Pesquisas em Geociências

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias>

Processos Magmáticos: I - Um Algoritmo de Identificação

Nelson Vieira Junior

Pesquisas em Geociências, 17 (1-2): 45-52, Set./Dez., 1990.

Versão online disponível em:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/article/view/21381>

Publicado por

Instituto de Geociências

Portal de Periódicos UFRGS

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Informações Adicionais

Email: pesquisas@ufrgs.br

Políticas: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/editorialPolicies#openAccessPolicy>

Submissão: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#onlineSubmissions>

Diretrizes: <http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/about/submissions#authorGuidelines>

Data de publicação - Set./Dez., 1990

Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil

Processos Magmáticos: I — Um Algoritmo de Identificação

NELSON VIEIRA JUNIOR

Instituto de Geociências, UFRGS, Caixa Postal 15001 CEP 91500 - Porto Alegre, RS, Brasil

(Recebido em 17/08/90. Aceito para publicação em 15/12/90.)

Abstract — The identification of magmatic processes is reviewed in this paper. Special attention has been given to geochemical aspects with emphasis on the behaviour of each element. Equations for each principal magmatic process for several variation diagrams are presented, so that the influence of these processes can be evaluated by looking at the distribution of the geochemical data plotted on specific variation diagrams. An attempt to summarize the identification of the active magmatic process (es), based on the variation diagrams, is presented as an algorithm.

Resumo — Neste trabalho são revisadas as formas de identificação dos processos magmáticos sob os aspectos geoquímicos, em particular, elementais. Equações para os principais processos magmáticos são apresentadas para diversos tipos de diagramas de variação. Desta forma, dependendo da configuração dos dados geoquímicos de uma dada associação, quando plotados em diagramas de variação específicos, pode-se identificar o(s) processo(s) magmático(s) atuante(s). Numa tentativa de sumarização, é apresentado um algoritmo para identificação dos processos magmáticos a partir de diagramas de variação.

INTRODUÇÃO

O reconhecimento dos processos magmáticos constitui etapa fundamental no estabelecimento de elos petrogenéticos entre ou dentro de associações ígneas. O próprio termo “associação ígnea” supõe que as litologias envolvidas estejam relacionadas entre si através de um ou mais processos magmáticos. Embora na literatura especializada seja comum o emprego de “séries” (e.g., shoshonítica, toleítica, alcalina, etc) para referir-se a associações cogenéticas de determinadas características, o estabelecimento dos processos magmáticos atuantes e responsáveis por tal unidade são muitas vezes contróvertidos, quando não relegados a um plano secundário. Dessa forma, não é incomum que, em determinados tipos de associações, subsistam dúvidas acerca de sua origem. Em realidade, a atuação de diferentes processos magmáticos sobre produtos inicialmente distintos pode levar, em princípio, ao desenvolvimento de *trends* similares.

A elucidação dos processos magmáticos deve basear-se em critérios múltiplos como dados de campo, petrográficos, mineralógicos, experimentais, geoquímicos, etc., devendo ser realizada em duas etapas fundamentais: identificação e quantificação. Neste artigo, será realizada uma revisão sobre as formas de identificação dos processos magmáticos sob os aspectos geoquímicos, em particular, elementais. Na parte II deste trabalho (neste número) serão revisados os diversos métodos de quantificação. Descrições detalhadas dos processos magmáticos fogem ao escopo do presente trabalho e podem ser encontradas em Cox et. al. (1981), Hall (1987) e Hughes (1982).

HISTÓRICO

A utilização de dados geoquímicos, principalmente

elementos maiores, para definição de consangüinidade ou cogeneticidade entre diversas associações magmáticas, iniciou-se no século 19. Nessa época foram estabelecidas as bases de diversos processos magmáticos como cristalização fracionada e assimilação. Entretanto, foi somente neste século, no final da década de 60 e início de 70, que foi dado o primeiro passo para a moderna petrologia. Paul Gast e M.D. Shaw, trataram pioneiramente os elementos-traço como soluções diluídas, permitindo, assim, a aplicação da Lei de Henry. Esta implica que, para soluções diluídas, o coeficiente de atividade permanece constante fazendo com que as atividades dos componentes-traço sejam diretamente proporcionais à sua concentração. Assim, foi possível, através de determinações experimentais relativamente simples, estabelecer-se o coeficiente de distribuição de Nerst (K_d), que é a razão da concentração de um elemento traço numa determinada fase mineralógica e sua concentração na fase líquida em equilíbrio. Com isso, é possível conhecer-se o grau de preferência de um elemento traço por uma determinada fase. Por exemplo, o coeficiente de distribuição do Ni para olivina ($K_d^{Ni}_{ol}$), em fusões basálticas possui um valor médio de 14 (Henderson, 1984), evidenciando a forte preferência do Ni pela olivina. Estudos recentes têm demonstrado que os coeficientes de distribuição são sensíveis a vários fatores como: pressão, temperatura, composição e a própria cinética de cristalização. Atualmente, tais fatores têm sido levados em conta na determinação experimental dos coeficientes de distribuição. Não sendo mais necessário conhecer-se as relações concentração-atividade para cada elemento em cada fase mineral, estava aberto um dos mais profícuos caminhos em petrologia ígnea, tornando possível equacionar-se matematicamente os vários processos magmáticos. Treuil & Varet (1973) estabeleceram outro marco neste campo, tratando os dados químicos como funções matemáticas representativas dos

processos magmáticos. Neste caso, os dados de uma determinada associação, num diagrama binário específico, conformariam uma função matemática a qual refletiria o processo magmático atuante. Essa mesma linha de investigação foi retomada posteriormente por Allègre *et. al.* (1977) que introduziram métodos inversos para avaliação de cristalização fracionada e fusão parcial. Concomitantemente, verificou-se uma maior sofisticação nas formulações de processos magmáticos, criando-se modelos mais realísticos. Como exemplo, pode-se citar o modelo compósito AFC de DePaolo (1981), o qual responde por um processo de assimilação mais cristalização fracionada e o modelo de O'Hara (1977) de uma câmara magmática periodicamente fracionada e recarregada. Neste trabalho, modelos mais complexos como esses não serão discutidos, visto que um dos principais objetivos aqui é a identificação individual de cada processo.

O PROCESSO DE IDENTIFICAÇÃO: UMA QUESTÃO DE ESPAÇO

Quando se constrói um diagrama de variação binário para dois elementos quaisquer, o *trend* final observado constitui a representação de uma ou mais funções matemáticas. Em outras palavras, um dos elementos escolhidos (y) é função do outro elemento (x) e a variação de um em relação ao outro se faz através de uma ou mais funções matemáticas específicas. Tais funções constituem, em realidade, processos magmáticos cuja representação e intensidade são fortemente dependentes das variáveis escolhidas (x e y). Tal dependência ocorre na medida em que os diversos elementos químicos possuem diferentes comportamentos geoquímicos e suscetibilidades aos vários processos magmáticos. Seja, por exemplo, um diagrama da Ta versus Hf. Estes elementos apresentam características geoquímicas bastante similares (e.g. raio iônico, eletronegatividade, carga, etc.) e, por conseguinte, apresentarão coeficientes de distribuição (K_d) similares para a maioria das fases minerais. Pode-se esperar, portanto, que num processo de cristalização fracionada ou fusão parcial, a razão Ta/Hf permaneça constante, sendo, aproximadamente, idêntica à razão da rocha fonte. Por outro lado, no caso de um processo de mistura de magmas ou assimilação, os produtos a serem hidridizados proviriam de fontes diferentes (i.e., com diferentes Ta/Hf) ocasionando, portanto, variações na razão em foco. No primeiro caso (cristalização fracionada e fusão parcial), o diagrama seria uma reta passando pela origem, enquanto que no segundo caso, ter-se-ia uma reta que não passaria pela origem. Se por sua vez fosse montado um diagrama Ta/Hf versus La/Ce, onde esta última razão possui propriedades semelhantes à primeira, no caso de fusão parcial e/ou cristalização fracionada, teríamos todas as amostras agrupando-se ao redor de um ponto, pois ambas as razões não sofreriam alterações. Já no caso de um processo de mistura de magmas ou assimilação, os pontos conformariam uma hipérbole, demonstrando assim, a variabilidade dessas razões. É importante ressaltar que nesse último tipo de

diagrama, mesmo que houvesse um processo de cristalização fracionada e/ou variação do grau de fusão sobre uma determinada fonte, os mesmos não seriam aí representados, visto que tais razões permaneceriam constantes. Assim, neste último diagrama, isolou-se o processo de mistura de magmas ou assimilação. Como será visto adiante, este procedimento é extremamente útil para a quantificação dos processos magmáticos envolvidos.

A partir da colocação acima, pode-se agora introduzir o conceito de espaço como sendo o par de elementos ou razões de elementos que sejam mais ou menos suscetíveis a determinados processos. Dependendo do espaço utilizado, pode-se, a princípio, isolar qualquer processo magmático e identificá-lo.

Numa primeira instância, pode-se separar dois grandes grupos de espaços: elementos maiores e traços. Os elementos maiores são pouco afetados por processos tais como variação no grau de fusão (supondo-se um processo de fusão mínima), contaminação crustal ou difusão no estado líquido (efeito Soret, etc). Por sua vez, o comportamento dos elementos traço irá depender de sua compatibilidade ($D > 1$) ou incompatibilidade ($D < 1$). Elementos incompatíveis tenderão a ser afetados por todo e qualquer processo magmático, em contraposição aos compatíveis, os quais se mostram relativamente insensíveis a variações do grau de fusão parcial (para pequenas percentagens de fusão) e aos processos de contaminação. Entretanto, como visto anteriormente, pode-se estabelecer espaços dentro dos elementos traço, de modo a isolar os processos ocorrentes.

OS ESPAÇOS IDENTIFICADORES

Neste item serão apresentados diversos espaços identificadores para alguns dos principais processos magmáticos.

ELEMENTO MAIOR "I" VERSUS ELEMENTO MAIOR "J"

Cristalização fracionada

Neste espaço, a seguinte expressão para elementos maiores pode ser derivada (todos os símbolos como na Tabela 1):

$$M_i^j = \frac{M_o^j - M_e^j}{M_o^i - M_e^i} M_i^i + \frac{M_e^j M_o^i - M_o^j M_e^i}{M_o^i - M_e^i} \quad (1)$$

que é a equação da reta do tipo $y = ax + b$. Sendo assim, quando da atuação do processo de cristalização fracionada num gráfico de um elemento maior qualquer versus outro elemento maior, sempre serão obtidas retas. É relativamente comum que, no decorrer do processo de cristalização fracionada, a assembléia de minerais cristalizados mude, seja pela entrada de uma nova fase, seja pelo desaparecimento de outra. Neste caso, as concentrações de M_e^j e M_e^i mudariam, definindo-

se aí, novo segmento de reta. Assim, a ocorrência de diferentes segmentos de reta com diferentes inclinações, indicariam mudanças significativas na assembléia fracionante, devendo tais segmentos serem tratados individualmente para fins de quantificação. Um ponto importante a ressaltar é que, embora a equação (1) seja verdadeira para qualquer par de elemento maior num processo de cristalização fracionada, podem ocorrer leves curvaturas, se minerais que formam soluções sólidas perfeitas, constituírem as fases fracionadas dominantes. Este é o caso para o fracionamento dominado por olivina em magmas basálticos (Irvine, 1977), onde a composição do mineral muda continuamente enriquecendo-se em faialita. Assim, num diagrama $SiO_2 \times MgO$, é conformada uma curva que pode ser considerada como uma sucessão infinita de retas como a equação (1). Convém ressaltar também que o uso de diagramas onde num dos eixos é empregado um índice de diferenciação complexo (DI, SI, razões de elementos maiores, minerais normativos, etc.) configuração curvas, mascarando possíveis inflexões.

$M_1^{i,j}$ - Concentração do elemento maior 'i' ou 'j' no magma mais fracionado.

$M_0^{i,j}$ - Concentração do elemento maior 'i' ou 'j' no magma mais primitivo.

$M_e^{i,j}$ - Concentração do elemento maior 'i' ou 'j' na assembléia de minerais fracionados.

$C_m^{i,j}$ - Concentração do elemento qualquer 'i' ou 'j' no magma resultante.

$C_p^{i,j}$ - Concentração do elemento qualquer 'i' ou 'j' no magma inicial.

$C_d^{i,j}$ - Concentração do elemento qualquer 'i' ou 'j' no magma misturado, assimilante ou contaminante.

$C_1^{i,j,k,m}$ - Concentração do elemento traço 'i', 'j', 'k' ou 'm' no magma mais diferenciado (por fusão parcial e/ou cristalização fracionada).

$C_0^{i,j,k,m}$ - concentração do elemento traço 'i', 'j', 'k' ou 'm' no mais primitivo (para o caso de cristalização fracionada) ou na rocha fonte (para o caso de fusão parcial).

$K_{d\alpha}^i$ - Coeficiente de partição do elemento traço 'i' entre a fase α e a fusão.

W - Percentagem em peso das fases α , β , etc, onde $W_\alpha + W_\beta + \dots = 1$.

$D^{i,j}$ - Coeficiente de distribuição global do elemento traço 'i' ou 'j' onde $K_{d\alpha}^{i,j} W_\alpha + K_{d\beta}^{i,j} W_\beta + \dots = D^{i,j}$.

$a_{1,2}$ - Denominador de Y_1 ou Y_2 .

$b_{1,2}$ - Denominador de X_1 ou X_2 .

$X_{1,2}$, $Y_{1,2}$ - Coordenadas dos dados do ponto 1 ou 2 quaisquer sobre a hipérbole definida no diagrama.

Tabela 1 - Símbolos utilizados neste trabalho.

Fusão Parcial

Variações nos elementos maiores devido a mudanças no grau de fusão parcial, tenderiam a ocorrer somente se o processo de fusão não se desse no ponto mé-

nimo ou eutético, o que implicaria em graus elevados de fusão. Em relação ao manto, estudos recentes têm demonstrado que o máximo de percentagem de fusão possível estaria situado entre 0,5% e 1,0% (McKenzie, 1985) o que não acarretaria variações mensuráveis nos elementos maiores nos sucessivos incrementos de fusão. Quanto à fusão crustal, subsistem inúmeras dúvidas no tocante à quantidade de fusão ocorrente. Estudos recentes (Clemens & Vielzeuf, 1987; O'Nions & McKenzie, 1988) têm demonstrado que um mínimo de 10% de fusão é necessário para que a mesma possa ser remobilizada. Entretanto, grandes graus de fusão seriam, a princípio, proibitivos, devido à menor disponibilidade de calor. De uma forma ou de outra, a tendência seria a geração de fusões mínimas traduzindo-se numa composição em elementos maiores praticamente constante.

Mistura de fases

Sob esse título, abrangemos tanto o processo de mistura de magmas quanto de assimilação. O termo contaminação será aqui usado num sentido mais restrito, denotando baixas quantidades de assimilação. Para um diagrama de um elemento 'i' versus outro elemento 'j', tem-se (Treuil & Varet, 1973):

C_m^i = (C_p^i - C_d^i) / (C_p^j - C_d^j) * C_m^j + (C_d^i C_p^j - C_p^i C_d^j) / (C_p^j - C_d^j) (2)

a qual configura a equação de uma reta que não passa pela origem e, em cujos extremos estarão situados os membros finais (assimilante/assimilado, magma p/magma d ou contaminante/contaminado). Observa-se que neste espaço, para este processo, não são admitidas quaisquer inflexões.

ELEMENTO MAIOR 'J' VERSUS ELEMENTO TRAÇO 'I'

Cristalização fracionada

Para este processo, pode-se derivar a seguinte relação (Vieira Júnior, 1990):

C_1^i = C_0^i * ((M_0^j - M_e^j) / (M_1^j - M_e^j))^(D^i - 1) (3)

a qual conforma uma curva. É de fácil verificação que a equação (3) possui um assíntota vertical que corresponde ao teor do elemento maior 'j' na assembléia fracionada (M_e^j), constituindo-se na base do método de Vieira Júnior (1990) para avaliação de cristalização fracionada. Esta função pode ser aproximadamente linearizada utilizando-se um diagrama semi-log, onde o elemento traço seria plotado na escala logarítmica. Nessa última forma, possíveis inflexões também podem ser observadas.

Fusão parcial

As mesmas considerações realizadas no espaço anterior são pertinentes para o elemento maior. Entretanto, o elemento-traço escolhido apresentará variações na concentração caso seu coeficiente de distribuição global for menor que 1, o que forneceria um reta paralela a um dos eixos ordenados. No caso de um elemento traço compatível, teríamos as amostras agrupando-se ao redor de um ponto, dado que nem o elemento maior, nem o elemento-traço apresentariam variações significativas com mudanças no grau de fusão parcial.

Mistura de fases

Para o caso de mistura de magmas, assimilação ou contaminação, as relações são as mesmas da equação (2). Portanto, nesse espaço, também teríamos uma reta que não passa pela origem. Entretanto, num gráfico log-log, a equação (2) transforma-se em uma curva, ao contrário da equação (3), a qual configuraria uma reta.

ELEMENTO TRAÇO 'I' VERSUS ELEMENTO TRAÇO 'J'

Cristalização fracionada

Para dois elementos traço quaisquer, supondo-se um processo de cristalização fracionada do tipo Rayleigh, tem-se:

$$C_l^i = C_o^i \left(\frac{C_l^j}{C_o^j} \right)^{\left(\frac{D^i - 1}{D^j - 1} \right)} \quad (4)$$

constituindo uma função potencial. Porém, quando $D^j \approx D^i$, temos que:

$$C_l^i = C_o^i - \frac{C_l^j}{C_o^j} \quad (5)$$

a qual configura uma linha reta que passa pela origem. Pares de elementos com coeficientes de distribuição global similares (e.g. La x Ce, Ta x Hf, Yb x Lu, etc.) apresentarão suas razões (C_l^j/C_o^j) constantes durante o processo de cristalização fracionada. É importante ressaltar que esta situação difere daquela de mistura de fases, onde a reta não passa pela origem. A equação (4) pode também ser linearizada, utilizando-se um diagrama log-log. Nesse caso, também teríamos uma reta que não passa pela origem.

No caso de utilizar-se um elemento j altamente incompatível (i.e., $D^j \approx 0$), a equação (4) transforma-se em:

$$C_l^i = C_o^i \left(\frac{C_l^j}{C_o^j} \right)^{(1 - D^i)} \quad (6)$$

configurando assim uma equação potencial. Esta mesma equação também pode ser linearizada através de um

diagrama log-log, assumindo a forma de (Allègre *et al.*, 1977):

$$\log C_l^i = \log C_o^i + (D^i - 1) \log C_o^j - (D^i - 1) \log C_l^j \quad (7)$$

onde o coeficiente angular é igual a $(1 - D^i)$.

É importante ressaltar que em quaisquer dos casos acima, toda a vez que a função puder ser linearizada, se ocorrerem mudanças significativas na assembléia fracionante (e por conseguinte no D), ocorrerão diferentes segmentos de reta com diferentes inclinações.

Fusão Parcial

Num processo de fusão, onde a mesma permanece em equilíbrio com o sólido residual até alcançar um determinado volume sendo então extraída (*batch melting*), a seguinte equação pode ser derivada:

$$C_l^i = \frac{C_l^j C_o^i (1 - D^j)}{C_l^j (D^i - D^j) + C_o^j (1 - D^i)} \quad (8)$$

configurando um hipérbole. Se $D^j \approx D^i$, então a equação (8) transforma-se em:

$$C_l^i = C_l^j \frac{C_o^i}{C_o^j} \quad (9)$$

que é uma reta que passa pela origem e cujo coeficiente angular é C_o^i / C_o^j .

Se considerarmos que o elemento 'j' possui $D^j \approx 0$, teremos:

$$C_l^i = \frac{C_l^j C_o^i}{D^i (C_l^j - C_o^j) + C_o^j} \quad (10)$$

a qual corresponde a uma hipérbole. Esta função também pode ser linearizada utilizando-se um diagrama log-log.

O processo de batch melting tem sido geralmente utilizado para modelos de fusão parcial tanto na crosta quanto do manto. Para o manto, como já apontado anteriormente, pequenas porções de fusão, tão logo se formassem, seriam extraídas. Nesse caso, o processo mais provável seria a fusão do tipo Rayleigh (*Rayleigh melting*) (McKenzie & Bickle, 1988), apresentando-se nesse espaço como:

$$\frac{C_l^i}{C_o^i} = \frac{1}{D^i} \left(\frac{C_l^j D^j}{C_o^j} \right)^{\left(\frac{1/D^i - 1}{1/D^j - 1} \right)} \quad (11)$$

constituindo-se numa função pontencial. Como no caso anterior, num diagrama log-log teremos uma reta. É importante ressaltar que não é possível distinguir-se as funções (10) e (11) apenas com o uso de diagramas. Entretanto, ambas as funções, quando em diagramas log-

log, tornam-se linearizadas, o que se contrapõe ao esperado para o processo de mistura de fases no mesmo espaço.

Mistura de fases

As mesmas considerações para o espaço anterior são aqui pertinentes, sendo originadas retas em escala normal e curvas em escala log-log.

ELEMENTO TRAÇO 'I' SOBRE ELEMENTO TRAÇO 'J' VERSUS ELEMENTO TRAÇO 'I' ONDE $D^I \neq 0$ e $D^J = 0$

Cristalização fracionada

Neste espaço teremos uma curva potencial do tipo:

$$\frac{C_i^j}{C_l^j} = \frac{(C_i^j)^{D^j} (C_o^j)(1 - D^j)}{C_o^j} \quad (12)$$

Num diagrama log-log, esta função torna-se um reta.

Fusão parcial

Para um processo do tipo *batch melting*, tem-se (Hofmann & Feigenson, 1983):

$$\frac{C_i^j}{C_l^j} = C_l^j \frac{D^j}{C_o^j} + \frac{C_o^j(1 - D^j)}{C_o^j} \quad (13)$$

a qual constitui uma reta que não passa pela origem e cujo coeficiente angular é D^j/C_o^j . Num diagrama log-log, esta equação constitui uma curva, contrapondo-se ao resultado obtido para cristalização fracionada.

Mistura de fases

Aqui a equação (2) também é válida, transformando-se numa hipérbole do tipo:

$$\frac{C_m^i}{C_m^j} = \frac{C_m^i}{C_d^j + (C_p^j - C_d^j)(C_m^i - C_d^i)/(C_p^i - C_d^i)} \quad (14)$$

a qual pode ser linearizada fazendo-se um diagrama $C_m^i / C_m^j \times 1/C_m^j$

ELEMENTO TRAÇO 'I' SOBRE ELEMENTO TRAÇO 'J' VERSUS ELEMENTO TRAÇO 'K' SOBRE ELEMENTO TRAÇO 'M'

Aqui, o único processo relevante é o de mistura de fases, obtendo-se uma hipérbole do tipo (Langmuir *et al.*, 1978):

$$Ax - Bxy + Cy + D = 0 \quad (15)$$

onde $A = a_2b_1y_2 - a_1b_2y_1$; $B = a_1b_2 - a_2b_1$; $C = a_2b_1x_1 - a_1b_1x_2$ e $D = a_1b_2x_2y_1 - a_2b_1x_1y_2$. Uma importante feição da equação (15) é que as assíntotas vertical e horizontal, corresponderão, conforme o diagrama construído, aos teores das razões escolhidas no magma original e no contaminante/assimilante ou em outro magma misturado. Observa-se que a equação (15) é uma equação geral para mistura de fases, utilizando-se dois pares de razões de elementos quaisquer. Portanto, se houver, além da mistura de fases um processo de cristalização fracionada, a identificação de uma hipérbole deste tipo será prejudicada, dada a dispersão aí ocorrente. Uma maneira de isolar-se o processo de mistura de fases do processo de cristalização fracionada é escolher os elementos de tal forma que $D^i \neq D^j$ e $D^k \neq D^m$. Neste caso, as razões C_i^j/C_l^j e C_k^m/C_l^m não serão afetadas pelo processo de cristalização fracionada, e qualquer mudança que ocorra nas mesmas será devido à mistura de fases.

O ALGORITMO DE IDENTIFICAÇÃO

Como apresentado no item anterior, é possível, mediante o uso de espaços selecionados, isolar e identificar vários processos magmáticos correntes. Uma tentativa de sumarização desse procedimento é apresentada na figura 1, na forma de um algoritmo. Assim, para cada grupo de diagramas realizados, dependendo da configuração dos dados, procede-se a execução de outros gráficos igualmente condicionados, chegando-se à identificação de um ou mais processos magmáticos. Quanto aos condicionais, que dizem respeito à configuração do gráfico num espaço específico, são necessárias algumas considerações adicionais, abaixo apresentadas.

A DETECÇÃO DE INFLEXÕES

A detecção de inflexões é de extrema importância, uma vez que podem representar mudanças na assembléia fracionada (no caso de cristalização fracionada), o início de outro processo e/ou uma não cogeneticidade entre os segmentos de reta. Para que as inflexões possam ser detectadas, deve-se utilizar o maior número de diagramas possível. Assim, no caso de gráficos de um elemento maior versus demais elementos maiores, a ocorrência de um único diagrama com inflexões, é suficiente para a caracterização da não-unicidade da reta. Recomenda-se, portanto, além da execução de diagramas de variação normalmente executados (*e.g.* Harker), a confecção de outros diagramas como $TiO_2 \times FeO$, $MgO \times FeO$ ou $CaO \times Al_2O_3$, os quais poderão auxiliar na detecção de inflexões. Uma vez caracterizadas, os diferentes segmentos de reta devem ser avaliados separadamente para cada passo do algoritmo, chegando-se, assim, aos processos ocorrentes em cada segmento.

ESCOLHA DOS ELEMENTOS COM D SIMILARES

Figura 1 — Algoritmo para identificação dos processos magmáticos. CF = cristalização fracionada; MF = mistura de fases e FP = variação do grau de fusão parcial. O símbolo '+' entre dois processos indica a possibilidade de coexistência.

Dependendo das fases cristalinas envolvidas (na fusão parcial e/ou cristalização fracionada), aqueles pares de elementos classicamente assumidos como possuindo características similares (e.g. Ta-Hf, La-Ce, Zr-Nb, Yb-Lu, etc.) poderão apresentar um comportamento distinto, sem implicar necessariamente naquelas consequências previstas pela variação da razão do par escolhido. Esta última condição deve ser testada exaustivamente para outros pares de elementos que possam apresentar comportamentos geoquímicos similares.

A DISPERSÃO PARCIAL

A dispersão parcial, presente como alguns dos condicionais do algoritmo, é justificada quando do uso de diagramas do tipo $C_L^i/C_L^j \times C_i^j$, próprios para detecção do processo de fusão parcial. Neste caso, se houver a ocorrência de cristalização fracionada e variação do grau de fusão parcial, ter-se-á a configuração de um reta naquelas porções mais à direita do gráfico (i.e. menos diferenciadas e, portanto, mais pobres em i), dado que aí o processo de cristalização fracionada será menos acentuado. À medida que a diferenciação aumenta (i cresce), o efeito do processo de cristalização fracionada sobrepuja o de fusão parcial, ocorrendo, neste caso, uma dispersão dos dados. Essas relações podem ser visualizadas esquematicamente na Figura 2. O mesmo também se aplica àqueles condicionais que exigem a consideração das porções com mais baixo i para identificação de curvas ou segmentos de reta, implicando de qualquer forma, que o processo de fusão parcial deve ser identificado nas amostras menos diferenciadas.

Figura 2 - Diagrama esquemático $C_L^i/C_L^j \times C_i^j$, onde $D^i \neq 0$ e $D^j \neq 0$ mostrando a influência da cristalização fracionada (flexas sub-horizontais) e da variação do grau de fusão parcial (flexa diagonal). O tamanho das flexas sub-horizontais é proporcional à quantidade de fracionamento ocorrente, sendo a variação na concentração de 'i' uma função potencial desta. Observe-se a pequena dispersão ocasionada pelo processo de cristalização fracionada em termos mais básicos (mais pobres em 'i'). Modificado de Treuil & Varet (1973).

DISPERSÃO TOTAL

Como apontado no algoritmo, uma elevada dispersão dos dados nos diagramas implica a ocorrência de outros processos magmáticos/pós-magmáticos superpostos, ou ainda, na não cogeneticidade das amostras. Tal implicação é facilmente compreensível, uma vez que se ocorrem vários processos sucessivos e recorrentes como numa sequência $P_1, P_2, P_3, P_1, P_2, P_3, \dots$, o conjunto dos produtos gerados será tipicamente aleatório. Seja por exemplo uma situação hipotética onde temos uma câmara magmática periodicamente recarregada e fracionada, onde as sucessivas entradas de magma mais novo representam graus de fusão parcial variáveis de uma dada rocha fonte. Temos aí, portanto, três processos simultâneos de variação do grau de fusão parcial, cristalização fracionada e mistura de magmas. Em tal caso, a recarga da câmara ocorrerá com um magma apresentando diferentes graus de fusão parcial e em quantidades variáveis, para misturar-se com o outro magma residente com diferentes estágios de cristalização fracionada. O caráter aleatório do teor dos elementos nos magmas resultantes é evidente, podendo o mesmo raciocínio ser aplicado para os processos pós-magmáticos. Nestes casos, serão necessários dados adicionais, principalmente isotópicos (radiogênicos e estáveis) que, aliados aos demais dados (petrográficos, de campo e mineralógicos) poderão auxiliar na identificação dos processos ocorrentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da elaboração de diagramas de variação química selecionados, pode-se identificar os processos magmáticos atuantes. O algoritmo de identificação apresentado, constitui um sumário das funções anteriormente desenvolvidas para cada espaço identificador, considerando-se os três processos magmáticos mais comuns e suas combinações. O leitor deverá referir-se às equações fundamentais, bem como as funções apresentadas para cada espaço, no caso de existirem evidências independentes para processos magmáticos mais complexos.

Deve-se ressaltar que a identificação dos processos magmáticos através da presente metodologia deve ser estritamente baseada em dados de campo, petrográficos e mineralógicos, os quais detêm a primazia sobre os dados químicos. Em outras palavras, se os dados petrográficos e de campo apontam para uma não cogeneticidade entre as litologias em estudo, não será a ocorrência de *trends* definidos nos diagramas que implicarão numa conclusão oposta. Por outro lado, se dados de campo e de petrografia indicam uma relação cogenética, a ocorrência de dispersão nos diagramas deve ser cuidadosamente examinada, tendo-se em mente a sobreposição de outros processos magmáticos e/ou posmagmáticos.

Cabe salientar ainda, que a identificação dos processos através de diagramas constitui apenas um guia, não implicando sua exeqüibilidade. Esta somente pode

ser avaliada quando os parâmetros envolvidos nos processos levantados forem cuidadosamente avaliados.

Agradecimentos - O autor é grato às geólogas Andréa A. Tommasi e Carla C. Porcher pelas críticas e sugestões ao texto; à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) (Proc. nº 4388023200) pelo auxílio financeiro. A Carlos A. Coelho pela diagramação das figuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allègre, C.J.; Treiul, M.; Minster, J.F.; Minster, B. & Albarède, F. 1977. Systematic use of trace element in igneous process: Part I: Fractional crystallization processes in volcanic suites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 60: 57-75.
- Clements, J.D. & Vielzeuf, D. 1987. Constraints on melting and magma production in the crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 86: 287-306.
- Cox, K.G.; Bell, J.D. & Pankhurst, R.J. 1981. *The Interpretation of igneous rocks*. George Allen, London. 450p.
- Depaolo, D.J. 1981. Trace elements and isotopic effects of combined wall rock assimilation and fractional crystallization. *Earth Planetary Science Letters*, 53: 189-202.
- Hall, A. 1987. *Igneous petrology*. Longman, Essex. 573p.
- Henderson, P. 1984. *Inorganic Geochemistry*. Pergamon, Oxford. 353p.
- Hofmann, A.W. & Feigenson, M.D. 1983. Case studies on the origin of basalt: I - Theory and reassessment of Grenada basalts. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 84: 382-389.
- Hughes, C.J. 1982. *Igneous petrology*. Amsterdam, Elsevier. 551p.
- Irvine, T.N. 1977. Definition of primitive liquid compositions for basic magmas. *Carnegie Institut Washington Year Book*, 76: 454-461.
- Langmuir, C.H.; Vocke, R.D. & Hanson, G.N. 1978. A general mixing equation with applications to Icelandic basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 37: 380-392.
- Mckenzie, D. 1985. The extraction of magma from the crust and mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 74: 81-91.
- _____. & Bickle, M.J. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *Journal of Petrology*, 29: 625-679.
- O'Hara, M.J. 1977. Geochemical evolution during fractional crystallization of a periodically refilled magma chamber. *Nature*, 266: 503-507.
- O'Nions, R.K. & Mckenzie, D.P. 1988. Melting and continent generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 90 (4): 449-456.
- Treuil, M. & Varet, J. 1973. Critères volcanologiques, pétrologiques et géochimiques de la genèse et de la différenciation des magmas basaltiques: exemple de l'Afar. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(15): 506.
- Vieira Junior, N. 1990. *A new method for the evaluation of fractional Crystallization in igneous rocks*. Submetido ao Journal of Geology.