

# Una aproximación a la clasificación química de rocas intrusivas calcoalcalinas basada en su densidad: su utilidad en la prospección preliminar y cartografía de rocas graníticas

*An approach to the chemical classification of calc-alkaline intrusive rocks based on their density: its usefulness in preliminary prospecting and mapping of granitic rocks*

Pere Enrique

Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada. Facultat de Geologia. Universitat de Barcelona. C/ Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona, España; pere.enrique@ub.edu, jingyao.xu@ub.edu, sergi.esteve@ub.edu

## ABSTRACT

The density of rocks is a physical property easily obtainable at standard ambient conditions (20°C and 1 atm, National Institute of Standards and Technology). In series of igneous rocks, particularly in the calc-alkaline, its value varies gradually according to their chemical composition. This fact allows to correlate density and chemical composition of the rocks allowing an estimate of the overall composition. This composition represents a first petrological approach, easy to use, for mapping plutonic rocks. In this study, based on analysis of a significant part of the batholith of the Catalan Coastal Ranges (the Montnegre Massif), a good approximation of the results is obtained, with the condition of being used with appropriate samples and only with a prospective purpose. Estimated chemical compositions allow its use in conventional classification diagrams as can be seen when compared to chemical analysis in the  $R_1R_2$  diagram.

**Key-words:** Density, plutonic rocks classification, density-chemical composition correlation, hercynian, Montnegre.

## RESUMEN

La densidad de las rocas es una propiedad física de fácil determinación en condiciones ambientales estándar (20°C y 1 atm, Instituto Nacional de Normas y Tecnología). En series de rocas ígneas, en particular en las calcoalcalinas, su valor varía gradualmente en función de su composición química. Este hecho permite establecer una correlación entre la densidad y cada componente químico de las rocas lo que permite un cálculo aproximado de su composición global. Esta composición representa una primera aproximación petrológica objetiva de fácil utilización para la cartografía de rocas plutónicas.

En este estudio, basado en análisis del batolito de las Cordilleras Costeras Catalanas (Macizo del Montnegre), se comprueba la buena aproximación de los resultados, con la condición de ser utilizado con muestras apropiadas y únicamente con una finalidad prospectiva. Las composiciones obtenidas permiten su utilización en diagramas de clasificación convencionales tal como puede comprobarse cuando se comparan con los análisis químicos en el diagrama  $R_1R_2$ .

**Palabras clave:** Densidad, clasificación de rocas plutónicas, correlación densidad-composición química, herciniano, Macizo del Montnegre.

Geogaceta, 61 (2017), 127-130  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 26 de julio de 2016  
Revisión: 3 de noviembre de 2016  
Aceptación: 25 de noviembre 2016

## Introducción

Las densidades de las rocas ígneas dependen de las de los minerales que las forman y de la proporción en que se hallan (Ross, 1989) y, por tanto, en última instancia, así como en el caso de los magmas (Bottinga y Weill, 1970), dependen esencialmente de su composición química. Dado que las principales variaciones composicionales se deben a los factores de diferenciación magmática (entre ellos la cristalización fraccionada y la mezcla de magmas como procesos dominantes) los minerales de temperatura de fusión más elevada (ricos en hierro y por ello más densos) se van separando del magma residual, cada vez más rico en sílice.

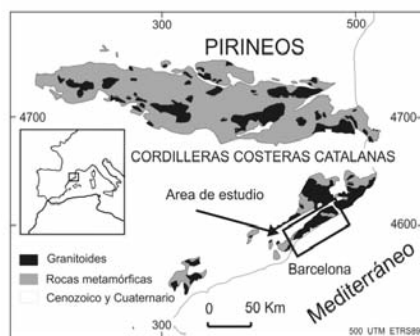
Como resultado, se obtiene una secuencia de rocas cuya densidad disminuye gradualmente desde los términos más básicos a los más ácidos. El intervalo de densidades de las principales rocas plutónicas varía entre 3,31 g/cm<sup>3</sup> de las peridotitas hasta 2,52 g/cm<sup>3</sup> de los granitos más ligeros (Daly *et al.*, 1966; Hall, 1987).

Debido a que los magmas evolucionan a partir de magmas parentales distintos, los conjuntos de rocas ígneas que se originan tienen composiciones que siguen trayectorias de variación que son características de cada serie. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que algunas asociaciones de rocas plutónicas manifiestan una clara correlación entre la densidad y su composición química, lo que

permite hacer una estimación de su composición global determinando únicamente este parámetro. Las muestras estudiadas corresponden a un sector del batolito calcoalcalino del Montnegre (Cordillera Litoral Catalana) (Enrique, 1985, 1990) (Fig. 1).

## Material y métodos

Para estudiar el grado de correlación existente entre la densidad y la composición química de las rocas plutónicas del Macizo del Montnegre se ha partido de un conjunto de 12 rocas representativas de un afloramiento de unos 500 km<sup>2</sup>, con un amplio espectro composicional. Las muestras y los datos ana-



**Fig. 1.- Localización del área de estudio (Macizo del Montnegre) en el conjunto de afloramientos hercynianos del NE peninsular.**

*Fig. 1.- Location of the study area (Massif Montnegre) in the whole NE peninsular Hercynian outcrops.*

líticos están extraídos de Enrique (1985) y se corresponden a su numeración (Tabla I). La densidad se ha calculado por el principio de Arquímedes a partir de fragmentos sólidos secos (por evaporación a temperatura ambiente) de formas arbitrarias y de entre unos 100 y 400 g, obteniendo el volumen por la disminución de peso debida a la inmersión en agua destilada. Dado que las muestras de rocas plutónicas no tienen una porosidad significativa y no se ha observado una variación relevante en los resultados obtenidos, no se ha considerado necesario seguir ningún protocolo estandarizado. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$d = \frac{PM}{PM - PA}$$

siendo "d" la densidad, "PM" el peso de la muestra y "PA" el peso aparente de la muestra inmersa en el agua. La diferencia PM-PA es equivalente al volumen de agua

desplazada (el volumen desplazado se ha calculado considerando que la densidad del agua a 20°C es 0,998 g/cm<sup>3</sup>). Las densidades obtenidas de las muestras estudiadas se hallan en la tabla I.

A continuación se ha comparado la densidad con los principales óxidos mayoritarios para establecer su correlación y su ecuación correspondiente. Los óxidos utilizados han sido: SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> total, MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O. En algunos casos la distribución de los puntos se ajusta a una regresión lineal pero en general se ajustan mejor a una polinómica de grado 2. En algunos óxidos, como en el TiO<sub>2</sub> o el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, se observan fuertes cambios de tendencia a partir de valores de densidad elevados, originando curvas de formas complejas. En esos casos, dado que sigue existiendo una correspondencia unívoca entre la densidad y la composición, se ha optado por fragmentar la distribución de puntos en diferentes segmentos rectos o parabólicos (si se diera el caso) (Fig. 2). Las ecuaciones para cada óxido, así como su coeficiente de determinación R<sup>2</sup>, se hallan en la tabla II. Los gráficos y las ecuaciones se han obtenido mediante el programa grapher de Golden Software Inc. (2002).

**Resultados**

La calidad de las correlaciones entre la densidad y la composición de los diferentes elementos químicos considerados es desigual pero lo suficientemente buena para poder distinguir claramente unos tipos petrográficos de otros.

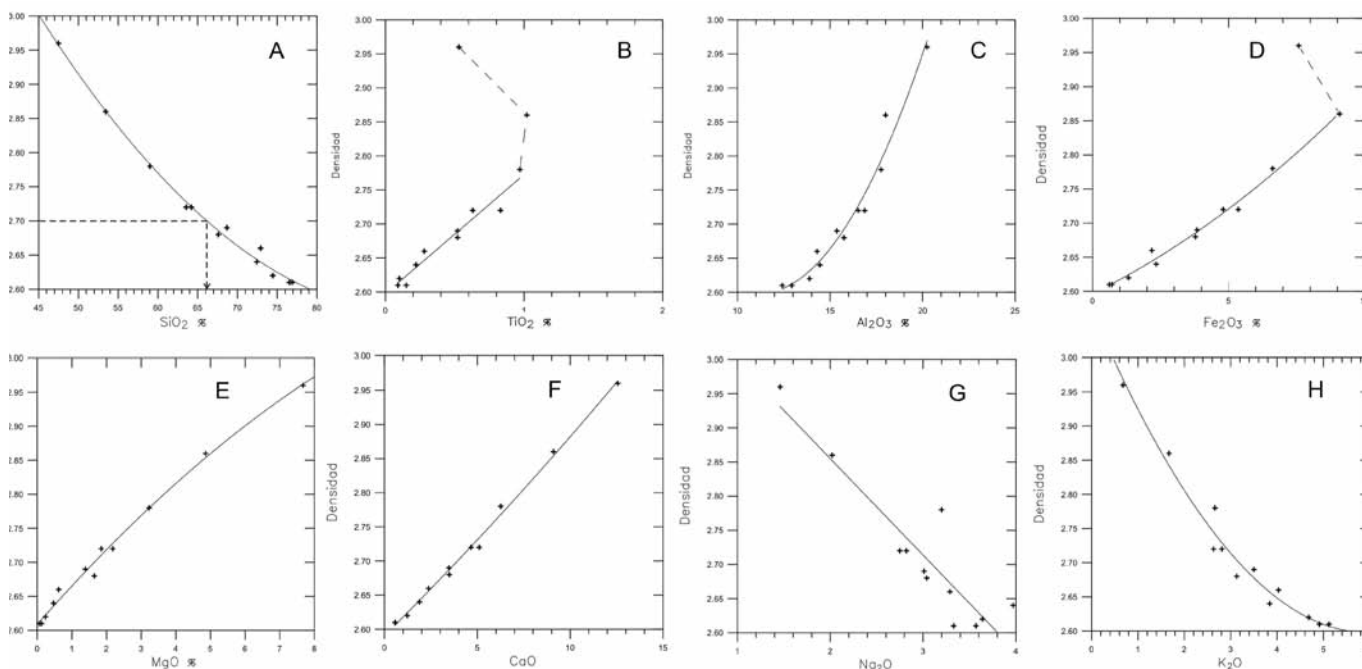
Para poner en evidencia estos resultados se han utilizado los porcentajes de óxidos calculados a partir únicamente de la densidad, en diagramas de clasificación química convencionales. Se ha escogido el diagrama R<sub>1</sub>R<sub>2</sub> de De la Roche *et al.* (1980) que utiliza un elevado número de componentes químicos para ver su efecto en todos ellos. La representación de las composiciones calculadas junto a analizadas (Fig. 3) permite ver la dispersión relativamente pequeña producida, lo cual mantiene las muestras en los mismos campos de clasificación.

En el diagrama se han representado, en primer lugar, las muestras patrón utilizadas para construir las regresiones (triángulos llenos). En segundo lugar se han proyectado las mismas muestras pero con los valores composicionales obtenidos a partir de las ecuaciones correspondientes expuestas en la tabla II (circunferencias). Para comprobar la utilidad del método también han sido representadas dos muestras (de las que se dispone de análisis químico) pero de una zona fuera del ámbito estricto del área estudiada. Se trata de una tonalita del extremo meridional de los Catalánides (número de muestra: 9-2) (Enrique, 1990), situada a unos 120 km al SSO del Macizo del Montnegre, y de una granodiorita con megacrístales de feldespato potásico (15-1) (Enrique, 1990), situada a unos 50 km al NE. Los puntos correspondientes a los análisis químicos se han representado como cuadrados llenos, mientras que los valores calculados a partir de su densidad se han representado como cuadrados vacíos.

Núm.	Tipo de roca	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	d	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
A-1fx	leucogranito	76,89	0,15	12,42	0,61 0,12	0,56	3,57	4,91	2,61	76,56	0,09	13,11	0,76	0,08	0,74	3,62	4,79
A-1	leucogranito	76,55	0,09	12,93	0,71 0,06	0,59	3,33	4,12	2,61	76,56	0,09	13,11	0,76	0,08	0,74	3,62	4,79
A-34	monzogranito	74,45	0,10	13,89	1,32 0,24	1,23	3,64	4,68	2,62	75,36	0,14	13,44	1,17	0,24	1,10	3,56	4,60
A-26	monzogranito	72,93	0,28	14,30	2,18 0,62	2,37	3,29	4,03	2,66	70,76	0,36	14,71	2,77	0,90	2,52	3,32	3,89
A-39	monzogranito	72,44	0,22	14,45	2,34 0,47	1,88	3,97	3,84	2,64	73,02	0,25	14,09	1,99	0,56	1,81	3,44	4,24
A-60	granodiorita	68,68	0,52	15,37	3,84 1,39	3,47	3,01	3,50	2,69	67,55	0,52	15,57	3,89	1,43	3,57	3,14	3,41
A-45	granodiorita	67,60	0,52	15,75	3,78 1,65	3,49	3,04	3,13	2,68	68,60	0,47	15,29	3,53	1,25	3,22	3,20	3,56
A-71	tonalita	64,21	0,83	16,52	5,36 2,18	4,66	2,75	2,81	2,72	64,54	0,69	16,35	4,95	1,99	4,61	2,96	2,96
A-13	tonalita	63,57	0,83	16,87	4,80 1,85	5,01	2,82	2,63	2,72	64,54	0,69	16,35	4,95	1,99	4,61	2,96	2,96
A-91	cuarzodiorita	59,01	0,97	17,76	6,62 3,23	6,26	3,20	2,66	2,78	59,11	1,01	17,68	6,86	3,21	6,65	2,61	2,19
A-67	cuarzogabro	53,44	1,02	18,00	9,08 4,86	9,10	2,02	1,67	2,86	53,10	1,02	18,98	9,01	5,02	9,28	2,13	1,42
A-93	gabro hornb.	47,50	0,53	20,24	7,58 7,67	12,56	1,46	0,68	2,96	47,58	0,53	19,83	7,58	7,60	12,43	1,54	0,86
9-2	tonalita	61,55	0,77	16,26	5,68 3,17	5,37	2,85	2,53	2,76	60,83	0,90	17,27	6,25	2,79	5,97	2,73	2,43
15-1	granodiorita	69,85	0,37	15,33	3,28 0,79	2,55	3,45	3,34	2,68	68,60	0,47	15,29	3,53	1,25	3,22	3,20	3,56

**Tabla I.- Análisis químicos (Enrique, 1985), densidad y composición química calculada a partir de su densidad, de las muestras estudiadas. Los análisis están obtenidos por espectrofotometría de absorción atómica excepto la muestra A-1x que se ha obtenido por fluorescencia de rayos-X en los Centres Científics I Tecnològics de la Universitat de Barcelona (CCiTUB). Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* representa el hierro total en forma de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.**

*Table I.- Chemical analysis (Enrique, 1985), density and chemical composition calculated from the density, of the studied samples. Analysis are obtained by atomic absorption spectrophotometry except sample A-1x that has been obtained by X-ray fluorescence at the Centres Científics I Tecnològics de la Universitat de Barcelona (CCiTUB).*



**Fig. 2.-** Curvas de correlación entre la composición de elementos mayores y la densidad (d) de las rocas plutónicas estudiadas. A) SiO<sub>2</sub> vs. densidad. La línea de puntos indica mediante un ejemplo cómo obtener la composición en SiO<sub>2</sub> de una roca plutónica de la zona estudiada para una densidad de 2,70 g/cm<sup>3</sup>; B) TiO<sub>2</sub> vs. d; C) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. d; D) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. d; E) MgO vs. d; F) CaO vs. d; G) Na<sub>2</sub>O vs. d; H) K<sub>2</sub>O vs. d.

*Fig. 2.- Correlation curves between major element-composition and density (d) of the studied plutonic rocks. A) SiO<sub>2</sub> vs density. The dotted line indicates an example of how to obtain the SiO<sub>2</sub> composition of a plutonic rock of the study area for a density of 2.70 g/cm<sup>3</sup>; B) TiO<sub>2</sub> vs. d; C) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. d; D) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> vs. d; E) MgO vs. d; F) CaO vs. d; G) Na<sub>2</sub>O vs. d; H) K<sub>2</sub>O vs. d.*

## Discusión

Los resultados expuestos anteriormente ponen de manifiesto que las rocas plutónicas calcoalcalinas del Macizo del Montnegre tienen una densidad que disminuye progresivamente desde los términos más básicos hasta los más ácidos.

Esta variación se corresponde no solo a su contenido en sílice sino también al resto de los óxidos de los elementos mayores. Sin embargo, su grado de correlación no es el mismo para todos los óxidos siendo el mayor para el SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO y CaO, algo menor para el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O y TiO<sub>2</sub>, y relativamente malo para el Na<sub>2</sub>O.

Como consecuencia, estas correlaciones permiten la obtención de una composición química aproximada de las rocas plutónicas que forman parte de la serie estudiada determinando únicamente su densidad.

Este hecho puede ser de gran utilidad en estudios cartográficos de áreas plutónicas en los que se requiere la identificación de un gran número de afloramientos para delimitar las diferentes unidades intrusivas o estudiar zonaciones composicionales progresivas. Es evidente que este método no sustituye ningún procedimiento analítico sino que representa únicamente un método objetivo, sin apenas gasto económico, para una prospección preliminar.

Como se ha reiterado previamente, la máxima efectividad se da cuando el método se utiliza en las mejores condiciones posibles. Ello significa que: 1) existe realmente una asociación plutónica cuya densidad varía en concordancia con su composición química. Dicha concordancia debe determinarse previamente mediante los análisis químicos de un estudio limitado de muestras representativas; 2) Las muestras obtenidas para medir su densidad y calcular su composición aproximada deben pertenecer a la misma asociación ígnea que los patrones utilizados. Para ello es necesario un estudio petrográfico pre-

vio de las diferentes tipologías, de modo que puedan ser reconocidas en un examen macroscópico sobre el terreno; 3) Las muestras deben ser representativas de la media del afloramiento y no representar variaciones locales a pequeña escala producidas por heterogeneidades debidas a concentraciones anómalas de determinados minerales; 4) Las muestras deben estar lo menos alteradas posible (ya sea por meteorización o por alteraciones hidrotermales).

De la observación de los diagramas de regresión de la Fig. 2 se deduce que puede existir alguna situación anómala que podría

variables	núm	ecuación	coef. R <sup>2</sup>
d vs. SiO <sub>2</sub>	12	$y = 1145,506614 - 697,682136 x + 110,3923057 x^2$	0,990
d vs. TiO <sub>2</sub> (d < 2,78)	10	$y = 5,44381425 x - 14,12031549$	0,953
d vs. TiO <sub>2</sub> (d: 2,78-2,88)	2	$y = 0,625 x - 0,7675$	1
d vs. TiO <sub>2</sub> (d > 2,88)	2	$y = -4,9 x + 15,034$	1
d vs. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	$y = -366,6943207 + 256,8887563x - 42,6708057 x^2$	0,953
d vs. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (d < 2,88)	11	$y = -355,8174452 + 231,15443 x - 36,22059662 x^2$	0,988
d vs. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (d > 2,88)	2	$y = -15 x + 51,98$	1
d vs. MgO	12	$y = 76,87357699 - 74,32530042 x + 17,20389018 x^2$	0,994
d vs. CaO	12	$y = -143,8016347 + 74,73903888 x - 7,417730634 x^2$	0,995
d vs. Na <sub>2</sub> O	12	$y = -5,944805835 x + 19,13361916$	0,840
d vs. K <sub>2</sub> O	12	$y = 207,3882186 - 136,169982 x + 22,43116319 x^2$	0,951

**Tabla II.-** Ecuaciones de correlación correspondientes a los gráficos de la figura 2. Se indican las variables, el número de muestras utilizado y el coeficiente de determinación R<sup>2</sup>.

*Table II.- Correlation equations corresponding to the graphs in figure 2. Variables, number of samples used, and the coefficient of determination R squared are indicated.*

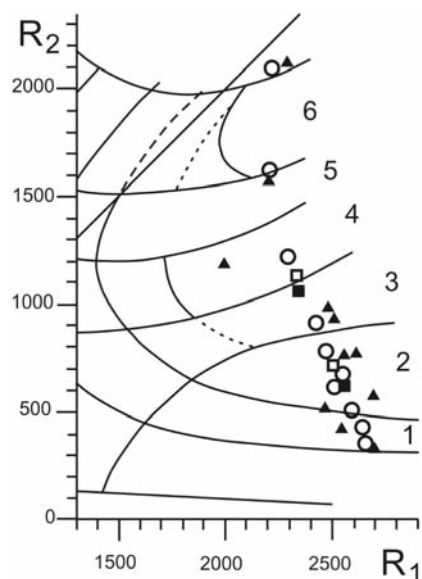


Fig. 3.- Representación gráfica de las muestras estudiadas en el diagrama R1R2 de De La Roche et al. (1980). Los triángulos corresponden a las muestras patrón, las circunferencias a los valores calculados a partir de su densidad y los cuadrados representan dos muestras independientes de zonas adyacentes (ver texto principal).  $R_1 = 4Si - 11(Na+K) - 2(Fe+Ti)$ ;  $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$ .

Fig. 3. Graphic representation in the diagram R1R2 of De La Roche et al. (1980) of the samples studied. Triangles correspond to the standard samples, circles to the values calculated from its density and the squares represent two independent samples of adjacent areas (see main text).  $R_1 = 4Si - 11(Na+K) - 2(Fe+Ti)$ ;  $R_2 = 6Ca + 2Mg + Al$ .

advertir del incumplimiento de alguna de las condiciones que se acaban de exponer, lo cual no impide la obtención de las composiciones correspondientes y, además, permite desvelar la posible presencia de más de una serie ígnea en el conjunto estudiado.

Nos centraremos en tres ejemplos:

- a) El  $TiO_2$ : La variación composicional entre los cuarzogabros y los leucomonzogranitos se realiza de forma normal con una buena correlación lineal. Sin embargo, en algunos términos más básicos, no solo la correlación es peor sino que, claramente deja de existir y la tendencia incluso se invierte, originando una curva de mayor complejidad. Ello puede poner en evidencia la existencia de otra asociación de tipología distinta que coexiste en la misma área geográfica. Como una primera aproximación, sin embargo, y con esta posibilidad presente, puede segmentarse la tendencia y obtenerse correlaciones para cada tramo (Fig. 1B).
- b) El caso del  $Fe_2O_3$  es similar al del  $TiO_2$ . Las rocas más básicas son mucho más pobres en hierro que lo que les corres-

pondería en la tendencia general. Este hecho refuerza la idea de que pueden pertenecer a una serie distinta.

- c) El  $Na_2O$ . El diagrama del sodio muestra la peor correlación con la densidad de todos los óxidos estudiados. Este caso es muy importante porque pone en evidencia la existencia de dos subseries casi iguales pero que difieren principalmente en la relación  $Na_2O/K_2O$ . En efecto, si se observa el diagrama puede verse una buena correlación lineal de un buen número de muestras, que se sitúan en la parte inferior de la nube de puntos y que definen una recta de buena calidad.

Por otra parte hacia la parte inferior derecha del diagrama se destacan dos muestras con contenidos mucho más altos en  $Na_2O$  que las de la tendencia general, las cuales hacen descender mucho la calidad de la recta.

Si se consideran estas muestras de forma independiente dibujan una recta paralela por encima de la anterior. Estas muestras proceden de las intrusiones de la superunidad del N del Montnegre con una relación  $Na_2O/K_2O$  sistemáticamente más elevada de la del S del Montnegre (Enrique, 1985).

Otras aplicaciones son las de reconocer las composiciones de rocas intrusivas genéticamente relacionadas como los enjambres de diques que suelen estar asociados. Los ensayos realizados sugieren que pueden utilizarse las mismas regresiones para las rocas afáníticas tanto afánicas como porfídicas, permitiendo la discriminación entre porfídicos graníticos, granodioríticos y dioríticos.

Por el contrario, en el caso de las rocas volcánicas no existe una equivalencia entre su densidad y la de las rocas plutónicas o hipoabísales de las mismas composiciones, obteniéndose densidades sustancialmente más bajas.

## Conclusiones

- 1) La buena correlación entre la composición química de las rocas plutónicas calcoalcalinas (ejemplo del macizo herciniano del Montnegre) y su densidad permite el cálculo aproximado de la composición en elementos mayores determinando únicamente este parámetro.
- 2) Esta composición calculada puede utilizarse como una primera aproximación con fines prospectivos, especialmente de tipo cartográfico.

- 3) Las composiciones permiten discriminar claramente entre los principales tipos petrográficos usando los diagramas convencionales.
- 4) Las discrepancias que pueden presentarse en las tendencias de los diversos óxidos al elaborar las regresiones con rocas patrón, pueden poner sobre aviso de la presencia de más de una serie ígnea en la misma área geográfica.
- 5) La mayor aproximación entre la composición química analizada y la calculada a partir de la densidad se obtiene en las muestras pertenecientes a la misma serie y dentro de la zona de obtención de los patrones de las curvas de regresión.
- 6) En casos de rocas de series similares de áreas próximas aún se pueden obtener resultados aceptables (ejemplos del S y el N de los Catalánides) lo que amplía el área de utilización (Tabla I y Fig. 3).
- 7) Análogos resultados se obtienen con las rocas intrusivas hipoabísales calcoalcalinas asociadas. Este punto es importante debido a los escasos criterios macroscópicos de clasificación que pueden utilizarse en rocas afáníticas.

## Agradecimientos

El autor agradece las interesantes aportaciones y sugerencias en la revisión y mejora del trabajo a los doctores Carlos Villaseca y Álvaro Rubio, así como al editor de Geogaceta Manuel Díaz.

## Referencias

- Bottinga, Y. y Weill D.F. (1970). *American Journal of Science* 269, 169-182.
- Daly, R.A., Manger, G.E. y Clary, S.P. Jr. (1966). *Geological Society of America Memoirs* 97, 19-26.
- De la Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P. y Marchal, M. (1980). *Chemical Geology* 29, 183-210.
- Enrique, P. (1985). *La asociación plutónica tardi-Herciniana del Macizo del Montnegre, Catalánides Septentrionales (Barcelona)*. Tesis Univ. de Barcelona, 351 p.
- Enrique, P. (1990). *Acta Geológica Hispánica* 25, 39-64.
- Hall, A. (1987). *Igneous Petrology*. Longman Scientific and Technical. 573 p.
- Hughes, C.J. (1982). *Igneous Petrology*. Elsevier. Amsterdam, 551 p.
- Ross, D.C. 1989. *Professional Paper U.S. Geological Survey* 1381, 166p.