

IDENTIFICAÇÃO DE DIFERENTES PULSOS MAGMÁTICOS NO ENXAME DE DIQUES TOLEÍTICOS DA SERRA DO MAR

Leila S. Marques^{1a}, Marcia Ernesto^{1b}, Enzo M. Piccirillo^{2a}, Giuliano Bellieni³,
Ana Maria G. Figueiredo⁴, Angelo De Min^{2b}

¹ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas-USP, Rua do Matão, 1226,
05508-090, São Paulo, Brasil. ^aleila@iag.usp; ^bmarcia@iag.usp

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Trieste, Via E. Weiss, 8, 34127,
Trieste, Itália. ^apicciril@univ.trieste.it; ^bdemin@univ.trieste.it

³ Dipartimento di Mineralogia e Petrologia, Università di Padova, Via Corso Garibaldi, 37,
35100 Padova, giuliano@epidote.dmp.unipd.it

⁴ Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, CNEN/SP, Caixa Postal 11049,
05422-970, São Paulo, Brasil, grafigue@curiango.ipen.br

Resumo – São apresentados os resultados de um estudo geoquímico e paleomagnético integrado efetuado nos diques toleíticos do Enxame da Serra do Mar, localizado na região costeira dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro. Os dados geoquímicos permitiram identificar quatro grupos de diques básicos com diferentes características, sendo que três deles apresentam forte similaridade com os derrames, com alto e baixo titânio, que ocorrem na Província Magmática do Paraná. O outro grupo, com bastante representatividade, cujas rochas são caracterizadas por altos teores de titânio ($\text{TiO}_2 > 3\%$), elevadas concentrações de estrôncio ($\text{Sr} > 550$ ppm) e razões relativamente baixas de Ti/Y ($\text{Ti/Y} < 500$) não possuem equivalentes extrusivos na província. Este grupo de diques possui pólo paleomagnético que coincide com os pólos do Jurássico, enquanto os diques dos demais grupos possuem pólos concordantes com aqueles do Cretáceo Inferior. As reconstruções paleomagnéticas mostram também que a Pluma de Tristão da Cunha não pode ter sido responsável, nem mesmo como fonte de calor, por esse magmatismo.

Palavras-Chave: Província Magmática do Paraná, Diques toleíticos da Serra do Mar, Enxames de diques máficos, Magmatismo mesozóico; Pluma de Tristão da Cunha

Abstract – The results of an integrated geochemical and paleomagnetic study of tholeiitic dikes from Serra do Mar Swarm is presented. This swarm is located in the coastal area of São Paulo and Rio de Janeiro States. The geochemical data allowed to identifying four groups of basic dikes, which present different characteristics: three of them are very similar to the high- and low-Ti flows from Paraná Magmatic Province. The other group, whose rocks have high contents of titanium ($\text{TiO}_2 > 3\%$) and strontium ($\text{Sr} > 550$ ppm), and relatively low Ti/Y ratios ($\text{Ti/Y} < 500$), has compositions not encountered in flows of the province. This group of dikes has a paleomagnetic pole which coincides with those of Jurassic, whereas the remaining groups have paleomagnetic pole which correlates with those of Early Cretaceous. The paleomagnetic reconstructions also show that Tristan da Cunha Plume was not responsible, even as a heating source, by this magmatism.

Keywords: Paraná Magmatic Province, Serra do Mar tholeiitic dikes, Mafic Dike Swarms, Mesozoic magmatism; Tristan da Cunha Plume

10859

1. Introdução

A plataforma Sul-Americana foi afetada no Cretáceo Inferior por uma intensa atividade ígnea, principalmente na forma de derrames de composição básica e de natureza toleítica, que cobriu uma área de cerca de 1.200.000 km², abrangendo a porção meridional do Brasil e também parte do Uruguai, Paraguai e Argentina (Piccirillo e Melfi, 1988). Associado à atividade vulcânica ocorreu expressivo magmatismo de natureza intrusiva, representado por sills, que afloram principalmente na parte nordeste da Bacia do Paraná, e pelos enxames de diques de Ponta Grossa, da Serra do Mar e de Florianópolis. Todas as ocorrências relacionadas a essa manifestação ígnea de composição toleítica compõem a Província Magmática do Paraná (PMP), que juntamente com as rochas vulcânicas do Etendeka (Namíbia - África), constitui uma das maiores províncias de basaltos continentais do mundo.

Embora muitos estudos já tenham sido conduzidos na PMP e no Etendeka, existe ainda uma grande controvérsia acerca dos processos envolvidos na gênese dessas rochas. De acordo com alguns autores (e.g. Gibson et al., 1999; Milner e Le Roex, 1996; Ewart et al. 1998), a composição das rochas basálticas reflete a participação da pluma de Tristão da Cunha. Por outro lado, Hawkesworth et al. (1992), Comin-Chiaramonti et al. (1997), Peate et al. (1999) e Marques et al. (1999) propõem que essa pluma poderia ter contribuído apenas como fonte de calor para a fusão de manto litostérico. Mais recentemente, Ernesto et al. (2002), baseando-se em dados paleomagnéticos, geoquímicos e de anomalias de geóide, descartam a possibilidade de envolvimento da pluma de Tristão da Cunha até mesmo como fonte de calor para gerar o magmatismo.

Este trabalho apresenta os resultados da integração de dados geoquímicos, paleomagnéticos e geocronológicos obtidos no estudo dos diques toleíticos do Enxame da Serra do Mar e de sua relação com os derrames basálticos da Província Magmática do Paraná, com particular ênfase na investigação da participação de Tristão da Cunha na gênese desses diques.

2. Contexto Geológico

O Enxame de Diques da Serra do Mar (SM) localiza-se na região costeira dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro, estendendo-se até o Vale do Paraíba, sendo caracterizado pelo afloramento de centenas de diques orientados preferencialmente na direção N40-50°E, a qual coincide com as estruturas do embasamento pré-cambriano. Os diques são verticais a sub-verticais, sendo que alguns deles chegam a atingir mais de 15 km de comprimento e suas espessuras variam de poucos até várias dezenas de metros. Os diques frequentemente ocupam falhas, reativadas por esforços tencionais perpendiculares à direção costeira (Almeida, 1986).

As informações disponíveis na literatura indicam que os diques são em sua grande maioria de composição básica e natureza toleítica (Comin-Chiaramonti et al., 1983; Piccirillo et al. 1988; Hawkesworth et al., 1992; Garda, 1995; Marques, 2001), sendo caracterizados por apresentarem altos teores de titânio (ATi; TiO₂ > 3%). Diques mais diferenciados (SiO₂ entre 58 e 68%) foram identificados em uma área restrita do litoral norte de São Paulo (Bellieni et al., 1990).

Datações ⁴⁰Ar/³⁹Ar indicam que a fase principal de intrusão desses diques ocorreu entre 133 e 129 Ma (Turner et al., 1994; Deckart et al., 1998), coincidente com aquela dos diques de Ponta Grossa, sendo assinaladas também idades entre 125 e 120 Ma (Renne et al., 1993). Algumas idades K-Ar e ⁴⁰Ar/³⁹Ar recentemente obtidas por Guedes et al. (2005) evidenciaram que parte dos diques é bem mais antiga, sendo registradas idades entre 161 e 193 Ma, indicando que o magmatismo mesozóico da região pode ter iniciado no Jurássico.

Os estudos efetuados até o momento também não permitiram chegar a um consenso sobre as fontes mantélicas envolvidas na gênese dos diques toleíticos da Serra do Mar. De acordo com Valente (1997), esses diques assemelham-se aos derrames basálticos com alto titânio que ocorrem na parte norte da Província Magmática do Paraná. Por outro lado, Peate (1997) propõe que esses diques tenham sido alimentadores de derrames atualmente localizados em Angola, já que os diques investigados pelo autor não apresentam semelhanças geoquímicas com os derrames da parte norte da província. Os resultados obtidos por Marques et al. (2003) mostram que uma parte significativa dos diques ATi da Serra do Mar possui características geoquímicas distintas dos derrames da PMP, ou seja, esses diques não possuem equivalentes extrusivos na província.

4. Metodologias Analíticas

A amostragem foi efetuada nas regiões serranas e litorâneas, abrangendo desde as proximidades do Município de São Sebastião (litoral de São Paulo) até o município de São Sebastião do Paraiba, situado no Vale do Paraíba (Rio de Janeiro). Nesses trabalhos, cerca de 60 amostras de diques básicos de natureza toleítica foram coletadas para os estudos geoquímicos, paleomagnéticos e geocronológicos. Para a coleta de amostras para paleomagnetismo foi utilizado um amostrador portátil, com o qual foram coletados pelo menos 5 cilindros de cada dique. As orientações das amostras foram realizadas com bússolas magnética e solar.

As análises de elementos maiores, menores e alguns traços (Cr, Ni, Ba, Rb, Sr, Y, Nb e Zr) foram efetuadas por meio da técnica de fluorescência de raios X (espectrômetro Philips, modelo PW 1404), na Universidade de Trieste

(Itália), que fornece resultados com precisão relativa inferior a 5% para os elementos maiores e menores, situando-se geralmente entre 5 e 10% para os elementos traços. O método de ativação com nêutrons térmicos e epitérmicos, seguida de espectrometria gama de alta resolução, foi empregado para a determinação de elementos terras raras (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb e Lu) e outros elementos traços, tais como, Ta, Th, U, Hf, Cs, Sc e Co. Estas medidas foram realizadas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/São Paulo), adotando-se os procedimentos descritos em Marques et al. (1989) e Figueiredo e Marques (1989). Medidas de 10 alíquotas do padrão BCR-1 (USGS), realizadas ao longo das análises das amostras estudadas, indicaram que os valores de precisão são inferiores 10%, enquanto os de exatidão variaram entre 0,6 e 8% (Marques, 2001).

No estudo paleomagnético foram determinadas as direções de magnetização características de cada sítio (dique) de amostragem, através de desmagnetizações sucessivas por campos magnéticos alternados e desmagnetizações térmicas, com a subsequente medida da remanência. O estudo da mineralogia magnética das rochas revelou que os principais portadores da magnetização são titanomagnetitas oxidadas a altas temperaturas capazes de preservar a magnetização primária. Testes de contacto revelaram que os diques toleíticos não foram remagnetizados pela atividade ígnea mais jovem, de natureza alcalina e com idades do Cretáceo Superior ao Terciário.

4. Resultados e Discussão

Do ponto de vista macroscópico, os diques investigados apresentam coloração cinza escura a preta e encontram-se em sua grande maioria orientados na direção N50 - 65 E; raramente foram registradas direções EW e NS-NW. Suas espessuras variam de 0,3 a 100 metros, sendo as mais comuns aquelas inferiores a 50 metros. Naqueles mais espessos observa-se um nítido aumento da granulação em direção ao interior dos corpos. As bordas, devido ao rápido resfriamento, têm granulação muito fina a vítrea.

As texturas são variadas, com predominância das afaníticas a faneríticas finas e médias, por vezes levemente porfíricas. A mineralogia é dominada por plagioclásios (andesina-labradorita), clinopiroxênios (augita e subordinada pigeonita) e opacos (ilmenita e titano-magnetita), que ocorrem tanto como fenocristais e ou microfenocristais, como também na matriz. Apatita e biotita ocorrem como acessórios.

Conforme a nomenclatura química proposta por De La Roche et al. (1980), os diques analisados são representados por andesi-basaltos toleíticos e lati-andesitos, ocorrendo, de modo muito subordinado, andesitos toleíticos e latitos. As análises químicas mostram que a grande maioria dos diques possui conteúdo de TiO_2 acima de 3% (ATi), correspondendo a aproximadamente 85% dos litotipos investigados. Foram raramente encontrados diques com TiO_2 entre 2 e 3% (ITi). Somente em uma área relativamente restrita, nas proximidades de São Sebastião do Paraíba (RJ), foram encontrados diques toleíticos com TiO_2 inferior a 2% (BTi), perfazendo aproximadamente 10% dos diques amostrados.

Conforme já mostrado em estudos anteriores (Marques, 2001, Marques et al., 2003), os diques BTi apresentam as mesmas características geoquímicas dos derrames basálticos com baixo titânio do sul da PMP, afetados por processos de contaminação crustal (Piccirillo e McIff, 1988; Marques et al., 1989; Peate, et al., 1992), como também com os basaltos da Bacia de Campos (Misuzaki et al., 1992). A variabilidade geoquímica desses diques pode ser explicada por um processo de diferenciação por cristalização fracionada associada à assimilação crustal (processo AFC), em magmas em uma fonte mantélica com características geoquímicas semelhantes àquela que deu origem aos derrames da sub-província sul com $^{87}Sr/^{86}Sr_i \leq 0.7060$. É importante notar que, um processo AFC a partir de magmas semelhantes aos derrames com baixo titânio que ocorrem no norte (BTi-N) da província é incompatível com o comportamento apresentado pelo Ba, Nb, Ta e Sr nesses diques.

Os diques básicos ATi apresentam significativa variação composicional, com conteúdos de MgO entre 6 e 2%. Em termos das concentrações de Sr e Fe_2O_3 , nota-se que a grande maioria dos diques possui as mesmas características dos derrames ATi-N ($Sr < 550$ ppm), enquanto os demais são similares aos derrames ATi-S ($Sr > 550$ ppm). Por outro lado, verifica-se que nem todos os diques que possuem elevadas concentrações de Sr, apresentam altos valores das razões Ti/Y, típicos dos derrames ATi-S. Desta forma, há um número significativo de diques, geralmente representados por lati-andesitos, que apresentam características geoquímicas diferentes daquelas normalmente encontradas nos derrames basálticos da Bacia do Paraná. Cabe destacar que todos os diques ITi ($2\% < TiO_2 \leq 3\%$), como também todos os ATi de natureza transicional (lati-basaltos e latitos), apresentam esse mesmo tipo de comportamento geoquímico, ou seja, possuem altas concentrações de Sr e valores relativamente baixos de Ti/Y.

As características geoquímicas e as razões isotópicas iniciais de Sr deste grupo de diques, que não possuem equivalente extrusivo na PMP, mostram que esses magmas foram afetados por significativos processos de contaminação crustal, que mascararam as características geoquímicas originais, causando também uma diminuição na razão Ti/Y, que foi utilizada para discriminar este conjunto. Portanto, estes diques podem representar uma variedade "contaminada" dos derrames ATi-S, mas requerendo contaminantes específicos para explicar sua leve tendência transicional. Esta tendência pode também ser resultante de fusão parcial de menor grau envolvendo uma fonte mantélica similar à que originou os derrames ATi-S, ou ainda, uma fonte com características geoquímicas levemente distintas.

Os resultados paleomagnéticos indicam que os diques adquiriram magnetização durante diferentes intervalos de polaridade normal e reversa. Os polos geomagnéticos virtuais calculados a partir das direções de magnetização de cada sítio, mostram dispersão maior do que aquela esperada devido às variações de longo período do campo geomagnético e o pólo paleomagnético, assim calculado, não corresponde aos polos do Cretáceo Inferior da América do

Sul. Entretanto, quando o conjunto de dados é subdividido, levando-se em consideração os diques que possuem características geoquímicas similares aos derrames da província e aqueles que não possuem equivalentes efusivos na PMP, os dois conjuntos de dados mostram dispersões menores e os pólos paleomagnéticos coincidem com pólos do Cretáceo Inferior e Jurássico, respectivamente.

Reconstruções paleomagnéticas baseadas nesses novos dados, bem como em dados já disponíveis para o Mesozóico da América do Sul, revelam que, tanto a pluma de Tristão da Cunha, como a de Trindade, geralmente evocadas como participantes no processo gerador do magmatismo Mesozóico do Sudeste do Brasil, não estiveram em posições favoráveis, relativamente à Placa Sul-Americana, para que pudessem ter sido responsáveis por esse magmatismo, seja na forma de suprimento de calor ou massa.

5. Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio financeiro das agências brasileiras FAPESP, PADCT-FINEP e CNPq, e italianas MURST e CNR.

6. Referências

- ALMEIDA, F.F.M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 16(4), p. 325-349, 1986.
- BELLIENI, G., MONTES-LAUAR, C.R., DE MIN, A., PICCIRILLO, E.M., CAVAZINNI, G., MELFI, A.J., PACCA, I.G. Early and Late Cretaceous magmatism from São Sebastião island (SE-Brazil): geochemistry and petrology. *Geochimica Brasiliensis*, v. 4(1), p. 59-83, 1990.
- COMIN-CHIARAMONTI, P.; GOMES, C.B.; PICCIRILLO, E.M.; RIVALENTI, G. High TiO₂ dikes in the coastline of São Paulo and Rio de Janeiro States. *Neues Jahrb. Mineral. Abh.*, v. 146(2), p. 133-150, 1983.
- COMIN-CHIARAMONTI, P., CUNDARI, A., PICCIRILLO, E.M., GOMES, C.B., CASTORINA, F., CENSI, P., DE MIN, A., MARZOLI, A., SPEZIALE, S., VELÁZQUEZ, V.F. Potassic and sodic igneous rocks from Eastern Paraguay: their origin from the lithospheric mantle and genetic relationships with associated Paraná flood tholeiites. *Journal of Petrology*, v. 38(4), p. 495-528, 1997.
- DECKART, K., FÉRAUD, G., MARQUES, L.S., BERTRAND, H. New time constraints on dyke swarms related to the Paraná-Etendeka magmatic province, and subsequent South Atlantic opening, southeastern Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 80, p. 67-83, 1998.
- DE LA ROCHE, H., LETERRIER, P., GRANDCLAUDE, P., BERTRAND, H. A classification of volcanic and plutonic using R1-R2 diagram and major element analysis. Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, v. 29, p. 183-210, 1980.
- ERNESTO, M., MARQUES, L.S., PICCIRILLO, E.M., MOLINA, E.C., USSAMI, N., COMIN-CHIARAMONTI, P., BELLINI, G. Paraná Magmatic Province-Tristan Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic considerations and alternative heat sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 118, p. 15-36, 2002.
- EWART, A., MILNER, S.C., ARMSTRONG, R.A., DUNCAN, A.R. Etendeka volcanism of the Goboboseb Mountains and Messum Igneous Complex, Namibia. Part I: geochemical evidence of Early Cretaceous Tristan plume melts and the role of crustal contamination in the Paraná-Etendeka CFB. *Journal of Petrology*, v. 39(2), p. 191-225, 1998.
- FIGUEIREDO, A.M.G., MARQUES, L.S. Determination of rare earths and other trace elements in the Brazilian geological standards BB-1 and GB-1 by neutron activation analysis. *Geochimica Brasiliensis*, v. 3, p. 1-8, 1989.
- GARDA, G.M. Os diques básicos e ultrabásicos da região costeira entre as cidades de São Sebastião e Ubatuba, Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 1995.
- GIBSON, S.A., THOMPSON, R.N., LEONARDOS, O.H., DICKIN, A.P., MITCHELL, J.G. The limited extent of plume-lithosphere interactions during continental flood-basalt genesis: geochemical evidence from Cretaceous magmatism in southern Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 137, p. 147-169, 1999.
- GUDES, E., HEILBRON, M., VASCONCELOS, P.M., VALERIANO, C.M., ALMEIDA, J.C.H., TEIXEIRA, W., THOMAZ FILHO, A. K-Ar and ⁴⁰Ar/³⁹Ar ages of dikes emplaced in the onshore basement of the Santos Basin, Resende Area, SE Brazil: implications for the South Atlantic Opening and Tertiary reactivation. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 18, p. 371-382, 2005.
- HAWKESWORTH, C.J., GALLAGER, K., KELLEY, S., MANTOVANI, M.S.M., PEATE, D., REGELOUS, M., ROGERS, N. Paraná magmatism and the opening of the South Atlantic. In: Storey, B.; Alabaster, A.; Pankhurst, R. (Eds.), *Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. Geological Society Special Publication, v. 68, p. 221-240, 1992.
- MARQUES, L.S. Geoquímica dos diques toleíticos da costa sul-sudeste do Brasil: contribuição ao conhecimento da Província Magmática do Paraná. Tese de Livre Docência, Departamento de Geofísica, IAG-USP, 2001.

- MARQUES, L.S., PICCIRILLO, E.M., MELFI, A.J., COMIN-CHIARAMONTI, P., BELLINI, G. Distribuição de terras raras e outros elementos traços em basaltos da Bacia do Paraná (Brasil Meridional). *Geochimica Brasiliensis*, v. 3, p. 33-50, 1989.
- MARQUES, L.S., DUPRÉ, B., PICCIRILLO, E.M. Mantle source compositions of the Paraná Magmatic Province: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Journal of Geodynamics*, v. 28, p. 439-459, 1999.
- MARQUES, L.S., PICCIRILLO, E.M., BELLINI, G., FIGUEIREDO, A.M.G., DE MIN, A. Caracterização geoquímica dos diques básicos mesozóicos de natureza toleítica da costa sudeste do Brasil. In: *IX Congresso Brasileiro de Geoquímica*. Livro de Resumos, p. 652-654, 2003.
- MILNER, S.C., LE ROEX, A.P. Isotope characteristics of the Okenyena igneous complex, northern Namibia: constraints on the composition of the early Tristan Plume and the origin of the EMI mantle component. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 141, p. 277-291, 1996.
- MIZUSAKI, A.M.P., PETRINI, R., BELLINI, G., COMIN-CHIARAMONTI, P., DIAS, J., DE MIN, A., PICCIRILLO, E.M. Basalt magmatism along the passive continental margin of SE Brazil (Campos Basin). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 111, p. 143-160, 1992.
- PEATE, D.W., HAWKESWORTH, C.J., MANTOVANI, M.S.M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas, South America: classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, v.55, p. 119-139, 1992.
- PEATE, D.W. The Paraná-Etendeka Province. In: *Mahoney, J.J. & Coffin, M. (eds.), Large Igneous Provinces. American Geophysical Union Geophysical Monograph Series*, v. 100, p. 217-245, 1997.
- PEATE, D.W., HAWKESWORTH, C.J., MANTOVANI, M.S.M., ROGERS, N.W., TURNER, S.P. Petrogenesis and stratigraphy of the high-Ti/Y Urubici magma type in the Paraná flood basalt province and implications for the nature of 'Dupal'-type mantle in the South Atlantic region. *Journal of Petrology*, v. 40(3), p. 451-473, 1999.
- PICCIRILLO, E.M., MELFI, A.J. The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. Instituto Astronômico e Geofísico - University of São Paulo, 600 p., São Paulo, 1988.
- PICCIRILLO, E.M., COMIN-CHIARAMONTI, P., MELFI, A.J., STOLFA, D., BELLINI, G., MARQUES, L.S., GIARETTA, A., NARDY, A.J.R., PINESE, J.P.P., RAPOSO, M.I.B., ROISENBERG, A. Petrochemistry of continental flood basalt-rhyolite suites and intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: PICCIRILLO, E.M., MELFI, A.J. (eds.), *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects*. Instituto Astronômico e Geofísico - University of São Paulo, 107-156, 1988.
- RENNE, P.R., MERTZ, D.F., ERNESTO, M., MARQUES, L.S., TEIXEIRA, W., ENS, H.H., RICHARDS, M.A. Geochronologic constraints on magmatic and tectonic evolution of the Paraná Province. *EOS. American Geophysical Union*, v. 26, p. 553, 1993.
- TURNER, S., REGELOUS, M., KELLEY, S., HAWKESWORTH, C., MANTOVANI, M. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: high precision ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 121, p. 333-348, 1994.
- VALENTE, S.C. Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of the Cretaceous dykes of Rio de Janeiro, Brazil. Ph.D. Thesis. The Queen's University of Belfast, 1997.