

Clasificación normativa de las rocas plutónicas saturadas y sobresaturadas en sílice basada en la clasificación modal QAP: El diagrama 2Q-(or+ab)-4an

Normative classification of silica-saturated and oversaturated plutonic rocks based on the QAP modal diagram: the 2Q- (or+ab)- 4an diagram

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

ABSTRACT

The modal QAP diagram constitutes the main tool for the classification of the acidic and intermediate plutonic rocks. However, it has some limitations and inconsistencies that produce distinct rock overlaps and sudden jumps in gradual compositional variations. The normative 2Q-(or+ab)-4an diagram gives similar results than the modal QAP in many cases and improves some others. For example, the overlapping between dioritoids and gabbroids is avoided as well as the jump of the feldspathic index from 100% to 0% when the plagioclase crosses the 5% of anorthite content. In addition, this diagram gives way to new compositional fields that allow one to include some rocks as the eucritoids, or new rock-names, such as "tonalgabbros" and "tonaleucrites" for quartz-rich, calcic to very calcic, rocks. At the vertex of the alkaline feldspar the orthoclase is added to the total albite, which gives a coherent behavior to the alkaline elements, unlike the QAP diagram in which the albite of the plagioclase has an opposite behavior. Because of this grouping, the approximation to the vertex of the alkaline feldspar is due to the increase of Na, as well as of K or both. As a consequence, the sodic series also move progressively from the vertex of the anorthite to the vertex or + ab avoiding the extreme polarization that occurs in the QAP diagram.

Key-words: 2Q-(or+ab)-4an diagram, CIPW classification, QAP diagram, eucrite, tonalgabbro.

RESUMEN

El diagrama modal QAP constituye la herramienta principal para la clasificación de las rocas plutónicas ácidas e intermedias. Sin embargo, tiene algunas limitaciones e inconsistencias que producen superposiciones de rocas distintas y saltos bruscos en variaciones composicionales graduales. El diagrama normativo 2Q-(or+ab)-4an reproduce en gran parte los resultados del diagrama modal QAP evitando la superposición de dioritoides y gabroides y el salto de 100% a 0% del índice feldespático cuando la plagioclase cruza el límite del 5% de anortita. Además, se generan nuevos campos que permiten, por ejemplo, incluir los eucritoides, o nuevos nombres de rocas como los "tonalgabros" y "tonaleucritas", para rocas ricas en cuarzo pero con plagioclase cálcica. En el vértice del feldespato alcalino la ortosa se suma a la albita total, lo que da un comportamiento coherente a los elementos alcalinos, a diferencia del diagrama QAP en el que la albite de la plagioclase tiene un comportamiento opuesto. A causa de este agrupamiento, el acercamiento al vértice del feldespato alcalino se debe tanto al incremento del Na, como del K o al de ambos. Como consecuencia de ello, las series sódicas también se desplazan progresivamente desde el vértice de la anortita hacia el vertice or+ab evitando la polarización extrema que se produce en el diagrama QAP.

Palabras clave: diagrama 2Q-(or+ab)-4an, clasificación CIPW, diagrama QAP, eucrita, tonalgabbro.

Geogaceta, 63 (2018), 95-98
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 8 de julio de 2017
Revisión: 16 de octubre 2017
Aceptación: 23 de octubre 2017

Introducción

Las rocas ígneas son el resultado de la consolidación de los magmas, cuya diversidad se debe a los distintos factores que intervienen en su génesis y evolución posterior. Dado que la composición magmática se modifica principalmente mediante procesos de cristalización fraccionada, las rocas ígneas resultantes están formadas por

distintas proporciones de minerales que varían gradualmente entre ellas. Por esta razón, las clasificaciones de dichas rocas se basan en porcentajes de minerales representativos expresados como campos composicionales en diagramas característicos. Estas clasificaciones mineralógicas resultan muy convenientes en la determinación de las rocas plutónicas ya que su naturaleza fanerítica facilita su identificación microscó-

pica. Sin embargo en el caso de las rocas hipoabisales y volcánicas, generalmente afaníticas, el establecimiento de las proporciones minerales (composición modal) puede resultar difícil, o incluso imposible en el caso de contener una fase hialina.

Así pues, en la actualidad la clasificación y nomenclatura de las rocas plutónicas se realiza principalmente con los diagramas modales de Le Maitre *et al.* (2002), basados

en los de Streckeisen (1976), y recomendados por la *IUGS Subcommission on The Systematics of Igneous Rocks*.

Dado que las rocas ígneas están constituidas por diversos minerales y algunos forman mezclas isomorfas, una primera dificultad consiste en escoger qué minerales y parámetros pueden representar mejor la diversidad de las rocas y sus relaciones genéticas. Si tenemos en cuenta que (con la excepción de las rocas ultramáficas) los feldespatos forman más del 50% de la mayoría de las rocas ígneas resulta lógico que este grupo de minerales sea determinante en los diagramas de clasificación. Además, las plagioclasas y los feldespatos alcalinos se reparten según el grado de diferenciación magmática, lo que nos permite, no solo clasificar la roca sino aproximar su grado de evolución y la serie o asociación ígnea a la que pertenece.

Los diagramas QAP y APF utilizan estas diferencias de contenido en feldespatos alcalinos (A) y plagioclasas (P), representadas mediante el índice feldespático, $IF = 100 P/(P+A)$, para establecer los campos composicionales de las rocas sobresaturadas, saturadas y subsaturadas en sílice (Shand, 1950). En el caso de rocas sobresaturadas en sílice aparece el cuarzo (Q) dando origen al diagrama QAP que incluye desde gabroides hasta granitoides. El diagrama APF representa a las rocas con feldespatoideos (F) los cuales, por ser subsaturados en sílice, son mutuamente incompatibles con el cuarzo.

Aún cuando los diagramas QAP y APF son muy útiles y discriminan muy bien las rocas de las principales asociaciones ígneas, presentan algunos inconvenientes derivados de la propia definición de las composiciones utilizadas en los vértices de los diagramas.

Un problema importante se da cuando se contraponen el concepto de plagioclasea con el de feldespato alcalino ya que la albita pura pertenece a ambos grupos. El problema se soluciona considerando que la albita más pura ($An < 5$) es un feldespato alcalino (A) mientras que todas las demás composiciones ($An \geq 5$) son plagioclasas (P). Este caso pone en evidencia otro problema mayor, de tipo similar, que tiene su origen en que las plagioclasas forman una serie isomorfa entre la albita y la anortita y, por tanto, representan una variación composicional muy importante entre sus dos extremos.

Dado que P se considera un mineral único las rocas ricas en este componente

pueden ser notablemente distintas, como se pone de manifiesto en la superposición en el mismo campo (próximo a P) de los gabros y de las dioritas.

Nuevamente, el problema se soluciona estableciendo otra discontinuidad en la composición de la plagioclasea. Se consideran dioritas si su plagioclasea tiene $An < 50$ y gabros si tiene $An \geq 50$.

Esta solución es simple desde el punto de vista teórico, pero comporta grandes dificultades prácticas pues se trata de la composición media, y las plagioclasas suelen presentar zonaciones que impiden esta determinación de forma precisa.

Por otra parte, teniendo en cuenta que la diferenciación da origen a rocas con plagioclasas progresivamente más albiticas, en el caso de magmas muy bajos en potasio la gran mayoría de los términos rocosos quedan en el campo próximo a P (gabros y dioritas) y al rebasar el umbral de An_5 se pasa directamente al campo próximo a A (sienitas de feldespato alcalino), ya que la molécula de la albita queda atrapada en la plagioclasea durante casi todo el proceso.

Para intentar resolver algunos de estos problemas se han construido diversos diagramas de clasificación basados no en composiciones modales sino en cálculos normativos. Estos cálculos generan unos minerales simplificados y normalizados a partir de la composición química de la roca, cuyo objetivo principal no es reproducir la composición modal sino poder comparar rocas tanto faneríticas como afaníticas con los mismos criterios.

Los primeros cálculos normativos (norma CIPW, Cross *et al.*, 1902) se basaron en la obtención de minerales simples (extremos de series isomorfas) y anhidros, y es como se sigue utilizando actualmente en numerosos estudios.

No obstante se han realizado diversas aproximaciones para poder reconstruir los minerales usados en las clasificaciones modales y así poder establecer equivalencias entre rocas plutónicas, hipoabisales y volcánicas.

La aplicación directa de los minerales de la norma CIPW en el diagrama QAP produce desplazamientos importantes respecto a los obtenidos mediante análisis modales. Una causa importante es la presencia de potasio en la biotita y moscovita, que queda en los minerales máficos y no es contabilizada en la composición modal (Parslow, 1969). Una mejora para la solución a este

problema se obtiene utilizando la mesonorma (Barth, 1959) pensada originalmente para la obtención de minerales hidratados en rocas metamórficas. Dado que entre los minerales calculados están la biotita y la hornblenda, puede adaptarse a la mineralogía presente en los granitoides y al resto de rocas cuarzo-feldespáticas hidratadas (Parslow, 1969; Mielke y Winkler, 1979; Kosinowski, 1982; Clarke, 1987-1993; Janoušek *et al.*, 2006).

La representación de las muestras en el diagrama QAP usando los minerales normativos obtenidos en la mesonorma se ajusta razonablemente bien a los de las composiciones modales y se usa a menudo como prácticamente equivalente. Sin embargo conviene calibrarlo con muestras modales pues su comportamiento depende del tipo de rocas estudiadas. Hay dos factores que influyen de forma contrapuesta en el índice feldespático obtenido. El primero se refiere a la albita (*ab*) y el otro a la ortosa (*or*) (las abreviaturas de minerales en cursiva se refieren a minerales normativos). En la roca real una parte de la albita se halla formando parte de la plagioclasea y la otra se halla como mezcla isomorfa o como exsoluciones peritéticas en los feldespatos potásicos. Como no existe una manera simple de redistribuir esta albita, en la norma se asigna toda ella para la formación de plagioclasea ($P = ab + an$), mientras que el feldespato alcalino queda restringido a la ortosa ($A = or$). Aquí ya puede verse que, por ejemplo, un granito albitico se representaría como una tonalita y no como un granito de feldespato alcalino. Por otro lado, un exceso de ortosa queda fijado en la formación de la biotita normativa, con lo que, el porcentaje de feldespato potásico resultante es inferior al obtenido en la norma CIPW y se aproxima más al valor modal.

Un diagrama normativo diseñado específicamente para reproducir de forma precisa los mismos campos de clasificación que el diagrama modal QAP es el diagrama *Q'-or-an* (Streckeisen y Le Maitre, 1979). Este diagrama se presenta en su versión rectangular tomando como eje horizontal la relación $an/(an+or)$ y en la vertical la proporción de cuarzo respecto al total de minerales félsicos (*Q'*). Los minerales normativos son los obtenidos de la norma CIPW y los límites de los campos de clasificación se han obtenido empíricamente representando las muestras previamente proyectadas en el diagrama modal QAP

(Streckeisen, 1976). La diferencia fundamental con los anteriores es que prescinde de la albíta (*ab*) para evitar el problema de su redistribución entre el feldespato alcalino y la plagioclasa. La coincidencia de la clasificación con la clasificación modal es notable aunque también se observan problemas importantes. En primer lugar la *or* de la biotita se sigue incorporando a la del feldespato alcalino. Esto hace que el índice $an/(an+or)$ se vea afectado por el contenido en biotita de la muestra, de modo que, por ejemplo, una tonalita rica en biotita puede desplazarse hacia el campo de las granodioritas mientras que una tonalita hornbléndica (o una leucotonalita) no. Es decir, la clasificación de la roca se puede modificar según los máficos que contenga, cosa que no ocurre en el QAP modal. Otro problema viene implícito en la supresión de la albíta. Muchas rocas sódicas quedan excluidas o mal representadas. Si ponemos como ejemplo un granito de feldespato alcalino acmita-normativo podemos apreciar que debería tener $an=0$ y $ab=0$ con lo que su valor en el eje *x*, $an/(an+or) = 0/0$.

Los mismos razonamientos pueden hacerse para la parte inferior del diagrama (*F'-or-an*).

No obstante, este diagrama es muy útil, tanto en la clasificación de las rocas ígneas como en la definición de las series ígneas a las que pertenecen (Whalen y Frost, 2013). Estos autores introducen una modificación dividiendo el campo de diorita/gabro en dos campos separados, lo cual hace que aparezcan el del cuarzogabro, y con composiciones más ricas en cuarzo, el de la tonalita rica en calcio.

El objeto de este trabajo es presentar un nuevo diagrama de clasificación de las rocas ígneas saturadas y sobresaturadas en sílice, a partir de los minerales de la norma CIPW que trate de evitar algunos de los problemas previamente citados y se ajuste al máximo a la clasificación modal QAP manteniendo el componente albítico como componente esencial. Asimismo se pretende definir mejor algunas tipologías e incorporar algunas rocas no incluidas en los diagramas anteriores.

El diagrama 2Q-(or+ab)-4an

Este diagrama utiliza los minerales félsicos obtenidos mediante la norma CIPW (% en peso) (Cross *et al.*, 1902) para la clasificación de las rocas ígneas saturadas y

subsaturadas en sílice en un formato triangular para una mejor comparación de los resultados con el diagrama modal QAP (Streckeisen, 1976; Le Maitre *et al.*, 2002). A diferencia del diagrama QAP no se basa en el índice feldespático $IF=100 \cdot P/(P+A)$ como factor de discriminación en el eje *x* sino en el índice feldespático ternario $IFT=100 \cdot an/(an+ab+or)$. Teniendo en cuenta que la plagioclasa de las rocas básicas menos diferenciadas aún contiene proporciones notables de *ab*, mediante este índice la mayoría de las rocas quedan agrupadas en la mitad izquierda del triángulo, debido a la preponderancia de los componentes alcalinos sobre la *an*. Como el objetivo principal es la clasificación de las rocas manteniendo en lo posible la nomenclatura de la IUGS, se han ajustado las divisiones de los campos de clasificación de modo empírico, utilizando los análisis modales de una asociación calcoalcalina y alcalina (Enrique, 1990; Ferrés, 1994) (Fig.1A) como referencia. La mejor coincidencia entre los campos de clasificación se ha obtenido multiplicando por 4 el valor normativo *an* y multiplicando por 2 el valor normativo *Q*.

Por lo tanto, el diagrama triangular resultante queda definido con los componentes si-

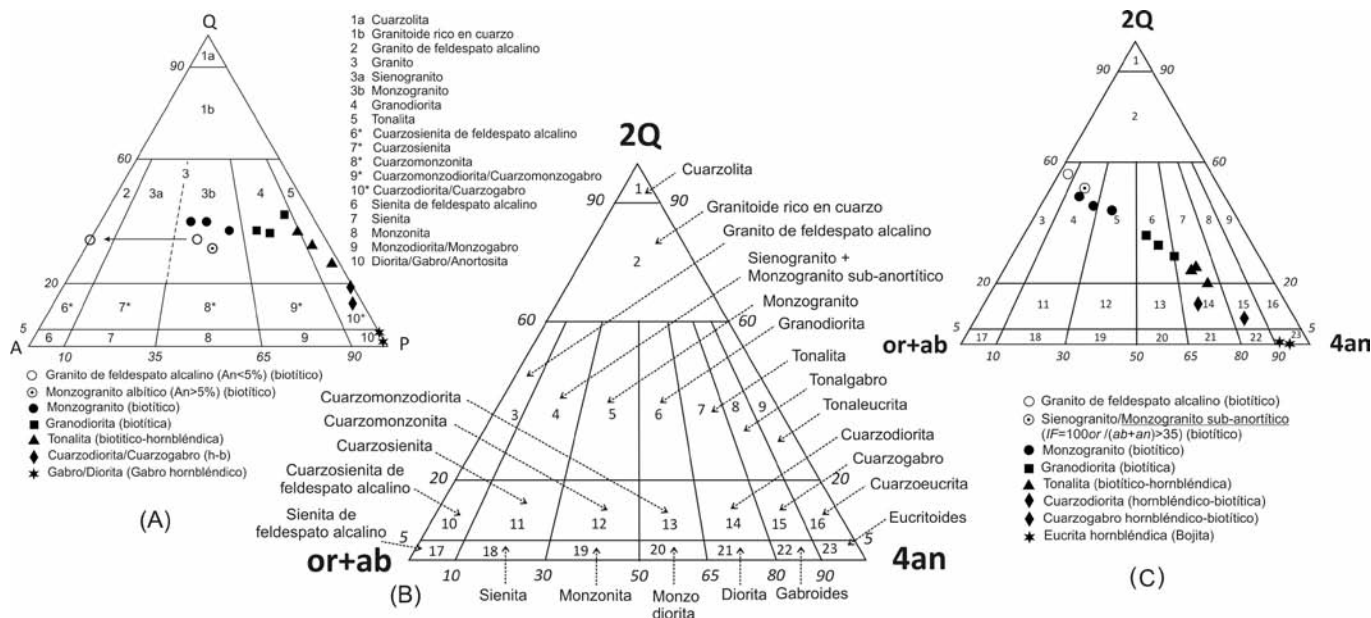


Fig. 1.- A) Composición modal de la asociación plutónica de Montnegre-Cadiretes (símbolos llenos y vacíos, respectivamente) en el diagrama QAP (Le Maitre *et al.*, 2002). Se muestra con una flecha el gran salto producido en el diagrama cuando se rebasa la composición An5 de la plagioclasa. B) Diagrama triangular normativo 2Q-(ab+an)-4an (CIPW) para la clasificación de rocas plutónicas saturadas y sobresaturadas en sílice con la indicación de la nomenclatura de los 23 campos definidos. C) Representación gráfica de las mismas muestras de la figura 1A en el diagrama 2Q-(ab+an)-4an. La leyenda muestra los nuevos nombres obtenidos con este diagrama (entre paréntesis se indican otros minerales esenciales presentes).

Fig. 1.- A) Modal composition of the Montnegre-Cadiretes plutonic association (full and empty symbols, respectively) on the QAP diagram (Le Maitre *et al.*, 2002). The large jump produced in the diagram is shown with an arrow when the composition An5 of the plagioclase is exceeded. B) Normative triangular diagram 2Q-(ab + an)-4an (CIPW) for the classification of silica-saturated and oversaturated plutonic rocks with the indication of the nomenclature of the 23 defined fields. C) Graphic representation of the same samples of figure 1A on the 2Q-(ab + an)-4an diagram. The legend show the new names obtained using this diagram. (Other essential minerals present in the rocks are indicated in parentheses).

guientes: a) vértice superior = $2 \times Q$, b) vértice izquierdo = $or+ab$, vértice derecho = $4 \times an$, de modo que, la escala de la base se refiere al índice feldespático ternario modificado $IFT^* = 100 \cdot 4 \cdot an / (4 \cdot an + ab + or)$.

En una primera aproximación, los valores de IFT^* que definen las líneas rectas radiales que convergen en $2Q$ y que delimitan los campos composicionales son: 10, 30, 50, 65 y 90. Los valores de $2Q$ son: 5, 20, 60 y 90 (Fig.1B).

Para valorar la correspondencia entre la nomenclatura resultante y la del diagrama QAP se han proyectado en ambos diagramas los análisis modales y los valores normativos (corrección del Fe de Le Maitre, 1976) de muestras representativas de toda la asociación calcoalcalina del Macizo del Montnegre (Enrique, 1990) y dos muestras de la asociación alcalina del Macizo de Cadiretes, adyacente al Macizo del Montnegre (Ferrés, 1994) (Fig.1C).

Discusión y conclusiones

El diagrama de clasificación de rocas ígneas $2Q-(ab+or)-4an$ que se presenta (con 23 campos composicionales definidos en la figura 1B) mantiene la misma nomenclatura del diagrama modal QAP en la mayoría de casos pero discrimina mejor algunas rocas que quedan superpuestas en el diagrama modal, debido a que puede diferenciar las rocas por el contenido en anortita de la plagioclasa. Así, por ejemplo, se separan en campos distintos las dioritas de los gabroides, e incluso permite separar, en un campo distinto, los eucritoides (gabroides con plagioclasa bytownítica y anortítica).

Por el mismo motivo aparecen composiciones sin una nomenclatura específica. Para las rocas con IFT^* comprendido entre 80 y 90 y $2Q$ entre 20 y 60, se propone el nombre de

"tonalgabro" que se correspondería en parte con la tonalita rica en Ca, propuesta por Whalen y Frost (2013). Aquí se propone tonalgabro, en primer lugar para evitar usar una terminología química en una clasificación mineralógica, y en segundo lugar para poder definir la "tonaleucrita" con IFT^* entre 90 y 100 y $2Q$ entre 20 y 60.

Un resultado importante del diagrama es que representa las series ígneas de forma gradual y sin discontinuidades, a diferencia del diagrama modal. Ello comporta que las series sódicas saturadas en sílice puedan representarse de modo continuo cerca de la base del triángulo desde las composiciones ricas en an hasta las composiciones ricas en feldespato alcalino ($ab+or$).

Otro resultado importante es la variación gradual que queda representada desde los monzogranitos hasta los granitos de feldespato alcalino, ya que en el diagrama QAP la evolución queda bloqueada en el campo monzogranítico al considerarse equivalentes las plagioclasas de composiciones comprendidas entre An_{50} y An_5 . Sin embargo, ello comporta que los monzogranitos con albita/oligoclase (en el QAP) se proyecten en los sienogranitos. Por esta razón el campo 4 incluye sienogranitos y "monzogranitos sub-anortíticos" (con oligoclase/albita), los cuales pueden distinguirse de los sienogranitos por la composición de su plagioclase ($An > 5\%$).

Finalmente otra utilidad importante, que comparte con las demás clasificaciones normativas, es que permite comparar directamente las rocas plutónicas, hipoabisales y volcánicas (faneríticas y afaníticas) en el mismo diagrama de clasificación.

Referencias

Barth, T.F.W. (1959). *Journal of Geology* 67, 135-152.

Clarke, D. (1987-1993). *NEWPET*. Memorial University of Newfoundland Department of Earth Sciences. Centre for Earth Resources Research. St. John's, NF, Canada.

Cross, W., Iddings, J.P., Pirsson, L.V. y Washington, H.S. (1902). *Journal of Geology* 10, 555-690.

Enrique, P. (1990). *Acta Geològica Hispànica* 25, 39-64.

Ferrés M. (1994). *Les intrusions granítics subvolcàniques d'afinitat alcalina de Tossa de Mar (Cadenes Costaneres Catalanes): Cartografia, Petrologia i Geoquímica*. Tesi de Llicenciatura. Univ. de Barcelona. (inéd.).

Janousek, V., Farrow, C.M. y Erban, V. (2006). *Journal of Petrology* 47, 1255-1259.

Kosinowski, M.H.F. (1982). *Computers & Geosciences* 8 (1), 111-120.

Le Maitre, R.W. (1976). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 56, 181-184.

Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M.J., Bonin, B. y Bateman, P. (2002). *Igneous rocks: a classification and glossary of terms*. Cambridge University Press, 236 p.

Mielke, P. y Winkler, H.G.F. (1979). *Neues Jahrbuch für Mineralogie*, Mh 471-480.

Parslow, G.R. (1969). *Mineralogical Magazine* 37, 262-269.

Shand, S.J. (1950). *Eruptive rocks*. Thomas Murby, 4th ed., London, 488 pp.

Streckeisen, A.L. (1976). *Earth Science Reviews* 12, 1-33.

Streckeisen, A. y Le Maitre, R.W. (1979). *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen* 136, 169-206.

Whalen, J.B. y Frost, C. (2013). En: *South-Central Section-47th Annual Meeting*. Geological Society of America. Paper No. 17-4.