

Granitoides e séries magmáticas: o estudo contextualizado dos granitoides

Lauro Valentim Stoll NARDI

Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: lauro.nardi@ufrgs.br

Recebido em 08/2014. Aceito para publicação em 01/2016.

Versão online publicada em 23/02/2016 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - A relação que muitas rochas graníticas possuem com magmas menos diferenciados provenientes do manto tem sido subestimada nas últimas décadas, perdendo-se assim uma poderosa ferramenta científica para investigação de ambientes geotectônicos antigos e da própria evolução do sistema manto-crosta. Propõem-se neste trabalho que os magmas graníticos passem a ser considerados como possíveis produtos de diferenciação de magmas provenientes do manto, com variável, e por vezes predominante, assimilação de fusões crustais. Com este objetivo, são revistos os critérios para enquadramento dos granitoides nas diferentes séries magmáticas, avaliadas as implicações geotectônicas deste enquadramento e também discutidas as características dos granitoides gerados por pura fusão crustal.

Palavras-chave: granitos, geoquímica de granitos, classificação de granitoides.

Abstract - GRANITOIDS AND MAGMATIC SERIES: THE CONTEXTUALIZED STUDY OF GRANITOIDS. The relationship that many granitic rocks show with less differentiated mantle-derived magmas has been underestimated in the last decades and, that has led to the loss of a powerful scientific tool for the investigation of ancient geotectonic settings and, even for the evolution of the mantle-crust system. It is proposed in this paper that granitic magmas should be considered as possible products of the differentiation of mantle-derived magmas, with variable, but sometimes, massive assimilation of crustal melts. In this way, the criteria for classifying granitoids, according to their magmatic series relationship, and the geotectonic implications of such approach, are revised, and the main characteristics of granites formed by pure crustal melting are discussed.

Keywords: granites, granite geochemistry, granitoid classification.

1 Introdução

As rochas graníticas, granitoides ou granitos *lato sensu*, diferentemente das rochas vulcânicas, tem sido comumente vistas como produtos de processos não magmáticos ou, de mecanismos específicos de fusão da crosta terrestre. Bonin *et al.* (1997) observaram que muitos autores veem os granitoides, de modo geral, como integrantes de um contexto de metamorfismo, desvinculando-os de uma possível relação com fontes situadas no manto. Aqueles autores atribuíram tal interpretação à ausência de vínculos nítidos entre granitoides e vulcanismo, exceto no caso de intrusões epizonais. Pitcher (1993) relatou que Abraham Gottlob Werner (1749-1817) admitia que os granitos eram precipitados de um grande oceano primitivo, enquanto James Hall e Thomas Beddoes, em 1791, afirmavam que a afinidade química de basaltos e granitos era uma boa evidência da origem ígnea dos últimos. James Hutton (1726-1793) (*apud*

Marmo, 1971) acreditava que os granitos eram o produto da cristalização de lavas subterrâneas, mais tarde chamadas magmas. Em 1788, J. Hutton (p. 257) declarou que:

"Upon the whole, therefore, whether we shall consider granite as a stratum or as an irregular mass, whether as a collection of several material, or as the separation of substances, which had been mixed, there is sufficient evidence of this body having been consolidated by means of fusion, and in no other manner."

Na década de 40 e 50, no entanto, os granitoides eram vistos predominantemente como produtos de metassomatismo sobre rochas metamórficas, isto é, transformações de rochas pré-existentes no estado sólido, com aporte de íons. Aproximadamente com este sentido, mas por vezes abrangendo também a anatexia (Bell, 1906 *apud* Bonin *et al.* 1997), foi criado o termo *granitização*. A geração de rochas graníticas por metassomatismo é ainda proposta por alguns autores, por

exemplo para a geração de granodioritos das associações pré-cambrianas do tipo tonalito-trondjhemito-granodiorito - TTG (López *et al.*, 2005). A vinculação dos granitoides com fusões menos diferenciadas mantélicas foi, no entanto, preconizada desde o século XIX por Rosenbusch (1889), Bowen (1928) e Read (1940), entre outros (*apud* Bonin *et al.*, 1997). Com os experimentos de Tuttle & Bowen (1958) constatou-se a similaridade composicional dos granitos com as fusões de rochas silicatadas ou com os resíduos finais líquidos da cristalização de magmas básicos e intermediários. As evidências experimentais e a grande repercussão do trabalho de Chappell & White (1974) levaram grande parte dos geólogos a admitir que os granitoides são em geral fusões de rochas crustais, descartando *a priori* suas possíveis relações com magmas menos diferenciados. Mesmo sendo esta a ideia mais popular, a visão magmatista - vinculação dos granitoides com magmas provenientes do manto - permaneceu e é ilustrada pela identificação dos granitoides com as séries magmáticas nos trabalhos de Lameyre & Bowden (1982), nas classificações referidas por Tauson & Koslov (1972), na caracterização de granitoides da série alcalina (Bonin, 1982), e no reconhecimento de granitoides típicos da série shoshonítica por Tauson (1983) e Nardi (1986), na classificação genética sugerida por Barbarin (1990), e na conclusão de Pitcher (1992, *apud* Bonin *et al.*, 1997) de que os granitoides tinham os magmas basálticos na sua origem.

Enquanto os crustalistas enfatizam a dificuldade de explicar a abundância relativa dos granitoides quando sua proveniência de magmas menos diferenciados é admitida, seus oponentes salientam os padrões geoquímicos correlacionáveis de granitoides e rochas básicas e intermediárias, bem como a similaridade composicional de sequências plutônicas e vulcânicas.

Recentemente, a ideia originária de Norman Levi Bowen, admitindo que os granitoides poderiam ser resultado de reação química, entre magma básico e gnaisses quartzo feldspáticos, gerando rochas intermediárias e magma granítico, foi proposta por Lopez *et al.* (2005). Embora sua resposta satisfatória às duas dificuldades anteriormente citadas seja sedutora, o mecanismo proposto ainda carece de maiores esclarecimentos e detalhamento.

Nas últimas décadas, a derivação de granitoides a partir da evolução de magmas derivados do manto com variável contribuição crustal (Barbarin, 1999), por assimilação ou contaminação, atinge grande importância e o reconhecimento de autores crustalistas famosos (Chappell & White,

2001). Isto vem ocorrendo, principalmente devido à abordagem sistêmica integrando evidências da geologia de campo, petrologia, geologia estrutural e geoquímica, além da geologia isotópica e geocronologia, utilizada por vários autores. Bachmann *et al.* (2007) enfatizaram a importância dos magmas básicos derivados do manto na origem do magmatismo granítico, advogando a integração dos dados de todas rochas magmáticas (plutônicas e vulcânicas de todas composições) na busca de uma melhor compreensão dos processos que levaram à diferenciação da Terra e geração da crosta continental. O vínculo de muitos magmas graníticos com fontes primárias situadas no manto é bem discutido em diversos trabalhos das últimas décadas como Patiño Douce (1999), Miller *et al.* (2003), López *et al.* (2005), Sisson *et al.* (2005), Bogaerts *et al.* (2006), Kemp *et al.* (2005, 2009) e Castro (2014), entre outros. Patiño Douce (1999) sintetizou de forma clara a concepção atual com base em petrologia experimental, afirmando que os granitos peraluminosos são as únicas rochas graníticas inquestionavelmente produzidas por pura fusão crustal. Prossegue aquele autor afirmando que:

"Except for peraluminous granites, generation of granitic magmas of every other type discussed here is associated with growth of the continental crust. This is so because basaltic components are clearly present in S-type granites, Cordilleran granites, basalt plateau rhyolites, and, very possibly, A-type granites as well..."

Revisões recentes discutindo a gênese de granitoides também concluem que o magmatismo granítico, seja o associado aos arcos magmáticos (Arndt, 2013; Brown, 2013) ou do tipo A (Eby, 2006; Nardi & Bitencourt, 2009), incorpora magmas máficos provenientes do manto.

Nas duas principais linhas de interpretação das rochas graníticas, distinguem-se dois grupos de classificações: aquelas que enfatizam o protólito da assumida fusão crustal (Chappell & White, 1974; Pitcher, 1983; Collins *et al.*, 1982) e as que focalizam a associação magmática em que os granitoides se enquadram (Tauson & Koslov, 1972; Bonin, 1982; Lameyre & Bowden, 1982; Nardi & Bonin, 1991). Este segundo grupo, não preconiza um mecanismo específico de gênese, baseando-se principalmente, nas características geoquímicas e mineralógicas da associação de rochas ígneas.

Uma síntese dos principais sistemas de classificação das rochas graníticas é apresentada por Barbarin (1999) que propôs uma alternativa considerando critérios composicionais e genéticos. Frost & Frost (2008) relacionaram parâmetros composicionais das rochas graníticas com seus ambien-

tes e processos genéticos, salientando-se o papel dos magmas básicos na geração de vários tipos de granitoides. Dall'Agnol & Oliveira (2007) demonstraram que é possível discriminar com parâmetros geoquímicos, granitoides do tipo-A oxidados e reduzidos; os tipos oxidados assemelham-se fortemente aos granitoides cálcio-alcalinos de arcos magmáticos maduros, em geral denominados tipo I.

A classificação de granitoides como tipo A e S, ainda tem vasta utilização por vários autores. Nardi & Bitencourt (2009) sugeriram critérios para classificar granitoides, ou mesmo riolitos, como do tipo A. Os critérios sugeridos são uma síntese do que é aceito pela maior parte dos autores. A terminologia 'tipo S' atualmente é mantida por muitos autores para os granitoides produzidos por fusão parcial de metapelitos, com ou sem a participação de magmas básicos. Enquadram-se entre os tipos S os granitos portadores de sillimanita, cordierita e muscovita primária, acompanhando, frequentemente, a biotita.

A grande abundância de rochas graníticas, que levou muitos autores a questionarem a possibilidade de seus magmas parentais serem derivados da diferenciação de magmas básicos ou intermediários, também não é satisfatoriamente explicada pela fusão parcial crustal devido à pouca quantidade de água disponibilizada pela desestabilização de minerais hidratados durante aquecimento crustal. Atualmente, vários autores sugerem que a quantidade de água nos processos de fusão da crosta é muito elevada devido ao seu intenso fluxo ao longo de condutos condicionados tectonicamente, particularmente em cinturões colisionais em associações com migmatitos (Reichardt *et al.*, 2010; Sawyer *et al.*, 2011; Brown, 2013).

Nesta revisão optamos pelo segundo tipo de classificação que busca enquadrar os granitoides em associações, sejam as séries magmáticas, sejam associações metamórficas de alto grau que os produziram por anatexia. Granitos associados geneticamente com migmatitos são discutidos em revisão recente de Brown (2013). Em nosso entender as classificações mais populares, que buscam identificar os granitoides segundo seu provável protólito, contribuem menos para a compreensão geológica dos ambientes tectônicos, à medida em que examinam os granitoides como eventos quase isolados de seu contexto geológico. Da mesma forma, a pressuposição de que a maior parte dos granitoides é simples fusão crustal rejeita, a priori, a possibilidade de que o magmatismo granítico possa constituir adição vertical à crosta, e que, portanto, não seja responsável por parte do crescimento

crustal.

Assim, fundamentados na crença de que a diversidade de modelos, hipóteses e ideias constitui a riqueza da ciência e que sua coexistência e interação, e não o seu embate, são o que promovem o progresso científico, apresentamos uma revisão das séries magmáticas e argumentamos pela retomada do estudo das rochas graníticas, também segundo esta visão, mais integradora e cientificamente mais fértil e promissora.

2 As séries magmáticas

A classificação das **associações de rochas ígneas** segundo sua composição química constitui importante etapa na construção de hipóteses geológicas no campo da petrogênese, estratigrafia, metalogenia e geotectônica. Exatamente porque não existe uma correspondência direta e simples entre composição química dos magmas e ambientes geotectônicos, ou processos genéticos, ou potencialidade econômica, esta etapa de identificação da série magmática a que pertence uma rocha, é imprescindível, devendo preceder, jamais substituir, as classificações genéticas, geotectônicas e outras que possuem elevado conteúdo interpretativo. Grande parte dos petrólogos admite presentemente que a fusão crustal é, na maior parte das vezes, associada com o aporte de magmas básicos provindos de fontes situadas no manto (*e.g.* Patiño Douce, 1999; Barbarin, 1999; Chappell & White, 2001; Arndt, 2013). Portanto o estudo das rochas ígneas com base em sua associação litológica deve ser parte fundamental, mesmo no estudo de rochas graníticas. A utilização de classificações dos granitoides com base nos seus possíveis protólitos (Chappell & White, 1974), advogada por autores eminentes como Pitcher (1983), entre outros, contribuiu para que estas rochas fossem encaradas como eventos de fusão parcial crustal isolados, não sendo vistas como possíveis termos de associação ígnea composicionalmente ampla, o que ocorre com frequência.

As associações de rochas magmáticas derivadas de magmas parentais de composição semelhantes, mesmo que seu processo de diferenciação inclua assimilação ou mistura com materiais externos, ou ainda a reação dos magmas básicos com rochas metamórficas, podem ser agrupadas conforme suas características composicionais comuns. Os principais grupos assim identificados são denominados de séries ígneas. Assim, uma associação ígnea pertence à série toleítica se for derivada da diferenciação de magmas parentais toleíticos, acompanhada ou não de assimilação de fusões

crustais, por exemplo. A mais clara e objetiva representação das séries magmáticas ou ígneas consta no trabalho de Lameyre & Bowden (1982), onde as mesmas são identificadas no diagrama QAP (Fig. 1). As séries ígneas apresentam padrões de diferenciação característicos quando representadas em diagramas químicos como FMA, TAS, $\text{CaO}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, entre outros. Winchester & Floyd (1977) reconheceram as séries subalcalinas, moderadamen-

te alcalinas (semelhante as alcalinas saturadas em sílica) e fortemente alcalinas incluindo as rochas subsaturadas em sílica, sugerindo parâmetros discriminantes também com base em seus conteúdos de elementos traços. Para classificar associações de rochas comagmáticas em uma determinada série, em geral é necessária a presença de termos com diferentes graus de diferenciação, de modo a ficar configurado um padrão de diferenciação.

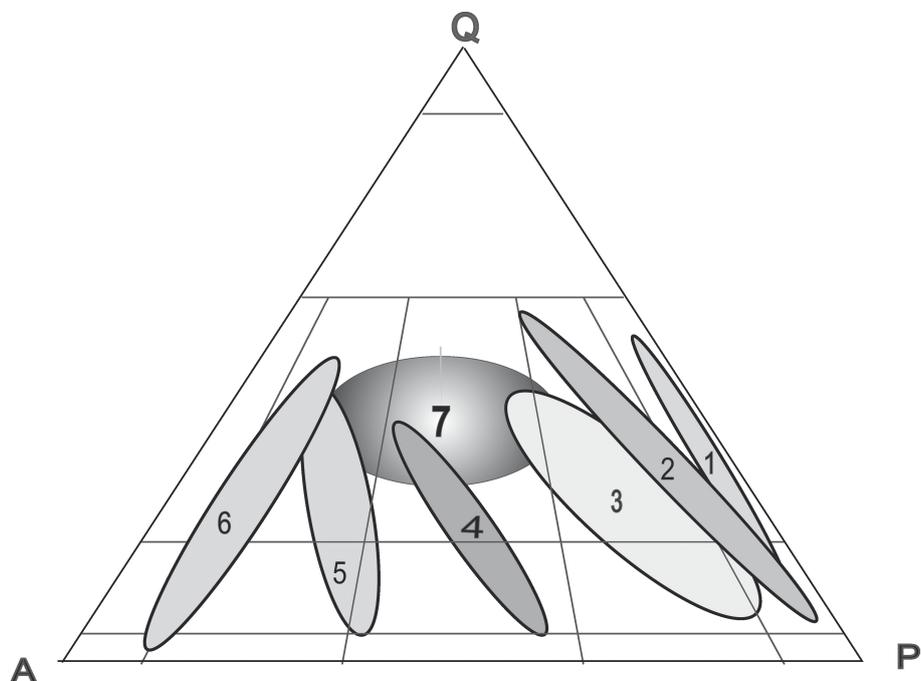


Figura 1. Principais séries magmáticas e produtos de fusão crustal lançados no diagrama QAP, modificado de Lameyre & Bowden (1982). 1- série toleítica oceânica; 2- série cálcio-alcalina baixo-K; 3- séries subalcalinas (toleítica e cálcio-alcalina) médio e alto-K; 4- série shoshonítica; 5- série alcalina saturada em sílica sódica; 6- série peralcalina e ultrapotássica; 7- associação leucocrática peraluminosa.

Os fundamentos da presente revisão constam em Girod (1978), Lameyre & Bowden (1982) e Wilson (1989), tomando como base a classificação sugerida pela Comissão Internacional de Nomenclatura de Rochas Ígneas (Le Maitre, 2002).

O termo alcalino é utilizado com base no diagrama TAS [SiO_2 versus $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] (Fig. 2), a exemplo do referido por Le Maitre (2002) com base em MacDonald & Katsura (1964) and Irvine & Baragar (1971), dentre outros. De acordo com este critério, as rochas básicas e intermediárias alcalinas são as que constituem as séries situadas acima da linha que separa os campos das séries saturadas e supersaturadas em sílica do diagrama TAS, sendo as demais ditas subalcalinas. As alcalinas são separadas em dois campos: alcalinas subsaturadas em sílica ou fortemente alcalinas e as alcalinas saturadas em sílica ou moderadamente alcalinas, conforme utilizado por Winchester & Floyd (1977) e Wilson (1989). É importante assinalar que o termo peralcalino, similar a agpaítico, refere-se à relação molar

de $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ com Al_2O_3 , em rochas ou magmas, não apresentando portanto relação direta com o termo alcalino nem com séries magmáticas (Fig. 3). Da mesma forma a classificação de J.A. Peacock envolve a variação de $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ versus CaO , ao longo da diferenciação, sendo esta medida pelo parâmetro SiO_2 , portanto o termo alcalino de Peacock não corresponde diretamente ao uso preconizado nesta revisão. Na figura 4 consta uma adaptação do critério de Peacock ao gráfico proposto por Brown (1981), podendo este ser utilizado para avaliação de cálcio-alcalinidade de uma série magmática. Diante da imprecisão do termo rocha cálcio-alcalina, sugere-se que este seja utilizado apenas para caracterizar uma série ígnea, como originalmente proposto, e não rochas com composição restrita. Portanto, um granitoide cálcio-alcalino seria aquele que pertence à esta série e não teria características físicas ou químicas capazes de defini-lo isoladamente. Em princípio, isto também deve ser aplicado aos termos alcalino, toleítico e shoshonítico, por

exemplo.

As principais séries magmáticas são a toleítica, a alcalina subsaturada em sílica, alcalina saturada em sílica shoshonítica (ou potássica), alcalina saturada em sílica sódica, alcalina saturada em sílica ultrapotássica, a cálcio-alcalina, e a komatiítica.

rada em sílica shoshonítica (ou potássica), alcalina saturada em sílica sódica, alcalina saturada em sílica ultrapotássica, a cálcio-alcalina, e a komatiítica.

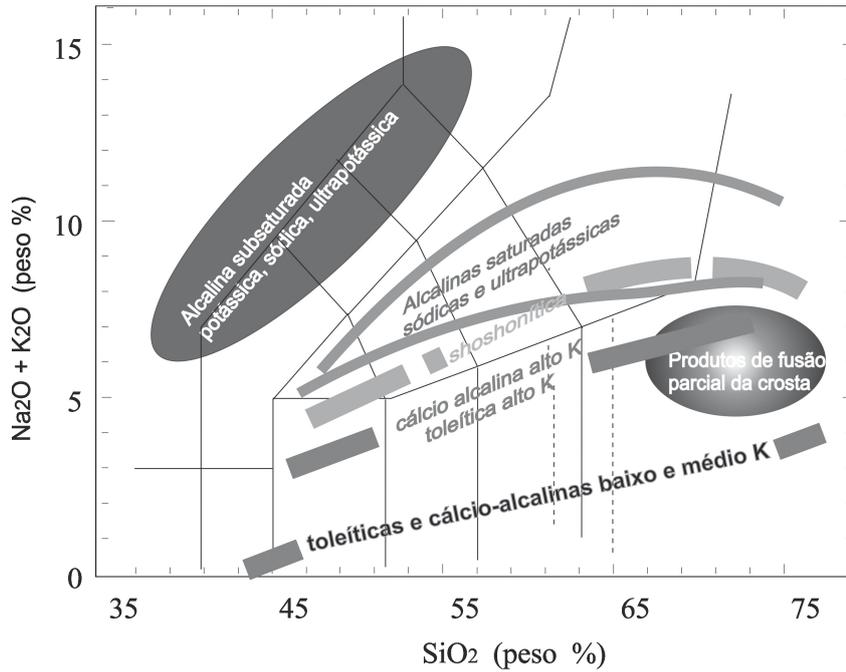


Figura 2. Principais séries magmáticas e produtos de fusão crustal lançados no diagrama TAS.

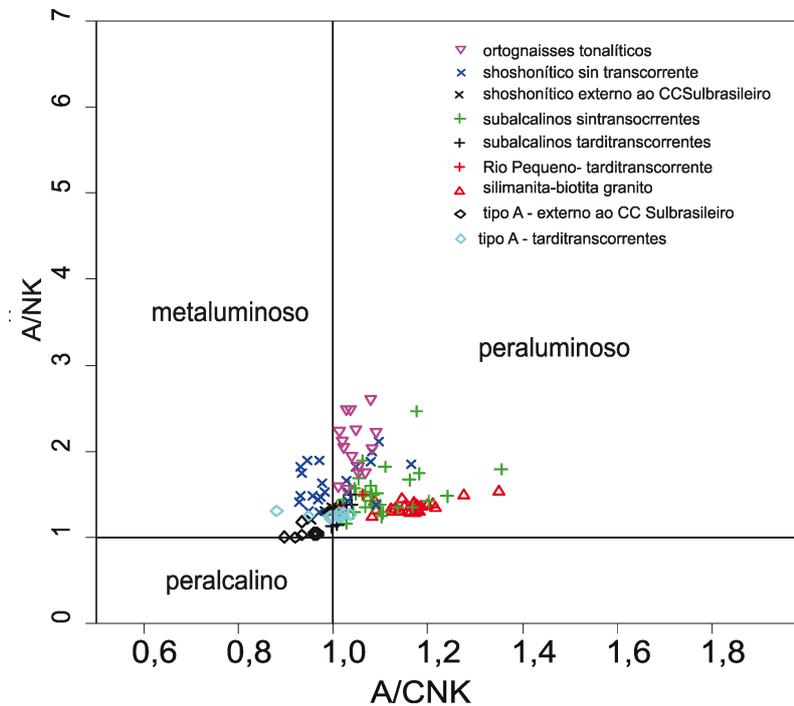


Figura 3. Diagrama A/NK versus A/CNK para classificação segundo os parâmetros de Shand. Amostras de granitoides pós-colisionais do sul do Brasil e ortognaisses tonalíticos de arco magmático neoproterozoico (Martil *et al.*, 2011).

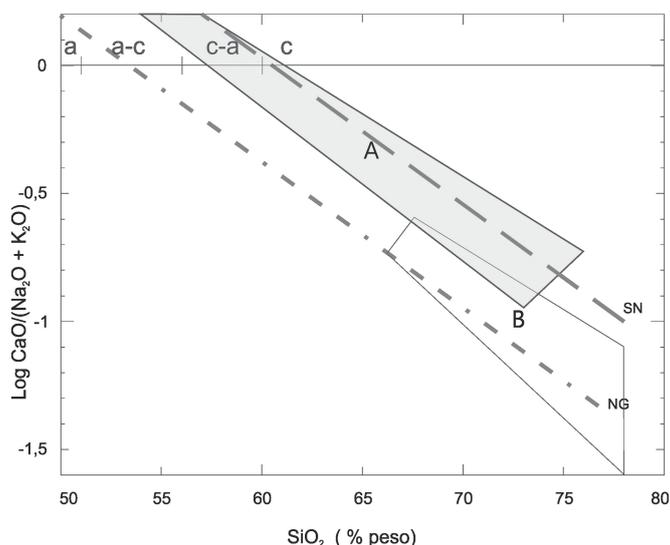


Figura 4. Diagrama de cálcio alcalinidade versus índice de diferenciação (Brown, 1981) apresentando os campos das séries vulcânicas de arcos magmáticos (A), dos granitoides metaluminosos das séries alcalinas (B) (ou tipo A, segundo Nardi & Bitencourt, 2009), *trend* dos granitoides da batólito Sierra Nevada (SN), *trend* das rochas do arco continental maduro da Nova Guiné (NG). A linha horizontal segmentada permite a identificação dos padrões representados no gráfico com a classificação de Peacock: a = alcalino, a-c = álcali cálcico, c-a = cálcio-alcalino, e c = cálcico.

As séries subalcalinas, constituídas principalmente por rochas que se situam no campo das séries supersaturadas em sílica do diagrama TAS, são a toleítica, a komatiítica e a cálcio-alcalina, sendo subdivididas em baixo-K, médio-K, e alto-K, conforme sugerido por Peccerillo & Taylor (1976) e revisito por Le Maitre (2002, Fig. 5).

O enquadramento de uma associação de rochas graníticas em séries magmáticas depende

em grande parte, como já foi dito, da presença de uma gama de rochas com graus de diferenciação diversos. Quando a composição é restrita em termos de diferenciação, a identificação de padrões de diferenciação (*trends*) se torna difícil nos diagramas, e critérios auxiliares devem ser buscados entre os conteúdos de elementos traço, composição das fases minerais e outros.

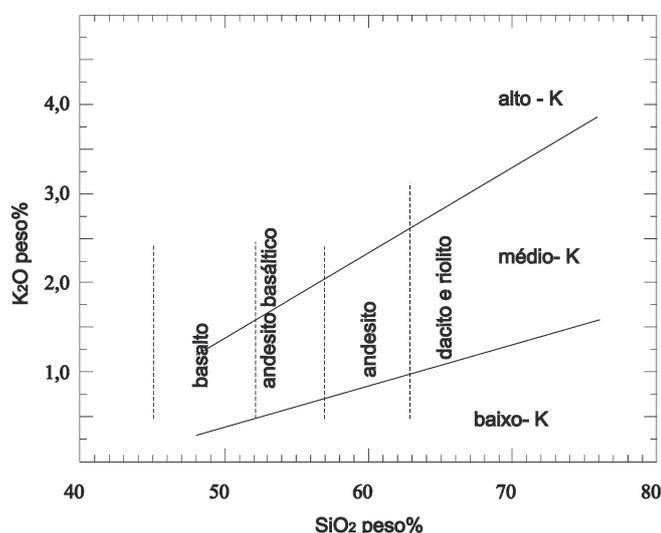


Figura 5. Diagrama de classificação das séries subalcalinas (segundo Le Maitre, 2002).

2.1 Séries subalcalinas

2.1.1 Série toleítica

As principais rochas da série toleítica, principalmente dos ambientes de crosta oceânica, são os gabros, quartzo-gabros, tonalitos e trondhjemitos,

definindo o trend tonalítico no diagrama modal QAPF, ou os seus correspondentes extrusivos. No diagrama TAS as rochas toleíticas se distribuem na base (séries toleíticas de ambientes oceânicos) e no topo (séries toleíticas continentais) do campo das rochas subalcalinas. Wilson (1989) destacou duas fundamentais características das rochas da série toleítica: o enriquecimento em ferro no diagrama FMA (Fig. 6), denominado “trend de Fenner”, que

distingue esta série das demais, e o caráter empobrecido em Al_2O_3 dos basaltos toleíticos (em torno de 12-14 %) com relação aos cálcio-alcálicos (em torno de 17 %). Tanto o enriquecimento em Fe como o empobrecimento relativo em Al da série toleítica em relação à cálcio-alcálica são bem ilustrados no diagrama de Jensen (Fig. 7). Zimmer *et al.* (2010) enfatizaram a importância do enriquecimento em ferro dos termos básicos e intermediários das séries toleíticas para distingui-la da cálcio-alcálica, adicionando ainda o fato de que os conteúdos de água são distintamente mais elevados nas séries cálcio-alcálicas. Segundo aqueles autores, é precisamente este conteúdo mais elevado de água e o concomitante aumento da fugacidade de O_2 , que causa as diferenças mineralógicas e químicas das duas séries, já que reduz o campo de estabilidade do plagioclásio, aumentando o de estabilidade do anfíbólio e magnetita. A correlação positiva entre aumento da quantidade de água e da fugacidade de O_2 tem sido constatada no magmatismo de arco recente.

De acordo com a classificação proposta por

Peacock, medindo a variação da proporção CaO versus $(Na_2O + K_2O)$ com o incremento de SiO_2 , as rochas de afinidade, ou da série, toleítica são cálcicas à cálcio-alcálicas, sendo estas últimas mais comuns em ambientes continentais.

As rochas toleíticas oceânicas apresentam de modo geral teores baixos de elementos como K, Rb, Ba, Sr, e Terras Raras leves; já as continentais podem mostrar conteúdos elevados desses elementos. A presença de dois piroxênios, pigeonita e augita é uma característica mineralógica dos basaltos toleíticos. Os fenocristais mais comuns são olivina, plagioclásio e óxidos de Fe e Ti, inclusive ilmenita. No cálculo de norma enfatiza-se a presença de hiperstênio quartzo como indicativa de afinidade toleítica em basaltos. Os granitoides da série toleítica baixo-K (Fig.1), predominantemente tonalitos associados com gabros e quartzo gabros, são correlacionáveis com os granitoides do tipo M (Pitcher, 1983) ou com os granitoides das cadeias oceânicas (ORG, Pearce *et al.*, 1984), ou ainda com os plagiogranitos da série toleítica de Tauson (1983).

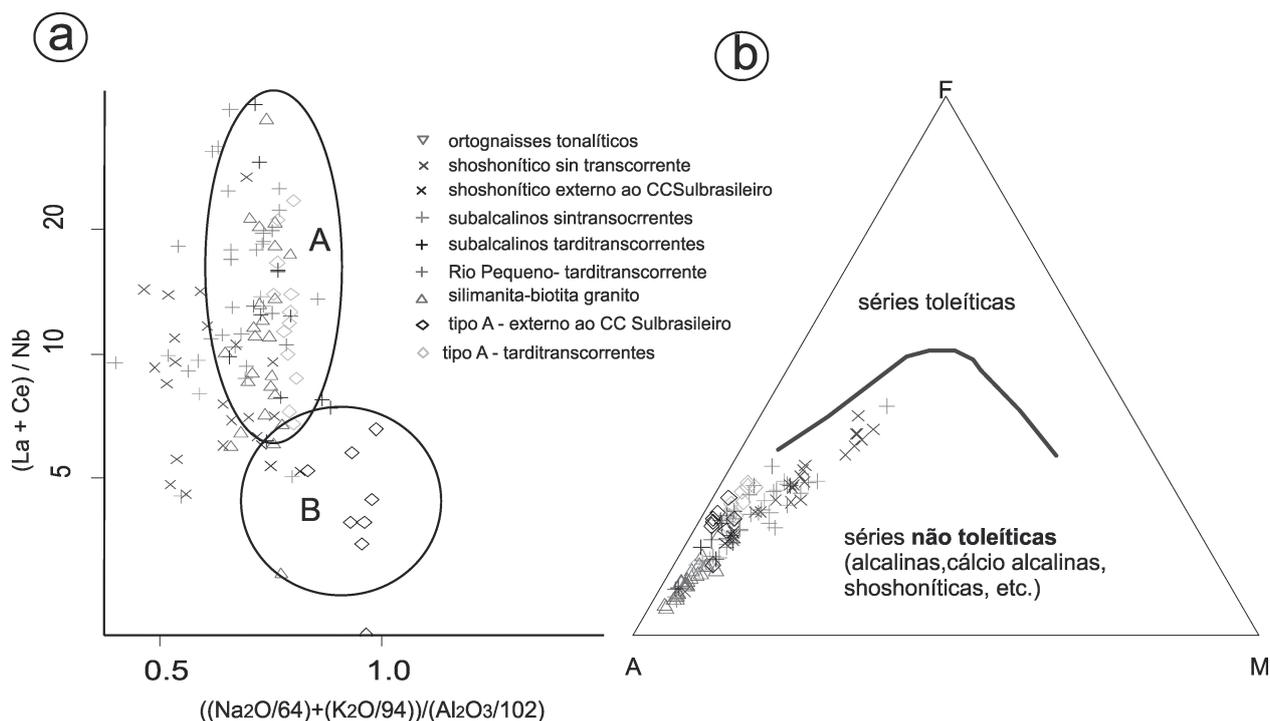


Figura 6. Diagrama de Nardi & Bitencourt (2009) mostrando granitoides pós-colisionais do sul do Brasil e os ortognaisses tonalíticos de arco magmático (Martil *et al.*, 2011). A) O campo A corresponde ao dos granitoides dentro dos cinturões de cisalhamento e B fora dos mesmos; B) FMA $(Na_2O+K_2O)-(FeO_t+TiO_2)-(MgO)$ com os granitoides pós-colisionais do sul do Brasil.

As séries toleíticas são típicas de assoalhos e cadeias meso-oceânicas, ou de ambientes anorogênicos intraplaca continentais, constituindo o magmatismo de riftes ou os *platôs* continentais (CFB- *Continental Flood Basalts*). Estudos recentes comprovam sua presença no magmatismo pós-colisional (Bitencourt & Nardi, 1993, 2000; Cottin *et*

al., 1998; Eby, 2006; Florisbal *et al.*, 2012; Fontana *et al.*, 2012), onde grandes volumes de granitoides do tipo A são gerados devido à interação de magmas básicos toleíticos médio a alto-K com fusões crustais, promovida pela tectônica transcorrente (Bitencourt & Nardi, 2000; Nardi & Bitencourt, 2007). Os granitoides assim gerados são incluídos

por Barbarin (1999) entre os KCG (granitoides subalcalinos enriquecidos em K) e Dall'Agnol & Oliveira (2007) os interpretaram como tipo A oxidados. Nardi & Bitencourt (2009) os incluíram entre os granitoides do tipo A de afinidade toleítica médio a alto-K. Frost & Frost (2008) enquadraram estes granitoides entre os denominados *ferroan granites*, devido suas elevadas razões FeO_T/MgO . Eby (2006) identifica os granitoides do tipo A da série toleítica continental com os do tipo A2, discriminados em diagramas de elementos traços. Os granitoides pertencentes à série toleítica médio a alto-K dos cinturões transcorrentes pós-colisionais, quando

submetidos à intensa assimilação de fusões crustais, tem suas características geoquímicas toleíticas mascaradas, e assumem feições semelhantes aos de granitoides da série cálcio-alcalina.

As rochas toleíticas riolíticas ou ácidas médio a alto-K são comuns nas associações de platôs continentais - *continental flood basalts* - e apresentam características gerais como alta razão FeO_T/MgO (> 0.9), conteúdos de Al_2O_3 relativamente baixos ($< 14\%$) para SiO_2 em torno de 70 % e similaridade composicional com rochas do tipo A (Nardi & Bitencourt, 2009).

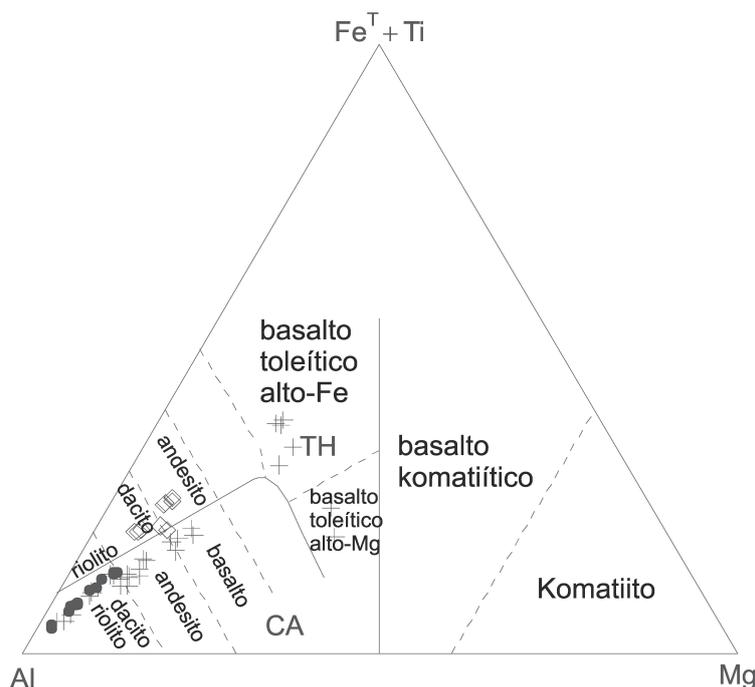


Figura 7. Diagrama de Jensen com os Granitoides Arroio Divisa e Sanga do Areal, da série toleítica médio a alto K do pós-colisional neoproterozoico do sul do Brasil (Centeno, 2008; Fontana *et al.*, 2012).

2.1.2 Série komatiítica

Komatiitos são rochas vulcânicas com menos de 53 % em peso de SiO_2 , $MgO > 18\%$, $TiO_2 < 1\%$ (Le Maitre, 2002); boninitos são as rochas intermediárias correspondentes. Supostamente, esta série, dita komatiítica, pode evoluir até rochas ricas em sílica como dacitos ou seus correspondentes intrusivos, tonalitos e trondhjemitos, cujas características devem ser muito próximas de rochas toleíticas.

As séries komatiíticas são em geral vinculadas ao Arqueano e produzidas por fusão de manto empobrecido em ETRL.

2.1.3 Série cálcio-alcalina

O termo cálcio alcalino tem atualmente um significado dúbio, se referindo em geral à rochas intermediárias formadas em ambientes de arcos magmáticos. O termo original definido por Peacock utilizando a variação da razão $CaO/(Na_2O+K_2O)$ durante a diferenciação não é mais empregado a não ser que seja citado especificamente o diagrama daquele autor. Middlemost (1985) afirmou que a utilização deste termo é para associações de rochas supersaturadas em sílica, subalcalinas, caracterizadas pela presença de basaltos aluminosos e que não registram enriquecimento em ferro nos termos intermediários. Cita ainda como típica associação

cálcio-alcálica os andesitos orogênicos, embora segundo a nomenclatura de Peacock, eles possam ser cálcicos, cálcio-alcálicos ou álcali cálcicos, dependendo da maturidade do arco.

As rochas da série cálcio-alcálica, de acordo com a visão mais aceita atualmente, distribuem-se predominantemente nos campos dos dioritos, quartzo monzodioritos, granodioritos e granitos no diagrama QAP, correspondendo nos termos vulcânicos a andesitos, dacitos e riolitos. A série cálcio-alcálica baixo-K inclui tonalitos e trondhjemitos em detrimento dos granitos, constituindo associações do tipo TTG ou adakitos (Condie, 2005; Martin *et al.* 2005; Moyen & Martin, 2012; Castro, 2014) típicas de arcos magmáticos. Em termos mineralógicos, as séries cálcio-alcálicas baixo-K, mostram rochas basálticas com fenocristais de plagioclásio, olivina, augita \pm óxido de Fe-Ti, atingindo importância a pigeonita em basaltos mais ricos em sílica. Nas séries cálcio-alcálicas mais potássicas aumenta a abundância de olivina, augita, ortopiroxênio, hornblenda e óxidos de Fe e Ti. Biotita e sanidina podem ocorrer nos termos intermediários. Conforme Zimmer *et al.* (2010), as características composicionais do magmatismo cálcio-alcálico decorrem de seu maior teor de H₂O (ca. 2-4 %) em relação ao toleítico, onde as rochas básicas a intermediárias raramente contêm mais de 2 %.

No diagrama TAS, as rochas da série cálcio-alcálica ocupam os campos das rochas subalcálicas supersaturadas em sílica (basaltos-andesitos-dacitos-riolitos). O caráter fortemente aluminoso dos basaltos cálcio alcálicos ($Al_2O_3 \geq 17 \pm 1$) foi já referido. No diagrama de Peacock as rochas da série cálcio-alcálica plotam no campo de mesmo nome e no campo cálcico, evoluindo para álcali cálcicas com o aumento de K. Elementos como Sr, Ba, Rb e Terras Raras leves (La, Ce, Pr e Nd) correlacionam-se positivamente com o K, mostrando enriquecimento da série baixo para a alto-K. Já elementos de elevado potencial iônico como Ti, P, Zr, Nb e Terras Raras pesadas, apesar de mostrarem tendência a leve enriquecimento, mantêm valores abaixo dos encontrados em rochas de afinidade alcálica. A composição normativa das rochas da série cálcio-alcálica indica a supersaturação em sílica. A presença de ortopiroxênio entre a mineralogia modal levou alguns autores a denominar esta série de série dos basaltos com hiperstênio.

As associações cálcio-alcálicas caracterizam o magmatismo de arco durante a subducção da placa oceânica, e a evolução do mesmo, refletida no aumento do conteúdo de K. Cawood *et al.* (2013) afirmaram que a atividade magmática dos arcos nas orogêneses acrescionárias é caracteristicamente

cálcio-alcálica em composição, embora inclua termos toleíticos baixo-K e shoshoníticos, dependendo do grau e tipo de interação com o substrato do arco. São também descritas, no que se refere aos termos graníticos, em ambientes pós colisionais (Harris *et al.*, 1986; Liégeois, 1998). Deve ser dada atenção especial à questão do significado do termo cálcio-alcálico, já que rochas cálcio-alcálicas, segundo critérios de uso corrente com base nos parâmetros de Peacock (*e.g.* Frost *et al.*, 2001), abrangem uma vasta gama de composições, incluindo granitos gerados por fusão de gnaisses quartzo feldspáticos, portanto, não são características de ambientes de arcos magmáticos. Assim, mais uma vez destaca-se a importância da vinculação dos granitos às demais rochas ígneas associadas.

Os granitoides da série cálcio-alcálica baixo-K (Fig. 1) são principalmente tonalitos, trondhjemitos e granodioritos, particularmente importantes em áreas arqueanas e em arcos magmáticos jovens de todas idades. Anfibólitos cálcicos são seus minerais máficos principais. De acordo com Pitcher (1993) são do tipo I Cordilheirano. As rochas adaquíticas e as suítes TTG – tonalito-trondhjemitogranodiorito podem ser enquadráveis nesta série, já que conforme admitido por Arndt (2013, p. 433) ‘...most high-volume granitic magmas, however, incorporate mafic melts from the underlying subduction zones...’ O magmatismo cálcio alcálico tem sua origem vinculada ao manto afetado pela subducção, podendo predominar a fusão da própria placa subductada, da cunha mantélica metassomatizada pelos fluídos relacionados com a subducção ou mesmo, a fusão de fragmentos continentais carregados pela mesma, como sugerido por Castro (2014).

Granitoides identificados como cálcio-alcálicos médio e alto-K, tem sido frequentemente descritos em ambientes pós-colisionais (*e.g.* Harris *et al.*, 1986; Bitencourt & Nardi, 2000). Em alguns casos como no Neoproterozoico do sul do Brasil, granitoides desse tipo são associados com rochas máficas de afinidade toleítica médio e alto-K (Fontana *et al.*, 2012). São em geral considerados como granitoides do tipo I-Caledoniano de Pitcher (1993). Neste caso, a assimilação de fusões crustais pelos magmas parentais, produz aumento dos conteúdos de Al, redução dos teores de Ca, Fe, e Mg, tornando os granitoides deste ambiente similares aos da série cálcio-alcálica. Situações onde essa interpretação pode ser aplicada são referidas no sul do Brasil por Nardi & Bitencourt (2009), Florisbal *et al.* (2012) e Fontana *et al.* (2012), entre outros. A forte contribuição crustal presente leva muitos autores a considerar granitoides da série toleítica médio e

alto-K como produtos de pura fusão crustal.

2.2 Séries alcalinas

2.2.1 Série alcalina subsaturada em sílica

Esta série ocupa o campo correspondente no diagrama QAPF, sendo característica a presença modal e normativa dos feldspatoides, com a consequente ausência de quartzo seja modal ou normativo, e portanto, de rochas graníticas.

2.2.2 Série alcalina sódica saturada em sílica

Por diferenciação esta série evolui para termos supersaturados e localiza-se, em termos de composição modal, nos campos de gabros, sienitos, quartzo sienitos, feldspato alcalino granitos e granitos do diagrama QAPF. Piroxênios e anfibólios sódicos, titano-augita, ferro-hedenbergita são seus minerais ferromagnesianos típicos. No diagrama TAS ocupa o campo das rochas saturadas em sílica [traquibasaltos, traquiandesitos basálticos, traquiandesitos, traquitos ($qz < 20\%$), traquidacitos ($qz > 20\%$) e riolitos]. Quando cumpre a condição de apresentar valores de $[(Na_2O + 2) > K_2O]$ é considerada sódica e seus termos vulcânicos recebem os nomes de hawaitos, mugearitos, benmoreítos e riolitos (Le Maître, 2002). Essas rochas são em geral metaluminosas ou peralcalinas. Embora exista uma tendência de enriquecimento dos elementos de alto potencial iônico, especialmente nos termos peralcalinos, são frequentes padrões composicionais de elementos traços similares aos encontrados nas demais séries. Os granitos são em geral metaluminosos (Nardi, 1991) ocorrendo com grande abundância principalmente em ambientes pós-colisionais, anorogênicos ou em arco continental maturo. Para a maior parte dos autores (e.g. Nardi & Bitencourt, 2009) as rochas graníticas ou riolíticas desta série são classificadas como do tipo A. Os granitoides metaluminosos da série alcalina são principalmente granitos, quartzo sienitos e rochas básicas de afinidade alcalina saturadas em sílica, constituindo associações ígneas bimodais. Suas fases máficas principais são biotita e anfibólios sódico-cálcicos. Os granitoides peralcalinos sódicos tem como máficos característicos os anfibólios e piroxênios sódicos.

2.2.3 Série shoshonítica ou alcalina potássica

As rochas da série shoshonítica ou alcalina potássica saturada em sílica são predominantemente

gabros, dioritos, monzodioritos, monzonitos, quartzomonzonitos e granitos, ou seus correspondentes vulcânicos, definindo no diagrama QAP o denominado *trend* monzonítico. Enfatize-se a importância dos monzonitos e quartzo monzonitos ou seus correspondentes vulcânicos como rochas características desta série. Os basaltos mostram fenocristais de olivina, augita-diopsídio e óxidos de Fe e Ti. Plagioclásio torna-se importante nos termos intermediários. No diagrama TAS elas distribuem-se ao longo dos campos das rochas alcalinas saturadas em sílica, cumprindo, no entanto, a condição $(K_2O + 2) > Na_2O$ e $(K_2O \setminus Na_2O) < 2,0$. Quando extrusivas são denominadas traquibasaltos potássicos, shoshonitos e latitos, além dos traquitos e riolitos. De acordo com o critério sugerido por Peacock, elas são predominantemente álcali-cálcicas e de acordo com os parâmetros de Shand são metaluminosas. A abundância em Sr, Ba, Rb e outros elementos litófilos de baixo potencial iônico, além de Terras Raras leves (La, Ce, Nd), em relação aos elementos litófilos de elevado potencial iônico (Zr, Ti, P, Nb, Y, Terras Raras Pesadas) é importante característica das rochas de afinidade shoshonítica (Fig. 8).

Ressalte-se ainda que a razão $K_2O \setminus Na_2O$ entre 1 e 2 é indicativa de afinidade shoshonítica em séries saturadas, apenas para os termos básicos e intermediários; os termos mais diferenciados ($SiO_2 > 63\%$) não apresentam enriquecimento relativo em K. Nardi (1986) destacou algumas das características dos granitoides da série shoshonítica, das quais os elevados teores de Sr e Ba, bem como a regularidade dos padrões de ETR são as mais importantes.

Os granitoides da série shoshonítica são principalmente quartzo monzonitos e granitos s.s., sendo discriminados dos cálcio-alcálicos alto-K pela associação típica com rochas monzoníticas e pela afinidade alcalina potássica - $K_2O > (Na_2O - 2)$ - da série. Na maior parte das classificações usuais esses granitoides não são distinguidos dos cálcio-alcálicos alto-K, entretanto Tauson (1983) os reconhecia como vinculados a série latítica ou shoshonítica. Os minerais máficos principais são biotita e anfibólio cálcico. As rochas ocorrem predominantemente em ambientes de arco magmático continental maturo e pós-colisionais. Na maior parte das classificações usuais os granitoides da série shoshonítica não são distinguidos dos cálcio-alcálicos alto-K, sendo frequentemente confundidos com estes, entretanto Tauson (1983) reconhecia-os como vinculados a série latítica ou shoshonítica. Alguns autores referem-se aos granitoides da série shoshonítica como granitos de alto Ba e Sr, enquadrando-os como do tipo I.

As séries alcalinas saturadas em sílica que pos-

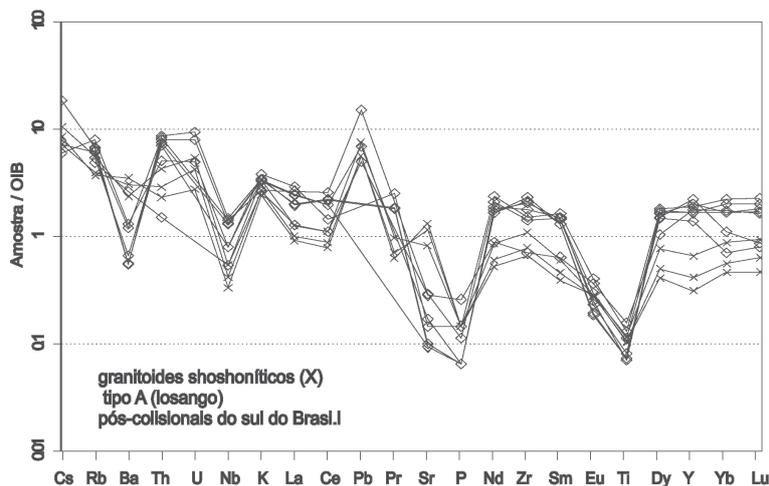


Figura 8. Granitoides pós-colisionais do sul do Brasil normalizados pelos valores de OIB.

suas razões K_2O/Na_2O superiores a 2,0 para os termos básicos e intermediários, foram excluídas das shoshoníticas por Pla Cid *et al.* (2000), sendo sugerido o reconhecimento dos termos ácidos das séries ultrapotássicas saturadas em sílica.

2.2.4 Série alcalina ultrapotássica saturada em sílica

Os granitoides das séries alcalina saturada em sílica ultrapotássica e peralcalina sódica são em geral pertita ou K-feldspato granitos associados com feldspato alcalino sienitos, quartzo sienitos, granitos metaluminosos sódicos, gabros, dioritos e lamprófiros. Os granitoides ultrapotássicos foram descritos por Plá Cid & Nardi (2006) e tem como característica distintiva a elevada razão K_2O/Na_2O , superior a 2. Suas fases máficas principais são biotita e anfibólio cálcico nos tipos metaluminosos e anfibólitos alcalinos nos tipos peralcalinos. São produtos finais da diferenciação do magmatismo sienítico ultrapotássico saturado em sílica.

Os granitoides da série alcalina saturada em sílica e os ultrapotássicos fazem parte de associações bimodais e são frequentes em ambientes anorogênicos ou pós-colisionais.

3 Associação leucocrática peraluminosa

As rochas produzidas por fusão crustal pura podem ser composicionalmente indistinguíveis de algumas das derivadas da diferenciação de magmas basálticos ou andesíticos, em geral com assimilação de fusões crustais, acima listadas. Associações assim geradas são via de regra compostas por granitos e granodioritos. Estudos experimentais mostram que, de modo geral, fusões crustais geram magmas leve ou fortemente peraluminosos, de composição granítica (Skjerlie & Johnston, 1996; Montel & Vilzeuf, 1997; Stevens *et al.*, 1997;

Patiño Douce, 1999), o que adequa-se com a denominação sugerida. Micas e granada (almandina) são minerais muito frequentes. Fusões parciais de metapelitos têm como produto típico composições com mais de 5% de coríndon normativo, frequentemente originando cordierita granitos.

Fusões de ortognaisses geram magmas graníticos de composição similar aos granitoides das séries cálcio-alcalinas médio a alto-K. Termos tonalíticos ou até quartzo dioríticos poderiam ser derivados da fusão de rochas básicas metamorfizadas, de composição anfibolítica, em condições de temperatura excepcionalmente elevada, como as frequentemente estimadas na crosta arqueana ou paleoproterozoica. Produtos de fusão crustal tendem, de modo geral, a ser empobrecidos em elementos litófilos de elevado potencial iônico (Zr, Ti, Terras Raras pesadas, Nb, Y) (Fig. 9) e em elementos que se enriquecem relativamente em plagioclásios como Sr e Eu ao menos quando a fusão não é sob alta pressão. Barbarin (1999) considerou como típicos produtos de fusão crustal, com pouca ou inexistente contribuição de materiais provindos do manto, os denominados muscovita granitos peraluminosos (MPG) e os cordierita granitos peraluminosos (CPG). Fourcade *et al.* (2001), no entanto, consideraram os granitos portadores de cordierita ou sillimanita, além de biotita, como produtos de fusão crustal com magmatismo básico associado. Os granitos da associação leucocrática peraluminosa podem ocorrer associados a rochas metamórficas e migmatitos. Em geral são granitos com muscovita primária e biotita. São importantes também os tipos com cordierita, sillimanita, andalusita e cianita, estes às vezes associados a rochas quartzo-dioríticas. Rochas graníticas menos diferenciadas ou mais ricas em máficos podem ocorrer associadas e são, segundo White (2001), produtos híbridos resultantes da contaminação da fusão por

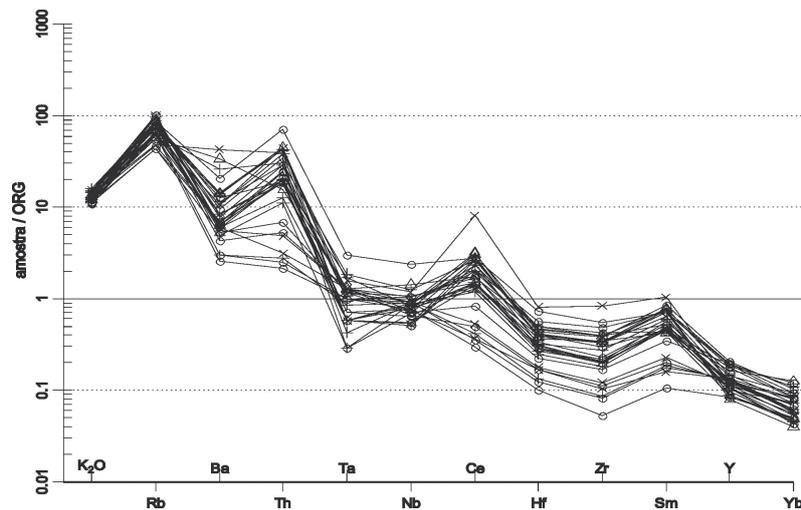


Figura 9. Diagrama multielementar (Pearce *et al.*, 1984) com as amostras do Granito Butiá (biotita sillimanita-biotita granito - tipo S) representadas em relação aos granitos ORG (*Ocean Ridge Granites*).

restos do protólito metamórfico, denominados restitos.

As fusões crustais são contaminantes, muitas vezes de grande impacto na composição de magmas derivados de fontes situadas no manto, constituindo os processos de diferenciação chamados AFC (*Assimilation, Fractional Crystallization*). Conforme vários autores, tais como Barbarin (1999), a maior parte dos granitos é originada por processos deste tipo, isto é, sua gênese representa a evolução de magmas híbridos, mantélicos com assimilação de fusões graníticas crustais. O magmatismo básico a intermediário de origem mantélica, além de ser fonte de calor fundamental para os processos de fusão crustal, contribui também com seus líquidos para a geração da maior parte das rochas graníticas (Sawyer *et al.*, 2011; Brown, 2013). A adição de água por condutos estruturalmente controlados, em porções da crosta com temperaturas próximas da *solidus* granítica, tem sido proposta como causa dos grandes volumes de fusão crustal granítica frequentemente descritos, em particular em ambientes colisionais (*e.g.* Reichardt *et al.*, 2010; Sawyer *et al.* 2011; Brown, 2013).

Associações leucocráticas peraluminosas ocorrem principalmente em ambientes de sin- a pós-colisionais ou de arco magmático maturo.

4 Considerações finais

O estudo dos granitoides a partir da consideração de vinculação genética com rochas ígneas menos diferenciadas, isto é, relacionando-os com as séries magmáticas, depende fortemente da presença e identificação desses termos menos diferenciados. Quando os granitoides ocorrem isolados, a sua possível relação com uma série magmática é de di-

fícil constatação, embora possa ser avaliada a partir de critérios petrográficos, mineralógicos e geoquímicos. Neste caso, para granitoides de composição restrita, termos como cálcio-alcálico, shoshonítico, alcálico e outros que se referem às séries magmáticas não deveriam ser utilizados para classificar a rocha, e sim, quando for o caso, para identificar a série a qual o granitoide se vincula. Assim, um granitoide cálcio-alcálico não é identificado por valores de CaO versus $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, mas sim pelo fato de fazer parte de uma associação magmática que constitui uma série cálcio-alcálica. Portanto, um granitoide gerado por fusão parcial pura de gnaisses quartzo feldspáticos não seria classificado como cálcio alcálico ou toleítico, por exemplo, pois não faz parte de nenhuma dessas séries.

O uso de diagramas como os ilustrados na figura 10 evidencia a relação dos magmas parentais graníticos com diferentes fontes, situadas no manto ou crosta, que podem ser vinculadas aos principais ambientes geotectônicos.

A retomada do estudo das rochas graníticas, testando-as como possíveis integrantes de uma determinada série magmática, representa um esforço no sentido de contextualizar tanto petrológica como geotectonicamente os granitoides, e não pressupor que eles sejam meros produtos de pura fusão crustal, quer de protólitos ígneos ou sedimentares metamorfizados. Uma vantagem adicional dessa visão mais integradora é examinar os granitoides como possíveis evidências de acreção juvenil a crosta, embora possam ter a participação parcial da mesma em sua composição. Mas, talvez a maior vantagem desta forma de encarar o magmatismo granítico seja torná-los, ao menos em diversos casos, registros de paleoambientes geotectônicos, o que fica muito enfraquecido quando apenas nos restringimos a investigar sua provável fonte crustal.

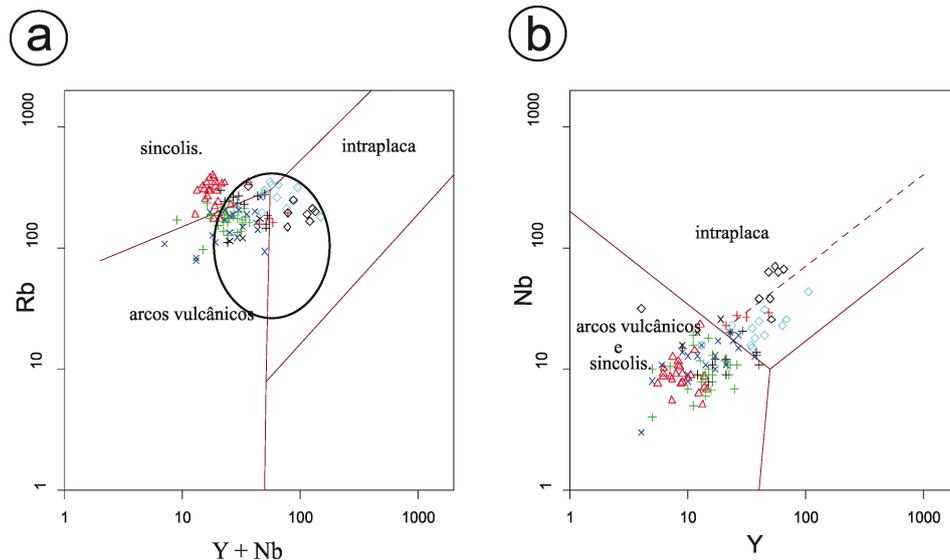


Figura 10. Granitoides pós colisionais do sul do Brasil representados em diagramas de Pearce *et al.* (1984) com campo dos pós-colisionais de Pearce (1996). A) Y+Nb vs Rb; B) Nb vs Y.

Agradecimentos- Este trabalho foi realizado com suporte financeiro do CNPq (Bolsa de Produtividade Científica). O trabalho foi melhorado com as sugestões de revisores e dos editores, aos quais agradeço.

Referências

- Arndt, N.T. 2013. Formation and Evolution of the Continental Crust. *Geochemical Perspectives*, 2(3): 405-533.
- Bachmann O., Miller C.F. & de Silva, S. 2007. The volcanic-plutonic connection as a stage for understanding crustal magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167: 1-23.
- Barbarin, B. 1990. Granitoids: main petrogenetic classifications in relation to origins and tectonic setting. *Geological Journal*, 25: 227-238.
- Barbarin, B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605-626.
- Bitencourt, M.F. & Nardi, L.V.S. 1993. Late to Post-collisional Brasileiro granitic magmatism in southernmost Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciência*, 65(1): 3-16.
- Bitencourt, M.F. & Nardi, L.V.S. 2000. Tectonic setting and sources of magmatism related to the Southern Brazilian Shear Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 184-187.
- Bogaerts, M., Scaillet, B. & Awvera, J.V. 2006. Phase Equilibria of the Lyngdal Granodiorite (Norway): Implications for the Origin of Metaluminous Ferroan Granitoids. *Journal of Petrology*, 47(12): 2405-2431.
- Bonin, B. 1982. *Les granites des complexes annulaires*. BRGM, Manuels et Méthodes, Paris, 182p.
- Bonin, B., Dubois, R. & Gohau, G. 1997. *Le métamorphisme et la formation des granites. Évolution des idées et concepts actuels*. FacSciences Nathan-Université, Paris, 317 p.
- Brown, G.C. 1981. Space and time in granite plutonism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A301: 321-336.
- Brown, M. 2013. Granite: from genesis to emplacement. *Geological Society of America Bulletin*, 125(7-8): 1079-1113.
- Castro, A. 2014. The off-crust origin of granite batholiths. *Geoscience Frontiers*, 5: 63-75.
- Cawood, P.A., Kröner, A., Collins, W.J., Kusky, T.M., Mooney, W.D. & Windley, B.F. 2013. Accretionary orogens through Earth history. *Special Publications, Geological Society of London*, 319: 1-36.
- Centeno, A.P. 2008. *Geologia dos granitoides Sanga do Areal, intrusivos no Complexo Arroio dos Ratos, na região de Quitéria - Serra do Erval, RS*. Porto Alegre, 45p. Monografia de Conclusão. Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Chappell, B.W. & White, A.J.R. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173-174.
- Chappell, B.W. & White, A.J.R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 489-499.
- Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J. & Chappell, B.W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80: 189-200.
- Condie, K.C. 2005. TTGs and adakites: are they both slab melts? *Lithos*, 80: 33-44.
- Cottin J.Y., Lorand, J.P., Agrinier, P., Bodinier, J.L. & Liégeois, J.P. 1998. Isotopic O, Sr, Nd and trace element geochemistry of the Laouni layered intrusions - Pan-African belt, Hoggar, Algeria: evidence for post-collisional continental tholeiitic magmas variably contaminated by continental crust. *Lithos*, 45: 197-222.
- Dall'Agnol, R. & Oliveira, D.C. 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: Implications for classification and petrogenesis of A-type granites. *Lithos*, 93: 215-233.
- Floribal, L.M., Janasi, V., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S.

- & Heaman, L. 2012. Contrasted crustal sources as defined by whole-rock and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of Neoproterozoic early post-collisional granitic magmatism within the Southern Brazilian Shear Belt, Camboriú, Brazil. *Journal of South American Earth Science*, 39: 24-43.
- Fontana, E., Nardi, L.V.S. & Bitencourt, M.F. 2012. Caracterização Geoquímica e Petrogenética dos Granitoides Arroio Divisa, Região de Quitéria, Rio Grande do Sul. *Geologia USP, Série Científica*, 12(3): -56.
- Fourcade, S., Capdevila, R., Ouabadi, A. & Martineau, F. 2001. The origin and geodynamic significance of the Alpine cordierite-bearing granitoids from Northern Algeria. A combined petrological, mineralogical, geochemical and isotopic (O, H, Sr, Nd) study. *Lithos*, 57: 187-126.
- Frost, B.R. & Frost, C.D. 2008. A Geochemical Classification for Feldspathic Igneous Rocks. *Journal of Petrology*, 49(11): 1955-1969.
- Frost, B.R., Barnes, C., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis, D. J. & Frost, C. D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033-2048.
- Girod, M. 1978. *Les roches volcaniques - pétrologie et cadre structural*. Doin Editeurs, Paris, 239p.
- Harris, N.W.B., Pearce, J.A. & Tindle, A.G. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M.P. & Ries, A.C. (eds.) *Collision Tectonics*. Geological Society of London, Special Paper, London, 19:115-158.
- Hutton, J. 1788. Theory of the Earth; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the Globe. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, I(II): 209-304.
- Irvine, T.N. & Baragar, R.W.A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548.
- Kemp, A.I.S., Wormald, R.J., Whitehouse, M.J., & Price, R.C. 2005. Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia. *Geology*, 33: 797-800.
- Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Collins, W.J., Gray, C.M., & Blevin, P.L. 2009. Isotopic evidence for rapid continental growth in an extensional accretionary orogen: The Tasmanides, eastern Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 284: 455-466.
- Lameyre, J. & Bowden, P. 1982. Plutonic rock type series: discriminations of various granitoid series and related rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 14: 169-186.
- Le Maitre, R.W. 2002. *Igneous Rocks - A classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press, Cambridge, 236pp.
- Liégeois, J.P. 1998. Preface - Some words on the post-collisional magmatism. *Lithos*, 45: xv-xvii.
- López, S., Castro, A. & Garcia-Casco, A. 2005. Production of granodiorite melt by interaction between hydrous mafic magma and tonalitic crust. Experimental constraints and implications for the generation of Archaean TTG complexes. *Lithos*, 79: 229-250.
- MacDonald, G.A. & Katsura, T. 1964. Chemical composition of Hawaiian lavas. *Journal of Petrology*, 5: 83-133.
- Marmo, V. 1971. *Granite petrology and the granite problem*. Elsevier Publish Co., Amsterdam, 244p.
- Martil, M., Bitencourt, M.F. & Nardi, L.V.S. 2011. Caracterização estrutural e petrológica do magmatismo pré-colisional do Escudo Sul-rio-grandense: os ortognaisses do Complexo Metamórfico Várzea do Capivarita. *Pesquisas em Geociências*, 38(2): 181-201.
- Martin, H., Smithies, R.H., Rapp, R., Moyen, J.F. & Champion, D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79: 1-24.
- Miller, C.F., McDowell, S.M. & Mapes, R.W. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6):529-532.
- Montel, J.M. & Vilzeuf, D. 1997. Partial melting of meta-greywackes, Part II. Compositions of minerals and melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128: 176-196.
- Middlemost, E.A.K. 1985. *Magmas and magmatic rocks: An introduction to igneous petrology*. Longman Inc., New York, 266p.
- Moyen, J.F. & Martin, H. 2012. Forty years of TTG research. *Lithos*, 148: 312-336.
- Nardi, L.V.S. 1986. As rochas granitoides da série shoshonítica. *Revista Brasileira de Geociências*, 16:3-10.
- Nardi, L.V.S. 1991. Caracterização petrográfica e geoquímica dos granitos metaluminosos da associação alcalina: revisão. *Pesquisas*, 18(1): 44-57.
- Nardi, L.V.S. & Bitencourt, M.F. 2009. A-type granitoids in post-collisional settings from southernmost Brazil: their classification and relationship with magmatic series. *Canadian Mineralogist*, 47(6): 1493-1504.
- Nardi, L.V.S. & Bonin, B. 1991. Post-orogenic and non-orogenic alkaline granite associations: the Saibro Intrusive Suite, Southern Brasil. A case study. *Chemical Geology*, 92(1/3): 197-212.
- Nardi, L.V.S. & Bitencourt, M.F. 2007. Magmatismo granítico e evolução crustal do sul do Brasil. In: (Eds.) Iannuzzi, R. & Frantz, J.C. *50 Anos de Geologia. Instituto de Geociências. Contribuições*. Editora Comunicação e Identidade, CIGO e IG-UFRGS, Porto Alegre, p. 125-141.
- Patiño Douce, A. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro, A., Fernandez, C. & Vigneresse, J.S. (Eds.) *Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques*. Geological Society, London, Special Publications, 168: 55-75.
- Pearce, J. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4):120-125.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W. & Tindle, A.G. 1984. Trace ele-

- ment discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956-983.
- Pitcher, W.S. 1983. Granite: Typology, geological environment and melting relationships. In: Atherton, M.P. & Gribble, C.D. (Eds.), *Migmatites, melting and metamorphism*. Shiva Publishing Limited, Chechire, p. 277-287.
- Pitcher, W.S. 1993. *The nature and origin of granite*. Chapman & Hall, London, 321p.
- Peccerillo, A. & Taylor, R.S. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63-81.
- Plá Cid, J. & Nardi, L.V.S. 2006. Alkaline ultrapotassic A-type granites derived from ultrapotassic syenite magmas generated at metasomatised mantle sources. *International Geology Review*, 48(10): 942-956.
- Plá Cid, J., Nardi, L.V.S., Conceição, H., Bonin, B. & Jardim de Sá, E. 2000. The alkaline silica-saturated ultrapotassic magmatism of the Riacho do Pontal Fold Belt, NE Brazil: an example of syenite-granite Neoproterozoic association. *Journal of South America Earth Science*, 13(7): 661-683.
- Reichardt, H., Weinberg, R.F., Andersson, U.B. & Fanning, C.M. 2010. Hybridization of granitic magmas in the source: The origin of the Karakoram Batholith, Ladakh, NW India. *Lithos*, 116: 249-272.
- Sawyer, E.W., Cesare, B. & Brown, M. 2011. When the Continental Crust melts. *Elements*, 7: 229-234.
- Sisson, T.W., Ratajeski, K., Hankins, W.B., Glazner, A.S. 2005. Voluminous granitic magmas from common basaltic sources. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148: 635-661.
- Skjerlie, K.P. & Johnston, A.D. 1996. Vapour-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins. *Journal of Petrology*, 37: 661-691.
- Stevens, G., Clemens, J.D. & Droop, G.T.R. 1997. Melt production during granulite-facies anatexis: experimental data from "primitive" metasedimentary protoliths. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128: 352-370.
- Tauson, L. V. 1983. Geochemistry and metallogeny of the latitic series. *International Geology Review*, 25: 125-135.
- Tauson, L.V. & Kozlov, V.D. 1972. Distributions Function and ratios of trace-elements concentrations as estimators of the Ore-Bearing Potential Granites. In: Jones, M.J. (ed.) *Geochemical Exploration*. Institution of Mining and Metallurgy, London, p. 37-44.
- Tuttle, O.F. & Bowen, N. L. 1958. Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAl-Si₃O₈ - KAlSi₃O₈ - SiO₂ - H₂O. *Memoirs of the Geological Society of America*, 74, 153p.
- White, A. J. R. 2001. Water, restite and granite mineralisation. *Australian Journal of Earth Science*, 48: 551-555.
- Wilson, M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, London, 466p.
- Winchester, J. A. & Floyd, P.A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325-343.
- Zimmer, M.M., Plank, T., Hauri, E.H., Yogodzinski, G.M., Stelling, P., Larsen, J., Singer, B., Jicha, B., Mandeville, C. & Nye, C.J. 2010. The Role of Water in Generating the Calc-alkaline Trend: New Volatile Data for Aleutian Magmas and a New Tholeiitic Index. *Journal of Petrology*, 51 (12): 2411-2444.

Man 554

Editores: Rômmulo Vieira Conceição & Paulo A. Souza.

