UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Antecristais e xenocristais máficos em diques ultrabásicos de
tendência alcalina da serra da Mantiqueira (SP)**

JÚLIO CÉSAR LOPES DA SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Mineralogia e
Petrologia para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de concentração: Petrologia Ígnea e
Metamórfica

Orientador: Prof. Dr. Rogério Guitarrari
Azzone

SÃO PAULO
2018

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Lopes da Silva, Júlio César

Antecristais e xenocristais máficos em diques
ultrabásicos de tendência alcalina da serra da
Mantiqueira (SP) / Júlio César Lopes da Silva;
orientador Rogério Guitarrari Azzone. -- São Paulo,
2018.

186 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Mineralogia e Petrologia) -- Instituto de
Geociências, Universidade de São Paulo, 2018.

1. Antecristais. 2. Xenocristais. 3. Complex
Plumbing System. 4. Lamprófiros. 5. Província
Alcalina Serra do Mar. I. Guitarrari Azzone,
Rogério, orient. II. Título.

Dedico esta dissertação a Leila, João e Maria, de onde pequenino, porém
efusivo, saí. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao universo por conspirar a minha realidade.

Não menos importante é minha gratidão a todos que fizeram parte da minha vida durante a construção deste trabalho.

Destaco e saúdo quem, durante o meu dia a dia, realizou tarefas que são naturalmente de uma mãe. Neste universo, tiveram pessoas que com um sorriso, um aceno, um aperto de mão ou uma lágrima, vibraram ao meu lado. Sou inteiramente grato a vocês.

Ao meu lado, meus amigos, que nunca, inconsistentemente, mediram esforço quando a tarefa era me ajudar. Na presença de vocês eu me elevei e sou agora o reflexo de nossa irmandade, seja na PG, IGc, CRUSP, USP, Rural, Rio, Cruzeiro e em qualquer outro lugar. Zé R., Will N., Esqueleto R.C., Thomas K., Fernando, Stepanhi, Verde R., Ari, M. Pexe, J. Francês, Zuri I., Pedrão, F. Conejo, P. Komodo, D. Muaytai, J. Poney, Calote L., Carlera, Rasta N., Funga A., César, Mariana, Camila S., Porra P., Massari, Vanessa M., Fofona C., Biloba R., Ney, L. Gambá, Coroinha R., M. Grega, Astrid, Maria Isabel, Bárbara, Lina, Anny, Piqueno A., Lanes I., Gordo G., Careca M., Busca V., Camijah, Ximpá G., Coruja P., Bilú L., Júlia, Família L., Anão T., Dug L., Banana J. e Rapoza V., brindo a vocês pelas inesquecíveis noitadas, cafés, gargalhadas e partidas de xadrez nestes últimos anos.

Emocionado, agradeço a minha família, especialmente a Sofia, Joana, Leila, Maria C., João, e Maria A. Incandescente é meu orgulho quando lembro que sou fruto de vocês e é pra vocês que meu sol brilha todos os dias.

Formalmente, gostaria de agradecer:

A Superintendência de Serviço Social da USP por ter-me recebido e acolhido durante a construção deste trabalho. Cordinalmente a Natália C.

Aos servidores dos laboratórios do IGc-USP, pelo exímia ajuda na execução analítica deste trabalho. Especialmente para aqueles que tive o prazer do

contato direto, Marcos, Leandro, Samuel, José Paulo, Vinícius e Audrey, deixo aqui meus sinceros agradecimentos.

Ao Museu de Geociências no IGc-USP, a turma de Dinâmica do Sistema Terra I 2017/1 e ambos os responsáveis, Miriam e Ideval, Christine e Gaston pelo meu despertar a educação e extensão da geociências.

Aos demais servidores, professores e alunos do IGc, das bibliotecas e da USP pelo magnífico suporte dia após dia.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa durante meus estudos.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento dos projetos 2012/06082-6 e 2017/03768-8 que custaram a parte analítica do meu projeto.

Ao Prof. Dr. Rogério Guitarrari Azzone pela inúmeras discussões que me guiaram no andar dos meus primeiros passos na ciência e que me mostraram a responsabilidade por trás do verdadeiro potencial.

Ciência nada mais é que arte definida.

A. Jr & J. Lopes

RESUMO

Lopes, J.C.S., 2018, Antecristais e xenocristais máficos em diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira (SP) [Dissertação de Mestrado], São Paulo, Instituto de Geociências, 186p.

Séries de diques máficos alcalinos fortemente a levemente insaturados em sílica ocorrem nas cercanias de Santo Antônio do Pinhal (SP) e Campos do Jordão (SP) na serra da Mantiqueira, SE Brasil. Estes intrudem o embasamento cristalino precambriano (Sul do Orógeno Brasília) e a intrusão máfica-ultramáfica alcalina Ponte Nova. Estas rochas alcalinas são cretáceas e compõe o magmatismo da província alcalina Serra do Mar. Em sua maioria os diques são classificados como basaltos alcalinos e lamprófiros alcalinos. São porfiríticos, com a população de macrocristais formada principalmente por clinopiroxênio e olivina. Subordinadamente, macrocristais de kaersutita, sadanagaita rica em titânio, e ocasionalmente, flogopita, enstatita, magnetita, espinélio e plagioclásio são registrados. Estes apresentam texturas de desequilíbrio, como *sieve* e *embayment*, que associadas a estilos de zonamento complexos, indicam evolução magmática em sistema aberto. Este estudo envolve: (1) petrografia de detalhe por microscopia ótica e microscopia eletrônica de varredura, (2) análises químicas pontuais quantitativas, de elementos maiores e menores por microsonda eletrônica e de elementos-traço por espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente e amostrador por ablação a laser (LA-ICP-MS), em diferentes horizontes dos macrocristais máficos, e (3) geoquímica de rocha-total por fluorescência de raios X e ICP-MS. Estas análises foram realizadas com vistas à determinação da gênese destas populações de cristais zonados. A partir das composições obtidas, balanços de massa foram realizados para excluir a influência dos macrocristais nas composições globais dos corpos e obter uma estimativa composicional dos líquidos magmáticos, representados pela matriz fina a afanítica nestas rochas. Os horizontes cristalinos dos macrocristais em equilíbrio com os líquidos calculados foram determinadas por meio da constante de equilíbrio de troca catiônica de Mg e Fe entre cristal e líquido, $Kd_{Fe^{2+}-Mg^{2+}}^{C/L}$. Estas relações de equilíbrio permitiram atribuir significados genéticos aos horizontes cristalinos, definindo-os como xenocristais, antecristais e fenocristais. Os primeiros (em desequilíbrio textural e químico com o a matriz) foram capturados e/ou

reciclados de ambientes magmáticos precoces à consolidação da rocha, permitindo acessar processos magmáticos passados durante a evolução do sistema magmático. Xenocristais mantélicos foram indentificados exclusivamente em diques da suíte fracamente insaturada em sílica. Macrocristais de olivina zonada com centros Fo>90 e textura *embayment*, encontram-se ao lado de macrocristais de clinopiroxênio zonado com centro de diopsídio com cromo incolor, anédrico, com zonamento concêntrico *step* normal. Estes centros de diopsídio com cromo apresenta mg# (Mg/Mg+Fe_T em proporção molecular) 88-87, alto Ni, baixo Na₂O, Al₂O₃, TiO₂, Zn, Sc, Hf, Y, Zr, Sr e elementos terras raras (ETRs), compatíveis com peridotitos fáceis granada. Nessa mesma ocorrência, centros de macrocristais de piroxênio são classificados como enstatita e apresentam textura *sieve*, zonamento concêntrico *step* reverso, altos teores de MnO, Ni, Zn e muito baixos de ETRs. Quanto aos antecristais, cristais em desequilíbrio químico e textural com a matriz mas cogenéticos ao sistema magmático, os clinopiroxênios destacam-se. Os centros desses macrocristais são classificados como diopsídio (por vezes com cromo ou com sódio), augita, hedenbergita e egrina-augita. O diopsídio é incolor, subédrico, com textura glomeroporfirítica, *sieve*, zonamento setorial e concêntrico *step* reverso. Este centro antecristalino incolor apresenta alto mg# (83-80), Cr₂O₃, Ni, Sc, baixo Na₂O, Zn e valores intermediários de Zr, Y, Hf e Sr, quando comparado aos demais antecristais. Centros verdes de augita e egrina-augita são encontrados nos diques de ambas às séries e apresentam textura *embayment*, *sieve* e zonamento concêntrico *step*. No geral os centros verdes tem baixo mg# (70-40), Cr₂O₃, alto MnO, Na₂O, Zn, mas diferentes teores de MnO, Na₂O, Li, Sc, Hf, Y, Zr, Sr e ETRs. Ti-augita, quimicamente classificada como diopsídio subsilícico com titânio, é euédrico, com textura glomeroporfirítica, zonamento concêntrico oscilatório e setorial e observada como borda em todos os macrocristais de clinopiroxênio, além de compor a matriz e agregados (textura glomeroporfirítica) com macrocristais subédricos de olivina (Fo<88). Os cristais destes tipos, em desequilíbrio químico com a matriz hospedeira mas com texturas de cogeneticidade ao sistema magmático, são antecristais do estágio magmático principal, que também é responsável por cristalizar os horizontes de diopsídio subsilícico com titânio em equilíbrio químico com o líquido hospedeiro. Kaersutita euédrica a subédrica, com textura glomeroporfirítica, esquelética e zonamento concêntrico oscilatório é o cristal predominante nos lamprófiros alcalinos. Este também ocorre como macrocristal

anédrico com textura *sieve* em alguns diques de olivina basalto. Nos anfibólios destaca-se o enriquecimento em Ba, Sr, Y, Nd, Zr e ETRs inversamente proporcional ao MgO. Flogopitas com titânio são observadas principalmente na matriz dos diques máficos alcalinos da Mantiqueira. Porém macrocristais são raros e observados com zonamento concêntrico *step* e setorial. Nos cristais de flogopita da matriz, ao aumento de vacância no plano octaédrico é proporcional as altas concentrações de Ti, Nb, Zr, Sr, Y e Li, quando comparado ao macrocristais. Os xenocristais de olivina e diosídeo com cromo, encontrados nos diques máficos da série fracamente insaturada em sílica, indicam incorporação de rocha encaixante mantélica e/ou da fonte. Já os magmas máficos fortemente insaturados em sílica se mostraram híbridos, a partir de modelagem com elementos-traço, entre a mistura de líquidos ultrabásicos alcalinos e fonolíticos/traquíticos, responsáveis por cristalizar, em estágios precoces, os antecristais de clinopiroxênio nos diques. Um estágio principal, em menor profundidade, é indicado pela presença em todos os diques de fenocristais e antecristais de diopsídeo subsílico com titânio como borda, macrocristal isolado ou com textura glomeroporfirítica, cristal na matriz, sendo, por vezes, associado a olivina e anfibólio. Esta diversidade de macrocristais pode ser explicada pelo modelo *complex plumbing system*, onde a interconexão entre diferentes magmas, ao longo de distintos estágios, com diversas encaixantes, sob profundidades diferentes da litosfera, se mostra eficiente na produção das feições petrográficas e químicas destas rochas por meio dos processos de mistura de magmas e incorporação da rocha encaixante durante a ascensão litosférica dessas magmas ultrabásicos alcalinos do Cretáceo na região ocidental da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.

Palavras-chave: Antecristais, Xenocristais, Complex Plumbing System, Lamprófiros, Província Alcalina Serra do Mar.

ABSTRACT

Lopes, J.C.S., 2018, Mafic antecrysts and xenocrysts in alkaline ultrabasic dykes of the Mantiqueira range (SP) [Master's Thesis], São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 186p.

Weakly to strongly silica-undersaturated mafic alkaline dike series occur nearby Santo Antonio do Pinhal (SP) and Campos do Jordão (SP) in a restricted area of the Mantiqueira range, SE Brazil. These are intrusive in the Precambrian crystalline basement (south of the Brasília orogen) and in the Ponte Nova mafic-ultramafic alkaline massif. These are Cretaceous rocks and are grouped as part of the Serra do Mar alkaline province. In the majority, the dikes are classified as alkaline basalts and alkaline lamprophyres. Are porphyritic, with the macrocryst population having clinopyroxene and olivine as main phases. Subordinatedly, kaersutite, and occasionally, phlogopite, enstatite, magnetite, spinel and plagioclase were found. These macrocrysts present disequilibrium textures, such as sieve and embayment, combined with complex zoning styles, which indicate a open-system magmatic evolution. The study involves: (1) detailed petrographic analyses by optical microscopy and scanning electron microscopy, (2) quantitative punctual analyses of major and minor elements by electron microprobe and trace element by laser ablation - inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) in different horizons of the main macrocrystic phases, and (3) whole-rock geochemistry by X-ray fluorescence and ICP-MS. These determinations were collected focusing in the determination of the genesis of each population of zoned crystals. From the obtained compositions, mass balance calculations were done to exclude the macrocryst influence in the bulk compositions of the bodies and to have a compositional estimative of the melts, represented by the fine-grained to aphanitic matrices of these rocks. The crystalline zones of macrocrysts in equilibrium with the calculated melts were defined using the Mg-Fe exchange equilibrium constant between minerals and liquid, $Kd_{Fe^{2+}-Mg^{2+}}^{C/L}$. The equilibrium relationships allowed the designation genetic meanings to the the crystalline zones, being these classified as xenocrysts, antecrysts and phenocrysts. The first two types (in textural and chemical disequilibrium with the matrices) were captured and/or recycled from an early magmatic environment, allowing to access the former magmatic processes during the

evolution of the system. Mantle xenocrysts were just identified in dikes from the weakly silica-undersaturated series. Macrocrysts of zoned olivine with cores having $Fo > 90$ and embayment texture were found together with zoned clinopyroxene macrocrysts, presenting incolor, anhedral Cr-diopside cores with normal concentric step zoning. These Cr-diopside cores have $mg\#$ ($Mg/(Mg+Fe_T)$ in molecular proportions) 88-87, high Ni values and low Na_2O , Al_2O_3 , TiO_2 , Zn, Sc, Hf, Y, Zr, Sr and rare earth elements (REEs). These compositions are compatible with the garnet peridotite facies. On the same occurrence, cores of macrocrystic pyroxene are classified as enstatite and present sieve texture, concentric reverse step zoning, and high levels of MnO, Ni, Zr and very low of REEs. Antecrysts, crystals in chemical and textural disequilibrium with the matrices but cogenetic to the magmatic system, were mainly formed by cores of clinopyroxene macrocrysts. The cores of these ones are classified as diopside (sometimes Cr-bearing or Na-bearing), augite, hedenbergite and aegirine-augite. The diopside is incolor, subhedral, with glomeroporphyritic and sieve textures, setorial and concentric reverse step zonings. They present higher $mg\#$ (83-80), Cr_2O_3 , Ni, Sc values, lower Na_2O and Zn, and intermediate Zr, Y, Hf and Sr concentrations when compared to the other antecryst. Green cores of augite and aegirine-augite are found in dikes of all series and present embayment and sieve textures and concentric step zoning. These have low $mg\#$ (70-40), Cr_2O_3 , high MnO, Na_2O and Zn, but wide ranges of MnO, Na_2O , Li, Sc, Hf, Y, Zr, Sr and REEs. Ti-augite, chemically classified as subsilicic Ti-bearing diopside, is euhedral, with concentric oscillatory and setorial zonings and found as rims in all clinopyroxene macrocrysts, as matrix crystals and as aggregates (glomeroporphyritic texture) with subhedral olivine macrocrysts ($Fo < 88$). Some of these zones are in chemical disequilibrium with the matrix but with textural equilibrium of magmatic system, being classified as antecrysts from a former magmatic stage. Other horizons of Ti-augite are phenocrysts, in chemical equilibrium with the host melt. Euhedral to subhedral kaersutite, with glomeroporphyritic and skeletal textures and oscillatory concentric zoning is predominant in alkaline lamprophyres. Anhedral kaesutite crystals with sieve texture occurs as macrocrysts in some olivine basalts dikes. In these amphiboles, the enrichment in Ba, Sr, Y, Nd, Zr and REEs present negative correlation with MgO contents. Ti-bearing phlogopites are found mainly in the matrices of the mafic dikes from the Mantiqueira range. However, macrocrysts are rare and found with anhedral habit and concentric step and setorial zonings. The

increase of vacancies in octahedric plane of the matrix crystals phlogopite is proportional with the concentrations of Ti, Nb, Zr, Sr, Y and Li, when compared with the macrocryst compositions. The olivine and Cr-diopside xenocrysts found in the mafic dikes from the weakly sílica-undersaturated series indicate the incorporation of mantle host rocks and/or source rocks. Otherwise, the magmas from the strongly sílica-undersaturated series are considered hybrids, based on the trace-element mixing modelling of alkaline ultrabasic and phonolitic/trachytic melts. These compositionally contrasting liquids are the responsible for the crystallization, in the earlier stages, of the different families of clinopyroxene antecrysts. One main stage, at lower depth, is indicated by the presence of phenocrysts and antecrysts of Ti-augite as rims, isolated or aggregate macrocrysts and matrix crystals, sometimes associated with olivine and amphiboles. This macrocryst diversity can be explained by the complex plumbing system model. In this model, the interconnection between several magma reservatories along distinct evolution stages, with different host rocks during their ascent under several depths in the lithosphere, is considered a efficient way to explain the petrographic and chemical features found in these rocks. Processes of magma mixing and the incorporation of host rocks during the lithospheric ascent are registere for the alkaline Cretaceous dikes of the Mantiqueira range, Serra do Mar alkaline province.

Keywords: Antecrysts, Xenocrysts, Complex Plumbing System, Lamprophyres, Serra do Mar Alkaline Province.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	<i>Rochas alcalinas cretáceas da Serra da Mantiqueira, PASM</i>	2
1.2	<i>Contexto magmático dos diques da Serra da Mantiqueira</i>	8
1.3	<i>Objetivo e estrutura da dissertação</i>	10
2	METODOLOGIA ANALÍTICA	12
2.1	<i>Petrografia</i>	12
2.2	<i>Microsonda Eletrônica (ME)</i>	13
2.3	<i>Espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente e amostrador por ablação a laser (LA-ICP-MS)</i>	14
2.4	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	16
2.5	<i>Litogeoquímica</i>	17
2.5.1	<i>Preparação da amostra</i>	17
2.5.2	<i>Fluorescência de raios X (FRX)</i>	18
2.5.3	<i>Espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS)</i>	18
3	RESULTADOS	19
3.1	<i>Petrografia</i>	19
3.2	<i>Classificação petrográfica</i>	52
3.2.1	<i>Minerais da matriz/mesóstase</i>	52
3.2.2	<i>Minerais dos ocelos e amígdalas</i>	52
3.3	<i>Litogeoquímica</i>	54
3.4	<i>Química Mineral</i>	56
3.4.1	<i>Olivina</i>	57
3.4.2	<i>Piroxênio</i>	59
3.4.3	<i>Anfibólio</i>	75
3.4.4	<i>Mica</i>	79
4	DISCUSSÃO	85
4.1	<i>A matriz e o equilíbrio cristal e líquido hospedeiro</i>	87
4.1.1	<i>Xenocristais</i>	95
4.1.1.1	<i>Enstatita</i>	95
4.1.1.2	<i>Olivina</i>	96
4.1.1.3	<i>Diopsídio com cromo</i>	96
4.1.2	<i>Antecristais</i>	97
4.1.2.1	<i>Olivina</i>	97
4.1.2.2	<i>Clinopiroxênio</i>	98
4.1.2.3	<i>Anfibólio</i>	102

4.1.2.4 Flogopita com titânio.....	103
4.1.3 <i>Fenocristais</i>	104
4.1.3.1 Diopsídio subsilícico com Ti.....	104
4.1.3.2 Kaersutita.....	104
4.2 Complex Magmatic Plumbing System	105
4.2.1 <i>A incorporação de xenocristais e inferências sobre a fonte</i>	106
4.2.2 <i>A mistura de magmas ultrabásicos alcalinos e fonolíticos/traquíticos</i>	107
4.2.3 <i>Síntese do sistema magmático aberto nos diques ultrabásicos alcalinos da Mantiqueira (PASM)</i>	110
5 CONCLUSÕES	114
6 REFERÊNCIAS	116
APÊNDICES	125
Apêndice 1 Composição dos principais óxidos e formula estrutural das olivinas dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	126
Apêndice 2 Composição química dos principais óxidos e formula estrutural dos piroxênios dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	131
Apêndice 3 Composição dos principais óxidos e formula estrutural dos anfibólios de diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	150
Apêndice 4 Composição dos principais óxidos e formula estrutural das micas dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	156
Apêndice 5 Composição dos elementos-traço das olivinas dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	161
Apêndice 6 Composição de elementos-traço dos piroxênios dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	163
Apêndice 7 Composição de elementos-traço nos anfibólios dos diques ultrabásicos alcalinos da Mantiqueira, PASM.....	172
Apêndice 8 Composição de elementos-traço das micas dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	174
Apêndice 9 Média dos padrões das análises de La-ICP-MS e valores preferidos destes segundo o GeoReM.....	175
Apêndice 10 Litogeoquímica e norma <i>CIPW</i> dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	183
Apêndice 11 Média composicional dos macrocristais subtraídos das análises de rocha-total no cálculo da matriz dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM.....	184

Apêndice 12 Proporção de macrocristais subtraídos da análise de rocha-total para a estimativa composicional da matriz dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	185
--	-----

Apêndice 13 Composição química e norma CIPW da matriz dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira (PASM).....	186
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Relação genética entre cristais e líquido hospedeiro durante a evolução de um sistema magmático, modificado de Davidson <i>et al.</i> (2007).....	3
Figura 1.2 Principais ocorrências Meso-Cenozoicas da província alcalina Serra do Mar (PASM) no SE do Brasil (A) e diques adjacentes ao maciço máfico-ultramáfico Ponte Nova na porção ocidental da serra da Mantiqueira (B).....	6
Figura 1.3 Diagrama ternário simplificado de equilíbrio entre fases do sistema nefelina-diopsídio-sílica em pressão atmosférica, modificado Schairer & Yoder (1960).....	9
Figura 3.1 Diques máficos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, Província Alcalina Serra do Mar (PASM). Amostras MT-64A (A) e MT-74F (B).....	26
Figura 3.2 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de piroxênios de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-64A.....	27
Figura 3.3 Fotomicrografias e imagens <i>BSE</i> de piroxênios e olivinas de diques máficos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM. Amostras MT-64A (A-D) e MT-74F (E-H).....	28
Figura 3.4 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de olivinas de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-64A.....	29
Figura 3.5 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de piroxênios, mesóstase e espinélio de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM. Amostra MT-74F.....	31
Figura 3.6 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de olivinas de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-74F.....	32
Figura 3.7 Diques máficos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostras MT-74E (A) e MT-73C (B).....	33
Figura 3.8 Fotomicrografias (A, C, E, G e H) e imagens <i>BSE</i> (B, D e F) de olivinas de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-74E.....	34
Figura 3.9 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de piroxênios de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-74E.....	36
Figura 3.10 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de olivinas de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-73C.....	37
Figura 3.11 Fotomicrografias (A, C, E, G e H) e imagens <i>BSE</i> (B, D e F) de piroxênios de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-73C.....	38

Figura 3.12 Diques máficos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar (PASM). Amostras MT-74B (A) e MT-68F (B).....	40
Figura 3.13 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D,F e H) de anfibólios de diques máficos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM. Amostras MT-74B (A-F) e MT-73C (G-H).....	41
Figura 3.14 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D,F e H) de piroxênios de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-74B.....	42
Figura 3.15 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D,F e H) de anfibólios de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-68F.....	44
Figura 3.16 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de piroxênios e olivinas de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM. Amostra MT-68F.....	45
Figura 3.17 Diques máficos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostras MT-75 (A) e MT-79A (B).....	46
Figura 3.18 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D,F e H) de piroxênios de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-75.....	47
Figura 3.19 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de macrocristais, matriz e ocelo de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM. Amostra MT-75.....	48
Figura 3.20 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de piroxênios de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar. Amostra MT-79A.....	50
Figura 3.21 Fotomicrografias (A, C, E e G) e imagens <i>BSE</i> (B, D, F e H) de macrocristais e amídalas de dique máfico de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM. Amostra MT-79A.....	51
Figura 3.22 Classificação química, caráter magmático (A) e assinatura de ETRs normalizadas (B) dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da porção ocidental da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar (PASM).....	55
Figura 3.23 Composição química das olivinas dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	60
Figura 3.24 Classificação dos piroxênios dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, segundo Morimoto (1988).....	62
Figura 3.25 Composição dos principais cátions, por unidade fundamental cristalina, dos piroxênios dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM....	66
Figura 3.26 Composição química de menor e traços em ppm dos piroxênios de diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	67

Figura 3.27 Assinatura de elementos terras raras (ETRs) normalizadas ao condrito dos piroxênios de diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM.....	68
Figura 3.28 Principais constituintes químicos dos anfibólios de diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	78
Figura 3.29 Composição química de maior, menores e traços dos anfibólios de diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	80
Figura 3.30 Concentração de terras raras (A) e outros elementos-traço (B), normalizados ao condrito, em anfibólios de diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	81
Figura 3.31 Principais constituintes químicos e classificação das micas dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM.....	83
Figura 3.32 Composição química das flogopitas dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	84
Figura 4.1 Simplificação de sistemas magmáticos indicando o zonamento esperado nos macrocristais das rochas vulcânicas e subvulcânicas.....	86
Figura 4.2 Classificação química da matriz dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	89
Figura 4.3 Diagrama binário de dispersão Fo <i>versus</i> Mg# do líquido entre olivinas e matriz hospedeira nos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	91
Figura 4.4 Diagrama binário de dispersão Mg# do cristal <i>versus</i> Mg# do líquido entre clinopiroxênios e matriz hospedeira nos diques ultrabásicos alcalinos da Mantiqueira, PASM.....	92
Figura 4.5 Diagrama binário de dispersão Mg# do cristal <i>versus</i> Mg# do líquido entre anfibólio e matriz hospedeira nos diques ultrabásicos alcalinos da Mantiqueira, PASM.....	93
Figura 4.6 Diagrama binário de dispersão Mg# do cristal <i>versus</i> Mg# do líquido entre flogopita e matriz hospedeira nos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	94
Figura 4.7 Diagrama de dispersão binário entre as razões Zr/Sr e La/Nb (ppm), com curvas de mistura simples entre líquidos máficos alcalinos e fonolíticos/traquíticos em equilíbrio químico com os antecristais dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira, PASM.....	110
Figura 4.8 Evolução esquemática do sistema aberto nos diques ultrabásicos de tendência alcalina da porção ocidental da serra da Mantiqueira, PASM.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Síntese de zonamentos, texturas, termos genéticos e descritivos utilizados nesse trabalho.....	4
Tabela 2.1 Condições analíticas dos minerais olivina, piroxênio, anfibólio e mica durante as quantificações <i>WDS</i> por microsonda eletrônica.....	15
Tabela 2.2 Condições analíticas dos minerais olivina, piroxênios, anfibólio e mica durante as quantificações por <i>LA-ICP-MS</i>	16
Tabela 3.1 Sumário petrográfico das rochas subvulcânicas máficas da porção ocidental da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	20
Tabela 3.2 Sumário petrográfico dos diques máficos de tendência alcalina da porção ocidental da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar (PASM).....	53
Tabela 3.3 Síntese petrográfica dos tipos de olivina dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	58
Tabela 3.4 Sumário petrográfico dos tipos de piroxênio dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	64
Tabela 3.5 Relação horizonte envolto <i>versus</i> horizonte manteador dos macrocristais de piroxênio dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, PASM.....	65
Tabela 3.6 Sumário petrográfico dos anfibólios dos diques ultrabásicos de tendência alcalina da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar.....	77
Tabela 4.1 Coeficientes de partição aplicados no cálculo dos líquidos magmáticos em equilíbrio químico com os antecristais de clinopiroxênio dos diques ultrabásicos alcalinos da serra da Mantiqueira (PASM).....	109

1 INTRODUÇÃO

Rochas vulcânicas e subvulcânicas alcalinas podem ser consideradas o produto do resfriamento de baixas taxas de fusão parcial de peridotitos metasomatizados ou férteis do manto terrestre (Foley *et al.*, 1992; Pilet *et al.*, 2008; Laporte *et al.*, 2014). Implicações sobre a geração, ascensão, evolução e colocação desses corpos ígneos são obtidas a partir de complexas feições petrográficas e químicas nos minerais dessas rochas (Davidson *et al.*, 2007; Ginibre *et al.*, 2007). Muitos desses minerais são máficos, precocemente cristalizados e estáveis em grandes intervalos de tempo nestes sistemas, registrando assim os processos envolvidos desde a fusão parcial da fonte até sua colocação em níveis crustais rasos ao longo de seu crescimento (Foley *et al.*, 2011; Ubide *et al.*, 2014a, 2015; Bussweiler *et al.*, 2015; McGee & Smith, 2016).

Estes registros revelam-se, na maioria dos casos, a cristais de olivina, clinopiroxênio, anfibólio e mica comuns aos magmas alcalinos. Recentemente, autores demonstram que esses cristais, zonados e com texturas de reabsorção e recristalização, não são fenocristais, ou seja, estão em desequilíbrio químico com o líquido magmático hospedeiro (e.g., Ubide *et al.*, 2012; Menezes *et al.*, 2015). Estes cristais, quando estranhos ao sistema magmático são chamados de xenocristais. Porém, aqueles em desequilíbrio químico, mas cognatos ao sistema são conhecidos como antecristais, sendo formados em estágios precoces da evolução do magma (Jerram & Davidson, 2007)

Os estudos sobre a gênese das diferentes e complexas populações minerais contribuiu para a construção do modelo *Complex Magmatic Plumbing System*. Este prediz que fragmentos da encaixante, a diferentes profundidades litosféricas, podem ser incorporados ao sistema magmático e transportado aos níveis crustais de consolidação da rocha (Orejana *et al.*, 2006; Jankovics *et al.*, 2016). Durante essa ascensão litosférica, o magma se aloja em diferentes câmaras interconectadas, interagindo com outras fusões ígneas (Ubide *et al.*, 2014b; Gernon *et al.*, 2016). A especificidade de cada estágio do sistema é registrada nos minerais, ao longo da “estratigrafia” de crescimento, ou seja o zonamento, sendo acessada por petrografia e análises químicas pontuais. Este método é umas das chaves para o reconhecimento dos complexos estágios magmáticos, das rochas encaixantes e do processos ali atuantes (Davidson *et al.*, 2007; Jerram & Martin, 2008; Streck, 2008).

Trabalhos com diques alcalinos porfíricos, incluindo os da província alcalina Serra do Mar (PASM) no litoral do estado do Rio de Janeiro, evocam, com base em petrografia e química mineral de macrocristais zonados, processos magmáticos de sistema aberto, como mistura entre magmas alcalinos básico-ultrabásicos e intermediários (Brooks & Printzlau, 1978; Valente, 1997; Duda & Schmincke, 1985; Bédard *et al.*, 1988; Dobosi & Fodor, 1992; Rock *et al.*, 1994; Simonetti *et al.*, 1996; Kahl *et al.*, 2011; Gernon *et al.*, 2016; Ubide *et al.*, 2014a, 2014b; Batki *et al.*, 2018) e/ou incorporação de xenólitos e xenocristais de encaixantes e/ou fontes litosféricas na evolução desses sistemas magmáticos (Scoot, 1976; Wass, 1979; Barton & Bergen, 1981; Szabó & Bodnar, 1998; Pilet *et al.*, 2002; Orejana *et al.*, 2006, 2007; Jankovics *et al.*, 2016).

É comum aos diques máficos alcalinos da Serra da Mantiqueira (PASM), estruturas zonadas, com bordas vítreas, seguidas por uma região vesicular em porções intermediárias e textura porfírica no centro (Alves *et al.*, 1992; Thompson *et al.*, 1998; Brotzu *et al.*, 2005; Marins, 2012; Menezes *et al.*, 2015; Azzone *et al.*, 2018). Os macrocristais (1-10mm, adaptado de Ubide *et al.*, 2014b), predominantemente máficos, destacam-se pelos diferentes estilos de zonamento, texturas de dissolução, recristalização e difusão. Essas feições petrográficas indicam desequilíbrio entre cristal e o líquido magmático hospedeiro, sugerindo processos como mistura entre magmas e assimilação da encaixante durante a evolução do sistema (Figura 1.1; Davidson *et al.*, 2007; Ginibre *et al.*, 2007; Jerram & Davidson, 2007; Streck, 2008). A tabela 1.1 sintetiza as feições petrográficas indicativas de evolução em sistema magmático aberto, os termos genéticos entre cristal e líquido hospedeiro e os termos descritivos aplicados no estudo dos cristais que, em seu crescimento, registram os ambientes e processos magmáticos precoces.

1.1 Rochas alcalinas cretáceas da Serra da Mantiqueira, PASM

As rochas da PASM são alvo de estudos geológicos desde o final do século XIX (Derby, 1887). Até a década de 70 do século seguinte, trabalhos petrogenéticos, geocronológicos e tectônicos com as rochas alcalinas das serras do Mar e da Mantiqueira começam a ganhar espaço na produção científica nacional (Amaral *et al.*, 1967; Ribeiro Filho, 1967; Almeida, 1971). Após a década de 80, a PASM é ininterruptamente alvo de pesquisas nacionais e internacionais, por vezes em cooperação, culminando em dezenas de trabalhos de grande importância científica.

Figura 1.1 Relação genética entre cristais e líquido hospedeiro durante a evolução de um sistema magmático, modificado de Davidson *et al.* (2007). A base (L-F-A) do polígono pequeno (L-F-A-X) representa um sistema magmático. Qualquer ponto fora deste plano deve ser considerado estranho ao sistema, como os xenocristais (vértice X). A base do polígono (L-F-A-X) é detalhada no diagrama ternário ao lado, onde qualquer líquido progenitor, em sistema fechado, cristaliza minerais em equilíbrio químico com este, chamados fenocristais. Esses são euédricos, podem ser zonados com estilo progressivo e de composição química semelhante a do equilíbrio com o líquido hospedeiro. Por outro lado, um magma progenitor após processos de sistema aberto modifica a composição do seu líquido, entrando em desequilíbrio com os cristais presentes no sistema magmático. Esses cristais em desequilíbrio, mas cogenéticos ao sistema magmático são chamados de antecristais. Centros anédricos, estilo de zonamento *step* reverso ou normal e texturas de dissolução e/ou reação são característicos aos antecristais e xenocristais, pois ambos estão em desequilíbrio químico com o líquido magmático hospedeiro.

Tabela 1.1 Síntese de zonamentos, texturas, termos genéticos e descritivos utilizados nesse trabalho.

Feição	Tipo	Descrição
Zonamento	Irregular	Variação composicional irregularmente distribuída no cristal
	Concêntrico	Variação composicional concêntrica a partir do centro do cristal
	Normal	Variação composicional (do centro para a borda do cristal) esperada na evolução por cristalização em sistema fechado
	Reverso	Variação composicional (centro borda do cristal) não suportada pela evolução em sistema magmático fechado
	Oscilatório	Variação concêntrica oscilante de composição, entre horizontes com dezenas de nm a dezenas de μm , em um cristal
	Monótono	Sem variação composicional significativa ao longo do cristal
	Step	Manifestação em etapa e com os limites entre os horizontes adjacentes bem definidos
	Progressivo	Manifestação de forma suave e continua, sem limites bem definidos entre os horizontes de crescimento de um cristal
Texturas	Dissolução superficial	Remoção do material cristalizado no contato cristal-líquido, tornando o hábito do cristal arredondado e/ou em baía (textura <i>embayment</i>)
	Dissolução pervasiva	Processo de remoção de material cristalizado que afeta todo o cristal, também chamado de textura <i>sieve</i>
	Reação	Reequilíbrio mineral sem dissolução do material cristalizado. Associado a inclusões e texturas <i>sieve</i>
Termos descritivos	Megacristal	Cristal em rocha subvulcânica porfirítica com dimensão >10 mm
	Macrocrystal	Cristal em rocha subvulcânica porfirítica com dimensão 10-1 mm
	Microcristal	Cristal em rocha subvulcânica com dimensão 1-0,5 mm
	Microfenocristal	Ou cristal da matriz, é aquele <0,5 mm e com hábito euédrico em rocha subvulcânica
Termos genéticos	Fenocristal	Cristal em equilíbrio químico com líquido magmático hospedeiro
	Antecristal	Cristal em desequilíbrio com o líquido hospedeiro, mas cogenético ao sistema magmático por processos de sistema aberto, indicando estágios de cristalização precoces à abertura
	Xenocristal	Cristal sem qualquer relação genética com sistema magmático e obviamente em desequilíbrio com este

Zonamentos e texturas em Sreck (2008). Termos genéticos em Jerram e Davidson (2007). Termos descritivos adaptados de Ubide *et al.* (2014b).

Com base no controle estrutural que governa a colocação dos corpos alcalinos e na variação de idades destes, Riccomini *et al.* (2005) dividiram a PASM em província alcalina Serra do Mar Setor Norte (litoral do estado de São Paulo, região ocidental da serra da Mantiqueira até a borda da bacia do Paraná) e Lineamento Magmático Cabo Frio (Alinhamento de ocorrências alcalinas desde Poços de Caldas até a ilha de Cabo Frio) (Sadowski & Dias Neto, 1981; Almeida, 1991; Figura 1.2). As rochas ígneas das PASM encontram-se predominantemente encaixadas no segmento central do sistema orogênico Neoproterozoico Província Mantiqueira, chamado orógeno Ribeira (Heilbron *et al.*, 2004). No entanto, o setor ocidental da PASM intrude a *nappe* Socorro-Guaxupé e os metassedimentos do terreno Embú, pertencentes ao segmento sul Neoproterozoico do orógeno Brasília (Vinagre *et al.*, 2014a, 2014b).

Atualmente, a gênese do magmatismo alcalino na PASM (e de todo aquele encontrado na porção meridional da plataforma Sul Americana) é debatida em torno de duas hipóteses antinômicas que propõem que, o principal mecanismo de geração dos magmas alcalinos das PASM, estaria relacionado ou (i) a deflexão do impacto da pluma mantélica Trindade sob o cráton São Francisco (Thompson *et al.*, 1998), ou (ii) a reativação de antigas suturas litosféricas, algumas profundas, durante a consolidação da margem passiva do oceano Atlântico Sul (Almeida, 1983; Riccomini *et al.*, 2005). Independentemente do contexto geodinâmico, o modelo petrogenético das principais ocorrências da PASM, predominantemente intrusões sieníticas, é o de evolução a partir de magmas progenitores máfico-ultramáficos alcalinos, como aqueles que constituem os enxames de diques associados a esses corpos plutônicos (Brotzu *et al.*, 1992; Morbidelli *et al.*, 1995; Bennio *et al.*, 2002; Enrich *et al.*, 2005, 2009; Brotzu *et al.*, 2007; Gomes *et al.*, 2017). No entanto, Marins (2012), investigando processos de diferenciação magmática com diques em sete complexos sieníticos da PASM, propõe que apenas Moro Redondo, Gericinó-Mendanha e Passa Quatro seriam cogenéticos a magmas progenitores máficos por processos de cristalização fracionada. Processos de assimilação durante a cristalização fracionada são indicados nas intrusões sieníticas Ilha de Cabo Frio e Itatiaia, no maciço máfico-ultramáfico alcalino Ponte Nova e nos enxames de diques miaskíticos ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ em proporção molecular <1 é miaskítico, >1 é agpaítico, conforme o índice de alcalinidade/agpaítico, IA, de Sørensen, 1974) do litoral do estado do Rio

Figura 1.2 Principais ocorrências Meso-Cenozoicas da província alcalina Serra do Mar (PASM) no SE do Brasil (A) e diques adjacentes ao maciço máfico-ultramáfico Ponte Nova na porção ocidental da serra da Mantiqueira (B). Em A as ocorrências alcalinas (círculo - lineamento magmático Cabo Frio e pentágono - província alcalina Serra do Mar setor Norte, por Riccomini *et al.*, 2005): 1 - Poços de Caldas, 2 - Bom Repouso, 3 - Caxambú, 4 - Passa Quatro, 5 - Itatiaia, 6 - Morro Redondo, 7 - Serra dos Tomazes, 8 - Tinguá, 9 - Mendanha-Mapicuru, 10 - Itaúna, 11 - Tanguá, 12 - Soarinho, 13 - Rio Bonito, 14 - Morro de São João, 15 - Cabo Frio, 16 - Ponta Nova, 17 - Ipanema, 18 - Monte de Trigo, 19 - São Sebastião, 20 - Morraria, 21 - Mirante, 22 - Búzios e 23 - Vitória. Grábens no continente: SP - São Paulo, Tb - Taubaté, Qz - Queluz, RVR - Resende Volta Redonda, BPS - Baixo Paraíba do Sul. Grábens do litoral: SB - Sete Barras, Rb - Ribeira de Iguape, St - Santos, Ub - Ubatuba, Gb - Guanabá e BSJ - Barra de São João. Seta vermelha em A destaca a ocorrência cumulática máfica-ultramáfica Ponte Nova (16) e seta rosa (A) indica a escarpa ocidental da serra da Mantiqueira. Em B, diques alcalinos (*In situ* = palitos verdes) cortam tanto o embasamento (segmento sul da orógeno Brasília), quanto o Ponte Nova, porém com distintas orientações. As amostras selecionadas neste trabalho (MT-64A, 74F, 74E, 73C, 74B, 68F, 79A e 75) estão destacadas. Legenda em B: PN - maciço máfico-ultramáfico alcalino cumático Ponte Nova, BSAL - metasienogranito, metamonzogranito e gnaiss de batólito Serra da Água Limpa na *nappe* Socorro-Guaxupé, G-NS - hornblenda ortognaisse da *nappe* Socorro-Guaxupé, QX-TE - quartzitos e xistos do Terreno Embú, D - drenagens e E - vias de acesso. As setas em B indicam a direção dos municípios: CJ - Campos do Jordão, SAP - Santo Antônio do Pinha e SM - Sapucaí Mirim no estado de São Paulo. Mapa A modificado de Rosa & Ruberti (2018) e mapa B modificado de Azzone *et al.* (2018) a partir de Azzone *et al.* (2009a) e Vinagre *et al.* (2014b).

de Janeiro (Valente, 1997; Brotzu *et al.*, 1997, 2005, Motoki *et al.*, 2013; Azzone *et al.*, 2016; Rosa, 2017). A mistura entre magmas básico-ultrabásicos fortemente insaturados em sílica e fonolitos agpaíticos foi observada nos diques do litoral do Rio de Janeiro (Valente, 1997).

As rochas ígneas alcalinas da serra da Mantiqueira são, predominantemente, variedades plutônicas sieníticas, cretáceas, insaturadas a saturadas em sílica e edificam os pontos culminantes dos estados São Paulo e Rio de Janeiro no sudeste brasileiro. Correspondentes extrusivos, como traquitos e fonolitos, sob a forma de dique, *plug*, *sill* e pequenos *stocks* são volumetricamente subordinados as rochas intrusivas e encaixados no embasamento Pré-cambriano e nas rochas alcalinas. Brechas magmáticas, estruturas anelares e minerais exóticos são característicos a tais litotipos félsicos (Alves *et al.*, 1992; Brotzu *et al.*, 1989, 1992, 1997, 2005; Atencio *et al.*, 1999; Enrich *et al.*, 2005, 2009; Marins, 2012; Lopes, 2015; Melluso *et al.*, 2017; Rosa, 2012, 2017; Rosa & Ruberti, 2018).

As rochas alcalinas máficas e ultramáficas da serra da Mantiqueira constituem, predominantemente, enxames de diques centimétricos a métricos, principalmente porfiríticos, por vezes zonados e/ou justapostos, cortando o embasamento e as ocorrências alcalinas (Referências anteriormente citadas). No entanto, rochas máfica-ultramáficas cumuláticas constituem predominantemente o maciço Ponte Nova, que merece destaque, pois é uma exceção na PASM (Azzone, 2008; Azzone *et al.*, 2009a, 2009b, 2016). Este está localizado na porção ocidental da serra da Mantiqueira, encaixado no contanto entre o batólito Serra da Água Limpa, da *nappe* Socorro-Guaxupé e os metassedimentos do terreno Embú (Figura 1.2B; Vinagre *et al.*, 2014b). Fácies máfica-ultramáficas alcalinas são encontradas, volumetricamente restritas, em alguns corpos intrusivos félsicos da PASM (Bellieni *et al.*, 1990; Enrich *et al.*, 2005, 2009; Brotzu *et al.*, 2007; Rosa & Ruberti, 2018).

Na Serra da Mantiqueira, o acesso difícil e a exposição restrita dificultam a amostragem *in situ* dos diques alcalinos. No entanto, estes afloram ao longo de drenagens da escarpa serrana e nos cortes de estrada. Assim, o objeto de estudo deste trabalho são os diques máficos da porção ocidental da serra da Mantiqueira, nas adjacências do maciço cumulático Ponte Nova, entre os municípios de Sapucaí Mirim (MG), Santo Antônio de Pinhal (SP) e Campos do Jordão (SP) no SE do Brasil (Figura 1.2B).

1.2 Contexto magmático dos diques da Serra da Mantiqueira

O magmatismo máfico-ultramáfico alcalino, apesar de volumetricamente restrito, é apontado como progenitor dos magmas sieníticos, a partir de cristalização fracionada com ou sem assimilação na PASM. Outra possibilidade seria a origem primária destas rochas, ou seja, por fusão direta da fonte.

No sistema nefelina-diopsídio-sílica ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaMgSi}_2\text{O}_6\text{-SiO}_2$) em pressão atmosférica de Schairer & Yoder (1960), dois são os caminhos para os magmas alcalinos progenitores, distintos entre si pela saturação em sílica, evoluírem até o eutético insaturado em SiO_2 (E2) no campo da nefelina (Figura 1.3). Um destes caminhos é o *trend* fortemente insaturado em sílica (seta tracejada vermelha C3-E2), que evolui ao mínimo da nefelina (E2) sem fracionar plagioclásio. Diferentemente, os magmas do *trend* fracamente insaturado em sílica (seta tracejada vermelha C2-E2) obrigatoriamente passam pelo campo do plagioclásio (Figura 1.3).

Ambos os *trends* alcalinos (fracamente e fortemente insaturados em sílica) são observados nos enxames de diques cretácicos da serra da Mantiqueira (Brotzu *et al.*, 1989, 1997, 2005; Thompson *et al.*, 1998, Marins, 2012, Lopes, 2015, Azzone *et al.*, 2018; Rosa & Ruberti, 2018), sendo um terceiro proposto por Azzone *et al.* (2018), observando os valores intermediários de nefelina normativa ($7 < Ne < 13$) entre os membros das duas séries. Adicionalmente, rochas alcalinas miaskíticas e agpaíticas são encontradas em Morro Redondo, Passa Quatro e Ponte Nova (Brotzu *et al.*, 1989, 1992, 2005; Marins, 2012; Lopes, 2015; Azzone *et al.*, 2018). Já rochas predominantemente miaskíticas ou predominantemente agpaíticas estão restritas a Itatiaia e Bom Repouso respectivamente (Brotzu *et al.*, 1997, 2005; Marins, 2012; Rosa, 2012; Rosa & Ruberti, 2018).

Nos diques alcalinos da Mantiqueira, o processo de cristalização fracionada parece ser o principal responsável pela evolução da série fortemente insaturada em sílica miaskítica (Marins, 2012; Rosa & Ruberti, 2018). No entanto, esse processo é ineficaz para a geração de fonolitos agpaíticos em ambos os *trends* e pela hipótese de origem primária, o processo de mistura de magmas nefelinítico/basáltico alcalino com fonolítico/traquítico não explica a assinatura química dos litotipos composicionalmente intermediários a tais membros em ambas as séries (Marins, 2012; Lopes, 2015). No maciço máfico-ultramáfico alcalino Ponte Nova, modelagens geoquímica e termodinâmica indicam a cristalização fracionada com assimilação da

Figura 1.3 Diagrama ternário simplificado de equilíbrio entre fases do sistema nefelina-diopsídio-sílica em pressão atmosférica, modificado Schairer & Yoder (1960). Os caminhos de evolução por cristalização (setas tracejadas em vermelho) para magmas supersaturados em sílica (C1-E1), fracamente insaturados em sílica (C2-E2) e fortemente insaturados em sílica (C3-E2) estão destacados. A barreira térmica diopsídio-albita (linha tracejada) separa o ponto eutético saturado em sílica (E1) do eutético insaturado em sílica (E2). Os magmas de cada um dos lados da barreira são incapazes de cruzá-la por cristalização fracionada em pressões atmosféricas (1 Kbar). Assim, uma rocha evoluída félsica supersaturada em sílica (E1) é cristalizada a partir de um magma progenitor máfico supersaturado em sílica (C1) com a remoção inicial de piroxênio (paralelamente a barreira diopsídio-albita) até o campo do plagioclásio (composição química traquítica), onde a cristalização simultânea de piroxênio e feldspato permite o magma evoluir até o mínimo saturado em sílica (E1). Por outro lado, uma rocha evoluída félsica insaturada em sílica (E2) pode cristalizar a partir de um magma máfico insaturado em sílica por dois caminhos. Em um deles, o magma máfico fracamente insaturado em sílica (C2) inicia sua evolução com a remoção de piroxênio (paralelamente a linha diopsídio-albita) até o campo do plagioclásio (traquito), onde a cristalização concomitante de piroxênio e feldspato pode evoluir até o mínimo insaturado em sílica (E2). Já o outro caminho até E2, inicia com um magma máfico fortemente insaturado em sílica (C3) que cristaliza olivina, piroxênio e posteriormente feldspatóide até o mínimo insaturado em sílica (E2), não cristalizando feldspato. O diagrama é simplificado dos trabalhos experimentais de Schairer & Yoder (1960).

encaixante durante sua gênese (Azzone *et al.*, 2016). Já para o enxame de diques adjacentes ao Ponte Nova, objeto de estudo dessa trabalho, petrografia e química mineral dos macrocristais dos corpos básico-ultrabásicos porfiríticos trazem indícios de evolução magmática em sistema aberto (Streck, 2008; Menezes *et al.*, 2015; Azzone *et al.*, 2018).

Assim, as ocorrências ígneas alcalinas aqui estudadas correspondem a diques máficos do Cretáceo Superior (Idade média $85,4 \pm 0,4$ Ma, a partir de Ar-Ar em biotitas de tefrifonolito; Azzone *et al.*, 2018), localizados na porção ocidental da serra da Mantiqueira no SE do Brasil (Figura 1.2B). Estes diques compõem a província alcalina Serra do Mar (PASM; cf. Almeida, 1983), que aflora no domínio costeiro do sudeste brasileiro, próximo (Serra da Mantiqueira, Poços de Caldas e regiões adjacentes) e ao longo do litoral (Linha de costa e ilhas costeiras; figura 1.2A).

1.3 Objetivo e estrutura da dissertação

O objetivo deste trabalho é avaliar os processos de sistema aberto, mistura de magmas e incorporação da rocha encaixante, na evolução magmática dos diques máficos alcalinos porfiríticos da porção ocidental da serra da Mantiqueira (PASM), a partir do estudo dos antecristais, xenocristais e fenocristais máficos hospedados na matriz destes diques.

Para tal, uma rigorosa avaliação petrografia através de microscopia ótica, esteve focada em reconhecer e caracterizar essa diversidade de macrocristais hospedados nos diferentes tipos de matriz dos diques máficos alcalinos da Mantiqueira (Seções 2.1, 2.4, 3.1 e 3.2). Após, cristais de piroxênio, olivina e, subordinadamente, anfibólio e mica, selecionados em 8 diques ultrabásicos, foram alvo de análises químicas pontuais que quantificaram os principais óxidos, por meio de WDS (espectroscopia de dispersão de comprimento de onda, do inglês *Wavelength Dispersion Spectroscopy*) através de microsonda eletrônica e elementos-traço por espectrometria de massa induzida por plasma acoplado (ICP-MS, do inglês *Induced Coupled Plasma – Mass Spectrometry*) a partir de ablação a laser (LA-ICP-MS, Seções 2.2, 2.3 e 3.4). A maioria dos dados litogeoquímicos dos diques selecionados foi compilada de Azzone *et al.* (2018). No entanto, uma das oito amostras selecionadas teve sua composição química quantificada sob os mesmos métodos analíticos e nos mesmos laboratórios do trabalho fonte dos dados

litogeoquímicos. Os métodos consistem na obtenção dos principais óxidos e alguns traços por fluorescência de raios X (FRX) e demais traços, como os elementos terras raras (ETRs) por *ICP-MS* (Seções 2.5 e 3.3).

Associando petrografia e química mineral, a relação de equilíbrio entre cristal e matriz pode ser (re)avaliada para cada tipo mineral com seu respectivo líquido hospedeiro a partir de modelagem geoquímica por meio da constante de equilíbrio de troca catiônica de Mg e Fe entre cristal e líquido, $Kd_{Fe^{2+}-Mg^{2+}}^{C/L}$ (Seção 4.1). Confrontado a composição química do cristal e da matriz, é possível reconhecer se este encontram-se em equilíbrio (Fenocristal, seção 4.1.3), em desequilíbrio, porém cogenéticos ao sistema magmático (Antecristal, seção 4.1.2) ou se é estranho e em completo desequilíbrio (químico e petrográfico) com o sistema magmático (Xenocristal, seção 4.1.1). Geneticamente identificados, xenocristais indicam processos de incorporação da encaixane, sendo sua caracterização fundamental para o reconhecimento da rocha incorporada (Seção 4.2.1). Antecristais representam estágios precoces (de cristalização) a processos de sistema aberto durante a evolução do sistema magmático. O complexo estilo de zonamento nos diferentes antecristais e as texturas de desequilíbrio entre cristal e matriz em um mesmo dique, sugerem processos de mistura de magmas e, portanto, uma composição híbrida para a matriz (Seção 4.2.2). Na busca do sistema que explique tal complexidade durante a geração, evolução e ascensão desses magmas até o estágio final de consolidação da rocha, o chamado *Complex Magmatic Plumbing System* reproduz a interação, sob variadas profundidades, de magmas gerados em diferentes regiões da litosfera (mistura) e com diferentes rochas encaixantes (assimilação), mostrando que o entendimento destes cristais reciclados servem como ferramenta na construção do modelo petrogénico (Seção 4.2.3).

5 CONCLUSÕES

Com base em estudos prévios, em diferentes análises químicas e na caracterização petrológica de detalhe realizada nos diques ultrabásico de tendência alcalina cretáceos da serra da Mantiqueira, província alcalina Serra do Mar, é possível concluir que:

i) A ocorrência inédita de xenocristais, predominantemente mantélicos, na porção ocidental da serra da Mantiqueira é de extrema importância para a geologia e petrogênese da província alcalina Serra do Mar. O reconhecimento de enstatita, olivina mantélica e diopsídio com cromo da fácies granada e/ou grana espinélio lherzolito, demonstra a eficiência da recligem de cristais após a incorporação da rocha encaixante e/ou da fonte, pelos magmas fracamente insaturados em sílica ao longo da transposição litosférica abaixo da serra da Mantiqueira ocidental.

ii) diferentes populações de antecristais são pela primeira vez descritas para estas rochas. Tais grupos podem ser definidos:

Olivinas tipo 2: com hábito subédrico, textura glomeroporfirítica e não zonada, apresenta Fo entre 88-80.

Clinopiroxênios do grupo A: diopsídio incolor, subédrico, com zonamento setorial, alto mg#, Cr_2O_3 , Ni, Sc e baixo Na_2O e Zn.

Clinopiroxênios do grupo B: diopsídio, augita, hedenbergita e egirina-augita, todos verdes, apresentam baixo mg#, Cr_2O_3 e alto MnO, Na_2O e Zn.

Clinopiroxênios do tipo C: diopsídio subsilícico com titânio (Ti-augita) com coloração salmão, hábito subédrico a euédrico, zonamento concêntrico oscilatório e setorial. Apresenta amplo mg#, alto Al_2O_3 , TiO_2 e ETRs.

Kaersutita e sanadagaíta rica em titânio: com hábito anédrico a subédrico, texturas *sieve* e *corona*, apresentam alta concentração de Ba, Sr e Zr.

Flogopita com titânio: hábito anédrico e zonamento concêntrico *step* e setorial. Com vacância no plano octaédrico proporcional ao aumento de Ti, Nb, Zr, Sr, Y e Li.

iii) A mistura entre magmas ultrabásicos alcalinos e fonolíticos/traquíticos é indicada e modelada a partir das populações de antecristais encontradas nos diques

ultrabásicos fortemente insaturados em sílica da Mantiqueira. O líquido calculado em equilíbrio com os antecristais foi utilizado como pólo de mistura, mostrando que a matriz hospedeira dos antecristais e o líquido calculado a partir dos fenocristais se sobrepõem quimicamente, sendo composicionalmente híbridos entre a mistura simples dos polos ultrabásicos alcalinos e fonolíticos/traquíticos.

iii) Os processos de mistura de magmas e incorporação de xenocristais da região fonte e das encaixantes são eficientes para explicar as complexas feições petrográficas e químicas dos magmas ultrabásicos alcalinos da Mantiqueira, sob a perspectiva do modelo magmático *Complex Plumbing System*.

6 REFERÊNCIAS

- Adam, J., Green, T., 2006, Trace element partitioning between mica-and amphibole-bearing garnet lherzolite and hydrous basanitic melt: 1. Experimental results and the investigation of controls on partitioning behavior: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 152, no. 1, p. 1-17.
- Akinin, V.V., Sobolev, A.V., Ntaflos, T., Richter, W., 2005, Clinopyroxene megacrysts from Enmelen melanephelinitic volcanoes (Chukchi Peninsula, Russia): application to composition and evolution of mantle melts: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 150, no.1, p. 85-101.
- Amaral, G., Bushee, J.C.U.G., Cordani, U.G., Kawashita, K., Reynolds, J.H., 1967, Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 31, no. 2, p. 117-142.
- Almeida, F.F., 1971, Condicionamento tectônico do magmatismo alcalino mesozóico do sul do Brasil e do Paraguai: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.43, p. 835-836.
- Almeida, F.F., 1983, Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana: *Revista Brasileira de Geociências*, v.13, no. 3, p. 139-158.
- Almeida, F.F., 1991, O alinhamento magmático de Cabo Frio: *Simpósio de Geologia do Sudeste*, 2º, São Paulo, SP, Atas, p. 423-428.
- Almeida, F.F., Carneiro, C.D.R., Mizusaki, A.M.P., 1996, Correlação do magmatismo das bacias da margem continental brasileira com o das áreas emersas adjacentes: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 26, no. 3, p. 125-138.
- Almeida, F.F., Brito Neves, B.B., Carneiro, C.D.R., 2000, The origin and evolution of the South American Platform: *Earth-Science Reviews*, v. 50, no. 1-2, p. 77-111.
- Almeida, J., Dios, F., Mohriak, W.U., Valeriano, C.D.M., Heilbron, M., Eirado, L.G., Tomazzoli, E., 2013, Pre-rift tectonic scenario of the Eo-Cretaceous Gondwana break-up along SE Brazil–SW Africa: insights from tholeiitic mafic dyke swarms: *Geological Society, London, Special Publications* 369, p. 11-40.
- Almeida, V.V., 2009, Mineralogia e petrologia de xenólitos mantélicos das regiões de Ubatuba (SP) e Monte Carmelo (MG): evidências de fusão parcial e metassomatismo no manto superior do sudeste do Brasil [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 112 p.
- Alves, F.R., Ruberti, E., Vlach, S.R.F., 1992, Magmatismo Meso-Cenozóico da região da Serra da Mantiqueira, SP/MG: *Boletim IG-USP, Publicação Especial* 12, p; 07-09.
- Ambrosio, M.R., Azzone, R.G., 2018, The Influence of Crystal and Melt Compositions On the REE+Y Partitioning Between Clinopyroxene and Basanitic/tephritic Melts of Cretaceous Alkaline Magmatism On the Southeastern Part of the South American Platform, Southeast Brazil: *The Canadian Mineralogist*, v. 56, p. 303-329.
- Armstrong, J.T., 1995, Citzaf- a package of correction programs for the quantitative Electron Microbeam X-Ray-Analysis of thick polished materials, thin-films, and particles: *Microbeam Analysis*, v. 4, no. 3, p. 177-200.
- Asimow, P.D., Ghiorso, M.S., 1998, Algorithmic modifications extending MELTS to calculate subsolidus phase relations: *American Mineralogist*, v. 83, no. 9-10, p. 1127-1132.
- Atencio, D., Coutinho, J.M.V., Ulbrich, M.N.C., Vlach, S.R.F., Rastsvetaeva, R.K., Pushcharovsky, D.Y., 1999, Hainite from Poços de Caldas, Minas Gerais, Brazil: *The Canadian Mineralogist*, v. 37, no. 1, p. 91-98.
- Azzone, R.G., 2008, Petrogênese do maciço alcalino máfico-ultramáfico Ponte Nova (SP-MG) [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 394 p.
- Azzone, R.G., Ruberti, E., Enrich, G.E.R., Gomes, C.B., 2009a, Geologia e geocronologia do maciço alcalino máfico-ultramáfico Ponte Nova (SP-MG): *Geologia USP, Série Científica*, v. 9, no. 2, p. 23-46.

- Azzone, R.G., Ruberti, E., Enrich, G.E.R., Gomes, C.B., 2009b, Zr-and Ba-rich minerals from the Ponte Nova alkaline mafic-ultramafic massif, southeastern Brazil: indication of an enriched mantle source. *The Canadian Mineralogist*, v. 47, no. 5, p. 1087-1103.
- Azzone, R.G., Munoz, P.M., Enrich, G.E.R., Alves, A., Ruberti, E., Gomes, C.B., 2016, Petrographic, geochemical and isotopic evidence of crustal assimilation processes in the Ponte Nova alkaline mafic-ultramafic massif, SE Brazil: *Lithos*, v. 260, p. 58-75.
- Azzone, R.G., Ruberti, E., Lopes, J.C., Gomes, C.B., Enrich, G.E.R., Hollanda, M.H.B.M., Tassinari, C.C.G. 2018, Upper Cretaceous weakly to strongly silica-undersaturated alkaline dike series of the Mantiqueira Range, Serra do Mar alkaline province: Crustal assimilation processes and mantle source signatures: *Brazilian Journal of Geology*, v. 48, no. 2, p. 373-390.
- Barton, M., Bergen, M.J., 1981, Green clinopyroxenes and associated phases in a potassium-rich lava from the Leucite Hills, Wyoming: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 77, no. 2, p. 101-114.
- Batki, A., Pál-Molnár, E., Jankovics, M.É., Kerr, A.C., Kiss, B., Markl, G., Heincz, A., Harangi, S., 2018, Insights into the evolution of an alkaline magmatic system: An in situ trace element study of clinopyroxenes from the Ditrău Alkaline Massif, Romania: *Lithos*, v. 300, p. 51-71.
- Bédard, J.H., Francis, D.M., Ludden, J., 1988, Petrology and pyroxene chemistry of Montereian dykes: the origin of concentric zoning and green cores in clinopyroxenes from alkali basalts and lamprophyres: *Canadian Journal of Earth Sciences*, v.25, no. 12, p. 2041-2058.
- Bellieni, G., Montes Lauar, C.R., De Min, A., Piccirillo, E.M., Melfi, A.J., Pacca, I.G., 1990, Early and Late Cretaceous Magmatism from Sao Sebastiao island (SE-Brazil): *Geochemistry and Petrology: Geochimica Brasiliensis*, v. 4, p. 59-83.
- Bennio, L., Brotzu, P., Gomes, C. B., D'Antonio, M., Lustrino, M., Melluso, L., Morbidelli, L., Ruberti, E., 2002, Petrological, geochemical and Sr-Nd isotopic features of alkaline rocks from the Arraial do Cabo Frio peninsula (southeastern Brazil): *Periodico di Mineralogia*, v.71, no. 2, p. 137-158.
- Blundy, J., Cashman, K., 2008, Petrologic reconstruction of magmatic system variables and processes: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 69, no. 1, p. 179-239.
- Brooks, C.K., Printzlau, I., 1978, Magma mixing in mafic alkaline volcanic rocks: the evidence from relict phenocryst phases and other inclusions: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 4, no. 3-4, p. 315-331.
- Brotzu, P., Melluso, L., Beccaluva, L., 1989, Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil. The syenitic intrusion of Morro Redondo, RJ: *Geochimica Brasiliensis*, v. 3, no. 1, p. 63-80.
- Brotzu, P., Barbieri, M., Beccaluva, L., Garbarino, C., Gomes, C. B., Macciotta, G., Melluso, L., Morbidelli, L., Ruberti, E., Sigolo, J.B., Traversa, G., 1992, Petrology and geochemistry of the Passa Quatro alkaline complex, southeastern Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 6, no. 4, p. 237-252.
- Brotzu, P., Gomes, C. B., Melluso, L., Morbidelli, L., Morra, V., Ruberti, E., 1997, Petrogenesis of coexisting SiO₂-undersaturated to SiO₂-oversaturated felsic igneous rocks: the alkaline complex of Itatiaia, southeastern Brazil: *Lithos*, v. 40, no. 2-4, p. 133-156.
- Brotzu, P., Melluso, L., D'Amelio, F., Lustrino, M., 2005, Potassic dykes and intrusions of the Serra do Mar Igneous Province (SE Brazil), *in* Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., eds., *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform: São Paulo, Edusp*, p. 443-472.
- Brotzu, P., Melluso, L., Bennio, L., Gomes, C. B., Lustrino, M., Morbidelli, L., Morra, V., Ruberti, E.; Tassinari, C.C.G., D'Antonio, M., 2007, Petrogenesis of the Early Cenozoic potassic alkaline complex of Morro de São João, southeastern Brazil: *Journal of South American Earth Sciences*, v. 24, no 1, p. 93-115.

- Burchardt, S., 2018, Volcanic and Igneous Plumbing Systems: Understanding Magma Transport, Storage, and Evolution in the Earth's Crust: Uppsala, Elsevier, 356 p.
- Busweiler, Y., Foley, S., Prevelic, D., Jacob, D.E., 2015, The olivine macrocryst problem: new insights from minor and trace element compositions of olivine from Lac de Gras Kimberlites, Canada: *Lithos*, n. 220-223, p. 238-252.
- Cañón-Tapia, E., 2018, The Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province: A historical perspective of current knowledge and future research trends: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 287-303.
- Cashman, K.V., Sparks, R.S.J., Blundy, J.D., 2017, Vertically extensive and unstable magmatic systems: a unified view of igneous processes: *Science*, v. 355, no 6331, eaag3055.
- Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C. B., 2005, Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform: São Paulo, Edusp, 755 p.
- Davidson, J.P., Morgan, D.J., Charlier, B.L.A., Harlou, R., Hora, J.M., 2007, Microsampling and isotopic analysis of igneous rocks: implications for the study of magmatic systems: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 35, p. 273-311.
- De Hoog, J.C., Gall, L., Cornell, D.H., 2010, Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry: *Chemical Geology*, v. 270, no. 1, p. 196-215.
- Deer W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1978, *Rock-Forming Minerals: Single-Chain Silicates*, Volume 2A (segunda edição): Londres, Longman, 668p.
- Deer W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1992, *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* (segunda edição): Londres, Longman Scientific & Technical, 696 p.
- Demange, M.A., 2012, *Mineralogy for Petrologists: Optics, Chemistry and Occurrences of Rock-Forming Minerals*: Boca Raton, CRC Press, 203 p.
- Derby, O.A., 1887, On nepheline-rocks in Brazil, with special reference to the association of phonolite and foyaite: *Quarterly Journal of the Geological Society*, v. 43, no. 1-4, p. 457-473.
- Dobosi, G., Fodor, R.V., 1992, Magma fractionation, replenishment, and mixing as inferred from green-core clinopyroxenes in Pliocene basanite, southern Slovakia: *Lithos*, v. 28, no. 2, p. 133-150.
- Duda, A., Schmincke, H.U., 1985, Polybaric differentiation of alkali basaltic magmas: evidence from green-core clinopyroxenes (Eifel, FRG): *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 91, no. 4, p. 340-353.
- Enrich, G.E.R., 2005, *Petrogênese da suíte alcalina da Ilha Monte de Trigo, SP* [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 229 p.
- Enrich, G.E.R., Azzone, R.G., Ruberti, E., Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., 2005, Itatiaia, Passa Quatro and São Sebastião Island, the major alkaline syenitic complexes from the Serra do Mar region, *in* Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., eds., *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*: São Paulo, Edusp, p. 419-441.
- Enrich, G.E.R., Ruberti, E., Gomes, C.B., 2009, Geology and geochronology of Monte de Trigo island alkaline suite, southeastern Brazil: *Brazilian Journal of Geology*, v. 39, no. 1, p. 67-80.
- Enrich, G.E.R., Ruberti, E., Azzone, R.G., Gomes, C.B., 2016, Eudialyte-group minerals from the Monte de Trigo alkaline suite, Brazil: composition and petrological implications: *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, no. 3, p. 411-426.
- Esperança, S., Holloway, J.R., 1987, On the origin of some mica-lamprophyres: experimental evidence from a mafic minette: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 95, no. 2, p. 207-216.
- Ersoy, E.Y., 2013, PETROMODELER (Petrological Modeler): a Microsoft® Excel® spreadsheet program for modelling melting, mixing, crystallization and assimilation processes in magmatic systems: *Turkish Journal of Earth Sciences*, v. 22, no. 1, p. 115-125.

- Fedele, L., Zanetti, A., Morra, V., Lustrino, M., Melluso, L., Vannucci, R., 2009, Clinopyroxene/liquid trace element partitioning in natural trachyte–trachyphonolite systems: insights from Campi Flegrei (southern Italy): *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 158, no. 3, p. 337-356.
- Foley, S., Venturelli, G., Green, D.H., Toscani, L., 1987, The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models: *Earth-Science Reviews*, v. 24, no. 2, p. 81-134.
- Foley, S., 1992, Vein-plus-wall-rock melting mechanisms in the lithosphere and the origin of potassic alkaline magmas: *Lithos*, v. 28, no. 3-6, p. 435-453.
- Foley, S., Jacob, D.E., O'Neil, H.S.C., 2011, Trace element variations in olivine phenocrysts from Ugandan potassic rocks as clues to the chemical characteristics of parental magmas: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 162, p. 1-20.
- Foley, S., Prelevic, D., Rehfeldt, T., Jacob, D.E., 2013, Minor and trace elements in olivines as probes into early igneous and mantle melting processes: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 363, p. 181-191.
- Garda, G.M., 1995, Os diques básicos e ultrabásicos da região costeira entre as cidades de São Sebastião e Ubatuba, Estado de São Paulo [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 349 p.
- Gernon, T.M., Upton, B.G.J., Ugra, R., Yücel, C., Taylor, R.N., Elliott, H., 2016, Complex subvolcanic magma plumbing system of an alkali basaltic maar-diatreme volcano (Elie Ness, Fife, Scotland): *Lithos*, v. 264, p. 70-85.
- Ginibre, C., Woerner, G., Kronz, A., 2007, Crystal zoning as an archive for magma evolution: *Elements*, v. 3, no. 4, p. 261-266.
- Gomes, C.B., 2015, A Microsonda Eletrônica na Geologia: São Paulo, Edusp, 248p.
- Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., 2017, Magmatismo alcalino continental da região meridional da Plataforma Brasileira: São Paulo, Edusp, 608 p.
- Gomes, C.B., Alves, F.R., Azzone, R.G., Enrich, G.E.R., Ruberti, E., 2017, Geochemistry and petrology of the Búzios Island alkaline massif, SE, Brazil: *Brazilian Journal of Geology*, v. 47, no. 1, p. 127-145.
- Grütter, H.S., 2009, Pyroxene xenocryst geotherms: Techniques and application: *Lithos*, v. 112, p. 1167-1178.
- Hawthorne, F.C., Oberti, R., Harlow, G.E., Maresch, W.V., Martin, R.F., Schumacher, J.C., Welch, M.D., 2012, Nomenclature of the amphibole supergroup: *American Mineralogist*, v. 97, no. 11-12, p. 2031-2048.
- Heilbron, M., Pedrosa-Soares, A.C., Campos Neto, M.C., Silva, L.C., Trouw, R.A.J., Janasi V., 2004, A Província Mantiqueira, in Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito-Neves, B.B., org., *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*: São Paulo, Beca, p. 203-234.
- Herzberg, C., 2010, Identification of source lithology in the Hawaiian and Canary Islands: Implications for origins: *Journal of Petrology*, v. 52, no. 1, p. 113-146.
- Hutchison, C.S., 1974, *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*: New York, John Wiley, 527 p.
- Hutchison, C.S., 1975, Relations Between the Norm and its Variations, and the Mode: *Warta Geologi*, v. 1, no. 1.
- Irvine, T.N.J., Baragar, W.R.A.F., 1971, A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks: *Canadian journal of earth sciences*, v. 8, no. 5, p. 523-548.
- Jankovics, M.É., Harangi, S., Kiss, B., Ntafllos, T., 2012, Open-system evolution of the Fűzes-tó alkaline basaltic magma, western Pannonian Basin: constraints from mineral textures and compositions: *Lithos*, v. 140, p. 25-37.
- Janoušek, V., Farrow, C.M., Erban, V., 2006, Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit): *Journal of Petrology*, v. 47, no. 6, p. 1255-1259.

- Jerram, D.A., Davidson, J.P., 2007, *Frontiers in textural and microgeochemical analysis: Elements*, v. 3, no. 4, p. 235-238.
- Jerram, D.A., Martin, V.M., 2008, Understanding crystal populations and their significance through the magma plumbing system: Geological Society, London, Special Publications 304, no. 1, p. 133-148.
- Jerram, D.A., Bryan, S.E., 2018, Plumbing systems of shallow level intrusive complexes, *in* Breitkreuz, C., Rocchi, S., eds., *Physical Geology of Shallow Magmatic Systems*: Cham, Springer, p. 39-60.
- Kahl, M., Chakraborty, S., Costa, F., Pompilio, M., 2011, Dynamic plumbing system beneath volcanoes revealed by kinetic modeling, and the connection to monitoring data: An example from Mt. Etna: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 308, no. 1-2, p. 11-22.
- Klein, C., Dutrow, B., 2012, *Manual de ciência dos minerais [tradução de Manual of Mineral Science] (vigésima terceira edição)*: Porto Alegre, Bookman, 716 p.
- Kushiro, I., Walter, M.J., 1998, Mg-Fe partitioning between olivine and mafic-ultramafic melts: *Geophysical Research Letters*, v. 25, no. 13, p. 2337-2340.
- Laporte, D., Lambart, S., Schiano, P., Ottolini, L., 2014, Experimental derivation of nepheline syenite and phonolite liquids by partial melting of upper mantle peridotites: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 404, p. 319-331.
- LaTourrette, T., Hervig, R.L., Holloway, J.R., 1995, Trace element partitioning between amphibole, phlogopite, and basanite melt. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 135, no.1-4, p. 13-30.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks, I.U.G.S., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: *Journal of petrology*, v. 27, no. 3, p. 745-750.
- Le Maitre, R.W., 1976, The chemical variability of some common igneous rocks: *Journal of petrology*, v. 17, no. 4, p. 589-598.
- Le Maitre, R.W., 2002, *Igneous rocks. A classification of igneous rocks and glossary of terms (segunda edição)*: New York, Cambridge University Press, 236 p.
- Lesnov, F.P., 2010, *Rare Earth Elements in Ultramafic and Mafic Rocks and their Minerals: Main types of rocks. Rock-forming minerals*: Leiden, CRC press.
- Locock, A.J., 2014, An Excel spreadsheet to classify chemical analyses of amphiboles following the IMA 2012 recommendations: *Computers & Geosciences*, v. 62, p. 1-11.
- Lopes, J.C., 2015, *Reconhecimento geológico do Complexo Alcalino Passa Quatro [Monografia de Graduação]*: Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Departamento de Geociências, 78 p.
- Marins, G.M., 2012, *Estudo do magmatismo máfico de complexos alcalinos do sudeste do Brasil [Dissertação de Mestrado]*: Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Centro de Tecnologia e Ciências, Faculdade de Geologia, 161 p.
- Marsh, B.D., 2006, Dynamics of magmatic systems: *Elements*, v. 2, no. 5, p. 287-292.
- McDonough, W.F., Sun, S., 1995, The composition of the Earth: *Chemical Geology*, v. 120, p.223-253.
- McGee L.E., Smith, I.E.M., 2016, 2016, Interpreting chemical compositions of small scale basaltic systems: A review: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 325, p. 45-60.
- Melluso, L., Guarino, V., Lustrino, M., Morra, V., De'Gennaro, R., 2017, The REE-and HFSE-bearing phases in the Itatiaia alkaline complex (Brazil) and geochemical evolution of feldspar-rich felsic melts. *Mineralogical Magazine*, v. 81, no. 2, p. 217-250.
- Menezes, S.G., Azzone, R.G., Enrich, G.E.R., Ruberti, E., Cagliarini, R., Gomes, C.B., Chmyz, L., 2015, The antecryst compositional influence on Cretaceous alkaline lamprophyre dykes, SE Brazil: *Brazilian Journal of Geology*, v. 45, no. 1, p. 79-93.
- Middlemost, E.A.K., 1975, The Basalt Clan: *Earth-Science Reviews*, v. 11, p. 337-364.
- Mitchell, R.H., 2012, *Kimberlites, orangeites, and related rocks*: New York, Springer Science & Business Media. 410 p.

- Morbidelli, L., Gomes, C.B., Beccaluva, L., Brotzu, P., Conte, A.M., Ruberti, E., Traversa, G., 1995, Mineralogical, petrological and geochemical aspects of alkaline and alkaline-carbonatite associations from Brazil: *Earth-Science Reviews*, v. 39, no. 3-4, p. 135-168.
- Mori, P.E., Reeves, S., Correia, C.T., Haukka, M., 1999, Development of a fused glass disc XRF facility and comparison with the pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, University of São Paulo: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 29, p. 441-446.
- Morimoto, N., 1988, Nomenclature of pyroxenes: *Mineralogy and Petrology*, v. 39, no. 1, p. 55-76.
- Motoki, A., Araújo, A., Sichel, S., Geraldés, M., Jourdan, F., Motoki, K., Da Silva, S., 2013, Nepheline syenite magma differentiation with continental crustal assimilation for the Cabo Frio Island intrusive complex, State of Rio de Janeiro, Brazil. *Geociências*. v. 32, no. 2, p. 195-218.
- Mysen, B.O., 1987, Magmatic silicate melts: Relations between bulk composition, structure and properties, in Mysen, B.O., eds., *Magmatic Processes: Physicochemical Principles: The Geochemical Society, Pennsylvania. Special Publication 1*, p. 375-395.
- Nardy, A.J.R., Machado, F.B., Oliveira, M.A.F., 2008, As rochas vulcânicas mesozóicas ácidas da Bacia do Paraná: litoestratigrafia e considerações geoquímico-estratigráficas: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, no. 1, p. 178-195.
- Navarro, M.S., Andrade, S., Ulbrich, H., Gomes, C.B., Girardi, V.A., 2008, The direct determination of rare earth elements in basaltic and related rocks using ICP-MS: Testing the efficiency of microwave oven sample decomposition procedures: *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 32, no. 2, p. 167-180.
- Olin, P.H., Wolff, J.A., 2010, Rare earth and high field strength element partitioning between iron-rich clinopyroxenes and felsic liquids: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 160, no. 5, p. 761-775.
- Orejana, D., Villaseca, C., Paterson, B.A., 2006, Geochemistry of pyroxenitic and hornblenditic xenoliths in alkaline lamprophyres from the Spanish Central System: *Lithos*, v. 86, no. 1, p. 167-196.
- Orejana, D., Villaseca, C., Paterson, B.A., 2007, Geochemistry of mafic phenocrysts from alkaline lamprophyres of the Spanish Central System: implications on crystal fractionation, magma mixing and xenoliths entrapment within deep magma chamber: *European Journal of Mineralogy*, v. 19, no. 6, p. 817-832.
- Pietruszka, A.J., Marske, J.P., Heaton, D.E., Garcia, M.O., Rhodes, J.M., 2018, An Isotopic Perspective into the Magmatic Evolution and Architecture of the Rift Zones of Kīlauea Volcano: *Journal of Petrology* (in press).
- Pilet, S., Hernandez, J., Villemant, B., 2002, Evidence for high silicic melt circulation and metasomatic events in the mantle beneath alkaline provinces: the Na–Fe-augitic green-core pyroxenes in the Tertiary alkali basalts of the Cantal massif (French Massif Central): *Mineralogy and Petrology*, v. 76, no. 1-2, p. 39-62.
- Pilet, S., Baker, M.B., Stolper, E.M., 2008, Metasomatized lithosphere and the origin of alkaline lavas: *Science*, v. 320, no. 5878, p. 916-919.
- Polo, L.A., Giordano, D., Janasi, V.A., Guimarães, L.F., 2018, Effusive silicic volcanism in the Paraná Magmatic Province, South Brazil: physico-chemical conditions of storage and eruption and considerations on the rheological behavior during emplacement: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 355, p. 115-135.
- Powell, R., 1984, Inversion of the assimilation and fractional crystallization (AFC) equations; characterization of contaminants from isotope and trace element relationships in volcanic suites: *Journal of the Geological Society*, v. 141, p. 447-452.
- Putirka, K.D., 2008, Thermometers and barometers for volcanic systems: *Reviews in mineralogy and geochemistry*, v. 69, no. 1, p. 61-120.

- Putirka, K.D., 2016, Amphibole thermometers and barometers for igneous systems and some implications for eruption mechanisms of felsic magmas at arc volcanoes: *American Mineralogist*, v. 101, no. 4, p. 841-858.
- Pyatenko, Y.A., Ugryumova, N.G., 1988, Mineralogical crystallochemistry of rare-earth elements: *Izvestiya Akademii Nauk SSSR Seriya Geologicheskaya*, v. 11, p. 75-86.
- Read, G., Grutter, H., Winter, S., Luckman, N., Gaunt, F., Thomsen, F., 2004, Stratigraphic relations, kimberlite emplacement and lithospheric thermal evolution, Quiricó Basin, Minas Gerais State, Brazil: *Lithos*, v. 77, no. 1-4, p. 803-818.
- Ribeiro Filho, E., 1967, Geologia e petrologia dos maciços alcalinos do Itatiaia e Passa-Quatro (Sudeste do Brasil): *Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, Geologia*, v. 22, p. 9-89.
- Riccomini, C., Velázquez, V.F., Gomes, C.B., 2005, Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in central-southeastern Brazilian Platform, *in* Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., eds., *Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform*: São Paulo, Edusp, p. 31-56.
- Richard, L.R., 1995, MinPet: Mineralogical and petrological data processing system, version 2.02: MinPet Geological Software, Canada.
- Rieder, M., Cavazzini, G., D'yakonov, Y.S., Frank-Kamenetskii, V.A., Gottardi, G., Guggenheim, S., Koval, P.V., Müller, G., Neiva, A.M.R., Radoslovich, E.W., Robert, J., Sassi, F.P., Takeda, H., Weiss, Z., Wones, D.R., 1998, Nomenclature of the micas: *Clays and clay minerals*, v. 46, no. 5, p. 586-595.
- Rock, N.M.S., Gwalani, L.G., Griffin, B.J., 1994, Alkaline rocks and carbonatites of Amba Dongar and adjacent areas, Deccan Alkaline Province, Gujarat, India. 2. Complexly zoned clinopyroxene phenocrysts: *Mineralogy and Petrology*, v. 51, no. 2-4, p. 113-135.
- Rollinson, H.R., 1993, *Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation*: Routledge, Longman Geochemistry Series, 384p.
- Rosa, P.A.S., 2012, Geologia e petrologia da suíte alcalina de Bom Repouso, MG [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 198 p.
- Rosa, P.A.S., 2017, Geologia e evolução petrogenética do maciço alcalino de Itatiaia, MG-RJ [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 233 p.
- Rosa, P.A.S., Ruberti, E., 2018, Nepheline syenites to syenites and granitic rocks of the Itatiaia Alkaline Massif, Southeastern Brazil: new geological insights into a migratory ring Complex: *Brazilian Journal of Geology*, v. 48, no. 2, p. 347-372.
- Sadowski G.R., Dias Neto, C.M., 1981, O lineamento sismo-tectônico de Cabo Frio: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, no. 4, p. 209-212.
- Severin, K.P., 2004, *Energy dispersive spectrometry of common rock forming minerals*: Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 225 p.
- Schairer, J.F., Yoder, H.S.Jr., 1960, The nature of residual liquids from crystallization, with data on the system nepheline-diopside-silica: *American Journal of Science*, v. 258, p. 273-283.
- Scott, P.W., 1976, Crystallization trends of pyroxenes from the alkaline volcanic rocks of Tenerife, Canary Islands: *Mineralogical Magazine*, v. 40, no. 316, p. 805-816.
- Shea, T., Lynn, K.J., Garcia, M.O., 2015, Cracking the olivine zoning code: Distinguishing between crystal growth and diffusion: *Geology*, v. 43, no. 10, p. 935-938.
- Sherman G.E., Sutton, T., Blazek, R., Holl, S., Dassau, O., Morley, B., Mitchell, T., Luthman, L., 2011, Quantum GIS User Guide - Version 1.7 "Wroclaw", http://download.osgeo.org/qgis/doc/manual/qgis-1.7.0_user_guide_en.pdf
- Simonetti, A., Shore, M., Bell, K., 1996, Diopside phenocrysts from nephelinite lavas, Napak Volcano, eastern Uganda; evidence for magma mixing: *The Canadian Mineralogist*, v. 34, no. 2, p. 411-421.

- Streck, M.J., 2008, Mineral textures and zoning as evidence for open system processes: *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, v. 69, no. 1, p. 595-622.
- Szabo, C., Bodnar, R.J., 1998, Fluid-inclusion evidence for an upper-mantle origin for green clinopyroxenes in late Cenozoic basanites from the Nógrád-Gömör Volcanic Field, northern Hungary/southern Slovakia: *International Geology Review*, v. 40, no. 9, p. 765-773.
- Sobolev, N.V., Logvinova, A.M., Zedgenizov, D.A., Pokhilenko, N.P., Kuzmin, D.V., Sobolev, A.V., 2008, Olivine inclusions in Siberian diamonds: high-precision approach to minor elements: *European Journal of Mineralogy*, v. 20, no. 3, p. 305-315.
- Sörensen, H., 1974, *The Alkaline Rocks*: New York, John Wiley & Sons.
- Sun, S., McDonough, W.S., 1989, Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes: *Geological Society, London, Special Publications* 42, no. 1, p. 313-345.
- Thibault, Y., Edgar, A.D., Lloyd, F.E., 1992, Experimental investigation of melts from a carbonated phlogopite Iherzolite: Implications for metasomatism in the continental lithospheric mantle, *American Mineralogist*, v. 77, p. 784-794.
- Thiede, D.S., Vasconcelos, P.M., 2010, Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results: *Geology*, v. 38, no. 8, p. 747-750.
- Thompson, R.N., 1974, Some high-pressure pyroxenes: *Mineralogical Magazine*, v. 39, no. 307, p. 768-787.
- Thompson, R.N., Gibson, S.A., Mitchell, J.G., Dickin, A.P., Leonardos, O.H., Brod, J.A., Greenwood, J.C., 1998, Migrating Cretaceous–Eocene Magmatism in the Serra do Mar Alkaline Province, SE Brazil: Melts from the Deflected Trindade Mantle Plume?: *Journal of Petrology*, v. 39, no. 8, p. 1493-1526.
- Ubide, T., Arranz, E., Lago, M., Galé, C., Larrea, P., 2012, The influence of crystal settling on the compositional zoning of a thin lamprophyre sill: A multi-method approach: *Lithos*, v. 132, p. 37-49.
- Ubide, T., Galé, C., Arranz, E., Lago, M., Larrea, P., 2014a, Clinopyroxene and amphibole crystal populations in a lamprophyre sill from the Catalanian Coastal Ranges (NE Spain): a record of magma history and a window to mineral-melt partitioning: *Lithos*, v. 184, p. 225-242.
- Ubide, T., Galé, C., Larrea, P., Arranz, E., Lago, M., 2014b, Antecrysts and their effect on rock compositions: the Cretaceous lamprophyre suite in the Catalanian Coastal Ranges (NE Spain): *Lithos*, v. 206, p. 214-233.
- Ubide, T., McKenna, C.A., Chew, D.M., Kamber, B.S., 2015, High-resolution LA-ICP-MS trace element mapping of igneous minerals: In search of magma histories: *Chemical Geology*, v. 409, p. 157-168.
- Ulbrich, H.H.G.J., Gomes, C.B., 1981, Alkaline rocks from continental Brazil: *Earth-Science Reviews*, v. 17, no. 1-2, p. 135-154.
- Valente, S.C., 1997, Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of the Cretaceous dykes of Rio de Janeiro, Brazil [PHD Tesis]: Belfast, The Queen's University of Belfast, School of Geosciences, Department of Geology.
- Vinagre, R., Trouw, R.A.J., Mendes, J.C., Duffles, P., Peternel, R., Matos, G., 2014a, New Evidence of a Magmatic Arc in the Southern Brasília Belt, Brazil: The Serra da Água Limpa Batholith (Socorro-Guaxupé Nappe): *Journal of South American Earth Sciences*, v. 54, p. 120-139.
- Vinagre, R., Trouw, R. A. J., Mendes, J. C., Ludka, I., 2014b, Mineral chemistry and geothermobarometry of the Serra da Água Limpa Batholith, Socorro-Guaxupé Nappe, Southern Brasília Belt, Southeast Brazil: *Brazilian Journal of Geology*, v. 44, no. 3, p. 387-414.
- Wass, S.Y., 1979, Multiple origins of clinopyroxenes in alkali basaltic rocks: *Lithos*, v. 12, no. 2, p. 115-132.

- Wise S.A., Watters R.L., 2012a, Certificate of Analysis, Standard Reference Material 610: National Institute of Standards and Technology.
- Wise S.A., Watters R.L., 2012b Certificate of Analysis, Standard Reference Material 612: National Institute of Standards and Technology.
- Wilson, S.A., 1997a, Data compilation for USGS reference material BHVO-2, Hawaiian Basalt: U.S. Geological Survey Open-File Report.
- Wilson, S.A., 1997b, The collection, preparation, and testing of USGS reference material BCR-2, Columbia River, Basalt: U.S. Geological Survey Open-File Report 98.
- Wood, B.J., Blundy, J.D., 1997, A predictive model for rare earth element partitioning between clinopyroxene and anhydrous silicate melt: Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 129, no. 2-3, p. 166-181.
- Yoder, H.S.Jr., Tilley, C.E., 1962, Origin of basalt magmas: an experimental study of natural and synthetic rock systems: Journal of Petrology, v. 3, no. 3, p. 342-532.