

VARIACION DE LA MINERALOGIA DEL RESIDUO Y FRACCIONACION DE LOS ELEMENTOS TRAZA DURANTE LA FUSION PARCIAL INCONGRUENTE

R. Benito García* y J. López Ruiz*

RESUMEN

Algunas fases minerales de las que constituyen las rocas de la corteza y del manto superior funden incongruentemente. En estas condiciones, la fraccionación de los elementos traza no puede ser modelada mediante las clásicas ecuaciones de Shaw (1970), sino que tienen que utilizarse las ecuaciones de Hanson (1978) o las de Hertogen y Gijbels (1976). La elección de unas u otras ecuaciones, dependerá de que se desee calcular el valor de la concentración en el líquido para un momento dado de la fusión o a lo largo del proceso.

En este trabajo se modifican las ecuaciones propuestas por Hertogen y Gijbels (1976), extendiéndolas al caso más general en el que la reacción y fusión incongruente de una fase (α) tiene lugar según la reacción $\alpha + \beta + \gamma = \delta + \epsilon + \text{Liq.}$

Palabras clave: *Fusión parcial, fusión incongruente, elementos traza.*

ABSTRACT

Some minerals of the crust and mantle melt incongruently. During incongruent melting, the trace element fractionation can't be modelled by the mathematical expressions derived by Shaw (1970). In this case, the equations of Hanson (1978) should be used, when the mineralogy of residual solid is known, or the expressions obtained by Hertogen and Gijbels (1976), when the composition of the initial solid is known.

In this paper, the mathematical expressions presented by these last authors to treat incongruent melting processes, are extended to a more general case when the breakdown of one phase (α) takes the form $\alpha + \beta + \gamma = \delta + \epsilon + \text{Liq.}$

Key words: *Partial melting, incongruent melting, trace element.*

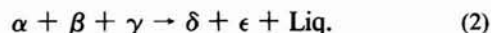
Introducción

Algunos minerales de rocas del manto superior y de la corteza funden incongruentemente. En general, las fases que aparecen en las rocas del manto y que presentan esta característica (por ejemplo, pargasita, enstatita, etc.), funden según reacciones del tipo:



en donde α representa la fase que funde incongruentemente y β , γ y δ las que se forman como consecuencia de la fusión de la primera. Por el contrario, algunos de los constituyentes minerales de rocas corti-

cales (por ejemplo, moscovita, biotita, etc.), lo hacen según reacciones más complejas, del tipo:



En los procesos de fusión en los que una de las fases del sistema funde incongruentemente, el comportamiento de los elementos traza, no puede modelarse utilizando las clásicas ecuaciones de Shaw (1970). En estos casos, puede recurrirse a las expresiones propuestas por Hanson (1978) o a las ecuaciones de Hertogen y Gijbels (1976).

Para poder aplicar estas últimas ecuaciones es preciso conocer la proporción en la que se encuentran

* Departamento de Geología. Museo Nacional de Ciencias Naturales (C.S.I.C.). José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

las diferentes fases del sistema a lo largo del proceso, lo que a su vez exige disponer de las correspondientes ecuaciones de balance de masas. La ecuación de balance de masas para las fases que funden congruentemente, fue establecida por Shaw (1979), y para las fases que funden incongruentemente, según reacciones semejantes a las de la ecuación (1), por Hertogen y Gijbels (1976).

En este trabajo, se modifican las ecuaciones propuestas por estos últimos autores, extendiéndolas al caso más general en el que la reacción y fusión de la fase incongruente tiene lugar según reacciones como las de la ecuación (2). Esta modificación permite estudiar la fraccionación que sufren los elementos traza, en líquidos basálticos originados en el manto superior, y en líquidos graníticos generados a partir de rocas metapelíticas, en las que moscovita y biotita son constituyentes omnipresentes.

Ecuaciones que gobiernan la composición mineralógica del sólido durante la fusión incongruente

Es un sistema multicomponente constituido por fases que funden congruentemente, por fases que reaccionan y funden incongruentemente según reacciones como las de la ecuación (2) y por fases que no intervienen en el proceso, la ecuación de balance de masas es*:

$$X^m W^s = X_o^m W_o - L q^m - S \frac{p_A^m}{\sum_m p_A^m} + S \frac{t^m}{1 - t^t} \quad (3)$$

siendo:

$$q^m = \frac{p_A^m t^t + p_B^m}{1 - [1 - t^t] \sum_m p_A^m} \quad (4)$$

y

$$S = L \frac{[1 - t^t] \sum_m p_A^m}{1 - [1 - t^t] \sum_m p_A^m} \quad (5)$$

Si se sustituyen estas dos últimas expresiones en la ecuación (3) y se tiene en cuenta que $L/W_o = F$ y $W^s/W_o = (1-F)$, se llega a la expresión general:

$$X^m (1 - F) = X_o^m - \frac{p_A^m + p_B^m - t^m \sum_m p_A^m}{1 - [1 - t^t] \sum_m p_A^m} F \quad (6)$$

donde

$$\sum_m X_o^m = \sum_m X^m = \sum_m [p_A^m + p_B^m] = t^t + \sum_m t^m = 1$$

* El significado de los símbolos empleados en las distintas ecuaciones, se encuentra en el Apéndice.

A partir de esta expresión se calcula la proporción en la que se encuentran los diferentes tipos de fases del sistema, después de cada etapa de fusión, y la tasa máxima de fusión de cada fase. Así, para el conjunto de fases que no se forman en la reacción incongruente, $t^m=0$, con lo que la expresión (6) queda reducida a:

$$X^m (1 - F) = X_o^m - \frac{p_A^m + p_B^m}{1 - [1 - t^t] \sum_m p_A^m} F \quad (7)$$

Esta expresión se simplifica todavía más si las fases funden congruentemente, ya que para éstas $p_A=0$; si sólo participan en el proceso a través de la reacción incongruente, en cuyo caso tendrán un $p_B=0$, o si no intervienen en la fusión, con lo que sus valores de $p_A=p_B=0$.

El grupo de fases formadas en la reacción tendrá un $t^m \neq 0$, pero un $p_A=0$, puesto que se ha supuesto que ninguna de estas fases funde incongruentemente. En consecuencia, la expresión (6) queda en la forma:

$$X^m (1 - F) = X_o^m - \frac{p_B^m - t^m \sum_m p_A^m}{1 - [1 - t^t] \sum_m p_A^m} F \quad (8)$$

Si las fases que se forman en la reacción incongruente, no intervienen en la fusión, tendrán un $p_B=0$, y si son nuevas en el sistema y permanecen en el residuo sin fundir, sus valores de $X_o=p_B=0$.

La tasa máxima de fusión para cualquier fase del sistema, viene dada por la expresión:

$$F = X_o^m \frac{1 - [1 - t^t] \sum_m p_A^m}{p_B^m + p_A^m - t^m \sum_m p_A^m} \quad (9)$$

Ecuaciones que gobiernan la abundancia en elementos traza de los líquidos generados durante la fusión incongruente

Como ya fue expuesto en la introducción, las clásicas ecuaciones de Shaw (1970) no pueden utilizarse para conocer la abundancia en elementos traza de los líquidos generados durante la fusión incongruente, puesto que el parámetro P_L^i no es aplicable. En estos casos, si se conoce la composición mineralógica y química del residuo, puede recurrirse a las expresiones:

$$C_L^i = \frac{C_o^i}{D_{RS}^i + F [1 - D_{RS}^i]} \quad (10)$$

$$C_L^i = \frac{C_{RS}^i}{D_{RS}^i} \quad (11)$$

propuestas por Hanson (1978), ya que las etapas previas del proceso no son relevantes, si el sistema permanece cerrado. A su vez, si se conoce la composición del material original, puede utilizarse la ecuación de Hertogen y Gijbels (1976):

$$\frac{C_L^i}{C_o^i} = \frac{1}{D_{o,n}^i + F [1 - Q_{L,n}^i] + F_{n-1} [Q_{L,n}^i - D_{o,n}^i]} \quad (12)$$

si ha habido una etapa previa de fusión, durante la que ha desaparecido alguna fase del sistema, o su forma más simplificada:

$$\frac{C_L^i}{C_o^i} = \frac{1}{D_o^i + F [1 - Q_L^i]} \quad (13)$$

si no ha tenido lugar una etapa previa de fusión.

Si la fusión incongruente tiene lugar según reacciones como las de la ecuación (1), el parámetro Q_L^i vendrá definido (Hertogen y Gijbels, 1976) por la expresión:

$$Q_L^i = \frac{P_L^i - p^\alpha [\sum_m^m K_m^i]}{1 - p^\alpha [1 - t]} \quad (14)$$

Pero si aquella tiene lugar según reacciones más complejas, del tipo de la ecuación (2), tomará la forma más general:

$$Q_L^i = \frac{P_L^i - [\sum_m^m p_\Lambda^m] [\sum_m^m t^m K_m^i]}{1 - [1 - t] \sum_m^m p_\Lambda^m} \quad (15)$$

La elección de las ecuaciones (10)-(11) o de las ecuaciones (12)-(13), para obtener el valor C_L^i del líquido generado, va a depender fundamentalmente de que se desee calcular dicho parámetro sólo en un momento dado de la fusión o a lo largo del proceso.

Variación de la mineralogía y de la relación C_L/C_o durante la anatexia de gneises biotítico-granatífero-sillimaníticos

Para ilustrar lo expuesto en los apartados precedentes, se ha calculado la variación mineralógica y la fraccionación que sufriría un hipotético gneis biotítico-almandínico-sillimanítico, durante un proceso de fusión, en el que unas fases funden congruentemente y otras incongruentemente.

De acuerdo con los datos experimentales (por ejemplo, Winkler, 1979), se ha supuesto que durante las primeras etapas del proceso, cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico funden congruentemente, hasta que se agotan las dos últimas fases. Durante la última etapa, la biotita funde incongruentemente, según la reacción (von Platen y Holler, 1966):



El cálculo de la relación C_L^i/C_o^i y de los valores de X^m en cada una de las etapas del proceso, se ha realizado aplicando las ecuaciones anteriormente expuestas, mediante el programa ANATEX. BAS (Benito y López Ruiz, 1989). Los valores obtenidos se encuentran recogidos en la Tabla 1, y de forma gráfica en la

Tabla 1.—Variación de la mineralogía y de la relación C_L/C_o durante la anatexia de un gneis biotítico-granatífero-sillimanítico.

	Q	Plg	Fto K	Alm	Bt	Sill	Cd	F	C_L/C_o									
									Rb	Sr	Zr	Ba	Ce	Th	Ni	Cr	V	
X_o	40	20	2	5	23	10	0	0										
Primera etapa:																		
p	32	42	26	0	0	0	0											
X_1	40,7	18,2	0	5,4	24,9	10,8	0	7,69	1,77	0,77	2,01	0,44	1,15	2,30	0,83	0,23	0,19	
Segunda etapa:																		
p	32	68	0	0	0	0	0											
X_2	43,8	0	0	7,4	34,0	14,8	0	32,35	1,25	2,64	1,38	0,42	0,97	1,49	0,69	0,22	0,18	
Tercera etapa:																		
p	100	0	0	0	0	0	0											
X_3	15,6	0	0	11,1	51,1	22,2	0	55,00	0,98	1,65	1,05	0,38	0,79	1,11	0,60	0,21	0,17	
Cuarta etapa:																		
p_Λ	27	0	0	0	43	30	0											
t	0	0	0	0	0	0	72											
X_4	0	0	0	13,2	31,4	5,9	49,5	62,26	1,11	1,48	1,05	0,58	0,78	0,85	0,68	0,33	0,28	
Cuarta etapa:																		
p	27	0	0	0	43	30	0											
X_4	13,4	0	0	13,2	52,7	20,7	0	62,26	0,97	1,49	1,03	0,41	0,81	1,08	0,63	0,24	0,19	

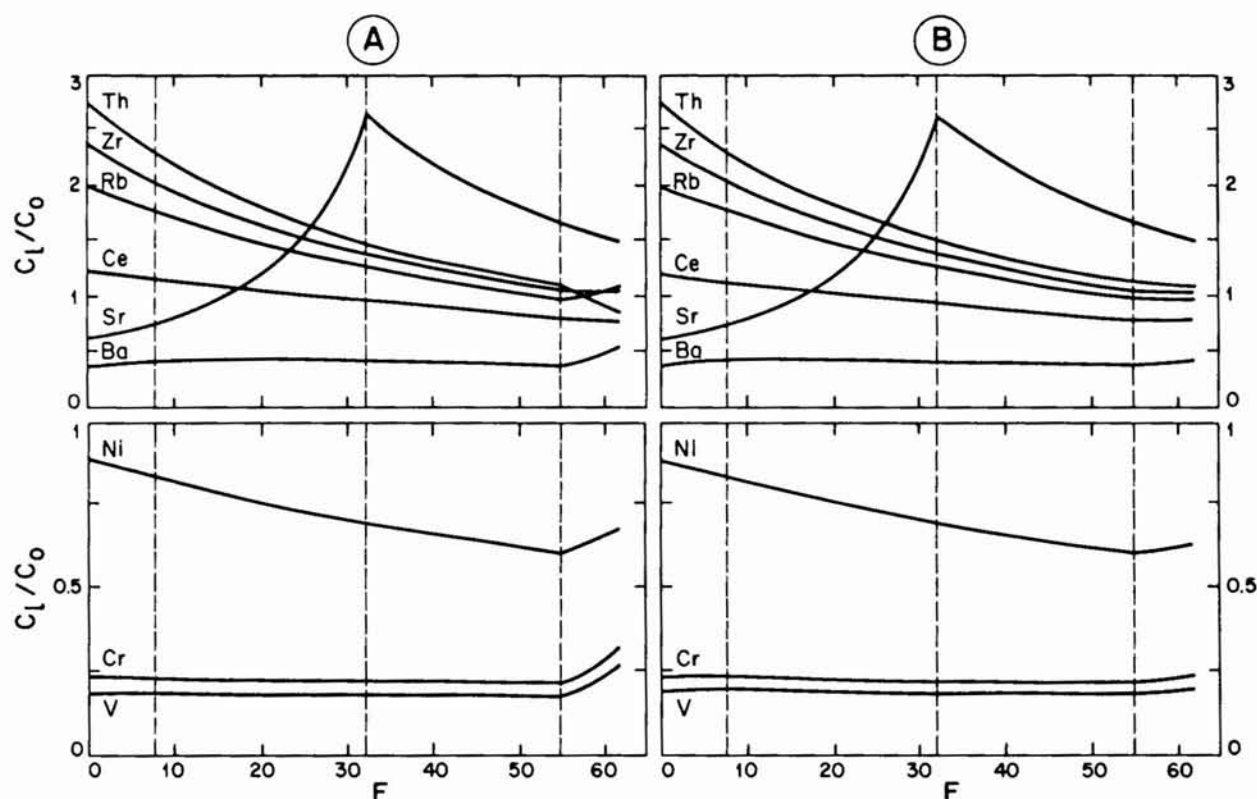


Fig. 1.—A: Concentración relativa de Th, Zr, Rb, Ce, Zr, Ba, Ni, Cr y V en el líquido producido por la anatexis de un gneis biotítico-granatífero-sillimanítico, en el que la biotita funde incongruentemente. B: Idem, con fusión congruente de la biotita. Las líneas de trazos verticales marcan las etapas en las que se ha dividido el proceso.

Fig. 1. Para comparación, se han calculado asimismo los valores que tendrían las dos variables indicadas, si la biotita fundiera congruentemente. Los coeficientes de reparto utilizados son los que figuran en la Tabla 2.

De la inspección de los resultados obtenidos se deduce que en las primeras etapas de la fusión, el líquido originado se empobrece intensamente en los elementos altamente incompatibles del sistema (Th, Zr, Rb y Ni), y ligeramente en los moderadamente incompatibles (Ba, Cr y V). Por el contrario, el líquido se enriquece progresivamente en Sr mientras que funden feldespato potásico y/o plagioclasa, e invierte esta tendencia al comienzo de la tercera etapa, ya que dicho elemento pasa a ser altamente incompatible.

Durante la fusión incongruente de la biotita, se invierte la tendencia de todos los elementos, ya que pasan de incompatibles a compatibles, como consecuencia de los relativamente altos coeficientes de reparto de dicha fase. Se exceptúan de este comportamiento el Sr y el Th, que en esta etapa continúan siendo elementos incompatibles.

Si se comparan los resultados obtenidos para la fusión incongruente de la biotita, con los de la fusión

Tabla 2.—Coeficientes de reparto

	Q/Liq	Ptg/Liq	Fto K/Liq	Alm/Liq	Bt/Liq	Sill/Liq	Cd/Liq
Rb	0,01	0,08	0,8	0,008	2	0,1	0,2
Sr	0,001	7	4	0,015	0,18	0,13	0,15
Zr	0,01	0,1	0,03	0,5	1,5	0,3	0,64
Ba	0,01	0,63	16	0,017	9	0,04	0,2
Ce	0,01	0,5	0,08	0,35	3	0,01	1,5
Th	0,01	0,05	0,1	0,01	1,5	0,01	2
Ni	0,01	0,01	0,02	0,22	4,6	0,5	1,5
Cr	0,125	0,125	0,03	0,22	15	7	2,5
V	0,008	0,008	0,05	8	20	2	0,7

Datos tomados de Pearson y Shaw (1960), Arth y Hanson (1975), Martin (1980), Reid (1983), Nash y Crecraft (1985), Giraud *et al.* (1986) y Benito y López Ruiz (en preparación).

congruente de la misma fase, se observa que los líquidos generados mediante el primer mecanismo, son más ricos en aquellos elementos (Ba, Cr y V) para los que la biotita tiene elevado coeficiente de reparto y la cordierita bajo coeficiente de reparto, y más pobres en aquellos otros, como el Th, en los que ocurre a la inversa. A su vez, los líquidos generados por ambos mecanismos tienen una abundancia prácticamente

idéntica en aquellos elementos, como el Sr, para los que ambas fases tienen coeficientes de reparto del mismo orden.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto de Investigación PB87-0372 «Variación de los elementos traza, de los isótopos de Sr-Nd-Pb-O y control tectónico en los procesos magmáticos y metalogénicos. Aplicación al volcanismo neógeno-cuaternario y yacimientos asociados de la península ibérica», financiado por la Dirección General de Investigación Científica y Técnica.

Referencias

- Arth, J. G. y Hanson, G. N. (1975). Geochemistry and origin of the early Precambrian crust of northeastern Minnesota. *Geochim. Cosmoch. Acta*, 39, 325-362.
- Benito, R. y López Ruiz, J. (1989). ANATEX.BAS: Un programa para calcular la variación de la mineralogía del residuo y la fraccionación de los elementos traza en la fusión parcial incongruente. *III Congr. Geoquímica de España*.
- Giraud, A.; Dupuy C. y Dostal, J. (1986). Behaviour of trace elements during magmatic processes in the crust: application to acidic volcanic rocks of Tuscany (Italy). *Chem. Geol.*, 57, 269-288.
- Hanson, G. N. (1978). The application of trace elements to the petrogenesis of igneous rocks of granitic composition. *Earth Planet. Sci. Letters*, 38, 26-43.
- Hertogen, J. y Gijbels, R. (1976). Calculation of trace element fractionation during partial melting. *Geochim. Cosmoch. Acta*, 40, 313-322.
- Martin, H. (1980). Comportement de quelques éléments en traces au cours de l'anatexis: exemple du Massif de Saint-Malo (Bretagne, France). *Can. J. Earth. Sci.*, 17, 927-941.
- Nash, W. P. y Crecraft, H. R. (1985). Partition coefficients for trace elements in silicic magmas. *Geochim. Cosmoch. Acta*, 49, 2309-2322.
- Pearson, G. R. y Shaw, D. M. (1960). Trace elements in kyanite, sillimanite and andalusite. *Amer. Mineral.*, 45, 808-817.
- Reid, F. (1983). Origin of the rhyolitic rocks of the Taupo volcanic zone, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 15, 315-338.
- Shaw, D. M. (1970). Trace element fractionation during anatexis. *Geochim. Cosmoch. Acta.*, 34, 237-243.
- Shaw, D. M. (1979). Trace element melting models. In: *Origin and distribution of elements* (L. H. Ahrens, edit.). Pergamon Press, Oxford, 577-586.
- Von Platen, H. y Holler, N. (1966). Experimentelle anatexis des stainer plattengneises von der Koralpe, Steiermark, bei 2, 4, 7 und 10 kb H₂O Druck. *Neues Jahrb. Mineral. Abhand.*, 106, 106-130.
- Winkler, H. G. F. (1979). *Petrogenesis of metamorphic rocks*. 5ª edición. Springer-Verlag, New York, 348 págs.

Apéndice

Definición de los símbolos empleados en las ecuaciones:

- F = grado de fusión.
- F_{n-1} = grado de fusión al que se ha llegado en la etapa anterior a la etapa n.
- C_L^i = concentración del elemento i en el líquido generado por la fusión.
- C_o^i = concentración del elemento i en el material originario.
- C_{KS}^i = concentración del elemento i en el residuo.
- $D_{o,n}^i$ = coeficiente de partición global del elemento i en el sólido inicial, en la etapa n de la fusión.
- D_{KS}^i = coeficiente de partición global del elemento i en el residuo.
- P_L^i = coeficiente de partición global del elemento i en el líquido.
- $Q_{L,n}^i$ = coeficiente de partición global del elemento i en el líquido, modificado por la formación de nuevas fases, en la etapa n de la fusión.
- K_m^i = coeficiente de reparto del elemento i para la fase m.
- X_m^i = fracción másica de la fase m en el residuo.
- X_o^i = fracción másica de la fase m en el material originario.
- W^s = masa del residuo.
- W_o = masa del material originario.
- L = masa del líquido generado por la fusión.
- S = cantidad de sólido originado en la reacción incongruente.
- q^m = contribución de la fase m al líquido.
- p^α = proporción en la que la fase α funde incongruente.
- p_A^m = proporción en la que la fase m interviene en la reacción incongruente.
- p_B^m = proporción en la que la fase m funde congruente.
- t^t = proporción en que el líquido se produce en la reacción.
- t^m = proporción en que la fase m se forma en la reacción.

Recibido el 18 de enero de 1989

Aceptado el 7 de abril de 1989