 53-62.
- Navidad, M., Carreras, J., 1995. Pre-Hercynian magmatism in the Eastern Pyrenees (Cap de Creus and Albera Massifs) and its geodynamical setting. *Geologie en Mijnbouw*, 74, 65-77.
- Navidad, M., Guitard, G., in litt. Le magmatisme Pre-Hercynien du Paléozoïque basal dans le Massif du Canigou (Pyrénées Orientales). Interpretation du cadre d'évolution géodynamique. *Géologie de la France*.
- Navidad, M., Liesa, M., Carreras, J., 1996. Condiciones metamórficas de las metabasitas del Roc de Frausa (Pirineos Orientales). Estimaciones en base a la composición del anfíbol. IV Congreso Geológico de España. *Geogaceta*, 20 (3), 621-625.
- Pearce, J. A., Cann, J. R., 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth Planet. Sci. Letters*, 19, 290-300.
- Pearce, J. A., 1983. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins. In C. J. Hawkesworth and M. J. Norry (eds). *Continental basalts and mantle xenoliths*, 230-250. Shiva Publ. Ltd.
- Pearce, J. A., Alabaster, T., Shelton, A. W., Searle, M. P., 1981. The Oman ophiolite as a Cretaceous arc basin complex: evidence and implications. *Phil. Trans. R. Soc.*, A300, 299-317.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrology*, 4 (25), 956-983.
- Pecerillo, R., Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63-81.
- Taylor, S. R., MacLennan, S. M., 1985. The continental crust. Its composition and evolution. Blackwell Scientific Publ. 311p.
- Thompson, R. N., Morrison, M. A., Hendry, G.L., Parry, S. J., 1984. An assesment of the relative roles of crust and mantle in magma genesis: an elemental approach. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 310, 549-590.
- Winchester, J. A., Floyd, P. A., 1976. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20, 325-343.