



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 633

**ESTUDO GEOQUÍMICO E ISOTÓPICO (U-Pb/Lu-Hf) DE
NOVAS OCORRÊNCIAS DE GRANITOS TIPO-A NO
DOMÍNIO CARAJÁS**

Dissertação apresentada por:

JULLY MYLLI LOPES AFONSO

Orientador: Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira (UFPA)

BELÉM - PARÁ
2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- A454e Afonso, Jully Mylli Lopes.
Estudo geoquímico e isotópico (U-Pb/Lu-Hf) de novas ocorrências de granitos tipo-A no Domínio Carajás /
Jully Mylli Lopes Afonso. — 2023.
ix, 61 f.: il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2023.
1. Granito tipo-A. 2. Paleoproterozoico. 3. Datação U-Pb.
4. Isótopos de Hf. I. Título.

CDD 558.115



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

ESTUDO GEOQUÍMICO E ISOTÓPICO (U-Pb/Lu-Hf) DE NOVAS OCORRÊNCIAS DE GRANITOS TIPO-A NO DOMÍNIO CARAJÁS


Dissertação apresentada por:


JULLY MYLLI LOPES AFONSO

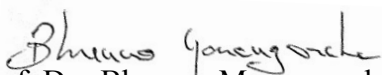
Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de GEOQUÍMICA E PETROLOGIA e Linha de Pesquisa EVOLUÇÃO CRUSTAL E METALOGÊNESE.

Data de Aprovação: 18 / 04 / 2023

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira – Orientador
Membro - UFPA


Prof. Dr. José de Arimatéia Costa de Almeida
Membro externo – UNIFESSPA


Prof. Dr. Bhrenno Marangoanha
Membro - UFPA

AGRADECIMENTOS

Registro meus sinceros e profundos agradecimentos às pessoas e entidades que direta ou indiretamente prestaram sua contribuição para que esta dissertação fosse concluída, em especial:

- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) Código de financiamento 001.
- A Universidade Federal do Pará (UFPA), ao Instituto de Geociências (IG), ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) e ao Grupo de Pesquisa de Petrologia de Granitoides (GPPG), pelo fornecimento de infraestrutura necessária, pelo incentivo e aprendizagem.
- Ao orientador prof. Davis Carvalho de Oliveira, pela oportunidade de iniciação na área de pesquisa, por sua orientação, confiança e paciência ao longo destes anos.
- Aos funcionários da secretaria do programa de pós-graduação, em especial à Cleida Freitas pela assistência nas questões administrativas.
- Ao Laboratório de Microanálises e ao Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso) do Instituto de Geociências da Universidade Federal (UFPA), na pessoa do Prof. Dr. Marco Antônio Galarza, por toda ajuda e conhecimento compartilhado.
- Aos colegas do Grupo de Pesquisa de Petrologia de Granitoides (GPPG), pelo companheirismo, apoio, críticas, sugestões e por jamais negarem ajuda sempre que solicitada. Em especial, ao Rodrigo Santos por toda a ajuda no processo final desta dissertação.
- Em especial agradeço profundamente a minha família meus pais Selma e Jorge Afonso, pelo amor, cuidado, dedicação, educação e por possibilitarem através de seu trabalho que eu pudesse me dedicar inteiramente a meus estudos. E aos irmãos Jenny e Jhon Afonso, por jamais me deixarem desistir.

RESUMO

A Província Carajás foi palco de um evento magmático extensivo, marcado por intrusões graníticas anorogênicas e diques associados. O mapeamento geológico realizado na porção central do Domínio Canaã dos Carajás, permitiu a individualização de dois novos *stocks* graníticos anorogênicos. Esses granitos ocorrem como *stocks* de forma subcircular, isotrópicos, como intrusões em rochas graníticas arqueanas da Suíte Vila União e Granito Cruzadão. São classificados como monzogranitos e divididos em fácies biotita monzogranito equigranular (BMzGE) e biotita monzogranito porfirítico (BMzGP), apresentam aspecto de granitos evoluídos, onde a biotita é o principal mineral ferromagnésiano e estão frequentemente associadas à fluorita, além de allanita, zircão, apatita e epidoto. São metaluminosos a peraluminosos, com elevado conteúdo de HFSE ferroso com caráter reduzido a levemente oxidado. Quando comparados aos demais granitos tipo-A da Província Carajás, esses granitos demonstram contrastes significativos com as Suítes Jamon e Velho Guilherme e são similares ao observado para a Suíte Serra dos Carajás e, por consequência, ao Granito Gogó da Onça. Dados geocronológicos de U-Pb em zircão mostraram que a idade de cristalização desses granitos é de $\sim 1893 \pm 13$ Ma, e associados aos dados isotópicos de Lu-Hf indicam fontes crustais para essas rochas, com valores ϵ_{Hf} fortemente negativos variando entre -14 a -17 e TDM entre 3,38 Ga a 3,57 Ga, apontando alto tempo de residência crustal. Dados de modelagem geoquímica sugerem que tais granitos foram gerados a partir de fusão parcial de rochas tonalíticas de composição análoga ao do Tonalito Arco Verde e/ou Tonalito Caracol do Domínio Rio Maria. Tais resultados são compatíveis com a hipótese de que estes granitos foram gerados do retrabalhamento de granitoides mesoarqueanos e colocados em crosta rasa em 1,89 Ga.

Palavras-chave: granito tipo-A; paleoproterozoico; datação U-Pb; isótopos de Hf.

ABSTRACT

The Carajás Mineral Province was the setting of an extensive magmatic event, marked by anorogenic granitic intrusions and associated dykes. Geological mapping methods carried out in the central portion of the Canaã dos Carajás Domain allowed the individualization of two new anorogenic granitic stocks. These granites occur as isotropic, semicircular shaped stocks, which occur as intrusions in Archean granitic rocks of the Vila União and Cruzadão granite suites. And are classified as monzogranites and divided into biotite-monzogranite equigranular facies (BMzE) and biotite monzogranite porphyritic (BMzP) facies, where biotite is the main ferromagnesian mineral and are often associated with fluorite, in addition to allanite, zircon, apatite and epidote. They are meta- to peraluminous, with a high content of HSE iron-related with a reduced to moderately oxidized character. When compared to others type-A granites of the Carajás Mineral Province, these granites display significant contrasts with the Jamon and Velho Guilherme suites and are similar to those observed in the Serra dos Carajás suite and, consequently, the Gogó da Onça Granite. Geochronological data of U-Pb in zircon revealed that crystallization age of these granites is $\sim 1893 \pm 13$ Ma, and associated with isotopic data of Lu-Hf indicate crustal sources for these rocks, with strongly negative ϵ_{Hf} values ranging from -14 at -17°C and TDM between 3.38 Ga to 3.57 Ga. Based on this informations, the geochemical modeling imply that these granites were generated from partial melting of tonalitic granites of similar composition to the Arco Verde Tonalite or Caracol Tonalite from the Rio Maria Domain. Such results are suitable with the hypothesis that these granites were generated from a fusion of Archean granitoids and placed in a shallow crust between 1.88 and 1.86 Ga.

Keywords: A-type granites; paleoproterozoic; U-Pb dating; Hf isotopes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Mapa de localização e principais acessos a área de estudo (fonte: do autor).	3
Figura 2 - Mapa geológico detalhado da província carajás, destacando a área de trabalho.....	15
Figura 3 - Mapa geológico simplificado destacando as suítes graníticas paleoproterozoicas e a distribuição das principais ocorrências de granitos tipo-a da província carajá.....	17
Figura 4 - Mapa geológico detalhado da área de trabalho.....	22
Figura 5 - Diagramas modais Q-A-P (streckeisen, 1976) e Q-(A+P) - M.....	24
Figura 6 - Principais aspectos mineralógicos e texturais microscópicos dos granitos estudados..	26
Figura 7- Diagramas de harker para os óxidos de elementos maiores e elementos traços dos granitos estudados, em comparação com granitos das suítes paleoproterozoica.	30
Figura 8 - Padrão dos e _{tr} dos granitos estudados, em comparação com granitos das suítes paleoproterozoicas.....	31
Figura 9 - Diagramas de classificação química, tipologia e ambiente tectônico dos granitos estudados em comparação com granitos das suítes paleoproterozoicas	33
Figura 10 - Imagens de catodoluminescência (cl) em cristãos de zircão	35
Figura 11 - Diagrama concórdia U-PB SHRIMP	36
Figura 12 - Diagrama de idade vs eHf.....	37
Figura 13 - Quadro e histogramas comparativos de dados de susceptibilidade magnética	40
Figura 14 - Diagramas multielementar para geração dos granitos estudados.	46

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	3
1.3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	5
1.3.1 Bibliografia	5
1.3.2 Petrografia	5
1.3.3 Suscetibilidade Magnética e Minerais Opacos	6
1.3.4 Geoquímica	6
1.3.5 Geocronologia (MÉTODO U-PB)	7
1.3.6 Estudo Isotópico (MÉTODO LU-HF).....	7
1.3.7 Modelamento Geoquímico	9
CAPÍTULO 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	10
2.1 GEOLOGIA DA PROVÍNCIA CARAJÁS	10
2.1.1 Domínio Rio Maria	10
2.1.2 Domínio Sapucaia	11
2.1.3 Domínio Canaã dos Carajás	12
2.1.4 Bacia Carajás.....	16
2.2 GRANITOS ANOROGÊNICOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS.	16
2.2.1 Suíte Jamon	16
2.2.2 Suíte Serra dos Carajás.....	17
2.2.3 Suíte Velho Guilherme	18
2.2.4 Outros granitos tipo-A	18
CAPÍTULO 3 PETROGRAFIA	21
3.1 GEOLOGIA E PETROGRAFIA DOS GRANITOS ESTUDADOS.....	21
3.2 ASPECTOS TEXTURAIS.....	23
CAPÍTULO 4 GEOQUÍMICA	27
4.1 INTRODUÇÃO	27
4.2 ELEMENTOS MAIORES E TRAÇOS	27
4.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOLOGIA	31
CAPÍTULO 5 GEOCRONOLOGIA E GEOLOGIA ISOTÓPICA	34

5.1 GEOCRONOLOGIA U-PB (SHRIMP) EM ZIRCÃO.....	34
5.2 ISÓTOPOS DE Lu-Hf EM ZIRCÃO.....	36
CAPÍTULO 6 DISCUSSÃO	38
6.1 COMPARAÇÕES COM GRANITOS TIPO-A DA PROVÍNCIA CARAJÁS.....	38
6.2 ORIGEM DOS GRANITOS ESTUDADOS.....	41
CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS	49

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O conhecimento sobre a gênese do magmatismo granítico teve um significativo avanço desde a década de 70, quando surgiram as primeiras classificações alfabéticas (I, S, M e A). Essa classificação motivou extensas discussões na comunidade científica, principalmente no que concerne a granitos do tipo-A. Tais granitos foram caracterizados inicialmente por Loiselle & Wones (1979), como a classe que compreende granitos gerados ao longo de zonas de *rift* e dentro de blocos continentais estáveis, moderadamente alcalinos, com baixo conteúdo de CaO e Al₂O₃, alto Fe/FeO+MgO, e com teores elevados de Na₂O+K₂O. Estudos petrográficos de sequência de cristalização indicam condições de baixa a moderada fugacidade de oxigênio e reduzido conteúdo de H₂O (Dall’Agnol *et al.* 2005, Dall’Agnol & Oliveira 2007). Os granitos do tipo-A representam um grupo de granitos que incluem uma variedade de associações petrográficas de afinidades geoquímicas contrastantes (Whalen *et al.* 1987, Eby 1992, Frost *et al.* 2001) são enriquecidos em elementos traços e incompatíveis (REE, exceto Eu, Zr, Y, Nb, Ta), e apresentam baixos teores em elementos traços compatíveis com fases máficas (Co, Sc, Cr e Ni) e Feldspatos (Sr, Ba, Eu), podem ocorrer desde ambientes anorogênicos de natureza continental ou oceânica à ambientes pós-orogênicos na crosta continental (Yang *et al.* 2006). Segundo Frost & Frost (2011), devido à composição ferrosa ser uma característica comum de todos os granitos dessa classe, sugeriram o termo ferroso como sinônimo de granitos tipo-A.

Na Província Carajás ocorrem numerosos registros desse magmatismo tipo-A, provenientes de um episódio de distensão crustal no Paleoproterozoico marcado por intrusões graníticas anorogênicas e por diques associados (Dall’Agnol *et al.* 2005). E embora esses granitos apresentem muitas similaridades, existem entre eles diferenças importantes em relação à petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética (SM). Considerando essas diferenças, Dall’Agnol *et al.* (2005), com base em parâmetros químico-mineralógicos e nas condições de fugacidade de oxigênio prevaletentes durante a cristalização de seus magmas, caracterizaram e subdividiram essas intrusões em três suítes distintas: i) Suíte Jamon – oxidada; (ii) Suíte Serra dos Carajás - reduzida a moderadamente oxidada; e (iii) Suíte Velho Guilherme – reduzida. Além dos plútons pertencentes a essas três suítes, ocorrem também outros granitos tipo-A (p. ex granitos Seringa, São João, Rio Branco e Gradaús) que

apresentam assinaturas geoquímicas ambíguas, não permitindo associá-los à uma das três suítes da Província Carajás.

Foram identificados na mesma área de ocorrência do Granito Rio Branco - região de Água Azul do Norte a oeste do município Canaã dos Carajás, nas proximidades das áreas de Vila União e Vila Ouro Verde (Figura 1) - dois pequenos plútons que apresentam características afins dos granitos isotrópicos que ocorrem na província. O presente trabalho representa o primeiro estudo que discute de forma integrada os principais aspectos composicionais e petrológicos destes granitos e os resultados apresentados definem suas formas de ocorrência e as principais características petrográficas e geoquímicas, bem como os seus comportamentos magnéticos, idade de cristalização (U-Pb SHRIMP em zircão) e assinatura isotópica de Hf. Esses dados possibilitaram associar as características desses plutons com aqueles registrados nos granitos paleoproterozoicos da Província Carajás, assim como o avanço nas discussões sobre a natureza das fontes desses granitos.

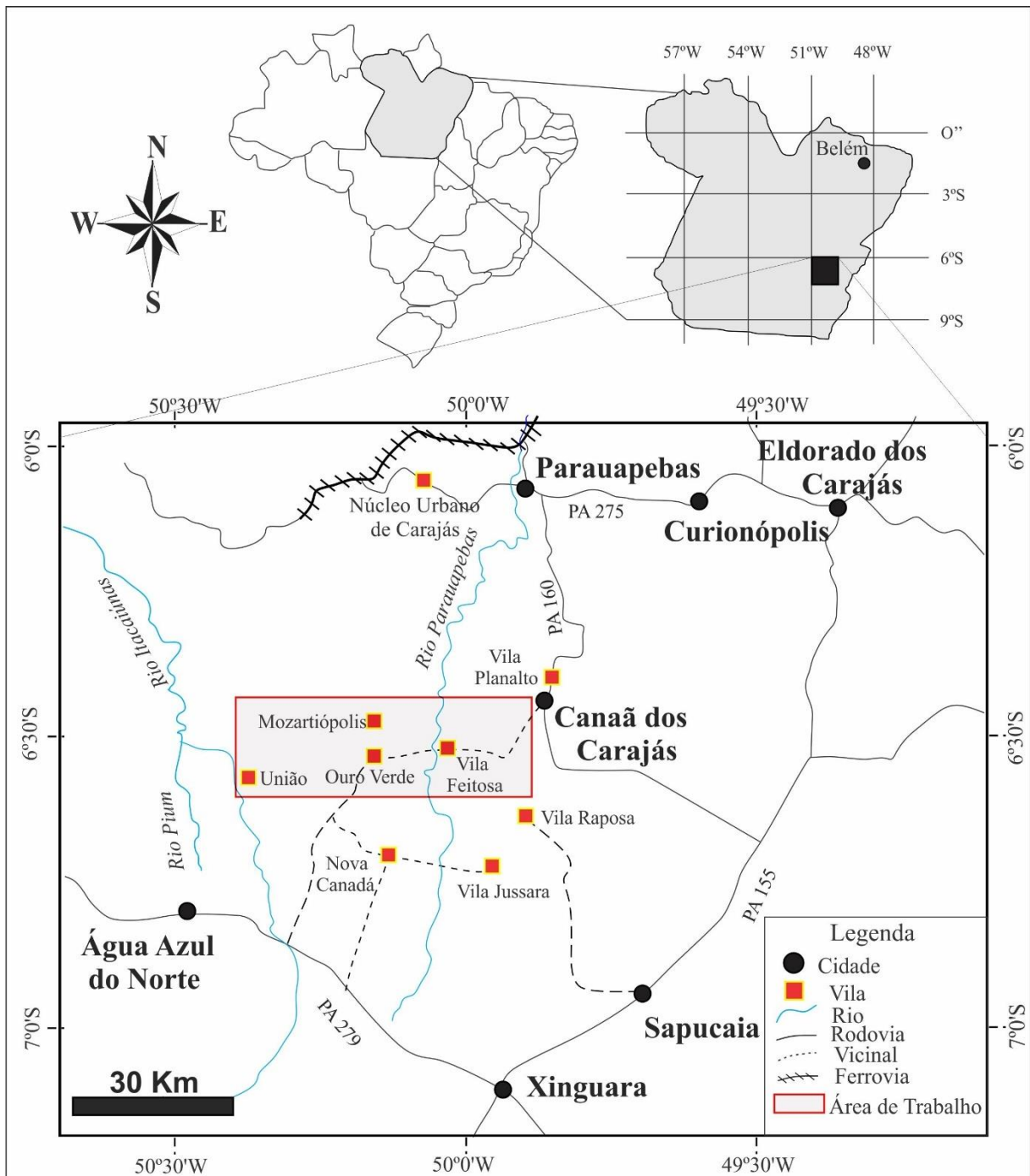


Figura 1 - Mapa de localização e principais acessos a área de estudo Fonte: Do autor.

1.2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

A ocorrência expressiva e relevância de rochas graníticas do tipo-A na Província Carajás motivou a realização de uma série de estudos ao longo das últimas décadas, assim como a geração de uma grande quantidade de informações sobre a natureza e assinatura isotópica das três suítes paleoproterozoicas. No entanto, atividades de mapeamento geológico vinculadas ao desenvolvimento de teses e dissertações de estudantes do Grupo de Pesquisa

Petrologia de Granitoides da UFPA (GPPG), possibilitaram a individualização de dois novos plútons graníticos de aspecto isotrópico na região de Água Azul do Norte e Canaã dos Carajás (Domínio Canaã dos Carajás). Tais plútons foram inicialmente descritos por Afonso *et al.* (2017) que abordaram os principais aspectos geológicos e petrográficos e demonstraram que esses granitos exibem assinatura geoquímica de granitos tipo-A. Entretanto, os granitos anorogênicos do Domínio Canaã dos Carajás ainda não foram enquadrados em nenhuma suíte definida em Dall'Agnol *et al.* (2005), uma vez que não se alinham perfeitamente aos padrões obtidos para estas suítes, isto pode sugerir que a fonte de seus magmas e/ou processos de evolução magmática não foram inteiramente coincidentes com aqueles apresentados pelas suítes paleoproterozoicas definidas por Dall'Agnol *et al.* (2005). Este trabalho contribuirá para caracterizar os granitos paleoproterozoicos do Domínio Canaã dos Carajás a partir da obtenção de novos dados de petrografia, petrologia magnética, geoquímica, geocronológicos (U-Pb) e isotópicos (Lu-Hf). Dados geoquímicos e isotópicos tendem a registrar as contribuições de fontes mantélicas e/ou crustais na gênese de rochas graníticas e podem ser usados como traçadores de ambientes tectônicos (Pearce *et al.* 1984, Goodge & Vervoort 2006). Análises isotópicas de Hf em zircão constituem um eficiente método para se determinar as fontes envolvidas em processos magmáticos. Assim, a combinação desses dados associados ao modelamento geoquímico deve auxiliar nas discussões sobre a natureza da fonte responsável pela origem dos magmas formadores destes plútons graníticos, bem como fornecer dados para compará-los com os demais granitos paleoproterozoicos da Província Carajás.

Com base no exposto, o principal objetivo desta pesquisa é caracterizar os *stocks* graníticos que ocorrem na porção central do Domínio Canaã dos Carajás, no que diz respeito às suas formas de ocorrências, feições petrográficas, e parâmetros geoquímicos. Além disso, novos dados sobre suas idades de cristalização (U-Pb) e composições isotópicas Lu-Hf, serão integrados aqueles de modelagem geoquímica, com o objetivo de avançar nas discussões sobre a natureza das fontes que deram origem a essas rochas. Desse modo, os estudos efetuados durante o desenvolvimento dessa dissertação visam os seguintes objetivos:

- ✓ Realizar estudos petrográficos (texturais) adicionais em amostras selecionadas para complementar os estudos apresentados por Afonso *et al.* (2017) e classificar os granitos estudados com base nas análises de composições modais.
- ✓ Caracterizar os minerais óxidos de Fe e Ti e determinar suas relações texturais;
- ✓ Determinar o comportamento magnético das rochas estudadas, e estabelecer relações entre o conteúdo desses óxidos com os valores de SM;

- ✓ Discutir sobre suas afinidades geoquímicas e tipologia, assim como o ambiente de formação e os processos envolvidos na sua gênese;
- ✓ Definir as idades de cristalização e determinar suas assinaturas isotópicas de Lu/Hf em cristais de zircão.
- ✓ Realizar modelagem geoquímica das possíveis fontes responsáveis pela formação destes granitos;
- ✓ Estabelecer comparações dos dados obtidos para os granitos estudados com aqueles de outros corpos graníticos paleoproterozoicos que ocorrem na Província Carajás e reavaliar o enquadramento destes granitos em uma das três suítes paleoproterozoicas da Província Carajás;

1.3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos, foram utilizadas diversas técnicas e métodos de investigação. Segue abaixo o enunciado das principais atividades realizadas.

1.3.1 Bibliografia

Levantamento bibliográfico referente à geologia da região do trabalho, com ênfase em aspectos geoquímicos, petrográficos, geocronológicos e isotópicos das suítes graníticas da Província Carajás. Além de artigos, teses, dissertações e livros sobre temas relacionados ao magmatismo do tipo-A, com ênfase em tipologia e petrogênese desses granitos.

1.3.2 Petrografia

O conjunto de rochas amostradas foi estudado macroscopicamente e com base nas principais variedades identificadas foram selecionadas 6 amostras representativas do Granito Oeste e 9 do Granito Leste para estudos petrográficos. A confecção de lâminas polidas foi realizada na Oficina de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG/UFGPA). As composições modais de 11 amostras disponíveis em trabalhos anteriores (Afonso *et al.* 2017) foram compiladas e foram efetuadas 4 novas análises modais adicionais em amostras selecionadas para estudos complementares (BVD 41A, BVD 42B, BVD 43 C, DMP 61) utilizando contador automático de pontos da marca Endeeper (≤ 1.800 pontos por amostra), posteriormente, as rochas submetidas a análises modais foram classificadas com base nas recomendações da Subcomissão de Nomenclatura de Rochas Ígneas da IUGS (Streckeisen 1976, Le Maitre *et al.* 2002). O estudo microscópico foi utilizado para

identificação e descrição sistemática dos minerais (Kerr 1959, Deer *et al.* 1997); reconhecimento das texturas magmáticas e de alteração (Bard 1980, Shelley 1993).

1.3.3 Suscetibilidade Magnética e Minerais Opacos

As medidas de SM foram realizadas em 15 amostras, para isso foi utilizado o suscetibilímetro portátil da *GH Instruments*, modelo SM 20. A suscetibilidade magnética da rocha é determinada, por esse aparelho, através de medidas comparativas e indutância. O procedimento para obtenção dos dados consiste, na obtenção das indutâncias da bobina do suscetibilímetro em contato direto com o ar (sem amostra) e, posteriormente, em contato com a amostra, sendo a suscetibilidade magnética representativa de cada amostra calculada através da razão entre as medidas de indutância obtidas no ar e as medidas obtidas em contato direto com a amostra. As medidas de indutância obtidas em contato com a amostra foram obtidas somente nas faces aproximadamente planas, nas quais não havia espaços vazios entre o aparelho e a amostra, o tratamento de dados foi feito no programa MINITAB 17 através da elaboração de histogramas e polígonos de frequência, que serviram de base para interpretações. Adicionalmente, foram efetuados estudos de minerais de óxidos de Fe-Ti em microscopia eletrônica de varredura (MEV-EDS), no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da UFPA, para identificar os minerais opacos, definir seus aspectos texturais (associações e transformações).

1.3.4 Geoquímica

As análises geoquímicas em rocha total foram realizadas em 9 amostras representativas dos granitos estudados, as quais foram previamente selecionadas no estudo petrográfico, sendo 4 representantes do Granito Oeste e 5 análises do Granito Leste. As amostras pré-selecionadas passaram pelas etapas de preparação (trituração, pulverização, quarteamento) na Oficina de Preparação de Amostras (OPA-IG/UFPA) e posteriormente foram submetidas as análises químicas realizadas no laboratório comercial *ALS Brasil Ltda* (Minas Gerais). Os elementos maiores e menores foram analisados por ICP-ES e os elementos-traço e terras raras por ICP-MS. A caracterização geoquímica foi feita com base nos procedimentos indicados por Rollinson (1993), e a avaliação do comportamento dos elementos maiores e traços definida por meio de diagramas de variação clássicos, bem como outros propostos na literatura (Shand 1950, Harker 1965, Sylvester 1989, Pearce *et al.* 1984, Whalen *et al.* 1987, Eby 1992, Frost *et al.* 2001, Dall'Agnol & Oliveira 2007).

1.3.5 Geocronologia (Método U-Pb)

Foram realizadas análises geocronológicas na amostra BVD-43B, representativa da fácies porfirítica pelo método U-Pb em zircão (*in situ*) no sistema SHRIMP (*Sensitive High Resolution Ion Microprobe*), no Laboratório de Geologia de Alta Resolução do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (GeoLabIGc-USP).

Em torno de 10kg da amostra foram triturados, moídos e peneirados nas frações 250, 175, 125 e 75 μm . Esses procedimentos foram realizados na Oficina de Preparação de Amostras (OPA) e no Laboratório de Preparação Mineral (LPM), ambos na UFPA. Os cristais de zircão foram separados da seguinte maneira: peneiramento húmido, separação por densidade (bateamento com água e microbateamento com álcool), separação magnética (ímã de neodímio e separador eletromagnético Frantz), e separação com auxílio de lupa binocular. Cerca de 100 cristais de zircão foram selecionados com o auxílio de lupa binocular e, em seguida, montados em um disco de epóxi em conjunto com os padrões analíticos, polidos até a metade de sua espessura a fim de expor o interior dos cristais, e revestida com uma película de carbono. Antes das datações, foram examinadas estruturas internas, sobrecrescimentos, fraturas, inclusões e defeitos físicos dos cristais, utilizando imagens de elétrons retroespalhados (BSE – *Backscattered Electron Images*) e catodoluminescência (CL – *Cathodoluminescence*), obtidas pela microsonda eletrônica modelo JEOL JXA-8230, do Laboratório de Microanálises da UFPA, operando sob condições de voltagem de aceleração de 15 kV e corrente do feixe de 20 μA , com distância de trabalho de 11 mm.

As análises realizadas pelo sistema SHRIMP II e seguem os procedimentos analíticos segundo Stern (1998), Williams (1998) e Sato *et al.* (2014), e os padrões utilizados são SL 13 para a composição referência do U (238 ppm; Sato *et al.* 2014), e o zircão TEMORA-2 (416,78 \pm 0,33 Ma; Black *et al.* 2003) para razões isotópicas padrão. O *spot* apresenta tamanho de 30 μm . Os dados foram reduzidos utilizando o *software* SQUID 1.03 (Ludwig 2001) e as idades calculadas usando Isoplot 4.15 (Ludwig 2012). Os erros da razão isotópica são 1σ .

1.3.6 Estudo Isotópico (Método LU-Hf)

As análises *in-situ* de isótopos de Hf em zircão foram realizadas no Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso) do Instituto de Geociências da UFPA por um LA-MC-ICP-MS (*Laser Ablation Multi-Collector Ion Coupled Plasma Mass Spectrometer*) de alta resolução, modelo Neptune, marca Thermo Finnigan, equipado com uma sonda laser Nd:YAG 213nm, modelo LSX-213 G2 da marca CETAC.

Os parâmetros analíticos para operação do ICP-MS envolveram 16,0 l/min de fluxo de gás argônio (Ar) resfriador; 0,7 a 0,8 l/min de gás argônio auxiliar; 1,2 a 1,3 l/min de gás argônio de arraste, 1200 W de potência, -2000 de extração, em modo de análise estático em baixa resolução, utilizando oito coletores de Faraday. O diâmetro de *spot* do laser é de 50 µm, sendo que durante as análises o fluxo de gás hélio (He), responsável pelo transporte do material de ablação para o ICP-MS, variou de 450-500 ml/min, com frequência de 10 Hz e tempo total de ablação de aproximadamente 60 segundos. Com utilização de uma potência de 50%, que forneceu uma densidade de energia de 4-5 J/cm² e permitiu obter um sinal da ordem de 1 a 3 volts para ¹⁷⁸Hf. O zircão Mud Tank (731±1 Ma Horstwood *et al.* 2016) foi utilizado como material de referência para a razão ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf, de modo que a sequência de análises intercalou três análises na amostra e uma no zircão de referência.

Para realizar as correções de interferências isobáricas dos isótopos Lu e Yb na massa 176, os isótopos de Lu, Hf e Yb foram medidos concomitantemente, com base nas razões isotópicas ¹⁷³Yb/¹⁷¹Yb, ¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf, ¹⁷⁵Lu/¹⁷⁷Hf e ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf. Assim, as interferências isobáricas do ¹⁷⁶Lu e ¹⁷⁶Yb foram corrigidas utilizando uma equação que envolve um fator de fracionamento de massa (β) para Lu e Yb e a intensidade dos sinais observados nos isótopos livres de interferência ¹⁷⁵Lu e ¹⁷³Yb, normalizados a partir de suas abundâncias isotópicas aceitas ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁵Lu = 0,026549 (Chu *et al.* 2002) e ¹⁷⁶Yb/¹⁷³Yb = 0,786956 (Thirlwall & Anczkiewicz 2004). O fator β (Hf, Yb e Lu) foi calculado para cada medida realizada, uma vez que seu valor depende diretamente da razão medida entre os isótopos de interesse. Por outro lado, para corrigir o fracionamento isotópico provocado pelo equipamento durante as análises, de acordo com a lei exponencial (Russel *et al.* 1978), as razões isotópicas de Yb foram normalizadas assumindo valor de 1,12346 para ¹⁷³Yb/¹⁷¹Yb (Thirlwall & Anczkiewicz 2004) e as razões isotópicas de Hf foram normalizadas utilizando valor de 0,7325 para a razão ¹⁷⁹Hf/¹⁷⁷Hf (Patchett & Tatsumoto 1980). Para a realização destes cálculos de correção e obtenção dos valores corrigidos das razões ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf e ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf de cada ponto analisado, os dados brutos foram processados em macro Microsoft Excel, sendo selecionados aproximadamente 40 valores de um total de 60 dados integrados de 1,049 s/ponto (Bertotti 2012, Bertotti *et al.* 2013, Milhomem Neto *et al.* 2017).

Planilhas de Excel foram utilizadas para calcular as idades-modelo dois estágios ou crustais (Hf-T_{DM}^C) e os parâmetros épsilon háfnio (ϵ_{Hf}) no tempo t, assim como para gerar os diagramas de evolução do Hf vs tempo. Foi utilizada a constante de decaimento $\lambda^{176}\text{Lu}$ de 1,867x10⁻¹¹ anos⁻¹ (Söderlund *et al.* 2004), razão ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf de 0,015 para o valor médio da crosta continental (Griffin *et al.* 2004) e razões ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf e ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf atuais para o

Reservatório Uniforme Condritico (CHUR) de 0,0336 e 0,282785 (Bouvier *et al.* 2008) e para o manto empobrecido (DM) de 0,0388 e 0,28325 (Andersen *et al.* 2009), respectivamente.

1.3.7 Modelamento Geoquímico

O modelamento geoquímico foi realizado almejando estimar possíveis rochas fontes dos granitos estudados neste trabalho. Para isso, processos magmáticos tais como Assimilation with Fractional Crystalization (AFC), fusão parcial, cristalização fracionada e mistura foram testados utilizando o software GENESIS (Teixeira 2005).

Para averiguar os fatores envolvidos nesses processos, foram feitos cálculos de balanço de massa dos elementos maiores para compor as proporções relativas dos minerais residuais da fonte e apresentar a composição provável do magma fonte. A exatidão dos dados calculados é válida se a soma dos quadrados dos resíduos (ΣR^2) for $\leq 1,2$ (Wyers & Barton 1986) e propicia o prosseguimento com o modelamento dos elementos traço com base na equação de fusão parcial em equilíbrio de Wilson (1989):

$$\frac{C_L}{C_0} = \frac{1}{F + D - FD}$$

Onde C_L e C_0 são as concentrações dos elementos traços no fundido (líquido) e na fonte (sólido), respectivamente, F é a fração em peso do magma formado e D é o coeficiente de distribuição para os sólidos residuais quando o magma é removido do sistema. Os coeficientes de partição mineral/líquido (Kd) foram obtidos a partir de Rollinson (1993) e pelo banco de dados online <https://earthref.org/KDD/>.

CAPÍTULO 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 GEOLOGIA DA PROVÍNCIA CARAJÁS

A Província Carajás está localizada na borda sudeste do Cráton Amazônico (Santos 2003; Figura 2a), e foi subdividida por Souza *et al.* (1996), Dall’Agnol *et al.* (2006) e Vasquez *et al.* (2008) em dois segmentos crustais tectonicamente distintos: Domínio Rio Maria de idade mesoarqueana, ao sul, e Domínio Carajás formado por rochas meso e neoarqueanas, ao norte. Como o limite entre estes dois domínios ainda não estava claramente estabelecido foi considerado por Feio *et al.* (2013) a existência de um Subdomínio de Transição em relação ao terreno situado entre Xinguara e o sul da Bacia Carajás. Como consequência, diversos estudos foram realizados no Subdomínio de Transição com intuito de esclarecer a evolução geológica e tectônica desta porção (Guimarães *et al.* 2010, Oliveira *et al.* 2011, Almeida *et al.* 2011, 2013, Feio *et al.* 2012, 2013, Dall’Agnol *et al.* 2013, Santos *et al.* 2013, Teixeira *et al.* 2013, Gabriel & Oliveira *et al.* 2014, Rodrigues *et al.* 2014, Leite-Santos & Oliveira 2014, 2016, Marangoanha & Oliveira 2014, Silva *et al.* 2016, Santos *et al.* 2018, Silva *et al.* 2018, Teixeira *et al.* 2018, Marangoanha *et al.* 2019a, 2019b, 2020). Esses estudos evidenciaram que essa porção não era uma crosta arqueana tectonicamente homogênea, então uma nova subdivisão foi proposta, diferenciando o Subdomínio de Transição em dois domínios distintos: Domínio Canaã do Carajás e Domínio Sapucaia (Figura 2b).

Os domínios citados acima são seccionados por um grande volume de corpos intrusivos de granitos tipo-A paleoproterozoicos (1,88 Ga) e diques associados (Dall’Agnol *et al.* 2006, Dall’Agnol & Oliveira 2007, Silva *et al.* 2016, Teixeira *et al.* 2017), e são limitados por grandes descontinuidades regionais de direção E-W, apresentando diferenças em sua evolução geológica, reconhecidas a partir das associações litológicas distintas que serão apresentadas abaixo.

2.1.1 Domínio Rio Maria (~ 3,0 Ga e 2,84 Ga)

O Domínio Rio Maria ocorre ao sul da Província Carajás, é caracterizado por associações mesoarqueanas, composto principalmente por sequências de *greenstone belts*, rochas máfica-ultramáficas, associações de Trondhjemitos e tonalitos (TTG), rochas sanukitoides, granodiorito e granitos potássicos (Silva 2022). Os *greenstones belts* são representados pelos grupos Andorinhas e Gradaús-Tucumã (3,0 a 2,9 Ga; Macambira &

Lancelot 1991, Souza *et al.* 1996, Lafon *et al.* 2000, Souza *et al.* 2001, Rolando & Macambira 2003, Santos-Silva *et al.* 2021). O complexo máfico- ultramáfico engloba o Complexo Guará-Pará e Serra Azul (Pimentel & Machado 1994, Santos-Silva *et al.* 2021). Os granitoides englobam: (1) suítes TTG (2,98-2,92 Ga) representados por Tonalito Arco Verde e Trondhjemitó Mogno, Tonalito Mariazinha e Tonalito Carapanã (Gastal 1987, Pimentel & Machado 1994, Guimarães *et al.* 2010, Almeida *et al.* 2011, Silva-Silva *et al.* 2020); (2) Suítes sanukitoides e granitoides com alto Mg associados (2,87 Ga; Oliveira *et al.* 2009, Gabriel & Oliveira 2014); (3) Leucogranitos cálcico-alcálicos - Suíte Guarantã; e potássicos – Granito Xinguara e Mata Surrão (2,87-2,86 Ga; Leite *et al.* 2004, Almeida *et al.* 2010, 2013). Após a geração destes granitoides, formaram-se as rochas sedimentares do Grupo Rio Fresco (Rio Doce Geologia e Mineração-Docegeo 1988, Huhn *et al.* 1988).

2.1.2 Domínio Sapucaia (~ 2,95 - 2,73 Ga)

O Domínio Sapucaia, localizado na porção central da Província Carajás (Figura 2c), é caracterizado pela ocorrência de associações análogas àqueles encontrados no Domínio Rio Maria, no entanto, tais unidades foram intensamente afetadas por eventos deformacionais que culminaram com a colocação de granitoides neoarqueanos. De modo geral, este domínio é formado por (1) greenstone belts do Grupo Sapucaia (Souza *et al.*, 2015); (2) Associações TTG representada pelo Tonalito Caracol (~ 2,93 Ga) e rochas afins do Tonalito Mariazinha (~ 2,93 Ga), Trondhjemitó Colorado (~2,87 Ga) e Trondhjemitó Água Fria (~ 2,86 Ga), representando as unidades TGG mais jovem (Almeida *et al.* 2011, Leite *et al.* 2004, Leite-Santos & Oliveira 2014, Silva *et al.* 2014). (3) Granitoides sódicos Tonalito São Carlos (~2,95 Ga; Silva *et al.* 2014); (4) Granitoides de alto Mg de afinidade sanukitoide na forma de corpos deformados e alongados na direção E-W, conforme definido e denominados por Gabriel & Oliveira (2014), como Granodiorito Água Azul e Água Limpa (2,88 Ga - 2,87 Ga); (5) Leucogranitos de alto Ba-Sr moderadamente deformados representados pelo Leucogranodiorito Pantanal (Teixeira *et al.* 2013) e Leucogranodiorito Nova Canadá (2,89 Ga; Oliveira *et al.* 2010, Leite-Santos & Oliveira 2016); (6) Leucogranitos de alto potássio representados pelo granito Xinguara e Velha Canadá (~2,86 - 2,74 Ga; Leite-Santos & Oliveira 2016, Almeida *et al.* 2010, Santos *et al.* 2010, Leite *et al.* 2004); (7) Granitoides neoarqueanos representados pela Suíte Vila Jussara (Feio *et al.* 2012, Silva *et al.* 2014, Cunha *et al.* 2016, Dall’Agnol *et al.* 2017, Oliveira *et al.* 2018, Silva *et al.* 2020), ocorre entre os Domínios Sapucaia e Canaã dos Carajás. Essa suíte é constituída por tonalitos e granodiorito

com anfibólio e biotita, com idade variáveis entre 2,75 Ga e 2,72 Ga (Feio *et al.* 2012, Silva *et al.* 2014). Ocorrem próximos a região de Vila Jussara, associados a rochas máficas charnockíticas, e apresentam assinatura geoquímica granitos tipo-A com afinidade subalcalina, metaluminosos ou muito subordinadamente peraluminosos semelhantes àqueles da Suíte Planalto (Feio *et al.* 2012). No entanto, se diferenciam pelo caráter predominantemente oxidado e pela presença expressiva de rochas granodioríticas e tonalíticas com anfibólio modal e epidoto magmático (Cunha *et al.* 2016, Dall’Agnol *et al.* 2017).

2.1.3 Domínio Canaã dos Carajás (~ 3,00 a 2,70 Ga)

O Domínio Canaã dos Carajás (Figura 2c), onde está localizada a área de trabalho, ocorre ao norte do Domínio Sapucaia, é considerado embasamento da Bacia Carajás e se distingue dos outros domínios por suas associações litológicas e assinatura isotópica de Nd (Dall’Agnol *et al.* 2013, Feio *et al.* 2013). Esse domínio é composto principalmente por um grande volume de granitoides de idades mesoarqueana a neoarqueana com assinaturas geoquímicas distintas (Feio *et al.* 2013). De maneira geral o Domínio Canaã dos Carajás é caracterizado por: (1) greenstone belts do Grupo Sequeirinho; (2) Granulitos Chicrim-Cateté e Ouro Verde; (3) Complexo Xingu; (4) Granitoides mesoarqueanos como Tonalito Bacaba, Trondhjemito Ourilândia, Trondhjemito Rio Verde, Complexo Tonalítico Campina Verde e os Granitos Canaã dos Carajás, Bom Jesus, Cruzadão, Boa sorte e Serra Dourada; (5) Suíte Intrusiva Cateté; (6) Diopsídio Norito Pium; (7) Enderbitto Café; (8) Trondhjemito Pedra Branca; (9) Granitoides neoarqueanos como os Granitos Serra do Rabo e Igarapé Gelado, as rochas do Complexo Estrela e das suítes Plaqué, Planalto e Vila União.

O Grupo Sequeirinho corresponde a sequência *greenstone belt*, composto por rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas (textura *spinifex*) interdigitadas com rochas metavulcânicas intermediárias a ácidas, formações ferríferas bandadas, *metachert*, xistos e paragneisses (Tavares 2014, 2015, Costa *et al.* 2016, Silva 2022).

O Granulito Chicrim-Cateté (~3,0 Ga – 2,86Ga), foi caracterizado por Vasquez *et al.* (2008) como embasamento da Bacia Carajás, constituído por rochas de composição monzogranítica tonalíticas cálcio-alcalina, com ocorrência restrita de granulitos máficos associados (Araújo & Maia 1991, Vasquez *et al.* 2008), ocorrerem também como pequenos núcleos granulíticos localizados próximos a Vila Ouro Verde, denominados de Granulito Ouro Verde e caracterizados pela ocorrência de granulitos félsicos com composição tonalítica

a trondhjemiticas tipo-TTG, associados a pequenos volumes de granulitos máficos, as vezes observados como enclaves no granulito félsico (Marangoanha *et al.* 2019a, Silva *et al.* 2021).

O Complexo Xingu compreende parte do embasamento da Província Carajás, este é caracterizado pela ocorrência de Diopsídio-hornblenda-plagioclásio gnaiss e quartzo anfíbolito, intercalados a gnaisses de fácies anfíbolito superior a granulito, variavelmente migmatizados, com protólitos de composição tonalíticas a granodiorítica da série TTG (Silva 2014, Silva *et al.* 2015). O complexo Xingu teve sua área de ocorrência reduzida de forma significativa, uma vez que estudos recentes possibilitaram a individualização de granitoides mesoarqueanos que antes eram atribuídos a esse complexo (Feio *et al.* 2013).

Entre os granitoides mesoarqueano destacam-se as rochas de afinidade toleítica a cálcio-alcálica, que ocorrem de forma subordinada, e incluem o Tonalito Bacaba (3,0 Ga; Moreto *et al.* 2011), e Complexo Tonalítico Campina Verde (2,85 Ga; Feio *et al.* 2013). Ocorrem também Tonalito e Trondhjemitos de afinidade TTG, representados pelo Trondhjemito Rio Verde (~2,93-2,85 Ga; Feio *et al.* 2013) e Trondhjemito Ourilândia (~2,92 Ga; Silva 2022).

Os granitos cálcio-alcálicos mesoarqueanos ocorrem predominantemente nas adjacências da região de Canaã dos Carajás, dentre estes o Granito Canaã dos Carajás (~2,96 Ga; Feio *et al.* 2013), que possui caráter mais sódico, composto de rochas hololeucocráticas, com forte deformação. Além deste, ocorrem também granitos potássicos de afinidade cálcio-alcálica de 2,95 a 2,84 Ga, que são os granitos Cruzadão (Feio *et al.* 2013), Boa Sorte (Rodrigues 2011, Rodrigues *et al.* 2011), Bom Jesus (Feio *et al.* 2013) e Serra Dourada (Moreto *et al.* 2011, Feio *et al.* 2014). Segundo Feio *et al.* (2013), o Granito Cruzadão apresenta idade de cristalização em aproximadamente 2,84 Ga e assinatura geoquímica transicional entre as séries cálcico-alcálica e alcálica, fortemente foliado, localmente associado a hornblenda tonalitos. As rochas do Granito Boa Sorte, foram descritas por Rodrigues *et al.* (2014) como biotita monzogranitos e leucogranitos fortemente foliados fracionados e com idade de cristalização 2,85 Ga. O granito Bom Jesus é caracterizado por monzogranitos e sienogranitos, fortemente bandados e foliados, com idade de cristalização de aproximadamente 2,83 Ga (Feio *et al.* 2013). Por último o Granito Serra Dourada descrito por Feio *et al.* (2013) como leucomonzogranitos de granulação média a grossa, seccionados por pegmatitos e veios aplíticos, e com idade de cristalização de 2,86 Ga.

O magmatismo neoarqueanos ocorre de forma extensiva no Domínio Canaã dos Carajás, estes são representados por rochas máfico-ultramáficas, granitóides e charnockitos-enderbitos (Vasquez *et al.* 2008, Dall'Agnol *et al.* 2013, Dall'Agnol *et al.* 2017, Marangoanha

et al. 2019a, 2019b, 2020). A Suíte intrusiva Cateté corresponde ao magmatismo máfico-ultramáfico deste domínio, é caracterizado por intrusões acamadadas do Complexo Serra da Onça, Complexo Luanga, Complexo Lago Grande, todos de idades neoarqueana ~2,76 Ga (Lafon *et al.* 2000; Teixeira *et al.* 2015).

Os granulitos máficos que ocorrem entre os rios Pium e Parauapebas, foram reclassificados por Santos *et al.* (2013) como rochas máficas ígneas com ortopiroxênio de idade neoarqueana de aproximadamente 2,75 Ga e denominados de Diopsídio Norito Pium, cuja associação dominante são noritos e quartzo noritos isotrópicos ou fracamente deformados. Associado espacialmente ao Diopsídio Norito Pium ocorrem outros plutons lenticulares denominados por Marangoanha *et al.* (2019a) de Enderbitó Café composto por granitoides sódicos com ortopiroxênio.

A Suíte Pedra Branca é composta por Tonalitos e Trondhjemitos, fortemente deformados com hornblenda e biotita como máficos principais, e idade em torno de 2,75 Ga (Gomes & Dall’Agnol 2007, Feio *et al.* 2013). Além desses, vários plútons de afinidade subalcalina e assinatura geoquímica de magmatismo do tipo A foram descritos, tais como: Complexo Estrela (~2,76 Ga; Barros *et al.* 2004, 2009), Granito Serra do Rabo (~ 2,74 Ga; Barros *et al.* 2009) e Granito Igarapé Gelado datado (~2,73 Ga; Barbosa 2004, Barros *et al.* 2009).

Além destes, ocorrem também unidades compostas essencialmente por granitos ferrosos com anfibólio e biotita como máficos principais, que compõem as Suítes Planalto, Plaqué e Vila União. A Suíte Planalto é composta por álcali feldspato granito, monzogranitos e sienogranitos, com idade aproximada de 2,74 Ga (Feio *et al.* 2012). A suíte Plaqué é caracterizada por corpos graníticos de granulação média a grossa, as vezes apresentando foliação, com idade de 2,73 Ga (Macambira *et al.* 1996, Avelar *et al.* 1999). A Suíte Vila União, caracterizada pela ocorrência de quartzo diorito, tonalito, granodiorito e sienomonzogranito que formam plútons alongados paralelamente à principal estrutura de cisalhamento E – W (Marangoanha *et al.* 2020).

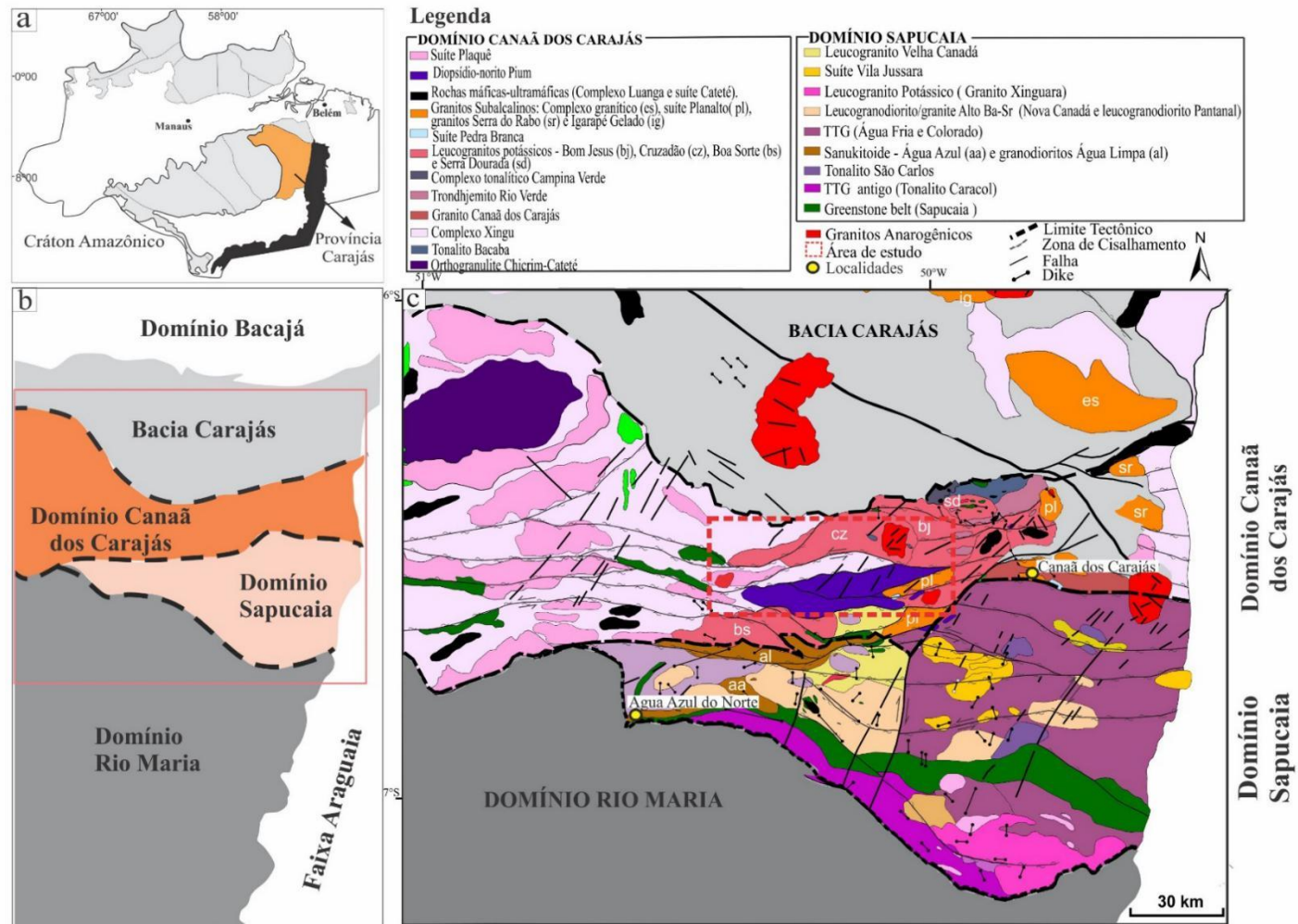


Figura 2 - Mapa geológico simplificado da Província Carajás, destacando os domínios Canaã dos Carajás e Sapucaia. Modificado de Vasquez *et al.* (2008), Guimarães *et al.* (2012), Santos *et al.* (2012), Santos & Oliveira (2012), Gabriel (2012), Feio *et al.* (2013). A) Subdivisão do Cráton Amazônico em províncias geocronológicas, com destaque para Província Carajás (Santos 2003). B) Representação da Província Carajás e sua divisão em domínios tectonicamente distintos, caracterizados pelo Domínio Rio Maria, Sapucaia, Canaã dos Carajás e Bacia Carajás ao norte (Dall'Agnol *et al.* 2006, Vasquez *et al.* 2008). C) Mapa geológico dos domínios Sapucaia e Canaã dos Carajás, com destaque para a área de ocorrência dos granitos estudados.

2.1.4 Bacia Carajás

A Bacia Carajás é caracterizada pela ocorrência de sequências metavulcano sedimentares neoarqueanas do Grupo Grão Pará (~ 2,76 -2,73 Ga), intrudido por magmatismo bimodal (rochas máfico-ultramáficas e granitos subalcalinos) (Docegeo 1988, Machado *et al.* 1991, Barros *et al.* 2009, Martins *et al.* 2017, Tavares *et al.* 2018), e recobertas por rochas sedimentares das Formações Serra Sul e Águas Claras (~ 2,68-2,06 Ga; Nogueira *et al.* 1995, Araújo & Nogueira 2019).

2.2 GRANITOS ANOROGÊNICOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS.

A Província Carajás foi palco de um evento magmático extensivo, marcado por intrusões graníticas anorogênicas e diques associados (Figura 3; Dall’Agnol *et al.* 2005, Silva *et al.* 2016). De forma geral esses granitos ocorrem como *stocks* de forma subcircular, isotrópicos, de alto nível crustal (1-3 Kbar), que ocorrem como intrusões em uma crosta rígida cortando de forma discordante suas rochas encaixantes, e apresentam razões Na₂O/K₂O que variam entre 1,0 e 2,0, são metaluminosos a peraluminosos, com elevado conteúdo de HFSE (*High Field-Strength Elements*) e caráter ferroso, comumente ocorre associados a esses granitos enclaves angulares das rochas encaixantes (Dall’Agnol *et al.* 2005). Devido à forte similaridade, esses granitos foram então caracterizados por Dall’Agnol *et al.* (2005) e Dall’Agnol & Oliveira (2007), e divididos em três suítes distintas, que são:

2.2.1 Suíte Jamon

A Suíte Jamon ocorre no Domínio Rio Maria (Figura 3), é representada pelos granitos Musa (Gastal 1987), Redenção (Oliveira *et al.* 2002), Marajoara (Santos *et al.* 2018), Jamon (Dall’Agnol *et al.* 1999), Bannach (Almeida *et al.* 2006) e Manda Saia (Santos, 2020). Esses granitos são marcados por uma homogeneidade composicional essencialmente monzogranítica e subordinadamente sienograníticas, comumente com megacristais de k-feldspato envoltos por plagioclásio (textura rapakivi), e com mineralogia acessória: zircão, apatita, magnetita, ilmenita, allanita, titanita e fluorita nas fácies mais evoluídas (Almeida *et al.* 2006, Oliveira *et al.* 2002). A constante presença de magnetita e titanita associadas é um forte indicativo que essas rochas foram formadas em condições oxidantes e de fugacidade de oxigênio (fO_2) relativamente elevada (Dall’Agnol *et al.* 1999, Almeida *et al.* 2007).

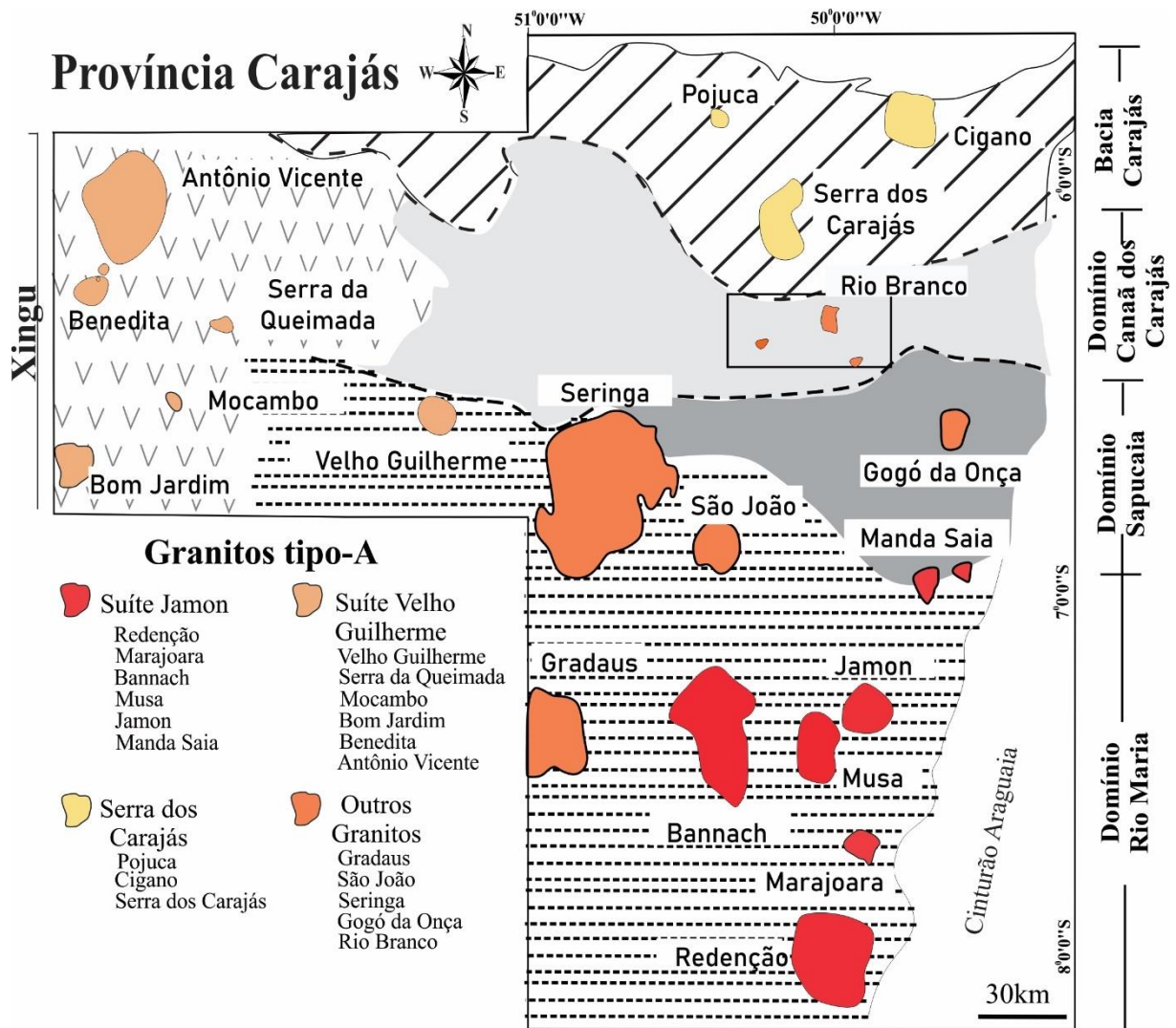


Figura 3 - Mapa geológico simplificado destacando as suítes graníticas paleoproterozoicas e a distribuição das principais ocorrências de granitos tipo-A da Província Carajás; Modificado de Dall'Agnol *et al.* (2005).

2.2.2 Suíte Serra dos Carajás

Os granitos anorogênicos paleoproterozoicos exclusivamente inseridos na porção da Bacia Carajás são representados pela Suíte Serra dos Carajás (Figura 3; Dall'Agnol *et al.* 2005), composta pelos Granitos Serra dos Carajás, Cigano e Pojuca (Javier Rios *et al.* 1995, Barros *et al.* 1995, Dall'Agnol *et al.* 2005). Esses granitos são marcados por uma homogeneidade composicional essencialmente monzogranítica e subordinamente sienograníticas, e com mineralogia acessória: zircão, apatita, magnetita, ilmenita, allanita e titanita rara ou ausente. Localmente podem ocorrer granitos hidrotermalizados onde a ocorrência de topázio e fluorita são comuns, e a turmalina por vezes pode estar presente (Barros *et al.* 1995, Javier Rios *et al.* 1995). Pode ocorrer a presença de magnetita, porém sem

ilmenita associada. Essas rochas foram formadas em condições de baixa fO_2 e sua assinatura geoquímica é própria de granitos tipo-A moderadamente reduzidos (Dall'Agnol & Oliveira 2007).

2.2.3 Suíte Velho Guilherme

A suíte Velho Guilherme, em sua maioria, ocorre na região do Xingu, composta pelos granitos estaníferos: Mocambo, Antônio Vicente, Benedita, Serra da Queimada, Bom Jardim e Velho Guilherme sendo este último localizado na região de Tucumã (Figura 3). Apresentam características subalcalinas e alcalinas, geralmente sienogranitos, monzogranitos e subordinadamente álcali-feldspato granitos. Suas fácies mais evoluídas são afetadas por intensa alteração hidrotermal pós-magmática. Apresentam intensa mineralizações de cassiterita, wolframita, fluorita, molibdenita e topázio são comuns nesses corpos, geralmente acompanhando as rochas mais evoluídas e intensamente hidrotermalizadas e a corpos de greinsens associados (Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2002, 2005, Lamarão *et al.* 2012). São mineralogicamente ricos em fluorita e com rara presença de titanita e magnetita (fases menos evoluídas), e são mais pobres em máficos do que as rochas das outras suítes, com conteúdo modal de mineral opaco menor que 0,1%. Isto implica baixos valores de SM, implicando em um caráter mais reduzido (Dall'Agnol & Oliveira 2007).

2.2.4 Outros granitos tipo-A

Além das três suítes mencionadas acima, é necessário destacar os granitos Seringa (Paiva Jr. *et al.* 2011), Rio Branco (Santos *et al.* 2013), São João (Lima *et al.* 2014), Gradaús (Abrantes Jr & Lamarão 2011, Carvalho 2017, Nery 2019) e Gogó da Onça (Teixeira *et al.* 2017) que não foram, até o momento, vinculados a nenhuma das suítes mencionadas. Os estudos feitos nesses granitos pelos autores citados, sugerem maiores semelhanças com os granitos da Suíte Serra dos Carajás. No entanto, da mesma forma apresentam forte divergência, e por isso não foram enquadrados de maneira conclusiva em nenhuma das suítes mencionadas.

O Granito Seringa: composto por sienogranitos e monzogranitos, com mineralogia acessória que incluem zircão, magnetita, ilmenita, apatita e allanita. A magnetita atinge proporções maiores que 1% nos monzogranitos e até 0,5% nas rochas mais evoluídas, sendo mais frequente que a ilmenita, com conteúdo modais de opacos variando de 2,6% a 0,3% e valores moderados de SM, similares aos da Suíte Serra dos Carajás (Paiva Jr. *et al.* 2011).

O Granito São João: composto por monzogranitos e sienogranitos, que seccionam unidades TTGs pertencentes ao Domínio Rio Maria. Apresenta mineralogia acessória que incluem zircão, apatita, allanita, magnetita e ilmenita, com conteúdo modal de opacos inferior a 1% e valores moderados de SM (Lima *et al.* 2014). A ausência de titanita magmática e a associação de magnetita e ilmenita conferem a esse granito valores moderados de SM e, portanto, caráter moderadamente reduzido (Dall’Agnol & Oliveira 2007, Lima *et al.* 2014).

O Granito Gradaús: intrusivo em metassedimentos do Grupo Rio Fresco que recobrem unidades arqueanas pertencentes ao Domínio Rio Maria, possui cerca de 800 Km², e é composto por rochas monzograníticas a sienograníticas, apresentando textura granular hipidiomórfica a porfirítica, com mineralogia acessória constituída por apatita, allanita, zircão, ilmenita, magnetita, fluorita. É um plúton moderadamente reduzido e com valores de SM moderada a baixa (Carvalho 2017).

O Granito Gogó da Onça: composto por granodiorito, monzogranitos e sienogranitos de textura granular hipidiomórfica a localmente granofírica, com mineralogia acessória composta por apatita, allanita, zircão, ilmenita e magnetita, com conteúdo modal de opacos inferior a 1% e valores moderados de SM (Teixeira *et al.* 2017).

O Granito Rio Branco: composto essencialmente por sienogranitos, com mineralogia acessória que incluem zircão, allanita, fluorita, hematita e magnetita (rara). As fases minerais secundárias estão relacionadas aos processos de alteração pós-magmática e são representadas por albita, topázio, fluorita, muscovita, siderofilita e óxidos e/ou hidróxidos de ferro e valores de SM baixos (Santos *et al.* 2013).

Datações feitas em zircão por métodos variados (U-Pb, Pb-Pb – Tabela 1), indicam idades de cristalização de ~1,88 Ga para esses granitos (Machado *et al.* 1991, Dall’Agnol *et al.* 1999, 2005, Teixeira *et al.* 2017, 2018). Estudos isotópicos de Nd, foram obtidos e revelam idades TDM arqueanas (~3,35 Ga a 2,60 Ga; Dall’Agnol *et al.* 2005, Rämö *et al.* 2002, Teixeira *et al.* 2018, 2019) e valores de ϵ Nd extremamente negativos (-12 a -8). Os valores de ϵ Nd das Suítes Jamon e Serra dos Carajás são similares (-10,5 a -8,1 e -9,7 a -7,9, respectivamente) e maiores que aqueles da Suíte Velho Guilherme (-12,1 a -12,2). Além destes, dados isotópicos de Lu-Hf obtidos por Teixeira *et al.* (2019) revelam idades T_{DM} ~ 3,12 Ga a 358 Ga e valores de ϵ Hf extremamente positivos que variam entre ~ 9,8 a 17,3. Tais dados associados podem ser interpretados como indicativo de fontes arqueanas para gênese desses magmas. Uma síntese dos principais dados geocronológicos e isotópicos obtidos até então, ocorrem resumidos na tabela abaixo:

Tabela 1 - Dados geocronológicos e isotópicos dos granitos tipo-A da Província Carajás.

Suítes	Plúton	Idades (Ma)	Material	Método	Sm-Nd		Lu-Hf	
					T _{DM}	εNd	T _{DM}	εHf
Jamon	Jamon	1885 ± 32 ⁽⁶⁾	Rocha Total	Pb-Pb Evaporação	3024	- 9,4 ⁽³⁾		
		1870 ± 18 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	2874	- 9,5 ⁽³⁾		
	Musa	1882 ± 4 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	2821	-9,4 ⁽³⁾	3,40	14,4 ⁽¹¹⁾
	Redenção	1870 ± 68 ⁽⁶⁾	Rocha Total	Pb-Pb Evaporação	2785	- 8,8 ⁽⁴⁾	3,40	14,5 ⁽¹⁴⁾
		1883 ± 9 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	2807	-10,5 ⁽⁴⁾	3,35	13,6 ⁽¹¹⁾
	Bannach	1875 ± 6 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	2844	- 9,6 ⁽⁴⁾	3,38	14,2 ⁽¹¹⁾
Marajoara	1885 ± 5 ⁽¹⁰⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP					
Serra dos Carajás	Cigano	1884 ± 4 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	2668	- 9,5 ⁽⁶⁾	3,43	14,9 ⁽¹¹⁾
	Pojuca	1871 ± 2 ⁽¹⁾	Zircão	U-Pb TIMS	3353	-9,7 ⁽⁶⁾		
	Serra dos Carajás	1880 ± 2 ⁽¹⁾	Zircão	U-Pb TIMS	2611	- 7,9 ⁽⁶⁾	3,40	14,4 ⁽¹¹⁾
		1882 ± 10 ⁽¹¹⁾		U-Pb SHRIMP	2727	- 9,2 ⁽⁶⁾	3,44	15,0 ⁽¹¹⁾
Velho Guilherme	Antônio Vicente	1882 ± 15 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	3254	-12,1 ⁽⁵⁾	3,40	14,2 ⁽¹¹⁾
	Serra da Quemada	1882±12 ⁽⁷⁾	Rocha Total	Pb-Pb Evaporação				
	Mocambo	1862±32 ⁽⁵⁾	Rocha Total	Pb-Pb Evaporação	2976	-7,9 ⁽⁵⁾		
	Bom Jardim	1884±4 ⁽⁷⁾	Rocha Total	Pb-Pb Evaporação				
	Velho Guilherme	1874±30 ⁽²⁾	Rocha Total	Pb-Pb Evaporação			3,34	13,4 ⁽¹¹⁾
		1882 ± 6 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP			3,36	13,7 ⁽¹¹⁾
Outros Granitos	Seringa	1889 ± 8 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	2,86	-10,7 ⁽¹¹⁾	3,47	15,5 ⁽¹¹⁾
	São João	1877± 3 ⁽¹¹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	2,91	-10,8 ⁽¹¹⁾	3,53	16,7 ⁽¹¹⁾
	Gogó da Onça	1866 ± 10 ⁽⁹⁾	Zircão	U-Pb SHRIMP	2,80	-9,07 ⁽⁹⁾	3,52	16,5 ⁽¹¹⁾
	Gradaús	1882± 9 ⁽⁸⁾	Zircão	Pb-Pb Evaporação				

Fonte: (1) Machado *et al.* (1991), (2) Lafon *et al.* (1995), (3) Dall'Agnol *et al.* (1999c), (4) Rämö *et al.* (2002), (5) Teixeira *et al.* (1999), (6) Dall'Agnol *et al.* (2005), (7) Pinho (2005), (8) Abrantes Jr & Lamarão (2011), (9) Teixeira *et al.* (2017), (10) Santos *et al.* (2018), (11) Teixeira *et al.* (2018, 2019).

CAPÍTULO 3 PETROGRAFIA

3.1 GEOLOGIA E PETROGRAFIA DOS GRANITOS ESTUDADOS

Os granitos estudados estão localizados na porção central do Domínio Canãa dos Carajás na Província Carajás (Figura 4a). São identificados como dois *stocks* subcirculares intrusivos em granitoides arqueanos. O *stock* que ocorre na porção oeste da área, aqui denominado de granito oeste (Figura 4b), é intrusivo em monzogranitos da suíte Vila União (~ 2,74 Ga; Marangoanha *et al.* 2019). Esta suíte é caracterizada pela ocorrência de uma ampla variedade de rochas, que variam de sienogranitos a dioritos, e formam plútons alongados paralelamente à principal estrutura de cisalhamento E – W. O segundo *stock*, aqui denominado de granito este, ocorre como uma intrusão no Granito Cruzadão (2,87 Ga; Feio *et al.* 2013), que é marcado por forte foliação E-W. Contrastando com suas rochas encaixantes, os dois plútons estudados ocupam área inferior 5,0 km² e afloram como pequenos morrotes ou blocos isolados. A profundidade relativamente rasa (ambiente epizonal) na qual se deu a colocação dos magmas geradores destas intrusões pode ser atestada pelas diferenças de idade entre as suas rochas encaixantes e os plútons (1,89 Ga; este estudo). Além disso, o fato dessas intrusões truncarem as foliações regionais E-W é um indicio que a colocação das mesmas não foram condicionadas por tais estruturas, o que também evidencia um comportamento rígido das rochas encaixantes e comprova o alto contraste de viscosidade com o magma granítico durante sua colocação.

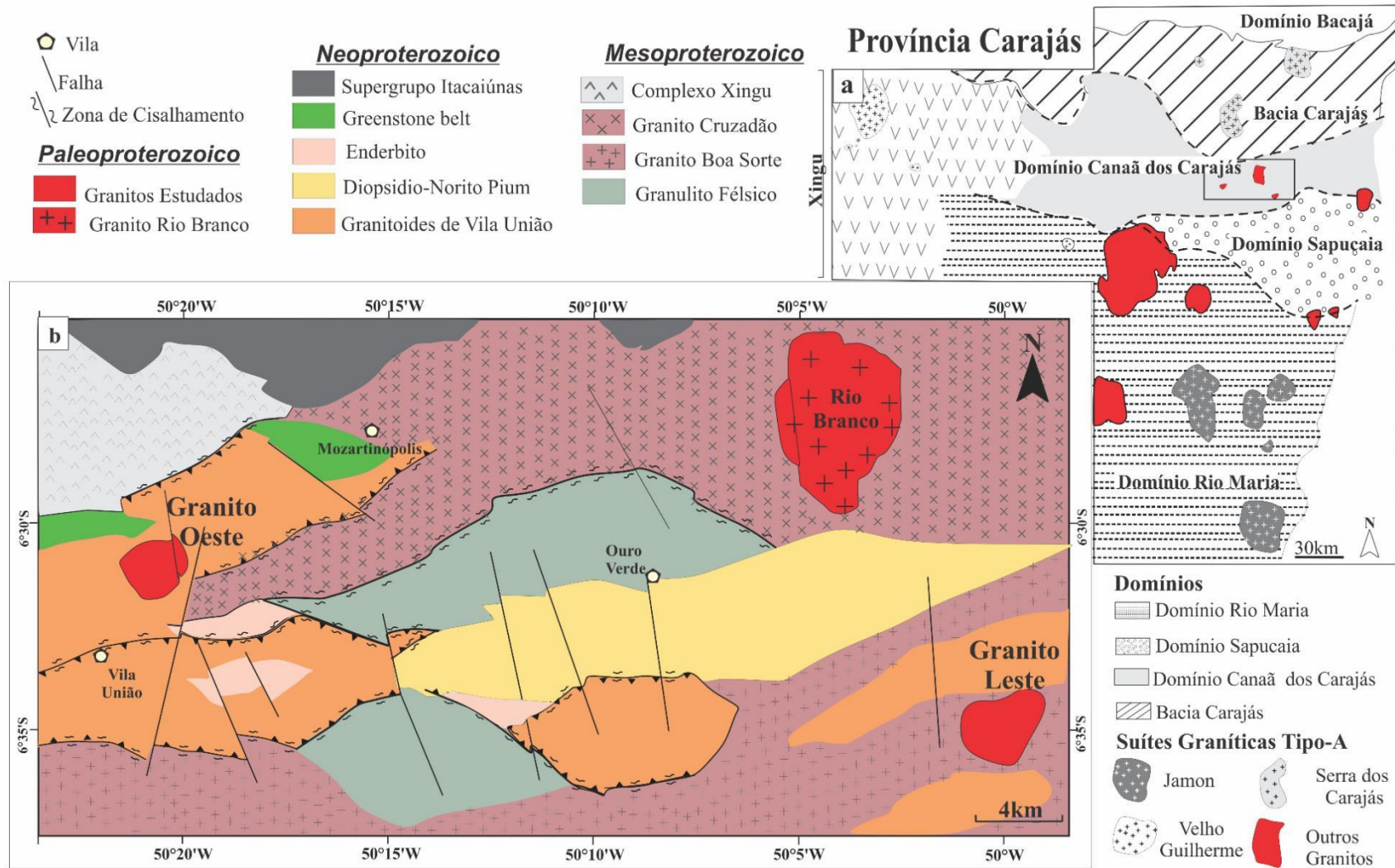


Figura 4 - Mapa geológico da área de trabalho. a) Mapa geológico simplificado destacando as suítes graníticas paleoproterozoicas e a distribuição das principais ocorrências de granitos tipo A da Província Carajás); b) Mapa geológico da área, destacando as principais unidades litoestratigráficas e os Granitos estudados. Modificado de Dall'Agnol *et al.* (2005), Marangoanha *et al.* (2019).

3.2 ASPECTOS TEXTURAIIS

Os plútons estudados são formados por rochas de aspecto isotrópico, hololeucocráticas ($M' < 5,0\%$), apresentam textura equigranular média (2-5mm), e raramente porfiríticas. Os dados obtidos a partir das análises modais permitem classificar essas rochas como essencialmente monzograníticas (ver Tabela 2 e diagramas QAP e Q-(A+P) - M', Figura 5). A fácies de textura equigranular (BM_zE) ocorre nos dois *stocks* graníticos e apresenta biotita cloritizada como único mineral ferromagnésiano (Figura 6a). Ocorrendo associada somente ao Granito Oeste, as rochas da fácies porfiríticas (BM_zP) apresentam agregados máficos dominados por biotita e finos cristais de anfibólio.

Os minerais acessórios incluem fluorita, allanita, apatita, epidoto, zircão, ilmenita e magnetita, além de sericita, argilominerais e clorita, como minerais secundários (Figura 6b-c).

O feldspato alcalino perítico ocorre como cristais subédricos com maclamentos tipo carlsbad e xadrez (Figura 6d). As lamelas de albita ocorrem na forma de filmes levemente ondulados, e podem ocorrer também como manchas disformes. Os contatos entre dois ou mais cristais de álcali feldspatos são geralmente suturados e por vezes marcados por um processo de albitização, caracterizado pelo desenvolvimento de bordas albiticas que ocorrem na forma de '*franjas*' que se projetam para o interior do cristal adjacente, gerando textura tipo '*coroa trocada*' (*swapped rims*) que imprimem um aspecto xenomórfico a esses cristais (Figura 6d). A ocorrência também de mesopertitas e de feições de intercrescimento granofírico são restritas ao Granito Oeste (Figura 6e-6f). Estes cristais geralmente contêm inclusões de plagioclásio, opacos, quartzo e biotita imprimindo em um aspecto tardio ao mineral.

O Plagioclásio ocorre como cristais subédricos comumente apresentam maclamento albita, são fortemente alterados para sericita-muscovita, e por vezes ocorrem na forma de agregados de grãos. O Quartzo ocorre como cristais anédricos com extinção ondulante e que comumente formam agregados. Outro tipo morfológico de quartzo ocorre como intercrescimento na borda de cristais de álcali feldspato gerando textura granofírica. Na variedade porfirítica (Figura 6g), é marcante a presença de fenocristais de quartzo e feldspatos comumente com bordas corroídas (embaçamento) imersos em uma matriz granofírica (Figura 6h-6k).

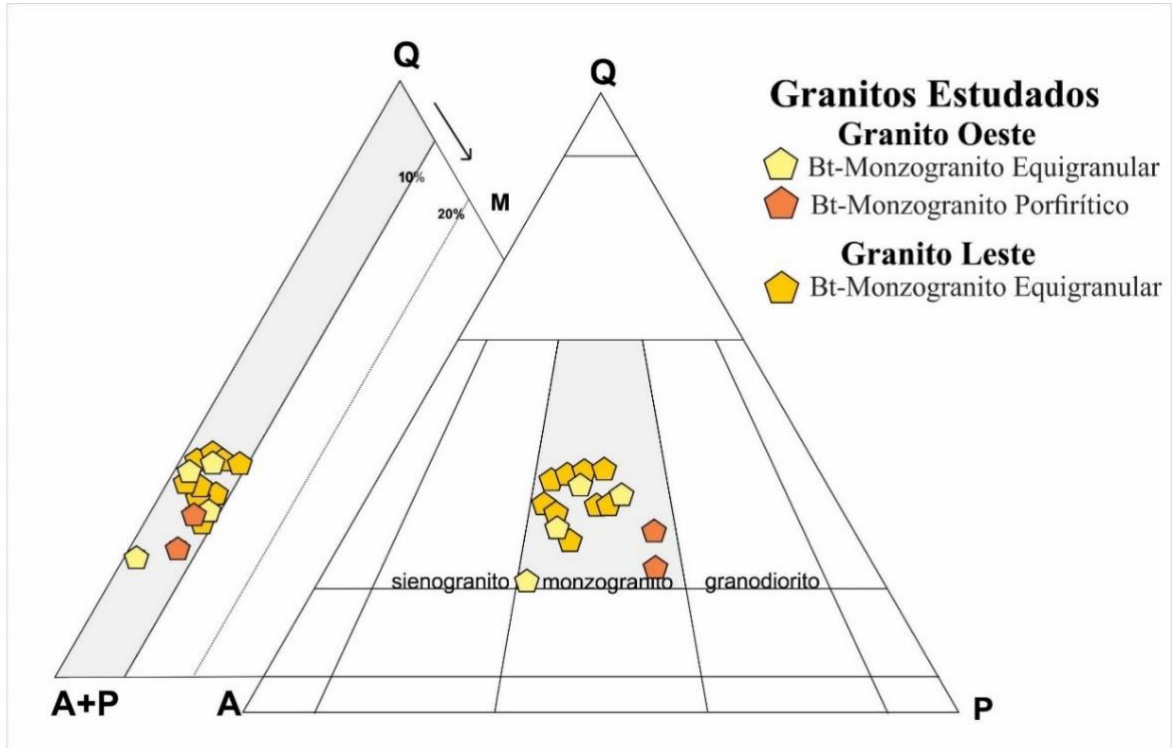


Figura 5 - Diagramas modais Q-A-P (Streckeisen, 1976) e Q-(A+P) - M para os dois granitos estudados. Abreviações: A- Álcalis, Q- Quartzo, P- Plagioclásio, M- Máficos.

Tabela 2 Composições modais dos corpos plutônicos estudados do Domínio Canaã dos Carajás.

Granitos Estudados	Granito Oeste						Granito Leste								
	Biotita Monzogranito Equigranular				Biotita Monzogranito Porfirítico		Biotita Monzogranito Equigranular								
Fácies															
Amostras	Al 14	Al 62*	Al 41	BVD 43 A	BVD 43 B*	BVD 43 C*	18	20	22	28	54	51	DMP 61	FDM 01	FDM 04
Quartzo	26,6	35,4	33,2	19,90	27,01	21,01	34,8	35,8	31,9	25,4	30,4	34,2	30,78	29,4	36,2
K-feldspato	37,5	32,5	28,9	49,80	25,77	27,77	27,5	36,2	31,5	36,3	32,1	31,7	37,11	38	31,5
Plagioclásio	26,4	26,6	33,8	28,25	40,08	42,08	28,1	24,3	33,3	27,9	30,6	24,8	23,06	25,9	27,3
Biotita	7	4,6	2,1	1,25	4,03	6,49	8	2	2,1	8	4,1	3,9	1,25	5,4	4,1
Anfíbólio	-	-	-	-	Tr	Tr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Clorita	0,4	0,6	1,7	0,05	2,03	1,52	0,1	1,2	0,9	0,5	1,4	2,5	0,06	0,2	-
Opacos	1,1	0,1	0,1	0,15	0,5	0,60	0,7	0,2	0,4	0,7	0,3	0,9	0,5	0,4	0,6
Allanita	0,3	0,3	-	0,05	0,04	0,33	0,4	-	-	0,5	0,5	0,4	0,06	0,2	0,2
Epidoto	0,2	-	-	-	-	-	-	0,1	-	0,1	-	0,6	0,00	-	-
Muscovita	-	0,1	0,1	0,05	-	-	-	-	-	-	0,3	0,3	-	0,1	-
Zircão	0,2	0,1	0,2	0,05	0,15	0,13	0,4	-	-	0,1	0,1	0,3	0,05	0,2	0,2
Apatita	0,2	-	-	-	-	-	0,1	0,2	-	0,3	0,2	0,4	0,06	0,2	0,1
Fluorita	-	-	-	0,15	0,12	-	-	0,1	-	0,3	-	-	0,83	-	-
Félsicos	90,5	94,5	95,9	98,0	93	90,86	90,3	96,3	96,7	89,7	93,2	90,7	93,8	91	95
Máficos	9,5	5,5	4,1	2,0	6,87	9,1	9,7	3,8	3,3	10	6,8	9,3	2,81	6,7	5,2
A 100%															
Quartzo	29,3	37,5	34,6	20,31	29,09	24,17	38,5	37,2	33	28,4	32,7	37,7	33,84	31,5	38,1
K-feldspato	41,4	34,4	30,1	50,84	27,75	28,73	30,4	37,6	32,5	40,5	34,5	35	40,8	40,7	33,1
Plagioclásio	29,2	28,1	35,2	28,85	43,16	47,10	31,1	25,2	34,5	31,1	32,9	27,3	25,35	27,8	28,7
Pl/Mc	0,7	0,8	1,2	0,6	1,5	0,75	1	0,7	1,1	0,8	1	0,8	0,62	0,7	0,9
Nº de Pontos	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800

*Intercrescimentos: quartzo + feldspato potássico; (-) não observado; Pl-Plagioclásio; Mc-Microclina; Tr-Traço.

A biotita é o mineral máfico mais importante, seus cristais são subédricos a anédricos, com forte pleocroísmo com cores variando de verde, marrom escuro, marrom a amarelo claro. Representa tipicamente um mineral de cristalização tardia, muitas vezes mostrando-se transformado para clorita. Por vezes ocorre na forma de agregados máficos em associação com biotita + minerais opacos + zircão + fluorita + allanita + apatita. A mica contém inclusões de quartzo, allanita, zircão e apatita. Finos cristais de biotita podem ocorrer inclusos em álcali feldspato. Outra feição que se destaca é a presença de epidoto e quartzo dispostos ao longo dos planos de clivagem da biotita. O anfibólio do tipo hornblenda está presente apenas na variedade porfíritica e forma agregados com biotita e minerais acessórios (Figura 6l).

A allanita é o mineral acessório mais expressivo e ocorre como cristais subédricos a euédricos, normalmente zonados e metamitizados, associados aos cristais de biotita, minerais opacos, fluorita e mais localmente ao epidoto. Possui pleocroísmo variando de amarelo pálido a castanho. A apatita apresenta-se como cristais anédricos, raramente prismáticos, e ocorrem como inclusões em cristais maiores de biotita e minerais opacos. O zircão ocorre de forma similar a apatita, por vezes zonados e com halos pleocróicos. Os minerais Opacos são subédricos a euédricos e ocorrem associados aos agregados máficos, geralmente inclusos na biotita ou associado à clorita, fluorita e allanita.

Os minerais secundários (pós-magmáticos) são argilominerais, sericita-muscovita, fluorita, clorita e albita. A albita ocorre em diversas formas, sendo mais comum na forma de lamelas sódicas que se desenvolvem inicialmente por exsolução no interior do feldspato alcalino, resultando em pertitas na forma de veios e 'manchas'. Em rochas onde a albitização foi mais intensa, há igualmente formação de albita intergranular (coroas trocadas). A fluorita ocorre como finos cristais anédricos, geralmente associados a minerais opacos, allanita e biotita. A sericita-muscovita e argilominerais ocorrem como produto da alteração dos feldspatos. A clorita ocorre como resultado da alteração de cristais de biotita.

Os minerais óxidos de Fe-Ti estão presentes em ambas as fácies, e foram identificados como ilmenita e magnetita, onde ocorrem como cristais subédricos e anédricos de granulação fina, geralmente inclusos na biotita ou associado a fluorita e allanita. A magnetita pode ocorrer como cristais individuais subédricos ou mais comumente associada com cristais de ilmenita formando textura de intercrescimento por processo de oxi-exsolução (Figura 6m). A ilmenita ocorre como cristais subédricos, sempre associada à magnetita formando dois tipos principais de texturas: (I) ilmenita *trellis* ou treliça (Ilm T), que corresponde a lamelas formadas de oxi-exsolução na magnetita ao longo de seus planos de clivagem (Figura 6n); (II)

ilmenita *composite* ou composta, que corresponde à cristais em contato reto com a magnetita (Figura 6o).

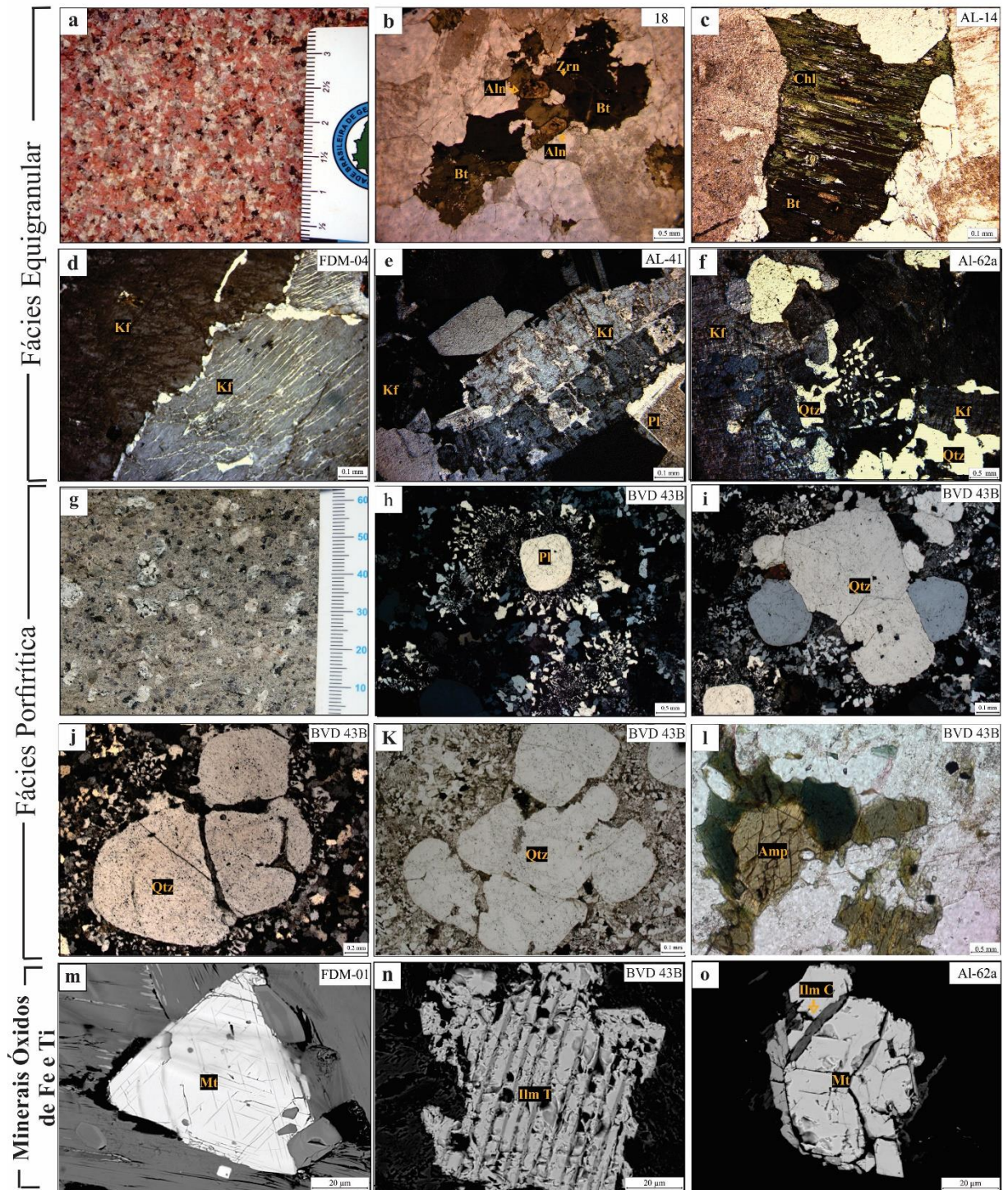


Figura 6 - Principais aspectos mineralógicos e texturais microscópicos dos granitos estudados. a) Textura fanerítica equigranular grossa; b) Concentração de biotita associadas a minerais opacos e allanita, com inclusões de zircão e apatita; c) Biotita intensamente transformado para clorita, com formação de epidoto e plagioclásio ao longo de seus planos de clivagem. d) Albita intergranular entre dois álcali feldspatos peritéticos; e) Feldspato potássico mesoperitítico com maclamento carlsbad; f) Feldspato potássico com intercrescimento de quartzo granofírico; g) Textura porfírica macroscópica; h) Matriz composta por intercrescimento granofírico; i) Fenocristais de quartzo e feldspatos j) Fenocristal de quartzo com borda apresentando textura granofírica; k) Fenocristal de quartzo com textura de embaimento; l) Cristal de anfibólio com clivagem característica que se cruzam em ângulos formando losangos; m) Magnetita subédrica com ilmenita em treliça ou *Trellis* (Ilm T); n) Ilmenita intercrescida com magnetita ao longo de seus planos de clivagem em lamelas verticais o) Textura de intercrescimento da Ilmenita *composite* ou composta externa (Ilm Cext) com magnetita. Abreviações: Kf- álcali-feldspato, Pl- plagioclásio, Qtz- quartzo, Bt- biotita, Amp- anfibólio, Aln- allanita, Chl- Clorita, Zrn- zircão, Mt- magnetita, Ilm- ilmenita.

CAPÍTULO 4 GEOQUÍMICA

4.1 INTRODUÇÃO

Os resultados geoquímicos discutidos a seguir foram obtidos a partir da análise química em rocha total de 9 amostras representativas dos granitos estudados (Tabela 3). Neste tópico, inicialmente será realizada uma descrição das principais características das rochas estudadas, com o comportamento dos elementos maiores, traços e terras raras e, por fim, a caracterização da tipologia. Tais dados foram confrontados com os dados dos granitos das três suítes paleoproterozoicas da Província Carajás disponíveis na literatura: suítes Jamon (Almeida *et al.* 2006, Oliveira *et al.* 2006), Velho Guilherme (Teixeira *et al.* 1999) e Serra dos Carajás (Dall’Agnol *et al.* 1994); e dos granitos Gogó da Onça (Teixeira *et al.* 2017) e Rio Branco (Santos *et al.* 2013). Isto permitirá que se faça uma melhor avaliação de suas afinidades petrológicas.

4.2 ELEMENTOS MAIORES E TRAÇOS

Os granitos estudados são fortemente fracionados e apresentam conteúdos elevados de SiO₂ (73–75%, Tabela 3). Mostram intervalos restritos para os conteúdos desse óxido, onde a disposição de suas amostras não define *trends* de evolução quando correlacionados com os demais óxidos. Em geral, estas rochas mostram valores moderados de Al₂O₃ (11,9–13,2%, Tabela 3), e muito baixos para CaO (0,9–1,6%) e MgO (0,1–0,3%). Os teores de K₂O são relativamente altos (4,77–5,6%), assim como aqueles de Na₂O que variam entre 2,39 e 3,5% (Tabela 3), resultando em razões K₂O/Na₂O entre 1 e 2. No entanto, apesar da pouca variação composicional entre as variedades estudadas, nota-se nos diagramas de variação de Harker (Figura 7) algumas diferenças entre as amostras da fácies equigranular de ambos os corpos em relação àquela de textura porfirítica. Os conteúdos dos óxidos de Ca (1,45 – 1,67%), Ti (0,4–0,42%) e Fe (4,05–4,33%) da variedade BMzGP são mais elevados em relação aqueles dos BMzGE (0,9 – 1,30%, 16–0,24% e 2,3–3,3%, respectivamente). Comportamento similar é observado para os conteúdos de Ba e Sr, os quais também são mais elevados na fácies porfirítica (2040–2130 ppm, 146,5–173ppm, respectivamente, tabela 3), e que por outro lado, seus teores de Rb são mais baixos (190,5–235 ppm) do que aqueles observados nas fácies equigranulares (4,38–712 ppm, 49,8–95ppm e 260,3–331ppm, respectivamente). Além disso, o granito porfirítico tem maiores teores de HFSE (Zr+Y+Nb) em relação aos granitos equigranulares (Figura 7).

Tabela 3 - Composições químicas dos granitos estudados

Granitos Estudados	Granito Oeste				Granito Leste					
	Fácies	BM _Z GE	BM _Z GE	BM _Z GP	BM _Z GP	BM _Z GE	BM _Z GE	BM _Z GE	BM _Z GE	BM _Z GE
Amostra	AL 14	AL 62	BVD 43B	BVD 43C	FDM 04	54	28	FDM 01	FDM 51	
SiO ₂ (%)	73,60	75,00	73,90	74,30	73,00	73,00	73,00	73,20	73,40	
TiO ₂	0,20	0,20	0,40	0,42	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	
Al ₂ O ₃	12,90	11,90	11,90	12,05	13,00	12,90	13,10	12,90	13,20	
Fe ₂ O _{3t}	2,60	2,30	4,81	4,50	3,00	3,30	2,90	3,10	2,70	
MnO	0,00	0,00	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
MgO	0,10	0,10	0,16	0,18	0,20	0,30	0,20	0,20	0,20	
CaO	1,10	1,00	1,45	1,67	1,20	0,90	1,30	1,30	1,00	
Na ₂ O	3,50	2,70	2,39	2,39	3,10	2,90	3,30	3,10	3,20	
K ₂ O	5,00	5,60	4,77	5,01	5,10	5,40	5,10	5,00	5,00	
P ₂ O ₅	0,00	0,00	0,07	0,09	0,10	0,10	0,00	0,00	0,10	
LOI	0,70	1,00	1,21	0,91	0,70	0,70	0,70	0,70	0,80	
Total	99,80	99,80	98,70	98,94	99,70	99,00	99,10	99,10	99,00	
Ba (ppm)	438,00	493,00	2130,00	2040,00	647,00	712,00	683,00	691,00	663,00	
Rb	307,80	260,30	235,00	190,50	331,00	289,40	313,30	313,80	265,20	
Sr	56,90	49,80	173,00	146,50	82,40	88,50	95,90	94,70	94,60	
Th	94,00	35,50	38,70	40,30	72,50	76,50	80,70	84,10	82,90	
U	25,50	13,00	6,08	7,40	23,00	15,80	18,30	20,70	16,20	
Zr	238,50	187,70	690,00	673,00	368,00	260,30	209,70	232,30	247,30	
Nb	56,30	26,00	29,90	31,50	45,40	34,90	35,10	38,30	27,30	
Y	96,80	55,00	73,90	71,00	49,20	22,80	62,20	56,60	24,60	
Ni	1,90	2,10	5,00	1,00	2,40	3,30	3,70	4,70	3,60	
Co	22,80	24,30	15,00	15,00	23,20	30,90	nd	nd	23,20	
Cu	19,80	10,80	17,00	76,00	8,60	8,20	nd	nd	10,00	
Zn	17,00	13,00	22,00	29,00	23,00	15,00	nd	nd	14,00	
Ga	27,70	21,60	27,30	26,60	22,00	20,10	20,90	21,20	21,20	
La (ppm)	101,70	117,70	168,00	152,00	153,50	155,60	156,80	161,60	168,30	
Ce	202,30	225,10	316,00	282,00	248,20	259,60	279,40	289,80	275,90	
Pr	21,50	23,20	33,70	30,70	25,30	25,10	27,50	27,50	25,60	
Nd	71,80	78,30	114,00	102,00	80,00	76,90	86,60	86,20	80,90	
Sm	13,00	13,00	18,90	16,45	11,40	12,60	13,10	12,90	12,50	
Eu	0,80	0,90	2,83	2,53	1,00	1,10	1,00	1,00	1,20	
Gd	13,30	11,10	16,65	14,95	8,50	10,00	11,70	11,60	9,30	
Tb	2,40	1,80	2,33	2,21	1,50	1,30	1,70	1,70	1,30	
Dy	15,20	10,60	13,20	12,70	8,50	6,30	10,40	10,00	6,10	
Ho	3,40	2,10	2,63	2,55	1,70	1,00	2,10	2,10	0,90	
Er	11,00	6,40	7,73	7,29	5,40	2,60	6,70	6,20	2,70	
Tm	1,70	0,90	1,10	1,11	0,90	0,40	1,10	1,00	0,40	
Yb	11,50	6,20	7,16	7,17	5,90	2,50	6,60	6,50	2,70	
Lu	1,80	0,90	1,05	1,07	0,90	0,40	1,10	1,00	0,40	
K ₂ O/Na ₂ O	1,40	2,00	1,00	1,00	1,60	1,80	1,60	1,60	1,50	
FeOt	2,40	2,10	4,30	4,00	2,70	3,00	2,60	2,80	2,40	
FeOt/(MgO+FeOt)	0,90	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	
A/CNK	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Ga/Al	4,10	3,40	4,30	4,10	3,20	2,90	3,00	3,10	3,00	
Y/Nb	1,70	2,10	2,47	2,25	1,10	0,70	1,80	1,50	0,90	
Rb/Sr	5,40	5,20	1,36	1,30	4,00	3,30	3,30	3,30	2,80	
Rb/Ba	0,70	0,50	0,11	0,09	0,50	0,40	0,50	0,50	0,40	
(La/Yb) _N	5,91	12,74	15,69	14,18	17,31	41,62	15,89	16,70	41,84	
ΣETR	471,40	498,20	705,28	634,73	552,60	555,40	605,70	619,00	588,20	
ΣETR Leves	411,00	457,30	653,43	585,68	519,40	530,90	564,40	579,00	564,40	
ΣETR Pesados	60,30	39,90	51,85	49,05	33,20	24,50	41,30	40,10	23,80	
Eu/Eu*	0,18	0,23	0,48	0,48	0,31	0,30	0,25	0,25	0,31	

Os padrões de elementos terras raras (ETR) das amostras analisadas foram normalizadas segundo Nakamura (1974), e mostram altos conteúdos da somatória destes elementos ($\Sigma\text{ETR} = 471,4 - 705,28$ ppm, Tabela 3), com padrões de distribuição sub-horizontalizados (moderadamente fracionado), mostrando um enriquecimento dos ETR leves ($\text{La} = 101,7 - 168,3$ ppm) em relação aos ETR pesados ($\text{Yb} = 2,5 - 11,5$ ppm) e razões La_N/Yb_N entre 5,91 e 41,62 (Figura 8). Além disso, os plútons estudados exibem uma moderada anomalia negativa de Eu, assim como apresentado por outros granitos evoluídos da Província Carajás (Figura 8), sendo que nas fácies equigranulares (BMZE) tais

anomalias são mais pronunciadas ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,18\text{--}0,31$) em relação aquelas mais discretas ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,48$) da fácies porfirítica (BMZP).

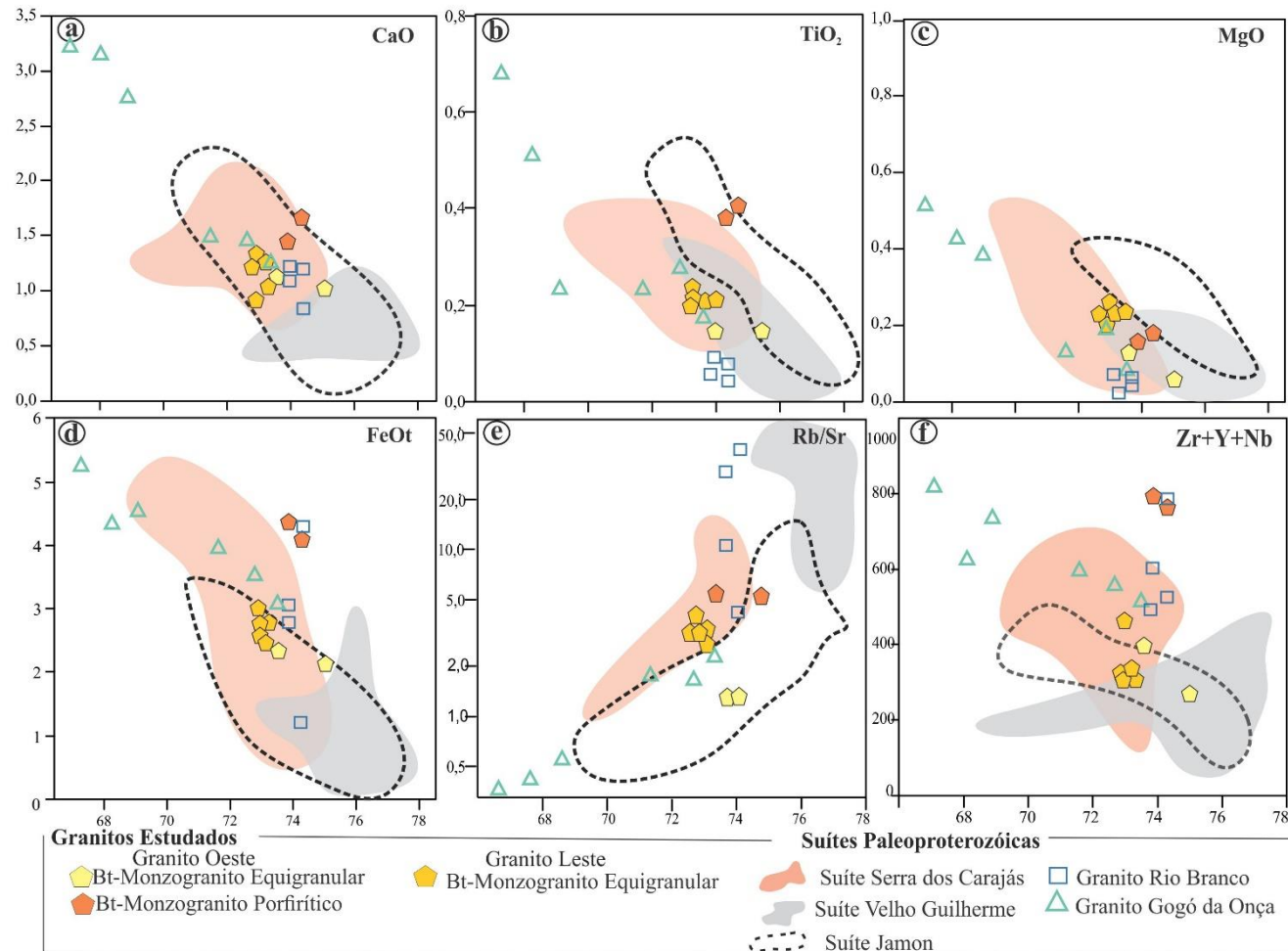


Figura 7- Diagramas de Harker para os óxidos de elementos maiores e elementos traços dos granitos estudados, em comparação com granitos das Suítas Paleoproterozóicas – Jamon (Dall’Agnol *et al.* 1999, Dall’Agnol & Oliveira 2007), Serra dos Carajás (Barros *et al.* 1995, Dall’Agnol *et al.* 1994) e Velho Guilherme (Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2005) e Granitos Rio Branco (Santos *et al.* 2013) e Gogó da Onça (Teixeira *et al.* 2017).

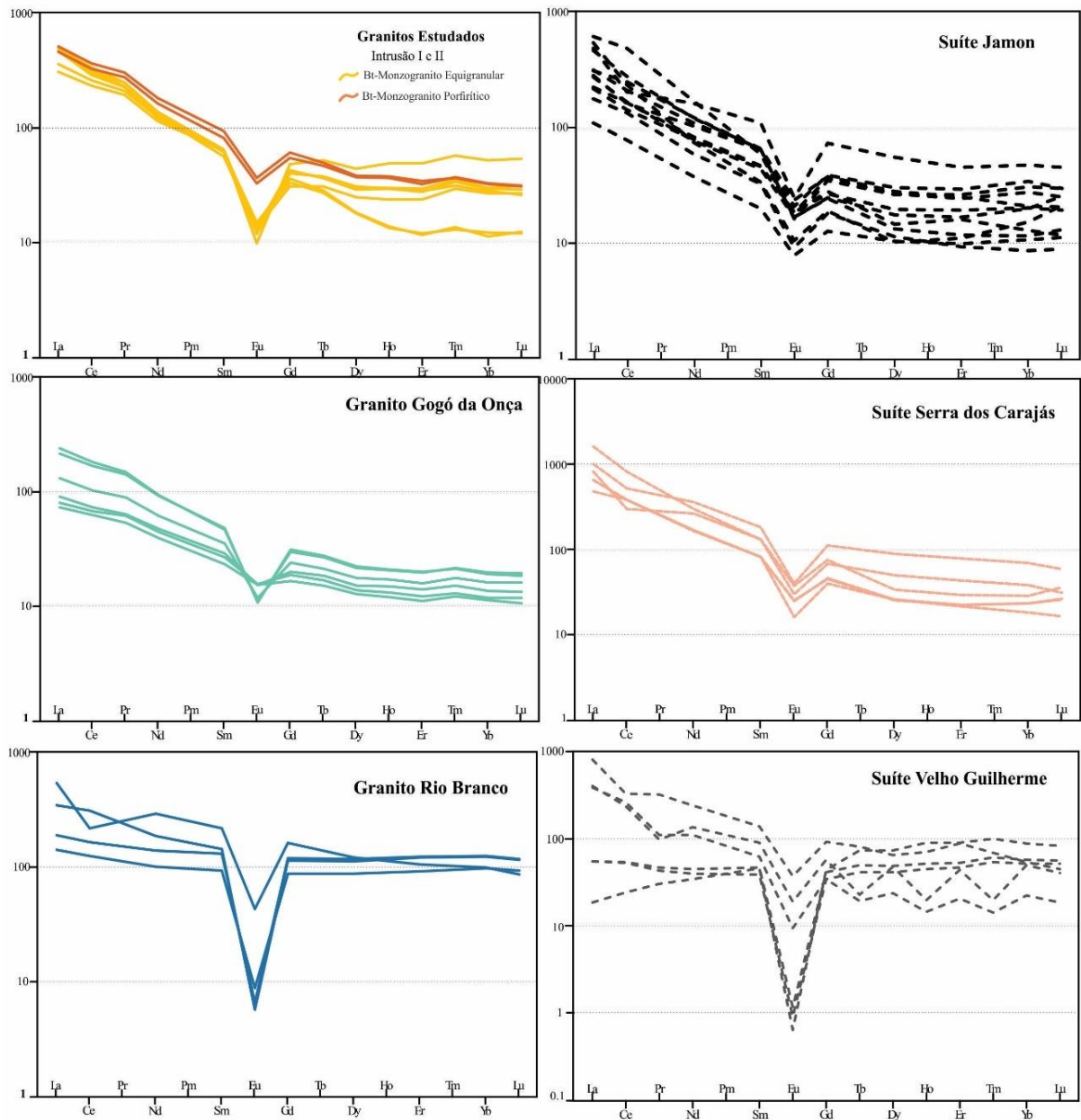


Figura 8 - Padrão dos ETR dos granitos estudados, em comparação com granitos das Suítes Paleoproterozoicas – Jamon (Dall’Agnol *et al.* 1999c, Dall’Agnol & Oliveira 2007), Serra dos Carajás (Barros *et al.* 1995, Dall’Agnol *et al.* 1994) e Velho Guilherme (Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2005) e Granitos Rio Branco (Santos *et al.* 2013) e Gogó da Onça (Teixeira *et al.* 2017). Normalizados em relação ao condrito de Nakamura *et al.* 1974.

4.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOLOGIA

Os dois plútons graníticos estudados apresentam caráter metaluminoso a fracamente peraluminoso, conforme índice de Shand (1950; Figura 9a). De acordo com o índice álcali-lime modificados (MALI) de Frost *et al.* (2001) os granitos equigranulares incidem na interseção entre os campos álcali cálcico e cálcico alcalino, enquanto que a variedade porfíricas são essencialmente cálcico-alcálicas (Figura 9b). Nos diagramas discriminantes que utilizam tanto parâmetros baseados nos conteúdos de elementos traços (Figura 9c; Whalen *et al.* 1987) quanto de elementos maiores (Figura 9d; Dall’Agnol & Oliveira 2007),

os granitos estudados mostram afinidades geoquímicas com os granitos tipo-A, e são distintos daquele de do tipo-I ou cálcico-alcálicos. Apesar do comportamento da razão de $\text{FeO}/(\text{FeO}+\text{MgO})$ permitir que se classifique as rochas estudadas como pertencente ao grupo de granitos ferrosos ($*\text{Fe} = 0,8 - 1,0$), é notado que o corpo leste apresenta valores para esta razão levemente inferiores ($<0,9$) às amostras do corpo oeste. Tal comportamento permite classificar este último como pertencente ao grupo de granitos tipo-A reduzidos e o primeiro como levemente oxidado, conforme pode ser observado no diagrama discriminante de Dall'Agnol & Oliveira (2007; Figura 9e). Ambos os plútons podem ser relacionados à granitos intraplaca conforme os parâmetros definidos por Pearce *et al.* (1984; Figura 9f).

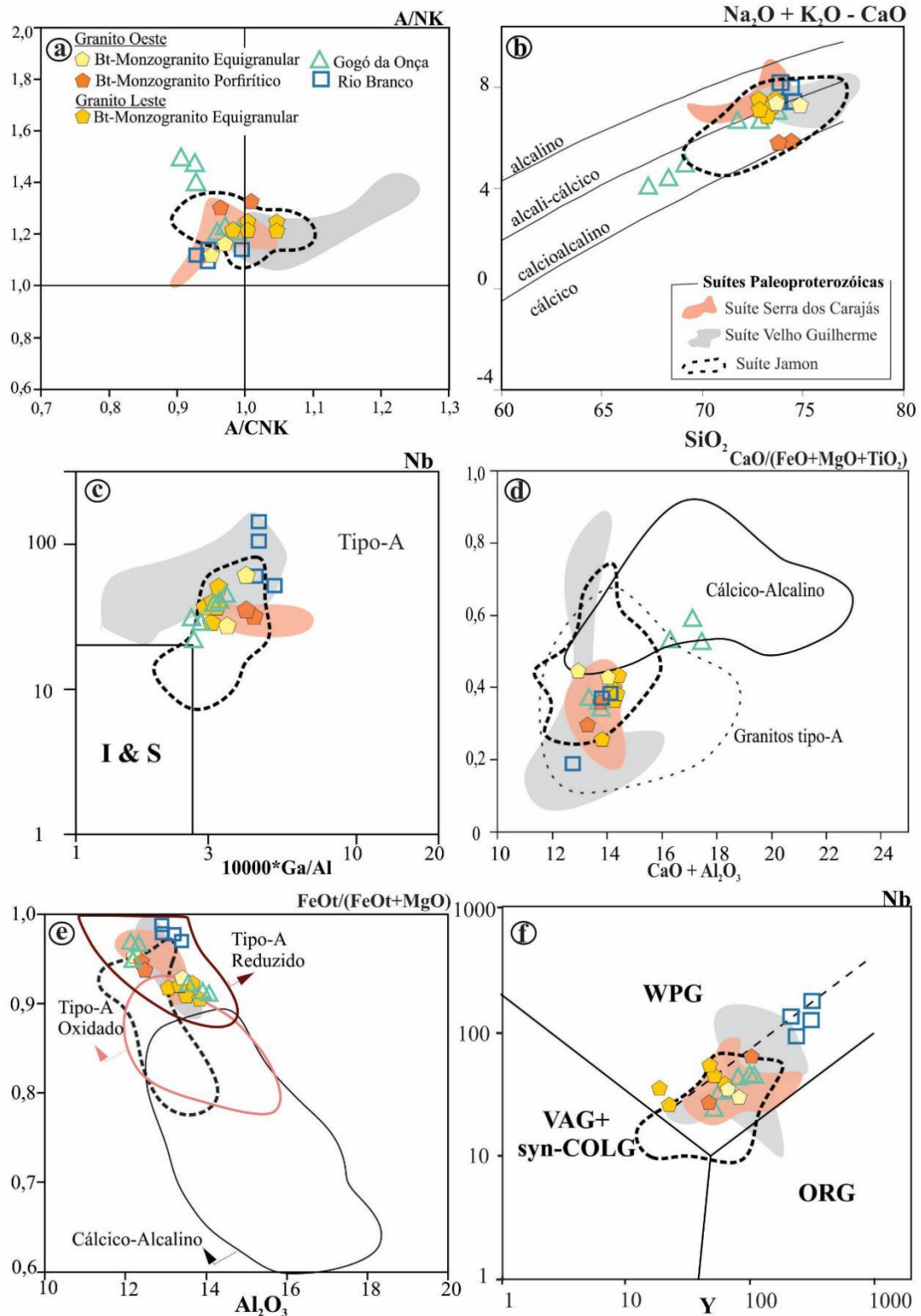


Figura 9 - Diagramas de classificação química, tipologia e ambiente tectônico dos granitos estudados em comparação com granitos das Suítes Paleoproterozóicas – Jamon (Dall’Agnol *et al.* 1999c, Dall’Agnol & Oliveira 2007), Serra dos Carajás (Barros *et al.* 1995, Dall’Agnol *et al.* 1994) e Velho Guilherme (Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2005) e Granitos Rio Branco (Santos *et al.* 2013) e Gogó da Onça (Teixeira *et al.* 2017). A) Diagrama de Shand (1943) destacando o caráter peraluminoso a fracamente metaluminoso dos granitos estudados. B) Diagrama MALI vs. SiO₂ de Frost *et al.* (2001) C) Representação das amostras analisadas no diagrama de Whalen *et al.* (1987). D) e E) Diagramas de Dall’Agnol & Oliveira (2007). F) Diagramas de Pearce *et al.* (1984). WPG (Granito Intraplaca); syn-COLG (Granito Sincolisional); VAG (Granito de Arco Vulcânico); ORG (Granito de Cadeia Oceânica).

CAPÍTULO 5 GEOCROLOGIA E GEOLOGIA ISOTÓPICA

Os dados de isótopos U-Pb e Lu-Hf foram obtidos a partir da análise de grãos de zircão da amostra BVD-43B do biotita-monzogranito porfirítico. Os cristais de zircão previamente selecionados e estudados foram imageados por catodoluminescência (Figura 10). As imagens fornecem informações importantes sobre a morfologia do zircão e a sua estrutura interna, permitindo a seleção dos melhores locais para análises pontuais. Os grãos de zircão mostram poucas fraturas, exibindo zoneamento oscilatório e concêntrico. As imagens mostram ainda que estes não apresentam núcleos herdados. São cristais euédricos a subédricos, com terminações piramidais que por vezes podem ser subarredondados. Apresentam fração granulométrica entre 75 e 125 μm , são incolores, amarelo claro e fumê, com formas subédricas a euédricas, apresentando alto grau de metamitização que dificultou a coleta de dados com pouco Pb comum.

5.1 GEOCROLOGIA U-PB (SHRIMP) EM ZIRCÃO

Os resultados das análises são apresentados na Tabela 4 e representados graficamente no diagrama de concórdia $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ vs. $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (Figura 11). As concentrações de U e Th variam de 59 a 531 ppm e 32 a 348 ppm, respectivamente. As razões Th/U variam entre 0,52 e 0,88. A idade de concórdia foi obtida usando os seis melhores resultados dentre os treze obtidos, e esses definem uma idade de concordância de 1893 ± 13 Ma com MSWD de 1,01 e probabilidade de concordância 0,59 (Figura 11), interpretada como a idade de cristalização da rocha.

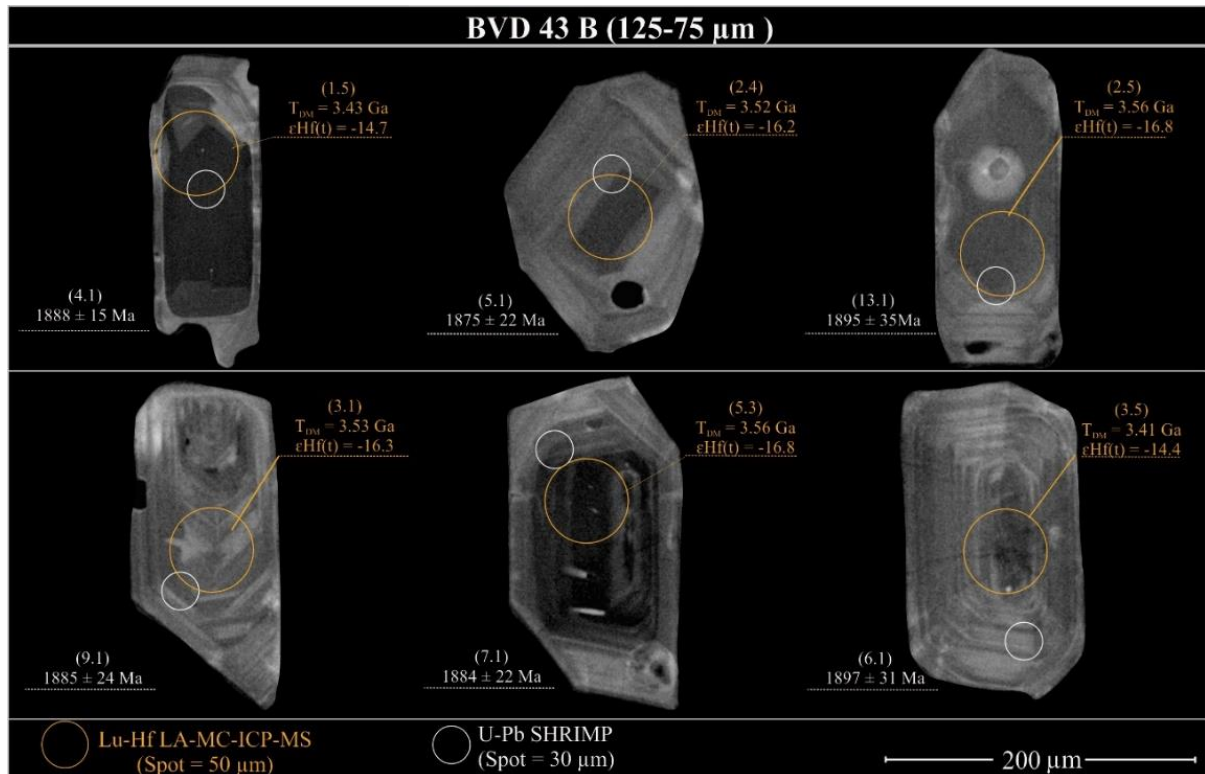


Figura 10 - Imagens de catodoluminescência (CL) em cristãos de zircão da amostra BVD 43B representativa dos granitos estudados. Os círculos brancos indicam a localização das análises SHRIMP, e os círculos laranjas indicam a localização das análises Lu-Hf por ICP-MS. Os números entre parênteses referem-se à identificação do spot analítico nas tabelas de dados U-Pb e Lu-Hf.

Tabela 4 - Síntese dos dados obtidos através da análise U-Pb (SHRIMP) em zircões para a amostra BVD 43B.

AMOSTRA BVD 43B (Biotita - Monzogranito Porfirítico)															
ID	U	Th	^{206}Pb	$^{206}\text{Pb}_c$	Razões Isotópicas					Idade				Disc.	
					Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1s	erro	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 s	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		1 s
Spot	ppm	ppm	ppm	%	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1s	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1s	erro	corr.	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	(%)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	(%)	(%)
1.1	109	93	0,88	33	0,56	0,347	1,5	5,5	2,3	0,5	1924	22	1872	36	0
2.1	71	45	0,66	21	1,14	0,343	1,7	5,6	3,1	0,5	1902	25	1916	49	0
3.1	160	87	0,56	48	0,07	0,349	1,3	5,5	1,3	0,8	1931	20	1884	16	-2
4.1	181	141	0,80	54	0,22	0,346	1,3	5,6	1,4	0,7	1913	19	1902	18	-1
5.1	100	73	0,76	30	0,38	0,344	1,5	5,6	2,0	0,6	1898	22	1926	29	-1
6.1	64	37	0,59	19	1,06	0,339	1,7	5,5	1,8	0,7	1879	25	1927	24	1
7.1	293	216	0,76	87	0,01	0,346	1,5	5,6	1,8	0,7	1913	23	1923	25	-2
8.1	63	37	0,61	19	2,03	0,342	1,8	5,1	2,4	0,6	1909	26	1757	37	-3
9.1	85	65	0,79	25	0,53	0,340	1,6	5,3	1,8	0,7	1893	23	1851	25	0
10.1	66	33	0,52	16	4,04	0,285	1,7	4,2	4,2	0,4	1636	24	1767	70	19
11.1	59	32	0,56	18	0,80	0,350	1,8	5,8	2,1	0,6	1934	27	1946	32	0
12.1	531	348	0,68	135	2,15	0,297	2,0	4,4	2,2	0,7	1689	26	1741	31	12
13.1	74	55	0,77	22	0,72	0,342	1,6	5,6	2,2	0,6	1891	24	1933	33	0

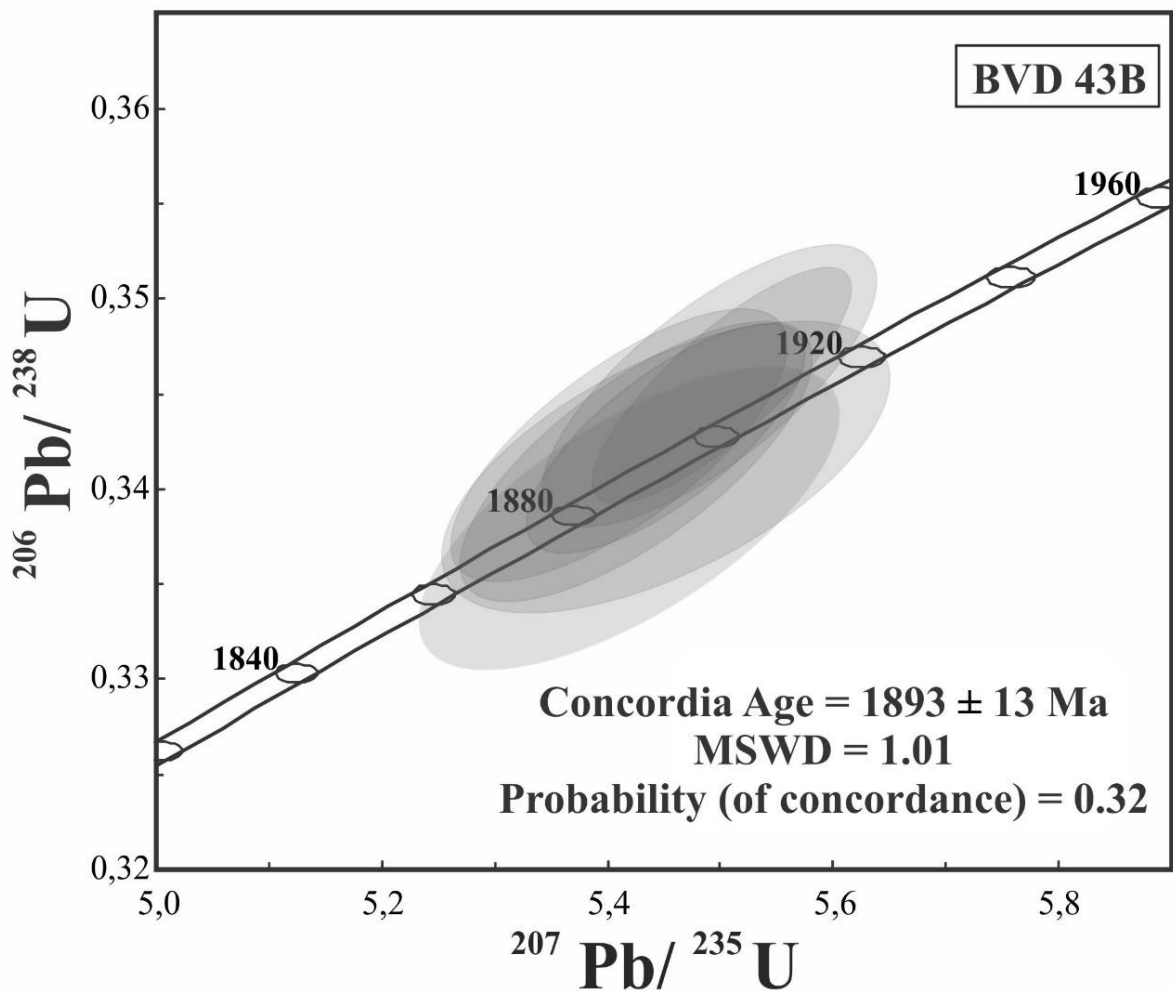


Figura 11 - Diagrama concórdia U-Pb SHRIMP da amostra BVD 43B, biotita monzogranito porfirítico, mostrando a idade concórdia de 1893 ± 13 Ma, interpretada como a idade de cristalização do corpo granítico.

5.2 ISÓTOPOS DE Lu-Hf EM ZIRCÃO

Foram obtidos um total de doze análises de Lu-Hf em grãos de zircão da amostra BVD 43B, em razão do tamanho reduzido dos cristais (75 a 125 μm), os *spots* para análises de Lu-Hf foram posicionados próximos aos pontos com datação U-Pb. Os resultados obtidos são fornecidos na Tabela 5. Os zircões analisados neste estudo têm razões iniciais muito homogêneas de $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}^{176}$ (0,281115 a 0,281204) e Lu/ ^{177}Hf no intervalo de 0,000390 e 0,001165, com valores de ϵ_{Hf} na idade de cristalização magmática (1893 Ma) fortemente negativos variando entre -14 a -17 e TDM entre 3,38 Ga a 3,57 Ga (Figura 12).

Tabela 5 - Síntese dos dados Lu//Hf obtidos através das análises em zircões para a amostra BVD 43B.

AMOSTRA BVD 43B (Biotita - Monzogranito Porfirítico)									
ID	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{\text{zircão}}$	2SE	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}_{\text{zircão}}$	2SE	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$t^{(\text{U-Pb})}$ (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_{(\text{zircão}, t)}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	TDM ^c (Ga)*
1.3	0,281152	0,000069	0,000736	0,000033	-57,7	1898	0,281125	-15,9	3,505
1.4	0,281185	0,000062	0,000788	0,000073	-56,6	1898	0,281156	-14,8	3,438
1.5	0,281200	0,000054	0,001165	0,000082	-56,0	1898	0,281158	-14,7	3,434
2.1	0,281126	0,000057	0,000390	0,000012	-58,7	1898	0,281112	-16,4	3,534
2.4	0,281135	0,000061	0,000518	0,000014	-58,3	1898	0,281116	-16,2	3,525
2.5	0,281125	0,000074	0,000702	0,000035	-58,7	1898	0,281100	-16,8	3,561
3.1	0,281138	0,000089	0,000678	0,000091	-58,3	1898	0,281113	-16,3	3,532
3.3	0,281204	0,000071	0,000697	0,000043	-55,9	1898	0,281179	-14,0	3,389
3.5	0,281194	0,000063	0,000735	0,000023	-56,3	1898	0,281168	-14,4	3,413
4.4	0,281115	0,000049	0,000597	0,000037	-59,0	1898	0,281094	-17,0	3,574
4.5	0,281133	0,000048	0,000440	0,000039	-58,4	1898	0,281117	-16,2	3,523
5.3	0,281141	0,000068	0,001138	0,000073	-58,1	1898	0,281100	-16,8	3,561

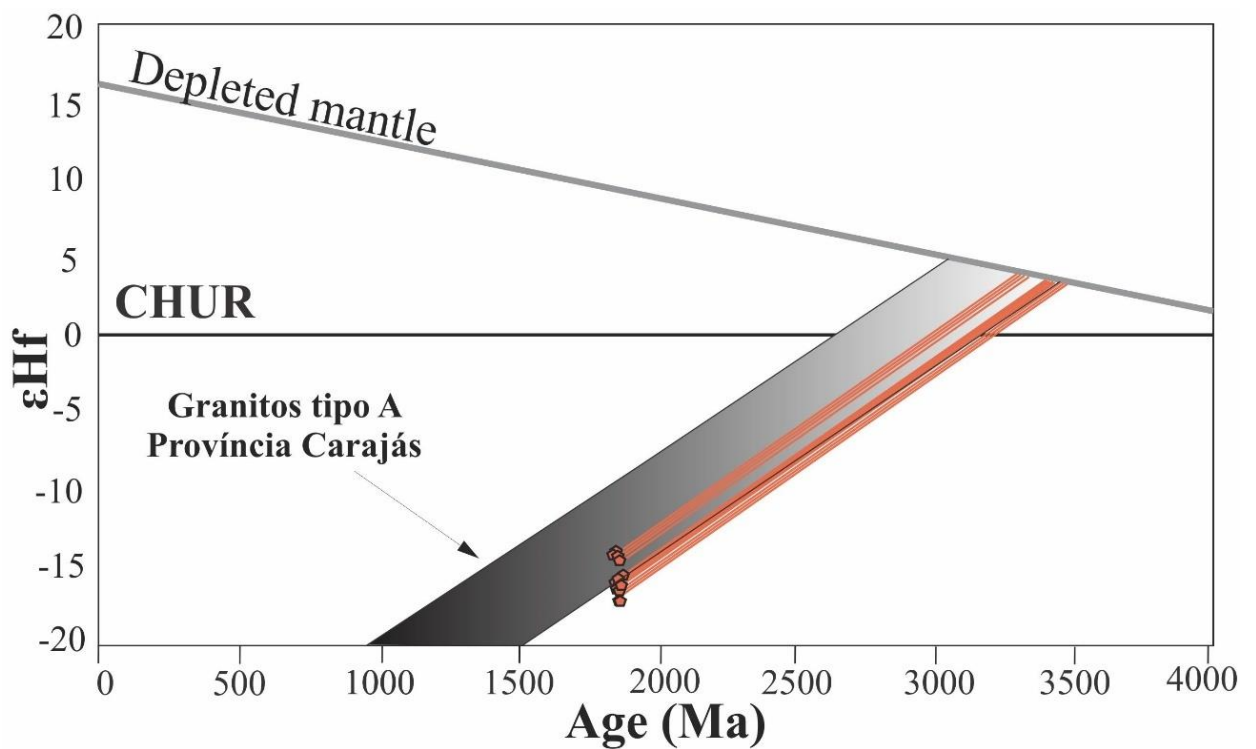


Figura 12 - Diagrama de idade vs ϵ_{Hf} da amostra BVD 43B, usando a média de crosta de 0,015 e comparando-os aos dados obtidos para outros granitos tipo-A da Província Carajás (Suíte Serra dos Carajás, Suíte Velho Guilherme, Suíte Jamon e Granito Gogó da Onça) por Teixeira *et al.* (2018).

CAPÍTULO 6 DISCUSSÃO

6.1 COMPARAÇÕES COM GRANITOS TIPO-A DA PROVÍNCIA CARAJÁS.

Com intuito de estabelecer as afinidades petrológicas dos plútons estudados, serão discutidos alguns parâmetros que permitam comparar suas principais características com aquelas dos corpos paleoproterozóicos das suítes Jamon, Serra dos Carajás e Velho Guilherme (Dall'Agnol *et al.* 2005). Adicionalmente, estes parâmetros serão comparados com aqueles de outros plútons que também ocorrem no Domínio Canãa dos Carajás, como os granitos Rio Branco (Santos *et al.* 2013) e Gogó da Onça (Teixeira *et al.* 2018).

As intrusões, objetos de estudo deste trabalho, mostram fortes afinidades quanto a forma de ocorrência e aspectos mineralógicos e texturais com os demais granitos paleoproterozoicos da Província Carajás. Apresentam fortes afinidades petrográficas e texturais entre si, sendo que a variedade porfíricas distingue-se das demais pela presença localizada de anfibólio e do maior conteúdo de minerais máficos. São formados por monzogranitos isotrópicos com conteúdo de minerais máficos, em sua maioria, inferiores a 10% e conteúdo modal de mineral opaco menor que 0,1%. Apresentam ainda, conteúdos significativos de fluorita e allanita, traços de anfibólio e ausência de titanita magmática. Sob tais aspectos, os plútons estudados mostram fortes afinidades com os granitos das suítes Velho Guilherme e Serra dos Carajás, onde nos primeiros não ocorre titanita magmática e há um enriquecimento em fluorita e topázio, e nos últimos, a titanita e magnetita são raras ou ausentes, sendo fluorita e allanita mais frequentes (Dall'Agnol & Oliveira 2007). Características similares foram também observadas para as rochas do Granito Rio Branco por Santos *et al.* (2013) e as fácies mais evoluídas (sienogranitos) do Granito Gogó da Onça (Teixeira *et al.* 2018). Por outro lado, tais aspectos divergem daqueles apresentados pelos granitos oxidados da Suíte Jamon, os quais apresentam conteúdo de minerais ferromagnesianos elevados, entre 5 e 20%, onde a titanita magmática é uma fase comum, juntamente com zircão, apatita, magnetita, ilmenita e allanita.

O conteúdo de SiO₂ apresentado pelos plútons estudados se distingue do padrão atribuído aos granitos das suítes Velho Guilherme e Jamon por não apresentarem rochas com teores de SiO₂ acima de 75% (Figura 7). Ainda com relação a este parâmetro, se aproximam ao que é observado nas rochas da Suíte Serra dos Carajás, do Granito Rio Branco e das fácies mais evoluídas do granito Gogó da Onça, distinguindo-se dos mesmos pelo caráter mais evoluído e por serem levemente mais empobrecidos em elementos compatíveis. Por outro

lado, os plútons estudados apresentarem maiores teores de CaO, MgO, FeOt e HFSE e razões Rb/Sr mais baixas em relação aos granitos da Suíte Velho Guilherme (Figura 7).

Em geral, os granitos Rio Branco e Gogó da Onça mostram afinidade com a suítes Velho Guilherme e Serra dos Carajás, respectivamente. No que se refere à amplitude das anomalias negativas de Eu e razões ETRL/ETRP apresentados pelas suítes paleoproterozóicas de Carajás, o padrão ETR apresentado pelas amostras do granitos estudados, com anomalias negativas de Eu moderadas (fácies equigranulares) à baixas (fácies porfírica) e moderado fracionamento de ETRP, são bastante distintos dos padrões horizontalizados como acentuadas anomalias negativas de Eu dos corpos da Suíte Velho Guilherme e Granito Rio Branco, mas que se assemelham, nestes aspectos, com algumas amostras que constituem a Suíte Serra dos Carajás, Jamon e Granito Gogó da Onça (Figura 8). Tais padrões resultariam, sobretudo, do grau de fracionamento de minerais acessórios, como allanita, apatita e zircão, uma vez que em magmas evoluídos, os ETR possuem coeficientes de partição elevados para estes minerais. O padrão côncavo dos ETRP observados nas fácies equigranulares do granito leste é muito similar ao padrão observado nas rochas que compõem a Suíte Jamon, tal comportamento foi interpretado por Dall'Agnol *et al.* (1999) como indicador de fracionamento do anfibólio, uma vez que os ETR são compatíveis com o mesmo em magmas félsicos e os coeficientes de partição dos ETR em anfibólio são mais altos entre Dy e Er (Rolinson 1993), justamente onde há a inflexão.

Nos diagramas que utilizam o índice de Fe [$\text{FeOt}/(\text{FeOt}+\text{MgO})$] como parâmetro de classificação de granitos, como aqueles de Frost *et al.* (2001) e Dall'Agnol & Oliveira (2007), as amostras estudadas coincidem com o campo dos granitos ferrosos reduzidos (Granito Oeste) a moderadamente oxidados (Granito Leste), atestando suas afinidades pelas suítes Velho Guilherme (+ Granito Rio Branco) e Serra dos Carajás (\pm Granito Gogó da Onça), respectivamente, e afastando-as claramente do campo dos granitos oxidados da Suíte Jamon. Visando reforçar as afinidades petrológicas atribuídas aos corpos estudados, foram obtidos dados de susceptibilidade magnética (SM) e de caracterização de minerais opacos, os quais estão representados no quadro e histograma de frequência da figura 13, juntamente com as demais informações sobre as assinaturas magnéticas das suítes paleoproterozoicas de Carajás e dos Granitos Rio Branco e Gogó da Onça. Os valores de SM estão relacionados, sobre tudo, ao conteúdo modal de magnetita, e que sob estes aspectos, as rochas estudadas se aproximam dos granitos reduzidos, com intervalo de SM entre $0,85 \cdot 10^{-3}$ a $5,0 \cdot 10^{-3}$ SI (Figura 13). Neste sentido, fica claro no histograma de frequência da figura 13, que o comportamento magnético

dos granitos estudados se assemelha principalmente aquele dos granitos moderadamente oxidados da Suíte Serra dos Carajás e do Granito Gogó da Onça, onde existe uma coincidência entre os limites de seus valores de SM, e que são divergentes daqueles mais baixos dos corpos das suítes Velho Guilherme e do Granito Rio Branco e dos mais elevados da Suíte Jamon.

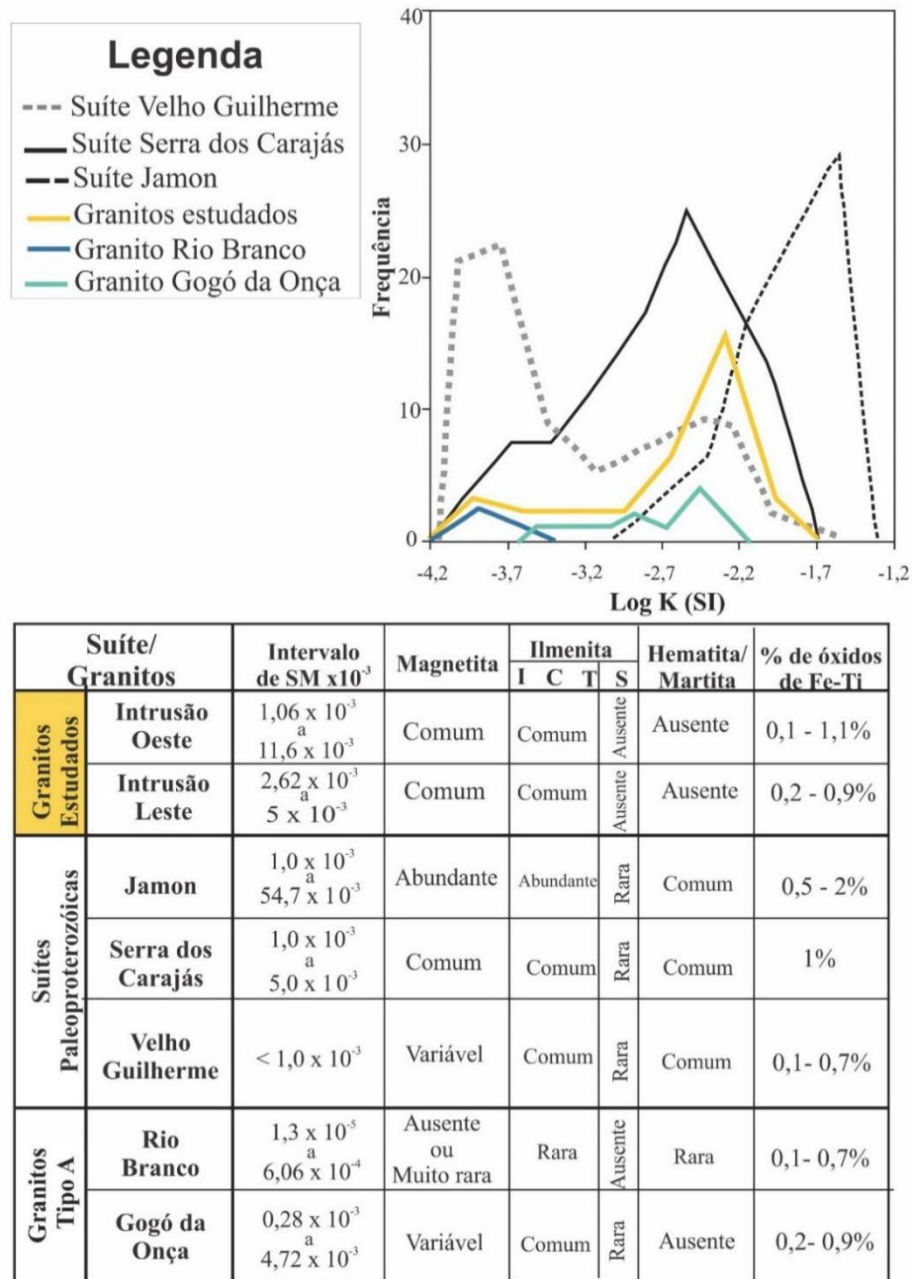


Figura 13 - Quadro e histogramas comparativos de dados de Susceptibilidade Magnética (SM) obtidos para as amostras estudadas e assinaturas magnéticas das suítes paleoproterozoicas. (Dados para comparação obtidos de Santos 2013, Souza *et al.* 2017).

6.2 ORIGEM DOS GRANITOS ESTUDADOS

Granitos tipo-A podem fornecer importantes informações sobre os processos magmáticos em ambientes extensionais dentro da litosfera e sua contribuição para o crescimento da crosta continental. Alguns modelos petrogenéticos têm sido propostos para a geração de tais granitos: i) anatexia crustal provocada por *underplating* máfico (Dall'Agnol *et al.* 1994, Huppert & Sparks 1988, Rämö & Happala 1995); ii) fracionamento de basaltos alcalinos derivados do manto (Turner *et al.* 1992, Litvinovsky *et al.* 2002, Mushkin *et al.* 2003); iii) baixo grau de fusão parcial de um resíduo granulítico anidro da crosta inferior, enriquecido em F e/ou Cl a partir do qual um fundido granítico foi previamente extraído (Collins *et al.* 1982, Clemens *et al.* 1986, King *et al.* 1997); iv) fusão de rochas cálcio-alcalinas sob baixa pressão em níveis rasos da crosta superior (Skjerlie & Johnston 1993, Patiño Douce 1997); v) hibridização entre granito anatóxico e magmas máficos derivados do manto (Bérdard 1990, Kerr & Fryer 1993, Wickham *et al.* 1996, Mingram *et al.* 2000). Dentro deste contexto e levando-se em consideração que Dall'Agnol *et al.* (2005) admitiu uma provável fonte quartzo-feldspática de composição intermediária para os granitos oxidados da Suíte Jamon, foi desenvolvido um modelo de geração dos magmas (reduzidos a moderadamente oxidados) formadores dos plútons estudados a partir da fusão parcial de rochas tonalíticas mesoarqueanas.

Diversos testes de balanço de massa foram realizados e os dados são apresentados nas Tabelas 6-9. A amostra F-62/92-26 (Figura 14a) do Tonalito Arco Verde apresenta uma composição adequada para a geração da amostra AL-62 da Intrusão Oeste a partir de fusão parcial a uma taxa de 16% deixando uma assembleia residual constituída por 61,35% de plagioclásio, 29,58% de quartzo, 7,11% de biotita, 1,56% de magnetita e 0,39% de ilmenita. A partir desta assembleia residual, com uma pequena variação nas porcentagens minerais e com taxa de fusão de 18%, é possível gerar um magma de mesma composição a partir da amostra AABG-34 do Tonalito Caracol (Figura 14b). Para a formação da Intrusão Leste, características bastante semelhantes (assembleias residuais e taxas de fusão de 15 e 18%) são observadas tendo tanto o Tonalito Arco Verde quanto o do Tonalito Caracol como fontes (Figuras 14c-d) de seus magmas. A origem destes magmas a partir da fusão parcial de rochas crustais quartzo-feldspáticas mesoarqueanas é coerente com os valores ϵ_{Hf} fortemente negativos variando entre -14 a -17 e TDM entre 3,38 Ga a 3,57 Ga obtidos para os plútons estudados. Foram realizados ainda, testes para a geração dos granitos estudados a partir da fusão parcial do Granodiorito Rio Maria e granulitos félsicos da Província Carajás, entretanto, não foram obtidos resultados satisfatórios.

Tabela 6 – Modelamento de composições de elementos maiores e traços e assembleias minerais residuais para geração do protólito da Intrusão Oeste (AL-62) por fusão parcial de um tonalito.

	92-26 (C ₀) ^a	Resíduo (Cs)	Composição dos minerais					Calculado	AL-62
	Tonalito		Pl ^b	Qz	Bt ^b	Mag ^c	Ilm ^c	Magma (C _L)	Biotita monzogranito (C _L)
			61,35%	29,58%	7,11%	1,56%	0,39%		
SiO ₂ (%)	70,47	69,43	60,60	100,00	37,44	0,00	0,00	76,06	76,09
TiO ₂	0,32	0,38	0,00	0,00	2,59	0,00	50,00	0,17	0,20
Al ₂ O ₃	15,61	16,37	24,72	0,00	16,91	0,00	0,00	12,00	12,07
FeO*	3,24	3,49	0,13	0,00	23,21	100,00	50,00	2,07	2,10
MnO	0,04	0,03	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,02	0,00
MgO	0,80	0,68	0,00	0,00	9,35	0,00	0,00	0,31	0,10
CaO	3,25	4,28	6,86	0,00	1,01	0,00	0,00	0,50	1,01
Na ₂ O	4,87	4,60	7,49	0,00	0,00	0,00	0,00	3,31	2,74
K ₂ O	1,40	0,75	0,00	0,00	9,09	0,00	0,00	5,55	5,68
Ba (ppm)	234,0							532,7	493,0
Rb	75,8							258,5	260,3
Sr	255,0							42,5	49,8
Y	9,1							43,6	55
Zr	239,0							343,5	187,7
Nb	14,0							26,9	26,0
La	62,0							121,6	117,7
Ce	109,1							226,4	225,1
Nd	34,6							78,5	78,3
Sm	5,1							13,0	13,0
Eu	0,9							1,1	0,9
Gd	3,8							12,4	11,1
Yb	0,7							3,9	6,2
Lu	0,1							0,7	0,9

ΣR^2 - soma dos quadrados dos resíduos. Todo ferro é reportado como FeO. Os valores dos óxidos foram recalculados para 100%. ^a Althoff (1996), ^b Leite (2001), ^c Martin (1987), Bt – biotita, Ilm – ilmenita, Mag – magnetita, Pl – plagioclásio, Qz – quartzo.

Tabela 7 – Modelamento de composições de elementos maiores e traços e assembleias minerais residuais para geração do protólito da Intrusão Oeste (AL-62) por fusão parcial de um tonalito.

	AABG-34 (C ₀) ^d	Resíduo (Cs)	Composição dos minerais					Calculado	AL-62
	Tonalito		Pl ^b	Qz	Bt ^c	Mag ^d	Ilm ^d	Magma (C _L)	Biotita monzogranito (C _L)
			61,01%	24,46%	14,59%	0,81%	0,13%		
SiO ₂ (%)	68,82	67,23	62,04	100,00	37,94	0,00	0,00	76,08	76,09
TiO ₂	0,42	0,48	0,00	0,00	2,83	0,00	50,00	0,19	0,20
Al ₂ O ₃	15,89	16,78	23,92	0,00	16,62	0,00	0,00	12,04	12,07
FeO*	3,94	4,36	0,18	0,00	23,14	100,00	50,00	2,09	2,10
MnO	0,06	0,06	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,01	0,00
MgO	1,07	1,29	0,00	0,00	8,85	0,00	0,00	0,09	0,10
CaO	3,10	3,49	5,81	0,00	0,00	0,00	0,00	1,07	1,01
Na ₂ O	4,41	4,78	7,97	0,00	0,00	0,00	0,00	2,73	2,74
K ₂ O	2,30	1,54	0,00	0,00	10,21	0,00	0,00	5,67	5,68
Ba (ppm)	402,0							444,5	493,0
Rb	127,3							284,2	260,3
Sr	259,2							47,3	49,8
Y	21,0							52,0	55,0
Zr	148,7							200,9	187,7
Nb	11,3							15,8	26,0
La	27,0							106,7	117,7
Ce	62,9							239,8	225,1
Nd	26,6							75,7	78,3
Sm	4,9							12,9	13,0
Eu	1,0							0,8	0,9
Gd	4,6							13,0	11,1
Yb	1,6							6,2	6,2
Lu	0,2							0,9	0,9

ΣR^2 - soma dos quadrados dos resíduos. Todo ferro é reportado como FeO. Os valores dos óxidos foram recalculados para 100%. ^a Ronaib (2013), ^b Althoff (1996), ^c Leite (2001), ^d Martin (1987), Bt – biotita, Ilm – ilmenita, Mag – magnetita, Pl – plagioclásio, Qz – quartzo.

Tabela 8 – Modelamento de composições de elementos maiores e traços e assembleias minerais residuais para geração do protólito da Intrusão Leste (51) por fusão parcial de um tonalito.

	92-26 (C ₀) ^a	Resíduo (Cs)	Composição dos minerais					Calculado	51
	Tonalito		Pl ^b	Qz	Bt ^a	Mag ^c	Ilm ^c	Magma (C _L)	Biotita monzogranito (C _L)
			61,36%	30,00%	6,24%	1,82%	0,58%		
SiO ₂ (%)	70,47	69,62	60,60	100,00	39,00	0,00	0,00	74,40	74,43
TiO ₂	0,32	0,39	0,00	0,00	1,59	0,00	50,00	0,17	0,20
Al ₂ O ₃	15,61	16,23	24,72	0,00	17,00	0,00	0,00	13,29	13,39
FeO*	3,24	3,45	0,13	0,00	20,20	100,00	50,00	2,41	2,44
MnO	0,04	0,02	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,03	0,00
MgO	0,80	0,73	0,00	0,00	11,48	0,00	0,00	0,36	0,20
CaO	3,25	4,21	6,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	1,01
Na ₂ O	4,87	4,60	7,49	0,00	0,00	0,00	0,00	3,77	3,25
K ₂ O	1,40	0,75	0,00	0,00	10,40	0,00	0,00	4,93	5,07
Ba (ppm)	234,0							548,6	663,0
Rb	75,8							282,5	265,2
Sr	255,0							90,6	94,6
Y	9,1							25,4	24,6
Zr	239,0							329,9	247,3
Nb	14,0							27,2	27,3
La	62,0							173,8	168,3
Ce	109,1							276,4	275,9
Nd	34,6							82,8	80,9
Sm	5,1							12,3	12,5
Eu	0,9							1,1	1,2
Gd	3,8							11,8	9,3
Yb	0,7							2,6	2,7
Lu	0,1							0,4	0,4

ΣR^2 - soma dos quadrados dos resíduos. Todo ferro é reportado como FeO. Os valores dos óxidos foram recalculados para 100%. ^a Althoff (1996), ^b Leite (2001), ^c Martin (1987), Bt – biotita, Ilm – ilmenita, Mag – magnetita, Pl – plagioclásio, Qz – quartzo.

Tabela 9 – Modelamento de composições de elementos maiores e traços e assembleias minerais residuais para geração do protólito da Intrusão Leste (FDM-4) por fusão parcial de um tonalito.

	AABG-24B (C ₀) ^a	Resíduo (Cs)	Composição dos minerais					Calculado	FDM-4
	Tonalito		Pl ^b	Qz	Bt ^c	Mag ^d	Ilm ^d	Magma (C _L)	Biotita monzogranito (C _L)
			56,84%	32,68%	9,49%	0,50%	0,49%		
SiO ₂ (%)	71,28	70,83	60,60	100,00	39,00	0,00	0,00	74,09	74,11
TiO ₂	0,34	0,40	0,00	0,00	1,59	0,00	50,00	0,18	0,20
Al ₂ O ₃	15,24	15,67	24,72	0,00	17,00	0,00	0,00	13,13	13,20
FeO*	2,72	2,74	0,13	0,00	20,20	100,00	50,00	2,72	2,74
MnO	0,03	0,02	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,01	0,00
MgO	0,98	1,11	0,00	0,00	11,48	0,00	0,00	0,21	0,20
CaO	3,54	3,90	6,86	0,00	0,00	0,00	0,00	1,24	1,22
Na ₂ O	4,18	4,26	7,49	0,00	0,00	0,00	0,00	3,23	3,15
K ₂ O	1,69	1,08	0,16	0,00	10,40	0,00	0,00	5,20	5,18
Ba (ppm)	529,0							626,0	647,0
Rb	56,4							230,5	331,0
Sr	398,9							86,6	82,4
Y	11,5							47,9	49,2
Zr	126,5							380,2	368,0
Nb	7,1							13,2	45,4
La	21,3							98,6	153,5
Ce	38,5							201,4	248,2
Nd	16,0							81,1	80,0
Sm	3,0							11,6	11,4
Eu	0,9							0,9	1,0
Gd	2,7							8,9	8,5
Yb	0,8							4,8	5,9
Lu	0,1							0,6	0,9

ΣR^2 - soma dos quadrados dos resíduos. Todo ferro é reportado como FeO. Os valores dos óxidos foram recalculados para 100%. ^a Ronaib (2013), ^b Leite (2001), ^c Althoff (1996) ^d Martin (1987), Bt – biotita, Ilm – ilmenita, Mag – magnetita, Pl – plagioclásio, Qz – quartzo.

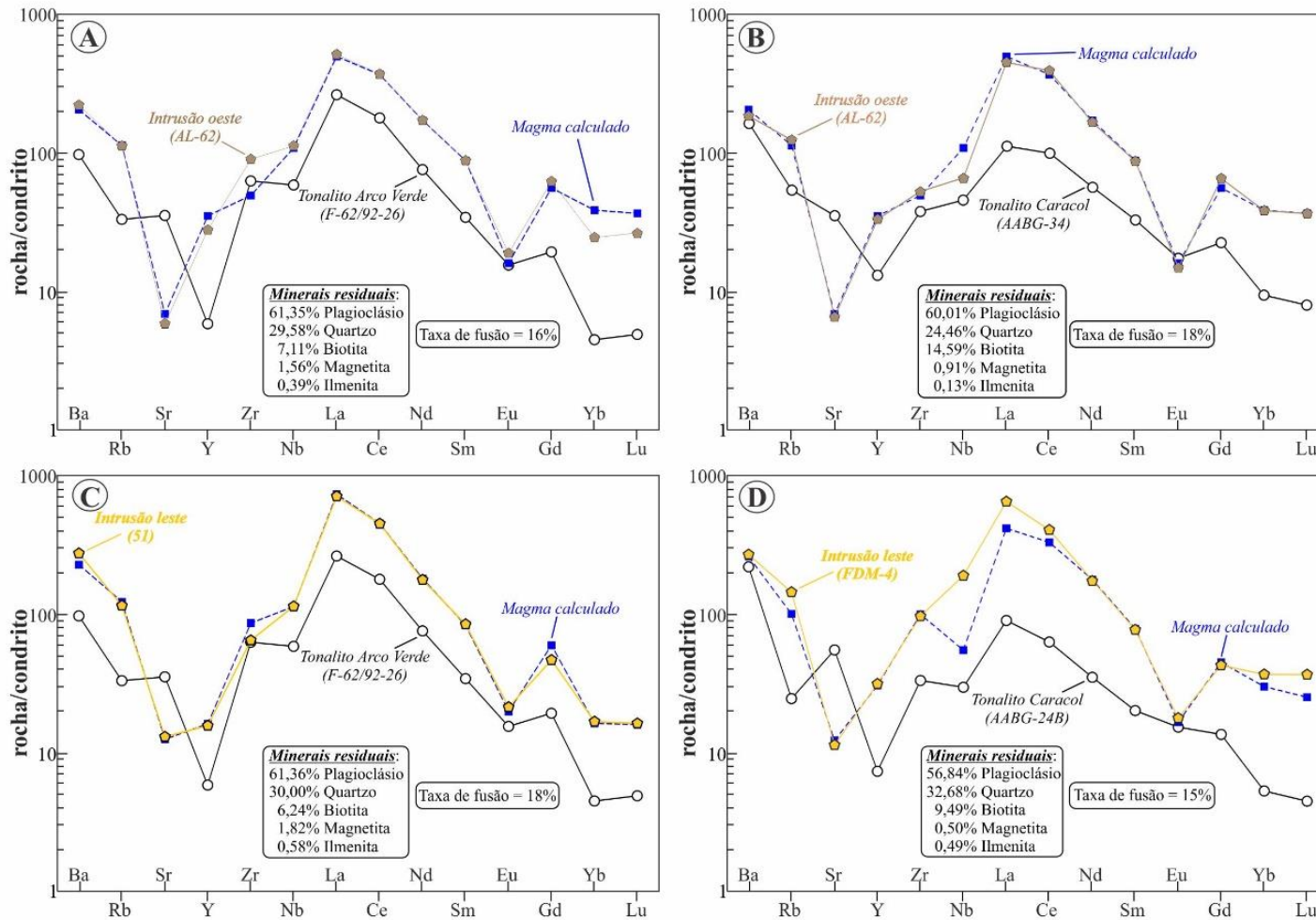


Figura 14 - Diagramas multielementar para geração dos granitos estudados por fusão parcial dos Tonalitos Arco Verde e Caracol. Diagramas normalizados pelo condrito de McDonough & Sun (1995).

CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO

As rochas que constituem os plútons estudados são classificadas como monzogranitos holecocráticos, de aspecto isotrópico e textura equigranular e porfírica. Apresentam aspecto de granitos evoluídos, onde a biotita é o principal mineral ferromagnésiano e está frequentemente associada à fluorita. As transformações em estágio *subsolidus* são marcadas pelas ocorrências de albita, sericita, epidoto e clorita. Tais plútons são intrusivos em granitoides arqueanos do Domínio Canãa dos Carajás com diferença de idade entre os granitos e as rochas encaixantes de ~1 Ga. Isto e o fato de truncarem as estruturas dúcteis dos granitoides arqueanos indica que os plútons se alojaram em níveis crustais rasos, sem influência de esforços regionais durante a colocação dos mesmos. Além disso, a presença frequente de intercrescimento granofírico e fluorita apontam para colocação dos corpos em níveis crustais rasos com importante atividade de fluidos durante a fase final de cristalização dos mesmos.

Estas rochas são peraluminosas a fracamente metaluminosas e mostram assinatura geoquímica de granitos intraplaca do tipo-A de origem crustal (subtipo A₂). Os plútons são afins dos granitos ferrosos de Frost *et al.* (2001) e daqueles de caráter reduzido a fracamente oxidado da Província Carajás, onde ambos apresentando elevadas razões FeOt/(FeOt+MgO) - $\geq 0,91$. A amplitude da anomalia negativa de Eu mostrada para as rochas da fácies BMzE, assim como sua baixa razão La/Yb, é característica de granitos evoluídos que as distinguem daquelas de caráter oxidado que constituem a Suíte Jamon, mas que às aproximam dos granitos reduzidos, em especial daqueles da Suíte Serra dos Carajás e das rochas mais evoluídas do Granito Gogó da Onça. Por outro lado, a fácies BMzP distingue-se por apresentar padrões ETR com moderadas anomalias negativas de Eu compatíveis com as fácies da Suíte Jamon. Ambas contrastam com amplitude acentuada das anomalias negativas de Eu dos granitos da Suíte Velho Guilherme e do Granito Rio Branco. A ocorrência de magnetita, mesmo que restrita nos plútons estudados, justificam os valores baixos a moderados de SM encontrados, e reforçam o caráter reduzido a fracamente oxidado destas rochas, além de suas analogias com a Suíte Serra dos Carajás.

Os contrastes nos aspectos composicionais apresentados entre as fácies BMzP e BMzE podem sugerir que a fonte de seus magmas e/ou processos de evolução magmática não foram inteiramente coincidentes. O modelamento geoquímico sugere que tais granitos (fácies BMzP) foram gerados a partir de fusão parcial de rochas tonalíticas de composição análoga ao

do Tonalito Arco Verde ou Tonalito Caracol do Domínio Rio Maria, com uma taxa de fusão que varia de 15 a 18% e uma assembleia residual composta por plagioclásio, quartzo, biotita, magnetita e ilmenita.

As análises U-Pb (SHRIMP) em zircão forneceram idades de 1893 ± 13 Ma, interpretada como a idade de cristalização destes plútons e são coincidentes com as idades de cristalização dos demais granitos paleoproterozoicos da Província Carajás. Os dados isotópicos de Lu-Hf indicam valores ϵ_{Hf} fortemente negativos variando entre -14 a -17 e TDM entre 3,38 Ga a 3,57 Ga evidenciando que os magmas parentais das rochas estudadas são essencialmente crustais. Dados semelhantes a esses foram obtidos por Teixeira *et al.* (2017, 2019) na caracterização geoquímica e isotópica do Granito Gogó da Onça e diversos outros granitos paleoproterozoicos da Província Carajás. Esses autores mostram que os cristais de zircão de todos os granitos têm valores iniciais notavelmente restritos de $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ e $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ fortemente negativos variando de -9 a -18, e as idades modelo Hf indicam fontes paleoarqueanas (3,3 Ga a 3,6 Ga) com uma pequena contribuição mesoarqueana (3,0 Ga a 3,2 Ga) para esses granitos.

As idades modelo Hf dos granitos orosirianos são principalmente paleoarqueanas e sugerem fontes mais antigas do que suas rochas encaixantes de idades neo- a mesoarqueanas (~2,75 Ga a 3,0 Ga). No entanto, até o momento, não há registro de rochas paleoarqueanas preservadas na Província Carajás e a ausência de composição isotópica de Hf das rochas encaixantes dos granitos paleoproterozoicos limita uma discussão mais aprofundada sobre o papel de fontes crustais evoluídas na geração desses granitos. No entanto, as idades modelo de Hf dos basaltos da Formação Parauapebas na Bacia de Carajás também atestam uma crosta mais antiga na Província Carajás (Martins *et al.* 2017) e um zircão herdado com idade de 3,2 Ga foi identificado no Granito Musa (Machado *et al.* 1991). Se as idades modelo de Hf estiverem corretas, isso implicaria que os granitos tipo-A são derivados de fontes na crosta profunda que são mais antigas do que as rochas expostas na superfície.

Os dados apresentados nesta dissertação, aliado aos resultados obtidos nos cálculos de modelagem geoquímica, atestam a importância da crosta arqueana para origem desses granitos. Tais resultados são compatíveis com a hipótese de que os granitos paleoproterozoicos de Carajás foram gerados a partir da fusão de granitoides mesoarqueanos e colocados em crosta rasa entre 1,86 e 1,89 Ga.

REFERÊNCIAS

- Abrantes Jr. F.R. & Lamarão C.N. 2011. Petrografia e variação composicional de zircão do Granito Gradaús, Província Carajás, Centro-Sul do Pará. *In: SBGq, 13º Congresso Brasileiro de Geoquímica & 3º Simpósio de Geoquímica dos Países do Mercosul, Gramado. Anais[...]*. p. 713-716.
- Afonso J.M.L., Oliveira D.C., Silva F.F. 2017. Novas ocorrências de granitos tipo A na Província Carajás. *In: Lima A.M.M & Gorayeb P.S.S (eds.) Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia Núcleo Norte, v. 10, p.209-295.
- Almeida J. A. C., Dall’Agnol R., Oliveira D. C. 2006. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **36** (2): 282-295.
- Almeida J.A.C., Guimarães F.V., Dall’Agnol R. 2007. Petrologia magnética do granito anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *Revista Brasileira de Geociências*. **37**: 17-36.
- Almeida J.A.C., Dall’Agnol R., Dias S.B., Althoff F.J. 2010. Origin of the Archean leucogranodiorite-granite suites: evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. *Lithos*, **120**: 235-257
- Almeida J.A.C., Dall’Agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, **187**:201-221.
- Almeida J.A.C, Dall’Agnol R., Leite A.A.S. 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **42**:103-126.
- Andersen T., Andersson U.B., Graham S., Aberg G., Simonsen S.L. 2009. Granitic magmatism by melting of juvenile continental crust: new constraints on the source of Paleoproterozoic granitoids in Fennoscandia from Hf isotopes in zircon. *Journal of the Geological Society*, **166**:233-247
- Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A, Estado do Pará, escala 1:250.000*. Brasília, DF, CPRM- Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB), Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para a Área do Programa Grande Carajás, 135 p.
- Araújo R. & Nogueira A.C.R. 2019. Serra Sul diamictite of the Carajás Basin (Brazil): A Paleoproterozoic glaciation on the Amazonian Craton. *Geology*, **47**:1166–1170.
- Avelar V.G, Lafon J.M., Correia Jr. F.C., Macambira E.M.B. 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã-Província Mineral de Carajás: novos resultados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**(4): 453-460.

Bard J. P. 1980. *Microtextures of igneous and metamorphic rocks*. Tokyo, D. Reidel Publishing Company, 246p.

Barros C.E.M., Dall'Agnol R., Vieira E.A.P., Magalhães M.S. 1995. Granito Central da Serra dos Carajás: avaliação do potencial metalogenético para estanho com base em estudos da borda oeste do corpo. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra* **7**: 93–123.

Barros C.E.M., Macambira M.J.B., Barbey P., Scheller T. 2004. Dados isotrópicos Pb-Pb em zircão (evaporação) e Sm-Nd do Complexo Granítico Estrela, Província Carajás, Brasil: implicações petrológicas e tectônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**(4): 351-358.

Barros C. E. M., Sardinha A. S., Barbosa J. P. O., Macambira M. J. B. 2009. Structure, petrology, geochemistry and zircon U/Pb and Pb/Pb geochronology of the synkinematic Archean (2.7 Ga) A-type granites from the Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. *Canadian Mineralogist* **47**(6): 1423-1440.

Bérdard J. 1990. Enclaves from the A-type granite of the Mégantic Complex, White Mountain magma series: clues to granite magmagenesis. *J. Geophys. Res.* **95**: 17797– 17819.

Bertotti A.L. 2012. *Lu-Hf em zircão por LA-MC-ICP-MS*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 162 p.

Bertotti A.L., Chemale Jr. F., Kawashita K. 2013. Lu-Hf em zircão por LA-MC-ICP-MS: aplicação em gabro do Ofiolito Aburrá, Colômbia. *Pesquisas em Geociências*, **40**(2):117-127.

Black L. P., Kamo S. L., Allen C. M., Aleinikoff J. N., Davis D. W., Korsch R. J., Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, **200**(1-2): 155-170. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00165-7)

Bouvier A., Vervoort J.D., Patchett P.J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, **273**:48-57.

Carvalho T.A. 2017. *Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do granito Gradaús, Província Carajás, SE do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Pós Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, 63 p.

Chu N.C., Taylor R.N., Chavagnac V., Nesbitt R.W., Boella R.M., Milton J.A., German C.R., Bayon G., Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: an evaluation of isobaric interference corrections. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **17**:1567-1574.

Clemens J.D., Holloway J.R., White A.J.R. 1986. Origin of an A-type granite: experimental constraints. *American Mineralogist*, **71**:317–324.

Collins W.J., Beams S.D., White A.J., Chappell B.W. 1982. Nature and origin of A-type granites with particular reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **80**(2):189–200.

Costa U.A.P., Paula R.R., Silva D.P.B., Tavares F.M., Oliveira J.K.M., Justo A.P. 2016. *Mapa geológico-geofísico ARIM Carajás*. Belém, CPRM. Escala 1:250.000. Programa Geologia do Brasil (PGB) – Projeto Evolução Crustal e Metalogenia da Província Mineral de Carajás – ARIM Carajás.

Cunha I.R.V., Dall’Agnol R., Feio G.R.L. 2016. Mineral chemistry and magnetic petrology of the Archean Planalto Suite, Carajás Province – Amazonian Craton: implications for the evolution of ferroan Archean granites. *Journal of South American Earth Sciences*, **67**: 100-121.

Dall’Agnol R. & Oliveira D. C. 2007. Oxidized, magnetite series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A type granites. *Lithos* **93**(3-4): 215-233.

Dall’Agnol R., Lafon J.M., Macambira M.J.B. 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian province: geochronological, petrological and geochemical aspects. *Mineralogy and Petrology* **50**: 113– 138.

Dall’Agnol R., Scaillet B., Pichavant M. 1999b. An experimental study of a lower Proterozoic A-type granite from the eastern Amazonian craton, Brazil. *Journal of Petrology* **40**: 1673–1698.

Dall’Agnol R., Costi H.T., Leite A.A. da S., Magalhães M.S.de, Teixeira N.P. 1999a. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research* **95**: 99-39.

Dall’Agnol R., Cunha I.R.V. da, Guimarães F.V., Oliveira D.C.de, Teixeira M.F.B., Feio G.R.L., Lamarão C.N. 2017. Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos* **277**: 3–32.

Dall’Agnol R., Rämö O.T., Magalhães M.S., Macambira M.J.B. 1999c. Petrology of the anorogenic, oxidised Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for the genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos* **46**: 431–462.

Dall’Agnol R., Oliveira M. A., Almeida J. A. C. Althoff F. J. A., Leite A. S., Oliveira D. C., Barros C. E. M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian Craton. In: Dall’Agnol R., Rosa-Costa L.T., Klein E.L. (eds.). Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Belém, PRONEX-UFPASBGNO, *Volume and Field Trip Guide*, p. 99–150.

Dall’Agnol R., Oliveira D.C., Guimarães F.V., Gabriel E.O., Feio G.R.L., Lamarão C.N., Althoff F.J., Santos P.A., Teixeira M.F.B., Silva A.C., Rodrigues D.S., Santos M.J.P., Silva C.R.P., Santos R.D., Santos P.J.L. 2013. Geologia do subdomínio de transição do domínio Carajás - implicações para a evolução Arqueana da Província Carajás - Pará. In: SBG, 13º, Simpósio de Geologia da Amazônia. *Recursos minerais e sustentabilidade territorial na Amazônia: anais – resumos expandidos*. Belém. v. 8, n. 3, p. 251-256.

- Dall'Agnol R., Teixeira N. P., Rämö O. T., Moura C. A. V., Macambira M. J. B., Oliveira D. C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. *Lithos* **80**(1-4): 101-129.
- Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. 1997. *An introduction to the rock-forming minerals*. 2. ed. Harlow, Essex; New York, Longman Scientific & Technical, Wiley, 696p.
- Eby G. N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications. *Geology* **20**(7): 641-644.
- Feio G.R.L., Dall'Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.J.B., Gomes A.C.B., Sardinha A.S., Santos P.A. 2012. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? *Lithos*, **151**:57-73.
- Feio G. R. L., Dall'Agnol R., Dantas E. L., Macambira M. J. B., Santos J. O. S., Althoff F. J., Soares J. E. B. 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás Province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research* **227**: 157-185
- Frost B. R., Barnes C. G., Collins W. J., Arculus R. J., Ellis D. J., Frost C. D. 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology* **42**(11): 2033-2048.
- Frost C. D. & Frost B. R. 2011. On ferroan (A-type) granitoids: their compositional variability and modes of origin. *Journal of Petrology* **52**: 39-53.
- Gabriel E. O. 2012. *Geologia, geoquímica e petrologia magnética dos granitoides Arqueanos da Porção Nordeste de Água Azul do Norte – Província Carajás*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 117p.
- Gabriel E.O. & Oliveira D.C. 2014. Geologia, petrografia e geoquímica dos granitoides arqueanos de alto magnésio da região de Água Azul do Norte, porção ao sul do Domínio Carajás, Pará. *Boletim do Museu do Pará. Emílio Goeldi. Ciências Nat.* **9**: 533-564.
- Gastal M.C.P. 1987. *Petrologia do maciço granítico Musa, Sudeste do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 316p.
- Gomes A.C.B. & Dall'Agnol R. 2007. Nova associação tonalítica trondjemítica Neoproterozoica na região de Canaã dos Carajás: TTG com altos conteúdos de Ti, Zr e Y. *Revista Brasileira de Geociências*, **37**: 182-193.
- Goodge J.W. & Vervoort J.D. 2006. Origin of Mesoproterozoic A-type granites in Laurentia: Hf isotope evidence. *Earth and Planetary Science Letters*, **243**, 711–731.
- Griffin W.L., Belousova E.A., Shee S.R., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U–Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons: *Precambrian Research*, **131**(3-4): 231-282.

Guimarães F.V.G., Dall’Agnol R., Almeida J.A.C., Oliveira M.A. 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica do trondhjemitó Mogno e Tonalito Mariazinha, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **40**(2):196–211.

Guimarães F. V., Dall’Agnol R., Oliveira D. C., Silva A. C., Teixeira M. F. B., Santos P. A. 2012. Geologia Preliminar da Porção Leste do Subdomínio de Transição da Província Carajás - PA. In: SBG, 46º Congresso Brasileiro de Geologia, Santos (SP), *Anais*[...], 1CD-ROM.

Harker A. 1965. *The natural history of igneous rocks*. New York, Macmillan, 384p.

Horstwood M.S.A., Košler J., Gehrels G., Jackson S.E., McLean N.M., Paton C., Pearson N.J., Sircombe K., Sylvester P., Vermeesch P., Bowring J.F., Condon D.J., Schoene B. 2016. Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-Th-Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. *Geostandards and Geoanalytical Research*, **40**(3): 311-332

Huhn S.R.D., Santos A.B.S., Amaral A.F., Ledsham E.J., Gouveia J.L., Martins L.B.P., Montalvão R.M.G., Costa V.G. 1988. O terreno granito-greenstone da região de Rio Maria – Sul do Pará. In: SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia. Belém. *Anais* v.3, p. 1430-1453.

Huppert H.E. & Sparks R.S. 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *Journal of Petrology*, **29**(3):599–624.

Javier Rios F., Villas R.N., Dall’Agnol R. 1995. O Granito Serra dos Carajás: Fácies petrográficas e evolução petrológica do setor norte. *Revista Brasileira de Geociências* **25**(1):20-31.

Kerr P. 1959. *Optical mineralogy*. 3rd ed. New York, McGraw-Hill Book Co. 492p.

Kerr A. & Fryer B.J. 1993. Nd isotopic evidence for crust–mantle interaction in the generation of A-type granitoid suites in Labrador, Canada. *Chem. Geol.* **104**: 39– 60.

King P.L., White A.J.R., Chappell B.W., Allen C.M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia. *Journal of Petrology*, **38**(3):371-391.

Lafon J.M., Rodrigues E., Macambira E.M.B., Pereira E.D. 1995. Magmatisme anarogénique du Protérozoïque Inférieur dans la région de São Félix do Xingu-Tucumã (Amazonie Orientale, Brésil). Nouvelles données géochronologiques. *C. R. Acad. Sci. Paris* **320**: 937/944

Lafon J.M., Macambira M.J.B., Pidgeon R.T. 2000. Zircon U–Pb SHRIMP dating of Neoproterozoic magmatism in the southwestern part of the Carajás Province (eastern Amazonian Craton, Brazil). In: 30th International Geological Congress, *Abstract Volume*, 1CDROM.

Lamarão C.N., Pinho S.C.C., Paiva Junior A.L., Galarza Toro M.A. 2012. Mineralogy and geochemistry of the Paleoproterozoic, tin-mineralized Bom Jardim Granite of the Velho Guilherme Suite, eastern Amazonian Craton. *Journal of South American Earth Science*, **38**:159-173.

Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M.J., Bonin B., Bateman P., Bellieni G., Dudek A., Efremova S., Keller J., Lameyre J., Sabine P.A., Schmid R., Sorensen H., Wolley A.R. 2002. *Igneous rocks: a classification and glossary of terms*. Recommendations of the international Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of igneous rocks. 2nd ed. United Kingdom, Cambridge University Press. 236 p.

Leite A.A.S., Dall'Agnol R., Macambira M.J.B, Althoff F.J. 2004. Geologia e geocronologia dos granitóides arqueanos da região de Xinguara (PA) e suas implicações na evolução do terreno granito-greenstone de Rio Maria. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**:447-458.

Leite-Santos P.J. & Oliveira D.C. 2016. Geologia, petrografia e geoquímica das associações leucograníticas arqueanas da área de Nova Canadá: Província Carajás. *Geologia USP. Série Científica*, **16**(2): 37-66

Leite-Santos P.J. & Oliveira D.C. 2014. Trondhjemitos da área de Nova Canadá: novas ocorrências de associações magmáticas tipo TTG no Domínio Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais*, Belém, **9**(3): 635-659.

Lima P.H.A., Lamarão C.N., Santo M.J.P. 2014. Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do Granito Paleoproterozoico São João, sudeste do Cráton Amazônico, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. **9**:47-72.

Litvinovsky B.A., Jahn B.-M., Zanzilevich A.N., Saunders A., Poulain S., Kuzmin D.V., Reichow M.K., Titov A.V. 2002. Petrogenesis of syenite–granite suites from the Bryansky Complex (Transbaikalia, Russia): implications for the origin of A-type granitoid magmas. *Chem. Geol.* **189**: 105– 133.

Loiselle M.C. & Wones D.R. 1979. Characteristics and origin of anorogenic granites. *In: The Annual Meetings of the Geological Society of America and Associated Societies, San Diego, Abstracts papers to be presented*, CA 11, 468.

Ludwig K.R. 2001. *Squid 1.0--A user's manual*. Berkeley, California, Berkeley Geochronology Center, 21 p. (Special Publication n. 2).

Ludwig K. 2012. *User's manual for isoplot version 3.75-4.15: a geochronological toolkit for microsoft*. [S.l., s.n.], 75p. (Excel Berkley Geochronological Center Special Publication No. 5).

Machado N., Lindenmayer Z., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U/Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás Área, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**:329-354.

- Martins P.L.G., Toledo C.L.B., Silva A.M., Chemale Jr. F., Santos J.O.S., Assis L.M. 2017. Neoproterozoic magmatism in the southeastern Amazonian Craton, Brazil: Petrography, geochemistry, and tectonic significance of basalts from the Carajás Basin. *Precambrian Research* **302**: 340–357.
- Macambira M. J. B. & Lancelot J. 1991. Em busca do embasamento arqueano da região de Rio Maria, sudeste do Estado do Pará. In: RBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 3, *Resumos Expandidos*, Belém, p.49-58.
- Macambira E.M.B., Jorge João X.S., Souza E.C. 1996. Geologic and petrological aspects of the Plaquê Granite – Southeastern of Pará State. In: Symposium of Archean Terranes of the South American Platform, Brasília. *Extended abstracts*. p. 73-75
- Marangoanha B. & Oliveira D.C. 2014. Diabásios e anfíbolitos da área de Nova Canadá: Natureza e Implicações Tectônicas Para a Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais*, **9**: 565-596.
- Marangoanha B., Oliveira D.C., Dall’Agnol R. 2019a. The Archean granulite-enderbite complex of the northern Carajás province, Amazonian craton (Brazil): origin and implications for crustal growth and cratonization. *Lithos*, **350–351**:105275.
- Marangoanha B., Oliveira D.C., Oliveira V.E.S., Galarza M.A., Lamarão C.N. 2019b. Neoproterozoic A-type granitoids from Carajás province (Brazil): new insights from geochemistry, geochronology and microstructural analysis. *Precambrian Res.* **324**: 86–108.
- Marangoanha B., Oliveira D.C., Galarza M.A., Marques G.T. 2020. Crustal anatexis and mantle-derived magmas forming Neoproterozoic A-type granitoids in Carajás Province, northern Brazil: petrological evidence and tectonic control. *Precambrian Research*, **338**:105585.
- Milhomem Neto J.M., Lafon J.M., Galarza M.A. 2017. Lu-Hf em zircão por LA-MC-ICP-MS no laboratório Pará-Iso (UFPA): metodologia e primeiro exemplo de aplicação na porção sudeste do Escudo das Guianas, estado do Amapá. In: Lima A.M & Gorayeb P. (eds.) *Contribuições à geologia da Amazônia*, Belém, Sociedade Brasileira de Geologia Núcleo Norte, v.10, p. 195-208.
- Mingram B., Trumbull R.B., Littma, S., Gerstenberger H., 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos* **54**: 1 –22.
- Moreto C. P. N., Monteiro L. V. S., Xavier R. P. , Amaral W. S., Santos T. J. S., Juliani C., Souza Filho C. R. 2011. Mesoproterozoic (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide–Cu–Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U–Pb geochronology and metallogenetic implications. *Mineralium Deposita* **46**:789–811.
- Mushkin A., Navon O., Halicz L., Hartmann G., Stein M. 2003. The petrogenesis of A-type magmas from the Amram Massif, southern Israel. *J. Petrol.* **44**: 815– 832.

- Nery P. H. 2019. *Química mineral e condições de cristalização do granito Gradaús, sul do Pará, Província Carajás*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 99 p.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré Cambriano da Serra dos Carajás: redescrição e redefinição litoestratigráfica. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra*, **7**:177-277.
- Oliveira D. C. 2006. *Modelos de evolução e colocação dos granitos paleoproterozóicos da Suíte Jamon, SE do Cráton Amazônico*. PhD Theses, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 171p
- Oliveira M.A., Dall'Agnol R., Almeida J.A.C. 2011. Petrology of the Mesoarchean Rio Maria suite and the discrimination of sanukitoid series. *Lithos*, **127**:192–209.
- Oliveira M. A., Dall'Agnol R., Scaillet B. 2010. Petrological constraints on crystallization conditions of MesoArchean Sanukitoid Rocks, southeastern Amazonian craton, Brazil. *Journal of Petrology*, **51**: 2121-2148.
- Oliveira M.A., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S. 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**:146-160.
- Oliveira D.C., Dall'Agnol R., Barros C.E.M, Figueiredo M.A.B.M. 2002. Petrologia magnética do Granito Paleoproterozóico Redenção, SE do Cráton Amazônico. In: Klein E.L, Vasquez M.L., Rosa-Costa L.T. (eds.) *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, Sociedade Brasileira de Geologia Núcleo Norte, v. 3, p. 115-132.
- Oliveira V.E.S. de, Oliveira D.C. de, Marangoanha B., Lamarão C.N., 2018. Geology, mineralogy and petrological affinities of the Neoproterozoic granitoids from the central portion of the Canaã dos Carajás domain, Amazonian craton, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* **85**, 135–159.
- Paiva Júnior A.L., Lamarão C.N., Lima P.H.A. 2011. Geologia, Petrografia e Geoquímica do Batolito Seringa, Província Carajás, SSE do Para. *Revista Brasileira de Geociências* **41**: 185-202.
- Patchett P.J. & Tatsumoto M. 1980. A routine high-precision method for Lu-Hf isotope geochemistry and chronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **75**:263-267.
- Patiño Douce A.E. 1997. Generation of metaluminous A-type granites by low-pressure melting of calc-alkaline granitoids. *Geology*, **25**(8):743–746.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, **25**:956-983.

Pinho S.C.C. 2005. *Petrografia e geocronologia da borda ENE do Granito Serra da Queimada e da borda SE do Granito Bom Jardim, Província Estanífera do Sul do Pará*. Orientador: Cláudio Nery Lamarão. Trabalho de Conclusão de Curso, Geologia, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, vii, 43p.

Pimentel M.M. & Machado N. 1994. Geocronologia U-Pb do Terrenos Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *In: 38º Congresso Brasileiro de Geologia*. Camboriú, *Resumos Expandidos*, p.390–391

Rämö O.T. & Haapala I. 1995. One hundred years of rapakivi granite. *Mineral Petrol*, **52**:129–185.

Rämö O.T., Dall’Agnol R., Macambira M.J.B., Leite A.A.S., Oliveira D.C. 2002. 1.88 Ga oxidized A-type granites of the Rio Maria region, eastern Amazonian craton, Brazil: positively anorogenic! *Journal of Geology* **110**: 603-610.

Rio Doce Geologia e Mineração- Docegeo. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In: SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Província Mineral de Carajás – Litoestratigrafia e principais depósitos minerais*. Belém, CVRD, *Anexos*, p.11-59.

Rodrigues D.S. 2011. *Petrografia, Geoquímica e Geocronologia do Granito Boa Sorte, Município de Água Azul do Norte – Província Carajás*. Trabalho de Conclusão do Curso, FAGEO de Marabá, Universidade Federal do Pará, Marabá, 88p.

Rodrigues D.S., Oliveira D.C., Macambira M.J.B. 2014. Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Mesoarqueano Boa Sorte, município de Água Azul do Norte, Para e Província Carajás. *Bol. do Mus. Para. Emílio Goeldi. Serie Ciências da Terra*, **9**: 597- 633.

Rolando A.P. & Macambira M.J.B. 2003. Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. *In: South American Symposium on Isotope Geology*. Salvador, *Expanded Abstracts*[...], 1 CDrom

Rollinson H. 1993. *Using geochemical data: evolution, presentation, interpretation*. New York, Longman, 352f.

Russell W.A., Papanastassiou D.A., Tombrello T.A. 1978. Ca isotope fractionation on the earth and other solar system materials. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **42**:1075-1090.

Santos J.O.S. 2003. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil Central. *In: Bizzi L.A., Schobbenhaus C., Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (ed.). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*. Belém, Companhia de Recursos Minerais/CPRM, p. 169-226.

Santos M.S., Oliveira D.C., Gabriel E.O. 2018. Granitoides TTG de Água Azul do Norte (PA): implicações tectônicas para a Província Carajás. *Geologia USP-Série científica*, **18**:119–148.

Santos P. A., Feio G. R. L., Dall’Agnol R., Costi H. T., Lamarão C. N., Galarza M. A. 2013. Petrography, magnetic susceptibility and geochemistry of the Rio Branco Granite, Carajás Province, southeast of Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* **43**(1): 2–15.

Santos P.A., Teixeira M.F.B., Dall’Agnol R., Guimaraes, A.V., 2013a. Geologia, petrografia e geoquímica da associação Tonalito-Trondhjemito-Granodiorito (TTG) do extremo leste do Subdomínio de Transição, Província Carajás, Para. *Boletim do Museu. Para. Emílio Goeldi. Ciências Nat.* **8**: 257-290.

Santos P. J. L. & Oliveira D. C. 2012. Geologia, Petrografia e Geoquímica das Associações Granodioríticas-Graníticas de Nova Canadá, Subdomínio de Transição, Província Carajás. *In*: SBG, 46º Congresso Brasileiro de Geologia, Santos-SP, *Anais[...]*, 1CDROM.

Santos P.J.L., Oliveira D.C., Galarza M.A., Macambira M.J.B. 2010. Geologia, petrografia e geocronologia das rochas granitoides do Complexo Xingu da região de Nova Canadá, município de Água Azul do Norte – Província mineral de Carajás. *In*: SBG, 45º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. *Anais[...]*, CD-ROM.

Santos R.D., Galarza M.A., Oliveira D.C. 2013. Geologia, geoquímica e geocronologia do Diopsídio Norito Pium, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, **8**:355-382.

Santos R. F. S., Oliveira, D. C. de, Silva, F. F. da. 2018 Geocronologia U-Pb, classificação e aspectos evolutivos do Granito Marajoara, Província Carajás. *Geologia USP. Série Científica*, **18**(4): 89-124.

Santos-Silva R.C., Sabóia A.M., Oliveira H.J. 2021. *Projeto integração geológica-geofísica metalogenética das sequências de Greenstone Belts do Domínio Rio Maria – Novas Fronteiras Rio Maria*. Escalas: 1.250.000–1:100.000. Belém, CPRM, p. 274

Sato K., Tassinari C.C.G., Basei M.A.S., Siga Júnior O., Onoe A.T., Souza M.D. 2014. Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP IIe/MC) of the Institute of Geosciences of the University of São Paulo, Brazil: analytical method and first results. *Geologia USP-Série Científica*, **14**(3):3-18.

Shand S.J. 1950. *Eruptive rocks, their genesis, composition, classification and their relation to oredeposit*. 4th ed. London, [s.n.], 488 p.

Shelley D. (ed.). 1993. *Igneous and metamorphic rocks under the microscope – classification, textures, microstructures and mineral preferred orientations*. 1st. Dordrecht, Springer. xvi, 446p.

Silva A. C., Dall’Agnoll R., Guimarães F. V., Oliveira D. C. 2014. Geologia, petrografia e geoquímica de Associações Tonalíticas e Trondhjemíticas Arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, **9**: 13-46.

Silva M. A. Delinardo da. 2014. *Metatexitos e diatexitos do Complexo Xingu na região de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução mesoarqueana do domínio Carajás*: MS Dissertation, Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP.

Silva M. A. D.da, Monteiro L. V. S., Moreto C. P. N., Sousa S. D. 2015. Metamorfismo e geoquímica do Complexo Xingu na região de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução mesoarqueana do domínio Carajás, Província Carajás. *In: Gorayeb P. S. de S. & Lima A. M. M. de. (org.). Contribuições à geologia da Amazônia.* Belém, Pará, SBG-NO, v.9, p. 251-270. (Panorama do conhecimento geológico por ocasião do 13º Simpósio de Geologia da Amazônia, realizado em Belém-Pará, no período de 22 a 26 de setembro de 2013).

Silva F.F.da, Oliveira D.C.de, Antônio P.Y.J, D'Agrella Filho M.S, Lamarão C.N. 2016. Magmatismo bimodal da área de Tucumã, Província Carajás: geocronologia U-Pb, classificação e processos. *Journal of South American Earth Sciences*, **72**: 95-114.

Silva L.R. 2022. *Petrogênese e história tectônica dos granitoides mesoarqueanos de Ourilândia do Norte (PA) – Província Carajás.* PhD Theses, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 317p.

Silva L.R., Oliveira D.C., Santos M.N.S. 2018. Diversity, origin and tectonic significance of the Mesoarchean granitoids of Ourilândia do Norte, Carajás province (Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, **82**:33–61

Silva M.A.D., Monteiro L.V.S., Santos T.J.S., Moreto C.P.N., Sousa S.D., Faustinoni J.M., Melo G.H.C., Xavier R.P., Toledo B.A.M. 2021. Mesoarchean migmatites of the Carajás Province: From intra-arc melting to collision. *Lithos*, **388-389**: e106078.

Silva-Silva L.C., Oliveira D.C., Souza D.B. 2020. Geology and geochemical constraints on the origin of the Mesoarchean granitoids from Carajás province, Amazonian craton. *Journal of South American Earth Sciences*, **100**:102–568

Skjerlie K.P. & Johnston A.D. 1993. Fluid-absent melting behavior of F-rich tonalitic gneiss at mid-crustal pressures: implications for the generation of anorogenic granites. *Journal of Petrology*, **34**(4):785–815

Söderlund U., Patchett P.J., Vervoort J.D., Isachsen C.E. 2004. The ¹⁷⁶Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letter*, **219**:311-324

Souza S. D., Monteiro L. V. S., Oliveira D. C., Silva M. A. D., Moreto C. P. N., Juliani C. 2015. O Greenstone Belt Sapucaia na Região de Água Azul do Norte, Província Carajás: Contexto Geológico e Caracterização Petrográfica e Geoquímica. SBG, Núcleo Norte, *Contribuição à Geologia da Amazônia*, **9**: 289-312.

Souza S.Z., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., Barros C.E.M. 1996. Carajás mineral province: geological, geochronological and tectonic contrasts on the Archean evolution of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrain and the Carajás block. *In: SBG, Symposium on Archean Terranes of South America Platform, Brasília,DF. Extended abstracts.* p. 31-33.

Souza Z. S., Potrel A., Lafon J. M., Althoff F. J., Pimentel M. M., Dall'Agnol R., Oliveira C. G. 2001. Nd, Pb and Sr Isotopes in the Identidade Belt, an Archaean Greenstone Belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): Implications for the Archaean Geodynamic Evolution of the Amazonian Craton. *Precambrian Research*, **109**: 293-315.

Stern R.A. 1998. High resolution SIMS determination of radiogenic trace isotope ratios in minerals. In: Cabri L.J. & Vaughan D.J. (eds.). *Modern approaches to ore and environmental mineralogy*. Ottawa, [s.n.], p. 241-268. (Mineralogical Association of Canada, 27).

Streckeisen A.L. 1976. To each plutonic rock its proper name. *EarthScience Reviews*, **12**(1):1-33.

Sylvester P.J. 1989. Post-collisional alkaline granites. *Journal of Geology*, **97**: 261–280.

Tavares F.M. 2014. *Rio Verde – SB.22-Z-A-III, Estado do Pará – carta geológica. Escala 1:100.000. Belém, CPRM. (Programa Geologia do Brasil – PGB).*

Tavares F.M. 2015. *Evolução geotectônica do nordeste da Província Carajás*. Phd Thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 115 p.

Tavares F. M., Trouw R. A. J., Silva Justo C. M. G; A. P., Oliveira J. K. M. 2018. The multistage tectonic evolution of the northeastern Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil: Revealing complex structural patterns. *Journal of South American Earth Sciences*, Oxford, **88**: 238-252.

Teixeira N. P. 1999. *Contribuição ao estudo das rochas granitoides e mineralizações associadas da Suíte intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará*. PhD Theses, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 508p.

Teixeira N. P., Bello R. M. S., Bettencourt J. S. 2002. Inclusões fluidas do Maciço Granítico Antônio Vicente, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(1): 135-146.

Teixeira N. P., Bettencourt J. S., Dall’Agnol R., Moura C. A. V., Fernandes C. M. D., Pinho S. C. C. 2005. Geoquímica dos granitos paleoproterozóicos da Suíte Granítica Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **35**: 217-226.

Teixeira N.P., Bettencourt J.S., Moura C.A.V., Dall’Agnol R., Macambira E.M.B. 2002a. Archen crustal sources for paleoproterozoic tingranites in the Carajás Province, SSE Pará, Brazil: Pb-Pb geochronology and Nd isotope geochemistry. *Prec. Res.*, **119** (1- 4):2257-2275.

Teixeira L.R. 2005. *Genesis versão 4.0. Aplicativo de modelamento geoquímico*. Universidade Federal da Bahia.

Teixeira M.F.B., Dall’Agnol R., Silva A.C., Santos P.A. 2013. Geologia, petrografia e geoquímica do Leucogranodiorito Pantanal e dos leucogranitos arqueanos da área de Sapucaia, Província Carajás, PA: implicações petrogenéticas. *Boletim do Museu. Pará. Emílio Goeldi, Serie Ciências Nat.*, **8**: 291-323.

Teixeira A.S., Ferreira Filho C.F., Giustina M.E.S.D., Araujo S.M., Silva H.H.A.B. 2015. Geology, petrology and geochronology of the Lago Grande layered complex: evidence for a PGE-mineralized magmatic suíte in the Carajás Mineral Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* **64**: 116–138.

Teixeira M.F.B., Dall'Agnol R., Santos J.S.O., Souza L.A.M., Lafon J.M. 2017 Geochemistry, geochronology and Nd isotopes of the Gogó da Onça Granite: A new Paleoproterozoic A-type granite of Carajás Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **80**:47-65.

Teixeira M.F.B. Dall'Agnol R., Santos J.O.S, Oliveira D.C., Lamarão C.L., McNaughton N.J. 2018. Crystallization ages of Paleoproterozoic A-type granites of Carajás province, Amazon Craton: Constraints from U-Pb geochronology of zircon and titanite. *Journal of South American Earth Sciences*, **88**:312-331

Teixeira M.F.B., Dall'Agnol R., Santos J.O.S., Kemp A., Evans N. 2019. Petrogenesis of the Paleoproterozoic (Orosirian) A-type granites of Carajás Province, Amazon Craton, Brazil: Combined in situ Hf–O isotopes of zircon. *Lithos*, **332**: 333, 1–22.

Thirlwall M.F., Anczkiewicz R. 2004. Multidynamic isotope ratio analysis using MC–ICP–MS and the causes of secular drift in Hf, Nd and Pb isotope ratios. *International Journal of Mass Spectrometry*, **235**:59-81.

Turner S.P., Foden J.D., Morrison R.S. 1992. Derivation of some A-type magmas by fractionation of basaltic magma; an example from the Padthaway Ridge, South Australia. *Lithos* **28**: 151– 179.

Vasquez M. L., Rosa-Costa L. T., Silva C. G., Ricci P. F., Barbosa J. O., Klein E. L., Lopes E. S., Macambira E. B., Chaves C. L., Carvalho J. M.,Oliveira J. G., AnjosG. C., Silva H. R. 2008. Litoestratigráficas. In: Vasquez M. L. & Rosa-Costa L. T. da (org.). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará*: Sistema de Informações Geográficas – IG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. Belém, CPRM, p. 113-215.

Wickham S.M., Alberts A.D., Litvinovsky B.A., Bindeman I.N., Schauble E.A. 1996. A stable isotope study of anorogenic magmatism in East Central Asia. *J. Petrol.* **37**: 1063– 1095.

Whalen J. W., Currie K. L., Chappel B. W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contribution to Mineralogy and Petrology* **95**: 407-419.

Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis* – a global tectonic approach. Dordrecht, Springer,

Williams I.S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben M.A., Shanks III W.C., Ridley W.I. (eds.). *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes*. p.1-35. (Riewier Economic Geologists, 7).

Wyers G.P. & Barton M. 1986. Petrology and evolution of transitional alkaline-subalkaline lavas from Patmos, Dodecanesos, Greece: evidence for fractional crystallization, magma mixing, and assimilation. *Contrib. Miner. Petrol.*, **93**: 297–311.

Yang J.H., Wu F.Y., Chung S.L., Wilde S.A., Chu M.F. 2006. A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence. *Lithos* **89**: 89–106.