



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC

**QUÍMICA MINERAL DE APATITAS DE GRANITOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS:
MORFOLOGIA, COMPOSIÇÃO E CONSIDERAÇÕES PETROLÓGICAS E
METALOGENÉTICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado por:

GIOVANNA REIS CORRÊA

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão (IG/UFPA)

**BELÉM – PA
NOVEMBRO/2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

GIOVANNA REIS CORRÊA

**QUÍMICA MINERAL DE APATITAS DE GRANITOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS:
MORFOLOGIA, COMPOSIÇÃO E CONSIDERAÇÕES PETROLÓGICAS E
METALOGENÉTICAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado por:

GIOVANNA REIS CORRÊA

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão (IG/UFPA)

**BELÉM – PA
NOVEMBRO/2022**

**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)**

C824q Corrêa, Giovanna Reis.
Química mineral de apatitas de granitos da Província Carajás:
morfologia, composição e considerações petrológicas e metalogenéticas
/ Giovanna Reis Corrêa. — 2022.
xiii, 47 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia,
Belém, 2022.

1. Apatita. 2. cassiterita. 3. MEV-EDS. 4. química
mineral. 5. Província Carajás. I. Título.

CDD 558.115



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA**

GIOVANNA REIS CORRÊA

**QUÍMICA MINERAL DE APATITAS DE GRANITOS DA PROVÍNCIA CARAJÁS:
MORFOLOGIA, COMPOSIÇÃO E CONSIDERAÇÕES PETROLÓGICAS E
METALOGENÉTICAS**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Bacharel em Geologia, com ênfase
Petrologia e Geoquímica**

Data da aprovação: 19/12/2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão
(Orientador – UFPA)

MSc. Luciano Castro da Silva
(Avaliador externo – CPRM)

Prof. Dr. Davis Carvalho de Oliveira
(Avaliador – UFPA)

À minha família e amigos, minha base, razão e suporte incondicional.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará, ao Instituto de Geociências (IG) e à Faculdade de Geologia (FAGEO), pelo suporte, infraestrutura e educação de qualidade.

Ao Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências, da UFPA.

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica e o incentivo à pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cláudio Nery Lamarão, pelo exímio trabalho prestado ao magistério, sempre dedicado a repassar seu conhecimento e me orientar da melhor forma possível. Toda minha admiração e gratidão por confiar este trabalho a mim, pela compreensão e pelas palavras de apoio que tanto ajudaram nessa trajetória.

À Msc. Gisele Tavares Marques e à química Ana Paula Picanço Corrêa, operadoras do MEV e da microsonda do laboratório de Microanálises.

À minha família, especialmente meus pais e irmãs, que são a razão de tudo isso e os grandes apoiadores dos meus sonhos. Obrigada pelo amor e suporte incondicional, por acreditarem em mim e estarem do meu lado em todas as minhas decisões, sem vocês não teria chegado até aqui.

À minha vó Glória, *in memoriam*, por me proteger e me guiar a cada passo dado.

À Naza, minha segunda mãe e grande conselheira. Obrigada por tanto, pelo cuidado comigo e minhas irmãs, pela lealdade e amizade que foram essenciais em minha jornada.

Aos meus amigos da turma de 2017, que tornaram a graduação mais leve e alegre. Obrigada por todos os momentos vividos, pelos campos, rolês e risadas. Aos meus melhores amigos da vida, obrigada pelos momentos compartilhados, principalmente os de pura felicidade na laje de casa, pelas conversas e pelo ombro amigo em momentos de dificuldade.

Ao meu grande amor, Mayara Raiol, companheira de curso e da vida, cujo amor e incentivo foram fundamentais e me deram forças para seguir adiante. Obrigada por ser meu ponto de paz, meu refúgio e luz em minha vida.

“Não somos mais que uma gota de luz; uma estrela que cai; uma fagulha tão só na idade do céu. Não somos o que queríamos ser. Somos um breve pulsar em um silêncio antigo, com a idade do céu”

Paulinho Moska

RESUMO

A apatita, de composição $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, é um dos minerais acessórios mais comuns em rochas magmáticas devido à sua ampla estabilidade a processos geológicos e carrega em sua estrutura uma variedade de elementos menores e traços que podem fornecer informações importantes. Compreender a assinatura morfológica e geoquímica desse mineral implica entender sua trajetória de cristalização e as condições que reinavam durante sua formação. O trabalho desenvolvido envolveu o estudo morfológico, textural e composicional através de MEV-EDS de cristais de apatita presentes nas diferentes fácies do granito estanífero Velho Guilherme, de caráter reduzido, localizado no Domínio Rio Maria e integrante da Província Estanífera do Sul do Pará, bem como de apatitas do granito Central, contendo localmente veios de quartzo com ocorrências de cassiterita, e pertencente ao Domínio Carajás. Para fins comparativos foram utilizados dados obtidos em trabalhos anteriores de apatitas dos granitos estaníferos Bom Jardim e Antônio Vicente, também integrantes da Província Estanífera do Sul do Pará, e dos granitos estéreis Jamon e Redenção, de caráter mais oxidado e pertencentes à Suíte Jamon; foram utilizados, ainda, apatitas das rochas arqueanas da Suíte Sanukitoide Rio Maria e do Trondhjemitó Mogno, ambos inseridos no Domínio Rio Maria. O estudo composicional demonstrou que as apatitas dos granitos Velho Guilherme e Central apresentam conteúdos mais elevados de Y, La e Ce e mais baixos de Ca+P em relação às apatitas encontradas em granitos desprovidos de mineralização e mostram assinatura geoquímica similar à de outras apatitas de granitos estaníferos do Cráton Amazônico. Os granitos paleoproterozoicos, tanto mineralizados quanto estéreis, apresentam apatitas mais enriquecidas em ETR+Y em relação às apatitas de rochas arqueanas. Dessa forma, análises em MEV-EDS, quando utilizadas com os devidos cuidados, podem auxiliar satisfatoriamente no estudo de minerais indicadores deste tipo de mineralização, além de diferenciar mudanças no cenário geológico de determinada região durante sua evolução crustal, distinguindo, por exemplo, eventos arqueanos de paleoproterozoicos.

Palavras-chaves: Apatita; cassiterita; MEV-EDS; química mineral; Província Carajás

ABSTRACT

Apatite, of composition $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, is one of the most common accessory minerals in magmatic rocks due to its wide stability to geological processes and carries in its structure a variety of minor and trace elements that can provide important informations. Understanding the morphological and geochemical signature of this mineral implies understanding its crystallization trajectory and the conditions that reigned during its formation. The work developed involved the morphological, textural and compositional study through MEV-EDS of apatite crystals present in the different facies of the tin-bearing granite Velho Guilherme, of reduced character, located in the Rio Maria Domain and part of the Província Estanífera do Sul do Pará, as well as apatites from the Central granite, locally containing quartz veins with occurrences of cassiterite, and located in the Carajás Domain. For comparative purposes, data obtained from previous work on apatites from the Bom Jardim and Antônio Vicente tin-bearing granites, also part of the Província Estanífera do Sul do Pará, and the barren granites Jamon and Redenção, which are more oxidized and belong to the Jamon Suite, were used; apatites from the Archean rocks of the Sanukitoide Rio Maria Suite and the Trondhjemitite Mogno were also used, both included in the Rio Maria Domain. The compositional study demonstrated that the apatites from the Velho Guilherme and Central granites have higher contents of Y, La and Ce and lower contents of Ca+P in relation to the apatites found in granites devoid of mineralization and show a geochemical signature similar to the other apatites from tin-bearing granites from the Amazon Craton. Paleoproterozoic granites, both mineralized and barren, have apatites more enriched in ETR+Y than apatites from Archean rocks. Thus, MEV-EDS analysis, when used with due care, can satisfactorily assist in the study of minerals that are indicators of this type of mineralization, in addition to differentiating changes in the geological scenario of a given region during its crustal evolution, distinguishing, for example, Archean and Paleoproterozoic events.

Key Words: Apatite; cassiterite; MEV-EDS; mineral chemistry; Carajás Province;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – (a) Mapa esquemático do Cráton Amazônico com a localização da Província Carajás. (b) Mapa geológico simplificado da Província Carajás com a distribuição das suítes graníticas do Cráton Amazônico (Dall’Agnol et al. 2005), com destaque para os granitos Velho Guilherme e Central, objetos deste estudo (em negrito). DRM=Domínio Rio Maria. RX=Região do Xingu. BC=Bacia Carajás. Suíte Jamon: granitos oxidados; Suíte Velho Guilherme: granitos reduzidos e estaníferos; Suíte Serra dos Carajás: granitos moderadamente oxidados; granitos paleoproterozoicos indiferenciados: granitos moderadamente oxidados.....15
- Figura 2 – (A) Cráton Amazônico e sua posição em relação à plataforma Sul-Americana: (B) Localização da Província Amazônia Central em relação ao Cráton Amazônico (Tassinari & Macambira 1999, 2004). (C) Mapa geológico da Província Carajás, com a localização das amostras da Suíte Sanukitoide Rio Maria, objeto deste estudo. Modificado de Vasquez et al. (2008), Guimarães et al. (2010), Oliveira et al. (2010), Feio et al. (2013), Santos & Oliveira (2012) e Gabriel & Oliveira (2014) 24
- Figura 3 – Fotomicrografias do Granito Velho Guilherme. Figuras A e B pertencentes à fácies BSGH e Figuras C, D, E e F referentes à fácies BSGEm. A: textura característica da fácies BSGH; B: : cristal de feldspato potássico rodeado por cristais de quartzo mais finos; C: textura típica da fácies BSGEm, mostrando cristais de quartzo subédricos a euédricos, plagioclásio, clorita e muscovita; D: : clorita formando agregados globulares, plagioclásio alterado e quartzo; E: textura granular hipidiomórfica, mostrando cristais de plagioclásio alterando para clorita, feldspato potássico alterado para argilomineral, quartzo, anfibólio cloritizado, muscovita e cristais de fluorita associados à minerais opacos e anfibólio; F: cristais de plagioclásio intensamente sericitizados, feldspato potássico alterado para argilomineral, anfibólio e quartzo.31
- Figura 4 – Fotomicrografias do Granito Central. A e B mostrando a fácies ABSG e C e D referentes a fácies ABMG. A: textura característica da fácies ABSG; B: inclusão de apatita na biotita; C: textura característica da fácies ABMG; D: cristais de apatita inclusos no quartzo.....33

Figura 5 – Imagens de elétrons retroespalhados (ERE), mostrando os aspectos morfológicos das apatitas do Granito Velho Guilherme. Figuras A, B, C, D e E representam a fácies BSGH e a F a fácies BSGEm. A: cristal subédrico, arredondado e bem desenvolvido de apatita, e outros dois menores euédricos, inclusos no feldspato potássico. B: cristais de apatita subédricos a euédricos associados à biotita; o cristal mais desenvolvido apresenta leve zoneamento; C: apatitas anédricas a subédricas, associadas à biotita e quartzo; D: cristais anédricos de apatita inclusos na biotita cloritizada; E: apatita associada à ilmenita e titanita; F: raros cristais anédricos e finos de apatita na fácies mais evoluída e mineralizada (BSGEm); notar cristal de fluorita às proximidades. Ap = Apatita; Bt = Biotita; Qz = Quartzo; Kfs = Feldspato potássico; Zr = Zircão; Ilm = Ilmenita; Ttn = Titanita. 34

Figura 6 – Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) mostrando os aspectos morfológicos das apatitas do Granito Central. Figuras A, B e C pertencentes a fácies ABMG, retratando inclusões de apatitas subédricas, com fraturamento moderado a alto nas biotitas. Figuras D, E e F associadas a fácies ABSG, com apatitas fraturadas, alterando para monazita e alguns cristais zonados; D: seção basal de apatita euédrica, alterando para monazita, inclusa na biotita; E: cristal subédrico de apatita, alterando para monazita, ocorrendo entre cristais de quartzo e feldspato potássico; F: cristal subédrico de apatita, zonado entre cristais de quartzo e feldspato potássico. Ap = Apatita; Bt = Biotita; Qz = Quartzo; Kfs = Feldspato potássico; Mnz = Monazita; Zr = Zircão36

Figura 7 – Diagramas composicionais das apatitas estudadas. (A): Ca x P; (B) Ca x F; (C) Ca x Y; (D) Ca x Fe+Mn.....44

Figura 8 – Diagramas composicionais das apatitas estudadas. (A): Ca+P x Fe+Mn=Y=La+Ce; (B) Y x La+Ce+Pd+Nd+Sm; (C) Gd+Yb+Y x La=Ce+Pr+Nd+Sm; (D) Ca+P x F+Cl+Na+Fe+Y+ETR 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação dos granitos e amostras estudadas.	19
Tabela 2 – Variações médias obtidas por MEV-EDS dos principais elementos contidos nas apatitas dos corpos estudados (% em peso; Fe+Mn+Y+La+Ce ppm). Entre parênteses o número de análises realizadas.	41
Tabela 3 – Variações composicionais médias de apatitas obtidas por MEV-EDS e Microsonda (SL-06-DT; MC-49; MASF-28) em trabalhos anteriores utilizadas nesse trabalho para fins comparativos (% em peso; Σ em ppm). Entre parênteses o número de análises realizadas.	42

Sumário

DEDICATÓRIA	Erro! Indicador não definido.
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vi
LISTA DE TABELAS	viii
1INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	2
2JUSTIFICATIVA	5
3OBJETIVOS	6
4MATERIAIS E MÉTODOS	7
4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	7
4.2 ESTUDO PETROGRÁFICO	7
4.3 ANÁLISE DE MEV-EDS	7
4.4. TRATAMENTO DE DADOS	8
5CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	9
5.1 DOMÍNIO RIO MARIA (DRM)	10
5.2 DOMÍNIO CANAÃ DOS CARAJÁS (DCC) E BACIA CARAJÁS (BC).....	11
6ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS ROCHAS ESTUDADAS	14
6.1 SUÍTE INTRUSIVA VELHO GUILHERME (SIVG)	14
6.1.1 Granito Velho Guilherme	14
6.2 SUÍTE SERRA DOS CARAJÁS	15
6.2.1 Granito Central.....	15
6.3 TRONDHJEMITO MOGNO	16
6.4 SUÍTE SANUKITOIDE RIO MARIA.....	16
7PATITA COMO INDICADOR PETROLÓGICO E METALOGENÉTICO	18

	x
8RESULTADOS	20
8.1 PETROGRAFIA.....	20
8.1.1 Granito Velho Guilherme	20
8.1.2 Granito Central	22
8.2 ASPECTOS MORFOLÓGICOS DAS APATITAS	23
8.3 ASPECTOS COMPOSICIONAIS	27
8.3.1 Suíte Intrusiva Velho Guilherme	27
8.3.2 Suíte Jamon	28
8.3.3 Suíte Serra dos Carajás.....	29
8.3.4 Granitoides Arqueanos	29
8.4 DIAGRAMAS DISCRIMINANTES	33
8.5 GRANITOS PALEOPROTEROZOICOS <i>VERSUS</i> GRANITOIDES ARQUEANOS.....	37
9CONCLUSÃO.....	38
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A Apatita, de composição $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$, é um dos minerais acessórios mais comuns nos três grandes grupos de rochas devido, principalmente, a sua ampla estabilidade a processos geológicos. Em rochas graníticas, esse fosfato armazena em sua estrutura conteúdos diversos de elementos menores e traços como Na, K, Mn, F, Cl, Sr, Pb, Ba, Th, U, V, As e ETRs; em decorrência disso, é possível obter informações petrológica e metalogenéticas valiosas (Sha & Chappell 1999).

Nesse contexto, definir a assinatura química de apatitas auxilia no entendimento das condições geoquímicas do seu ambiente de formação, visto que a sua composição varia em função de fatores como temperatura, pressão, fugacidade de oxigênio, atividade e composição de gases coexistentes, além da composição do sistema magmático como um todo. Logo, compreender a composição química de um mineral magmático, auxilia no entendimento das condições que reinaram durante a sua cristalização (Sha & Chappell 1999, Chu *et al.* 2009).

O presente trabalho encontra-se vinculado às atividades do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geociências, o qual vem desenvolvendo trabalhos de caracterização geoquímica em minerais acessórios de rochas granitoides, tais como titanita, magnetita, apatita, rutilo e zircão por meio de estudos de microscopia eletrônica de varredura-espectroscopia por dispersão de energia (MEV-EDS) e microsonda eletrônica (Lamarão *et al.* 2007, 2010, 2012, 2018, Breiter *et al.* 2014, Costa 2016, Faro 2016, Fonseca 2016, 2019, Cunha *et al.* 2016, Melo 2017, Nery 2017, Mesquita *et al.* 2018, Silva 2018, Reis 2019). O principal objetivo desses trabalhos foi utilizar as variações morfológicas e composicionais desses minerais acessórios como indicadores de potencial especializado (Sn, W, Au) ou não de suas rochas hospedeiras e, ainda, tecer considerações sobre o caráter oxidado e/ou reduzido dessas rochas e seus produtos de alteração hidrotermal.

Assim, alguns desses trabalhos se propuseram estudar o magmatismo tipo-A da Província Carajás a partir da análise química de minerais acessórios. O magmatismo tipo-A tem se tornado importante no sentido de contribuir para o melhor entendimento de processos crustais intraplaca do Pré-Cambriano e na evolução litosférica em escala global (Dall'Agnol *et al.* 2012, Teixeira *et al.* 2019). Esse magmatismo é derivado de várias fontes e processos, resultando em alguns contrastes mineralógicos e geoquímicos. O magmatismo anorogênico ocorre amplamente em várias regiões cratônicas ao redor do mundo, desde o Neoarqueano (~2,7 Ga) até períodos mais recentes; contudo, é mais abundante no Paleoproterozoico e Mesoproterozoico, sendo marcado por granitos tipo rapakivi. Na Província Carajás a maioria desses plutons foi agrupada por Dall'Agnol *et al.* (2005) nas suítes Jamon, Serra dos Carajás e

Velho Guilherme, de acordo com sua mineralogia, geoquímica, estado de oxidação e susceptibilidade magnética (Dall’Agnol *et al.* 1994, 2005, Teixeira *et al.*, 2002, 2005, Dall’Agnol e Oliveira 2007, Lamarão *et al.* 2012). A Suíte Jamon é oxidada e associada à série magnetita, enquanto a Suíte Velho Guilherme é reduzida e associada à série ilmenita (Ishihara, 1981). Por sua vez, a Suíte Serra dos Carajás apresenta granitos moderadamente reduzidos, localmente contendo magnetita e ilmenita.

Apesar de amplamente estudadas, ainda são restritos os estudos de química mineral nessas rochas. Considerando que a apatita é comum em rochas graníticas e tem a capacidade de fornecer informações acerca da evolução magmática e petrogenética de suas rochas hospedeiras, foram realizadas análises de MEV-EDS em cristais de apatita dos granitos anorogênicos Central (Javier Rios 1991, Javier Rios & Villas 1991, Javier Rios *et al.* 1995) e Velho Guilherme (Teixeira 1999, Teixeira e Bettencourt 2000, Teixeira *et al.* 2005), aflorantes na Província Carajás. Comparativamente foram utilizadas análises de apatitas dos granitos estaníferos Bom Jardim e Antônio Vicente, da região do Xingu (Faro 2016, Fonseca 2016, Nery 2019) e dos granodioritos da Suíte Sanukitoide Rio Maria e do Trondhjemito Mogno (Fonseca 2019), ambos arqueanos e localizados no Domínio Rio Maria.

1.1 APRESENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A Figura 1 mostra o mapa esquemático do Cráton Amazônico e o mapa geológico simplificado da Província Carajás, com a localização das três grandes suítes graníticas definidas por Dall’Agnol *et al.* (2005), além de outros corpos graníticos anorogênicos ainda não incluídos em nenhuma das três suítes.

O trabalho em questão foi desenvolvido a partir do estudo textural, morfológico e composicional por MEV-EDS em cristais de apatita presentes nas diferentes fácies dos granitos: (1) **Velho Guilherme**, estanífero situado entre os municípios de Tucumã e São Félix do Xingu, sul-sudeste do Pará, pertencente à Suíte Intrusiva Velho Guilherme (SIVG) e integrante da Província Estanífera do Sul do Pará (Abreu & Ramos 1974, CPRM/DNPM 1997, Dall’Agnol *et al.* 1993, Teixeira & Bettencourt 2000, Teixeira *et al.* 2002, 2005, Lamarão *et al.* 2012); (2) **Central** (Javier Rios 1991, Javier Rios *et al.*, 1995, Barros *et al.* 1994), localizado a aproximadamente 15 km do núcleo Carajás, pertencente à Suíte Serra dos Carajás e situado no domínio da Bacia Carajás (Dall’Agnol *et al.* 2013).

Para integrar a pesquisa, foram utilizadas apatitas dos granitos estaníferos Bom Jardim e Antônio Vicente, ocorrentes na região do Xingu, e dos granitos estéreis Jamon e Redenção,

do Domínio Rio Maria, além de análises em microsonda de apatitas da Suíte Sanukitoide Rio Maria (Oliveira *et al.* 2009) e do Trondhjemito Mogno (Guimarães *et al.* 2010). Estas últimas são arqueanas e pertencem ao Domínio Rio Maria, e foram utilizadas a fim de permitir comparações e interpretações petrológicas e metalogenéticas importantes. Desta forma, os dados de química mineral em apatitas obtidos neste estudo se somarão às outras informações geológicas existentes, constituindo-se em informações complementares para o avanço do conhecimento desses corpos graníticos.

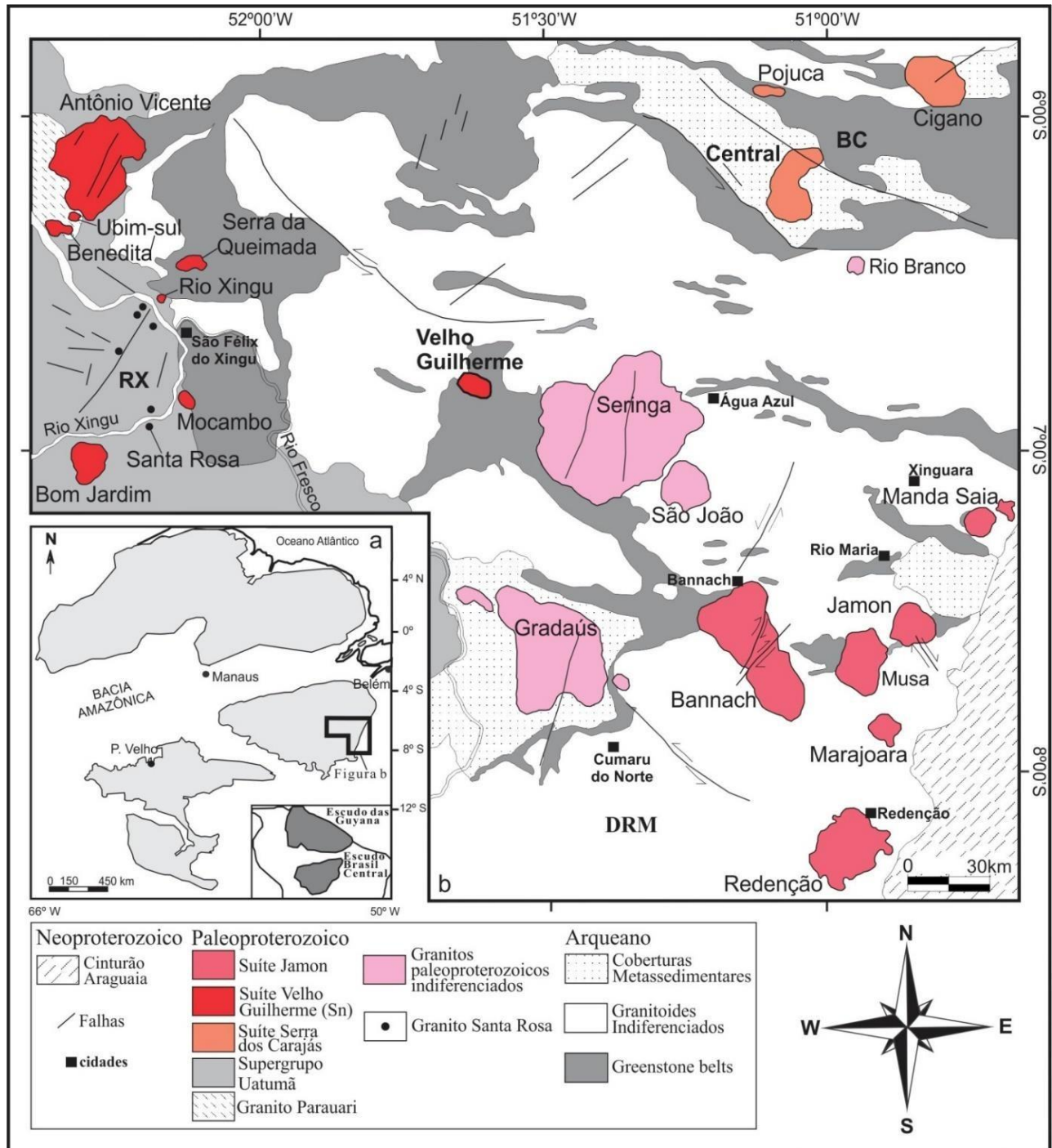


Figura 1 – (a) Mapa esquemático do Crátom Amazônico com a localização da Província Carajás. (b) Mapa geológico simplificado da Província Carajás com a distribuição das suítes graníticas do Crátom Amazônico (Dall’Agnol *et al.* 2005), com destaque para os granitos Velho Guilherme e Central, objetos deste estudo (em negrito). DRM=Domínio Rio Maria. RX=Região do Xingu. BC=Bacia Carajás. Suíte Jamon: granitos oxidados; Suíte Velho Guilherme: granitos reduzidos e estaníferos; Suíte Serra dos Carajás: granitos moderadamente oxidados; granitos paleoproterozoicos indiferenciados: granitos moderadamente oxidados.

2 JUSTIFICATIVA

Apatitas são minerais acessórios comuns em granitos metaluminosos e oxidados e mais raros em granitos reduzidos, ocorrendo localmente em suas fácies menos evoluídas. Devido a sua resistência à substituições, cristais de apatita incorporam durante sua cristalização uma grande variedade de elementos menores e traços geologicamente importantes, os quais podem fornecer informações sobre suas condições de formação e o potencial metalogenético de sua rocha hospedeira (Chu *et al.* 2009, Belousova *et al.* 2002)

Esse importante mineral acessório pode ser comparado ao zircão e, em alguns aspectos, até o supera como na abundância, estabilidade durante a evolução magmática e variedade química (Chu *et al.* 2009). A partir de estudos em diferentes tipos de rochas ígneas, Belousova *et al.* (2002) concluíram que a apatita, assim como o zircão, pode ser utilizada como um mineral resistato indicador (RIM – *Resistate indicator mineral*) em exploração mineral. Os minerais resistatos indicadores são caracterizados por serem resistentes às alterações e transformações durante os processos geológicos em que são submetidos. De acordo com Belousova *et al.* (2002), esta técnica é amplamente aceita em ocorrências diamantíferas e possui aplicação potencial para uma série de outros minerais de interesse econômico.

A importância atribuída ao presente estudo deve-se, entre outras coisas, aos poucos trabalhos envolvendo a caracterização de minerais acessórios, como a apatita, em granitos da Província Carajás. A identificação e caracterização morfológica e geoquímica dos diferentes tipos de apatita presentes nessas rochas complementarão os estudos realizados até agora nos granitos selecionados, permitindo avançar no conhecimento da evolução magmática e na caracterização de suas mineralizações através das modificações geoquímicas observadas em análises de MEV-EDS. Ainda, será possível tecer discussões a respeito das assinaturas geoquímicas com base nos diferentes contextos e cenários geológicos característicos de determinado período e fomentar o uso da apatita como um possível indicador de proveniência. Dessa forma, como esse mineral é precoce na sequência de cristalização e permanece até as fases finais, contribuindo para que a trajetória da sua rocha hospedeira seja traçada (Belousova *et al.* 2002), ele foi escolhido como tema do trabalho em questão.

3 OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é o estudo de cristais de apatita de granitos anorogênicos da Província Carajás, utilizando imagens de elétrons retroespalhados (ERE) e análises semiquantitativas de MEV-EDS. A partir disso, identificar uma assinatura geoquímica para as apatitas dos granitos estaníferos então estudados, para que as estas possam ser utilizadas como indicadores metalogenéticos de granitos especializados em estanho. Para isso, também foram utilizadas análises de apatitas de outros granitos paleoproterozoicos e arqueanos da Província Carajás, a fim de que essa comparação forneça informações mais consistentes.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) Identificar cristais de apatita presentes nas diferentes fácies dos granitos estudados por meio da microscopia de luz transmitida;
- b) Identificar os tipos morfológicos de apatita, possíveis zoneamentos, transformações e inclusões presentes nas rochas dos granitos Velho Guilherme e Central utilizando imagens de ERE;
- c) Caracterizar geoquimicamente os elementos traço presentes nesses cristais utilizando análises semiquantitativas de EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*);
- d) Tratar os dados obtidos em diagramas geoquímicos apropriados;
- e) Definir uma assinatura geoquímica para as apatitas dos corpos estudados e fazer as devidas comparações e interpretações;
- f) Discutir as implicações em decorrência dos tipos identificados, suas variações morfológicas e composicionais e associações com a mineralização;
- g) Tecer comentários sobre o potencial metalogenético desses corpos graníticos a partir das análises geoquímicas de suas apatitas e sobre a possibilidade de utilização desse mineral como *resistate indicator mineral* (RIM)
- h) Comparar com análises de apatitas das rochas arqueanas da Suíte Sanukitoide Rio Maria e do Trondhjemito Mogno e discutir as implicações da diferença de assinaturas geoquímicas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Para a realização do trabalho foram consultados os seguintes materiais bibliográficos:

- i) Trabalhos versando sobre a Província Estanífera do Sul do Pará, as suítes graníticas Velho Guilherme, Jamon e Serra dos Carajás, bem como trabalhos específicos envolvendo petrografia e geoquímica de rochas granitoides dessas três suítes (Abreu & Ramos 1974, Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2002, 2005, Dall’Agnol *et al.* 1993, 1999, 2005, Pinho 2005, 2009, Almeida *et al.* 2006, Oliveira *et al.* 2005, Lamarão *et al.* 2012, Mesquita *et al.* 2018, Melo *et al.* 2021);
- j) Trabalhos envolvendo estudos de química mineral em apatitas de rochas granitoides (Sha & Chappell 1999, Belousova *et al.* 2002, Chu *et al.* 2009, Cao *et al.* 2011, Ding *et al.* 2015, Faro 2016, Fonseca 2016, Mao *et al.* 2016);
- k) Livros e apostilas envolvendo princípios básicos e aplicações em MEV (p.ex. Reed 1996).

4.2 ESTUDO PETROGRÁFICO

Foram utilizadas lâminas e seções polidas dos corpos supracitados disponíveis no acervo do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG). O estudo petrográfico constou de uma revisão mineralógica das diferentes fácies e da obtenção de fotomicrografias de feições texturais características, bem como da seleção de cristais de apatita a serem analisados por MEV-EDS.

4.3 ANÁLISE DE MEV-EDS

As análises foram realizadas no Laboratório de Microanálises do IG-UFGA, sob a orientação do Prof. Claudio Nery Lamarão. O MEV utilizado foi um LEO-ZEISS 1430 equipado com sistema de EDS a seco Sirius-SD. As lâminas e seções polidas foram metalizadas com carbono. As condições de operação para obtenção de imagens de ERE e análises por EDS são: corrente do feixe de elétrons = 90 μ a, voltagem de aceleração constante = 20 KV, distância de trabalho = 15 mm. As análises de EDS utilizam o fator de correção ZAF ($Z=n^{\circ}$ atômico, A =absorção atômica, F =fluorescência de Raios-X), que já vem instalado com o software e faz correções entre pico e background do elemento. O tempo de duração das análises foi de 30s, com 3000 a 4000 contagens/segundo para cada análise. Posterior às análises, os dados analíticos foram tratados e interpretados em diagramas específicos utilizando-se o software GCDkit (Janoušek *et al.* 2006).

4.4. TRATAMENTO DE DADOS

Os dados provenientes das análises químicas foram organizados em tabelas Excel e, posteriormente, os dados de elementos maiores e traços foram tratados em diagramas binários gerados pelo software GCDkit. As interpretações e discussões presentes nesse trabalho foram baseadas nesses resultados e em informações pré-existentes na literatura.

Tabela 1 – Relação dos granitos e amostras estudadas.

UNIDADE GEOLÓGICA	AMOSTRAS	FÁCIES PETROGRÁFICA
Granito Velho Guilherme (este estudo)	VG-01, 38 (Sn)	BSGEm
	VG- 57A (Sn)	BSGH
Granito Central (este estudo)	RD-01	ABMG
	RD-04	ABSG
	MR-158	ABSG
Granito Antônio Vicente (*)	GFE-01	BASMG
	GAM-CS-541	BMG
	GFE-01 (Sn)	BASMG
Granito Bom Jardim (#)	SAL-NCBJ-124	BLMG
	SAL-42 (Sn)	BMG
Granito Jamon (*)	AU-391	ABMG
	AU-375	BMG
Granito Redenção (*)	DCR-33B	BMG
Sanukitoides de Ourilândia do Norte (**)	MC-49	EHbGRD
Trondhjemitó Mogno (**)	MASF-28	EBTrd

A = Anfibólio. B = Biotita. S = Sienogranito. MG = Monzogranito. L = Leuco. Em = Equigranular médio. H = Heterogranular. EHbGRD = Epidoto-hornblenda granodiorito. EBTrd = Epidoto-biotita trondhjemitó. # = Faro (2019). * = Fonseca (2016). ** = Fonseca (2019).

5 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Cráton Amazônico, situado na região norte da América do Sul (Tassinari & Macambira 2004), constitui um dos maiores crátons do mundo. Sua compartimentação leva em consideração fatores geológicos diversos como a geocronologia, tectônica, assembleias litológicas, dentre outras particularidades relacionadas a sua história geológica. Nele encontram-se os escudos das Guianas e Brasil Central, ambos separados pelas bacias do Amazonas e Solimões. Na porção sudeste do Cráton Amazônico, encontra-se a região mais antiga e preservada, representada pela Província Amazônia Central (>2.5 Ga), a qual é circundada por outras províncias geocronológicas, sendo elas: Maroni – Itacaiúnas (2.2 – 1.95 Ga), Ventuari – Tapajós (1,95 - 1,88 Ga), Rio Negro – Juruena (1,88 – 1,55 Ga), Rondoniana – San Ignácio (1,55 – 1,3 Ga) e Sunsás (1,3 – 1,0 Ga).

A Província Amazônia Central, representa uma porção do cráton que não foi submetida aos processos relacionados ao ciclo Transamazônico. Esta, segundo Tassinari & Macambira (2004), é separada em dois domínios pela Província Maroni-Itacaiúnas, o Bloco Carajás e o Bloco Roraima. Contudo, Santos (2003), formulou novas interpretações geocronológicas baseadas em datação U-Pb e Sm-Nd, assumindo a Província Carajás como independente e estendendo a mesma até a porção sul do estado do Amapá.

A Província Carajás encontra-se na porção leste-sudeste do Cráton Amazônico e é apontada como o maior núcleo Arqueano preservado desse cráton (Almeida *et al.* 1981) e uma das mais importantes províncias minerais do mundo, devido principalmente a sua variedade de ocorrência mineral (Fe, Cu, Au, Mn, Sn, Al, Ni, Ag). A mesma é delimitada a leste pelo Cinturão Araguaia, de idade neoproterozoica, ao norte pelo domínio Bacajá, a sul e a oeste encontra-se parcialmente recoberta por rochas sedimentares de idade fanerozoica da Bacia Parecis e também pelas rochas vulcânicas do Supergrupo Uatumã (Tassinari & Macambira 2004, Vasquez *et al.* 2008).

Devido a sua importância, vários estudos foram realizados a fim de promover sua melhor compartimentação geológica. Dall’Agnol *et al.* (2006) dividiram a Província em Terreno *Granito Greenstone* de Rio Maria (TGGRM), a sul, e Bacia Carajás (BC), a norte. O TGGRM, ou Domínio Rio Maria (Santos 2003, Vasquez *et al.* 2008), é constituído por rochas mais antigas e sequências do tipo granito-*greenstone*, com idades entre 2,85 – 3,05 Ga. O Bloco Carajás é formado principalmente de rochas neoarqueanas, apresentando sequências vulcanossedimentares, além de ser cortado por intrusões graníticas sintectônicas. Além disso,

o BC engloba rochas mesoarqueanas, em menor quantidade, como as dos complexos Xingu e Pium (Santos *et al.* 2003).

A área compreendida entre as regiões de Xinguara e a porção Sul da Bacia Carajás, teria sido alvo de eventos tectonomagmáticos neoarqueanos, os quais moldaram a Bacia Carajás. De acordo com Dall'Agnol *et al.* (2006), essa porção é denominada informalmente de Domínio de Transição, caracterizada por ser uma possível extensão do Domínio Rio Maria. Posteriormente, Vasquez *et al.* (2008), ratificando a proposta de Santos *et al.* (2003), dividiram a província em dois domínios tectônicos singulares: Domínio Rio Maria, localizado a sul e de idade mesoarqueana (3,0 – 2,87 Ga) e o Domínio Carajás, ao norte, constituído por rochas do embasamento mesoarqueanas e rochas neoarqueanas (3,0 – 2,76 Ga).

Em estudos realizados pelo GPPG, na porção centro-leste da Província Carajás, foi mostrado que o embasamento da Bacia Carajás, pertencente ao Domínio Carajás, não compreenderia uma crosta arqueana tectonicamente homogênea, o que resultou em uma nova denominação: Domínio Canaã dos Carajás (DCC) e Domínio Sapucaia, para as regiões norte e sul respectivamente (Dall'Agnol *et al.* 2013).

5.1 DOMÍNIO RIO MARIA (DRM)

O Domínio Rio Maria (Santos *et al.*, 2000, 2003, Vasquez *et al.* 2008), localizado a sul da Província Carajás, apresenta as rochas mais antigas do Cráton Amazônico. Esta região é constituída por um terreno arqueano, representado por *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas (3,0-2,9, Avelar 1999, Lafon *et al.* 2000, Souza *et al.* 2001, Rolando & Macambira 2003), e pelo Grupo Tucumã, além dos granitoides que formam as típicas suítes de afinidade TTG, com idades entre 2,98 a 2,93 Ga (Tonalito Arco Verde, Trondhjemitó Mogno, Complexo Tonalítico Caracol e Tonalito Mariazinha, Macambira & Lafon 1995, Leite *et al.* 2004, Dall'Agnol *et al.* 2006, Oliveira *et al.* 2006).

Além disso, o DRM é formado por granitoides mais jovens que seccionam as rochas TTGs (Santos *et al.* 2013), os quais são representados por: (1) Suíte Sanukitoide Rio Maria, formada principalmente por granodioritos com alto Mg, Cr e Ni (Oliveira *et al.* 2009), (2) Rochas TTGs mais jovens, representadas pelo Trondhjemitó Água Fria (2,86 Ga, Leite *et al.* 2004), (3) Leucogranodioritos-granitos de afinidade cálcio-alcalina que formam a Suíte Guarantã e correlatos, (4) Leucogranitos potássicos representados pelos granitos Xinguara, Mata Surrão e rochas similares, com idade de aproximadamente 2,87 Ga (Oliveira *et al.* 2006,

Almeida *et al.* 2010, 2011, 2013, Santos *et al.*, 2013). Os sedimentos do Grupo Rio Fresco (DOCETEO 1988) recobrem o embasamento arqueano do DRM.

Durante o Paleoproterozoico a crosta arqueana do DRM foi intrudida por granitos tipo-A da Suíte Jamon, que engloba os maciços Jamon, Musa, Redenção, Marajoara, Manda Saia e Bannach, além de diques máficos e félsicos associados (Dall’Agnol *et al.* 2005, Oliveira 2006, Dall’Agnol & Oliveira 2007). A região de São Félix do Xingu está situada no contexto da Província Amazônia Central e abrange rochas arqueanas do DRM e do Supergrupo Itacaiúnas (Araújo *et al.* 1988). Nessa região aflora uma importante suíte anarogênica paleoproterozoica, mineralizada em Sn e W, pertencente a Província Estanífera do Sul do Pará, denominada de Suíte Intrusiva Velho Guilherme (SIVG), constituída pelos maciços Velho Guilherme, Antônio Vicente, Mocambo, Serra da Queimada, Bom Jardim, Rio Xingu, Benedita e Ubim-Sul.

5.2 DOMÍNIO CANAÃ DOS CARAJÁS (DCC) E BACIA CARAJÁS (BC)

O Domínio Canaã dos Carajás foi afetado principalmente por eventos meso e neoarqueanos, com a predominância de granitos *stricto sensu* em relação aos TTGs. O Complexo Xingu, presente nesse domínio, é caracterizado por uma associação litológica heterogênea afetada por metamorfismo de fácies anfíbolito e granulito e sendo composta por granitoides variados, migmatitos, gnaisses, rochas supracrustais e rochas máficas e ultramáficas (DOCEGEO 1988), com idades entre 2,85 e 2,97 Ga (Avelar *et al.* 1999).

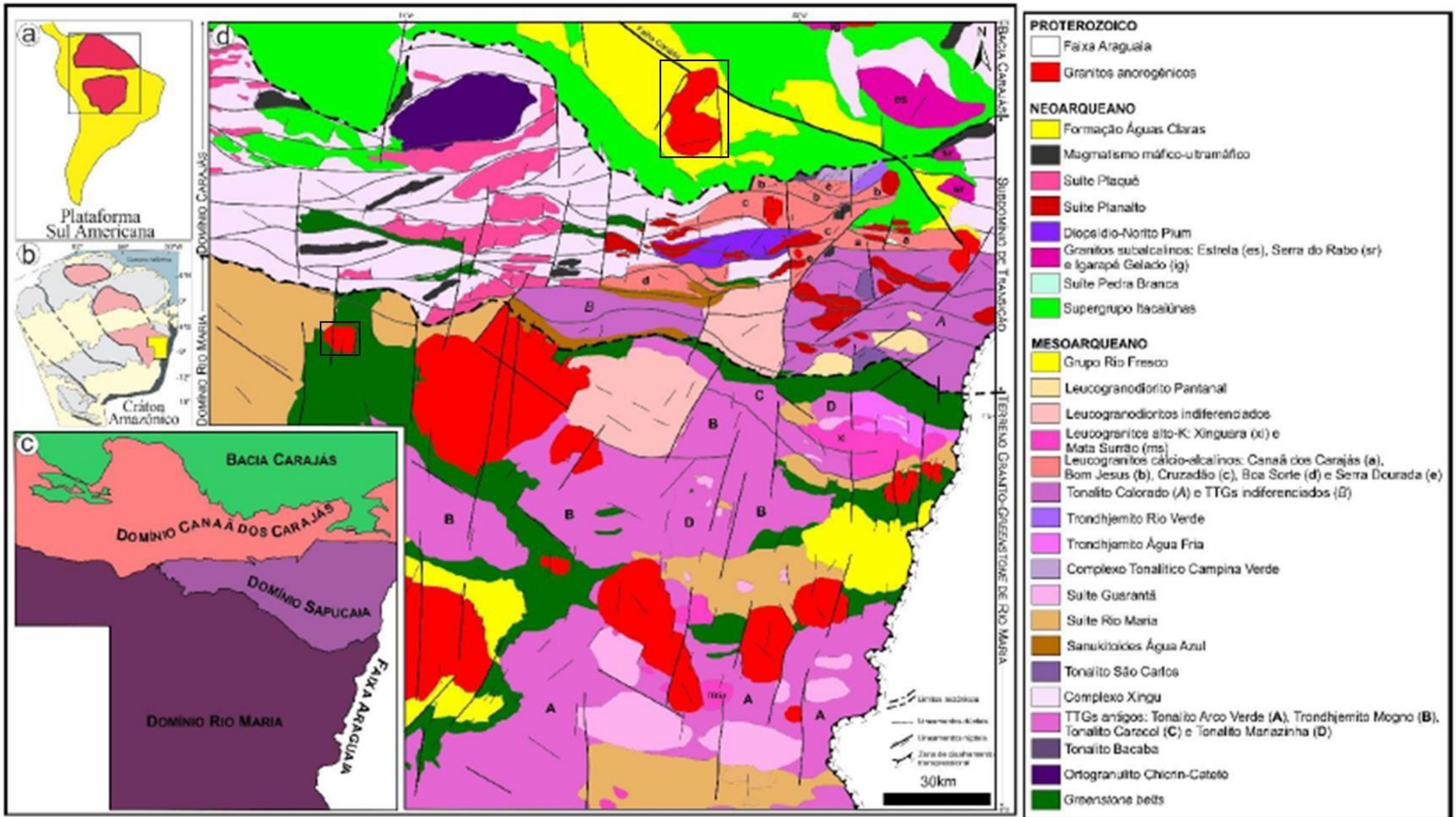
Além das rochas do Complexo Xingu, o DCC é composto por rochas derivadas do magmatismo mesoarqueano, sendo as mais antigas pertencentes ao Complexo Granulítico Pium, com idade de 3.0 Ga (Araújo & Maia 1991), além de ocorrências trondhjemíticas locais, pertencentes ao Trondhjemito Rio Verde (Feio & Dall’Agnol 2012), com idade de 2,92 e 2,86 Ga (Feio *et al.*, 2013). Outras unidades mesoarqueanas são representadas pelos granitoides sódicos e incluem o Tonalito Bacaba, com idade de 3,0 Ga (Moreto *et al.* 2011), o Granito Canaã dos Carajás (2,96 Ga: Feio *et al.* 2013) e por fim, o Complexo Tonalítico Campina Verde, apresentando idades entre 2,87 e 2,85 Ga (Feio *et al.* 2013). Além disso, é constituído por uma suíte composta por granitoides potássicos cálcio-alcálicos, representada pelos granitos: Cruzadão (2,84 Ga, Feio *et al.* 2013), Boa Sorte (2,89-2,85 Ga, Rodrigues *et al.*, 2014), Bom Jesus (2,83 Ga, Feio *et al.*, 2013) e Serra Dourada (Feio *et al.* 2013), com idade mínima variando entre 2,86 a 2,83 Ga.

No Neoarqueano, ocorrem as rochas máfica-ultramáficas, pertencentes à suíte Cateté (Macambira & Vale 1997), ao Complexo Intrusivo Luanga (Jorge João *et al.* 1982, Medeiros

Filho & Meireles 1985) e ao Gabro Santa Inês (DOCEGEO 1988), além do Norito Pium (Santos *et al.* 2012) e rochas charnoquíticas associadas ao Complexo Pium (Feio *et al.* 2012, Gabriel *et al.* 2014). Os granitos de natureza subalcalina, compostos pelo Complexo Estrela (~2,76 Ga, Barros *et al.*, 2009), Granito Serra do Rabo (2,74 Ga: Sardinha *et al.* 2006, Barros *et al.* 2009) e Granito Igarapé Gelado (2,73 Ga, Barros *et al.* 2009). Nesse domínio, granitoides de natureza tipo A, sódicos e potássicos são associados às suítes Planalto, com idade variando entre 2,74 e 2,71 Ga (Feio *et al.* 2012), Suíte Pedra Branca (2,75 Ga), composta por granitoides sódicos de afinidade toleítica e associados a suíte Planalto (Feio *et al.* 2012, 2013), e por fim, a suíte Plaquê (Araújo *et al.* 1988, Jorge João & Araújo 1992), representada por granitos potássicos produtos de retrabalhamento crustal em 2,73 Ga (Avelar *et al.* 1999).

Os eventos geológicos do Neoarqueano também resultaram na formação das rochas metavulcânicas e formações bandadas ferríferas do Supergrupo Itacaiúnas, que ocupam parte da Bacia Carajás e é representado pelos grupos Igarapé Salobo, Grão-Pará, Igarapé Bahia, Igarapé Pojuca e Buritirama (DOCEGEO 1988), além de rochas metassedimentares da Formação Águas Claras (Feio *et al.*, 2012). O embasamento mesoarqueano e as rochas supracrustais da Bacia Carajás são cortados por granitoides subalcalinos sintectônicos, representados pelo Complexo Granítico Estrela (2,76 Ga, Barros *et al.* 2001, 2009) e pelos granitos Serra do Rabo (2,74 Ga, Barros *et al.* 2009), Igarapé Gelado (2,73 Ga, Barbosa 2004), Sossego e Curral (2,74 Ga, Moreto *et al.* 2015). Sobrepostas ao Supergrupo Itacaiúnas, ocorrem as rochas sedimentares da Formação Águas Claras (Nogueira *et al.* 1995).

Somado a isso, a Bacia Carajás foi palco de eventos magmáticos anorogênicos paleoproterozoicos (1,88 Ga), que culminaram na formação da **Suíte Serra dos Carajás**, onde está situado o maciço **Central** objeto de estudo do presente trabalho, além de outros granitos, como: Pojuca, Cigano e Rio Branco (Dall'Agnol *et al.* 2006, Santos *et al.* 2013).



6 ASPECTOS GEOLÓGICOS DAS ROCHAS ESTUDADAS

6.1 SUÍTE INTRUSIVA VELHO GUILHERME (SIVG)

Localizada entre os municípios de Tucumã e São Félix do Xingu, sul-sudeste do Pará, a SIVG abrange os principais depósitos de Sn-W que compõem a Província Estanífera do Sul do Pará (Abreu & Ramos 1974, Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2002, 2005, Lamarão *et al.* 2007, 2012). Seus maciços intrudem rochas arqueanas (Granodiorito Rio Maria, metavulcanossedimentares do Grupo Tucumã) do DRM (Araújo *et al.* 1988, Teixeira *et al.* 2005) e do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Araújo *et al.* 1988). Esses corpos são encontrados na forma de *stocks* arredondados até grandes batólitos, os quais apresentam características de colocação crustal rasa, como o caráter fracamente discordante dos corpos em relação às encaixantes, a presença de rochas vulcânicas não metamorfizadas e de sequências supracrustais entre elas, além da presença comum de intercrescimentos granofíricos e o desenvolvimento de auréolas de contato de baixa pressão (Teixeira & Dall'Agnol 1991, Teixeira 1999).

A SIVG é constituída pelos granitos paleoproterozoicos Antônio Vicente, Velho Guilherme, Mocambo, Serra da Queimada, Bom Jardim, Rio Xingu, Benedita e Ubim-Sul, com idades de cristalização entre 1,88 – 1,86 Ga (Macambira & Lafon 1995, Teixeira *et al.* 2002, 2005, Lamarão *et al.* 2012). São representados por rochas hololeucocráticas a leucocráticas, principalmente sienograníticas a monzograníticas e, subordinadamente, álcali-feldspato graníticas, além de *greisens* mineralizados em Sn e W (cassiterita e wolframita). A mineralização dessas rochas também está associada às fácies mais evoluídas dos granitos, as quais foram submetidas a intensas alterações tardi a pós-magmáticas (Teixeira *et al.* 2002, 2005, Lamarão *et al.* 2012, Teixeira *et al.* 2019). Monazita, torita, zircão, xenotímio, fluorita e columbita são acessórios comuns. Em relação a geoquímica, esses granitos são metaluminosos a peraluminosos e exibem características químicas que os classificam como granitos tipo-A, do subgrupo A2 (Eby 1992), com conteúdo de $\text{SiO}_2 > 65\%$ e razões $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ entre 1,0 e 2,0 (Dall'Agnol *et al.* 2005).

6.1.1 Granito Velho Guilherme

O maciço Velho Guilherme está inserido no contexto da Suíte Intrusiva Velho Guilherme e aflora a sul da cidade de Tucumã, intrudindo as rochas metavulcanossedimentares e metassedimentares do Grupo Tucumã, e a noroeste corta o Granodiorito Rio Maria. Sua idade de 1874 ± 30 Ma foi obtida por datação radiométrica Pb-Pb em rocha total (Lafon *et al.* 1995).

Teixeira (1999) distinguiu três fácies petrográficas principais: i) biotita sienogranito equigranular médio, ii) sienogranito heterogranular, iii) microssienogranito. A relação espacial desses granitos é caracterizada pelo biotita sienogranito equigranular sendo seccionado pelo sienogranito heterogranular, e este é cortado pelo microssienogranito e por veios hidrotermais. Todas essas rochas são afetadas, em diferentes intensidades, por alterações pós-magmáticas (Teixeira 1999, Teixeira *et al.* 2005).

6.2 SUÍTE SERRA DOS CARAJÁS

A Suíte Serra dos Carajás (SSC, 1,88-1,85 Ga) ocorre no contexto geológico do Domínio Carajás, onde uma tectônica extensional foi responsável pela colocação a nível crustal raso desses granitoides anorogênicos que cortam grande parte das rochas arqueana. É composta pelos maciços Central, também conhecido como Granito Serra dos Carajás (Javier Rios *et al.* 1995), Cigano, Pojuca e Rio Branco (Dall’Agnol *et al.* 2006, Santos *et al.* 2013, Teixeira *et al.* 2019).

Esses batólitos são representados por rochas de composição hornblenda-biotita monzogranítica e sienogranítica dominante, com fases acessórias similares às da Suíte Jamon, porém, com menores quantidades de titanita e magnetita e mais comumente fluorita. Além disso, a mineralização de calcopirita, molibdenita e cassiterita está associada às zonas afetadas por alteração hidrotermal do Granito Central (Javier Rios *et al.* 1995, Teixeira *et al.* 2019). Em relação à geoquímica, essa suíte apresenta características que seguem o padrão dos granitos rapakivi anorogênicos da Província Carajás, com afinidade tipo-A e moderadamente reduzidos (Javier Rios *et al.* 1995, Villas 1999, Santos *et al.* 2013).

6.2.1 Granito Central

O maciço Central ou Granito Serra dos Carajás, está inserido no contexto da Suíte Serra dos Carajás, na Bacia Carajás (BC), e está situado a aproximadamente 15km da Vila de Carajás. Este corpo possui dimensões batolíticas e é intrusivo em rochas arqueanas do Grupo Grão Pará, bem como nas rochas sedimentares da Formação Águas Claras.

Datação pelo método U-Pb em cristais de zircão resultou em uma idade de aproximadamente 1,88 Ga (Machado *et al.* 1991). As principais fácies descritas por Javier Rios *et al.* (1995) incluem: anfibólio-biotita sienogranito e anfibólio-biotita monzogranito, além de diques micrograníticos que se alojaram posteriormente, formados por anfibólio-biotita microgranito, biotita microgranito e biotita leucogranito. Em seguida, a partir de fusão residual silicática enriquecida em boro, formaram-se bolsões pegmatíticos e veios que representam as

últimas rochas magmáticas a se solidificarem. Por fim, veios hidrotermais distintos foram gerados devido a percolação de fluidos aquosos em mistura com soluções de fontes externas. Segundo Javier Rios *et al.* (1995), o potencial estanífero deste batólito ainda precisa ser avaliado, haja vista a ocorrência de veios de quartzo com cassiterita em sua borda oeste.

Em relação a geoquímica, o Granito Central é caracterizado por elevados conteúdos de sílica (74,0 - 77%) e álcalis ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ entre 7,0 - 8,8%) e baixos de MgO (0,1 - 0,2%), com teores de álcalis+CaO inferiores aos de Al_2O_3 , resultando em um caráter levemente peraluminoso e moderadamente reduzido nas suas fácies principais. Suas características químicas são similares a de outros granitos tipo A da Província Carajás (Javier Rios *et al.* 1995, Dall’Agnol *et al.* 2005, Teixeira *et al.* 2019).

6.3 TRONDHJEMITO MOGNO

O Trondhjemitó Mogno (2,96 Ga Pb-Pb em zircão, Macambira & Lafon 1995, Almeida *et al.* 2011), ocorre como um batólito exposto ao sul da cidade de Xinguara e se estende até o sudeste de Bannach, é composto essencialmente por trondhjemitos e, subordinadamente, tonalitos e granodioritos, contendo enclaves máficos e xenólitos de granodioritos e metabasaltos. São rochas leuco a mesocráticas, de coloração cinza esbranquiçada a cinza escura e granulação médio a grossa, protomiloníticas, granoblásticas e granolepidoblásticas anastomosadas, com processos hidrotermais sobrepostos. Sua assembleia mineral é composta por plagioclásio, quartzo, microclínio, biotita, hornblenda, clorita, allanita, titanita, opacos, apatita e zircão. Estas rochas podem aparecer fraca a fortemente foliadas e comumente apresentam bandas composicionais, onde a intensidade da deformação geralmente aumenta próximo às zonas de cisalhamento.

6.4 SUÍTE SANUKITOIDE RIO MARIA

Amplamente distribuídas no Domínio Rio Maria, é composta predominantemente por granodioritos (Granodiorito Rio Maria) e, secundariamente, por monzogranitos e quartzodioritos ou quartzo monzodiorito, além de rochas acamadadas e enclaves máficos decimétricos a centimétricos. São intrusivas nos *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas, nos tonalitos Arco Verde, Mariazinha e Caracol, e no Trondhjemitó Mogno. O Granodiorito Rio Maria, de idade sempre em torno de 2,87 Ga, é equigranular, de granulação média a grossa e coloração cinza com tonalidades esverdeadas devido a intensa saussuritização do plagioclásio. Sua mineralogia principal é representada por plagioclásio, quartzo e feldspato potássico, além de anfibólio, biotita e epidoto como principais fases máficas. Exibe foliação com direção

preferencial WNW-ESSE (Leite & Dall'Agnol 1994, Oliveira *et al.* 2009, 2010, Santos & Oliveira 2016, Silva *et al.* 2019).

7 APATITA COMO INDICADOR PETROLÓGICO E METALOGENÉTICO

A capacidade de incorporar elementos menores e traços geologicamente importantes em sua estrutura, como elementos terras raras (ETR), Sr, Y, Th e U, durante a cristalização magmática, além da alta estabilidade em condições mínimas do manto superior, de até 2,5 GPa e 1350°C, tornam a apatita um mineral importante para o estudo da composição geoquímica do seu magma hospedeiro. A composição química de um mineral em um sistema magmático é influenciada pela temperatura, pressão, fugacidade de oxigênio, atividade e composição de fases coexistentes e pela composição do sistema magmático em si. Dessa forma, o estudo da composição química de um mineral magmático, pode auxiliar na interpretação das condições geológicas que reinaram durante a sua cristalização (Sha & Chappell 1999). A fórmula da apatita é definida como $A_{10}(ZO_4)_6X_2$, a qual pode sofrer as seguintes substituições: $A = Ca^{2+}, Sr^{2+}, Pb^{2+}, Ba^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Cd^{2+}, ETR^{3+}, Eu^{2+}, Ce^{4+}, Al^{3+}, Na^+, Z = P^{5+}, Si^{4+}, S^{6+}, Al^{3+}, As^{5+}, V^{5+}, CO_3^{-2}, SO_4^{-2}, CrO_4^{-2}, VO_4^{-2}, X = F^-, Cl^-, OH^{-2}, O^{-2}, CO_3^{-2}$.

Essa expressiva quantidade de substituições, somada ao fato de a apatita ser um mineral precoce na sequência de cristalização que permanece até as fases finais, pode fornecer informações chaves acerca da sua trajetória na câmara magmática e dos processos envolvidos durante a sua cristalização (Sha & Chappell 1999, Belousova *et al.* 2001, 2002, Chu *et al.* 2009). Sha & Chappell (1999) utilizaram cristais de apatita e suas diferentes afinidades químicas, associando com o conteúdo de sílica, fugacidade de oxigênio e nível de fracionamento magmático para caracterizar petrológica e geoquimicamente granitos tipo I e S, do Lachland Fold Belt, Austrália. De acordo com os autores, apatitas de granitos tipo S são enriquecidas em F e empobrecidas em Cl, comparadas com apatitas de granitos tipo I. Contudo, apatitas de granitos tipo S, possuem alto conteúdo de Fe Mn devido a fugacidade de oxigênio mais baixa de seu magma, em relação a apatitas dos granitos tipo I.

Em rochas granitoides ocorre o predomínio de fluorapatitas, com teores de F entre 1,3 e 2,8%. As razões F/Cl e o teor de F, por exemplo, estão correlacionados positivamente ao grau de diferenciação do magma, ou seja, quanto maior a razão e o teor de F, mais evoluído será o magma. Ainda, granitoides mais fracionados podem conter apatitas enriquecidas em Rb, Sr, Y e Mn (Cao *et al.* 2011). Em relação a presença de ETR, estes podem distinguir granitos oxidados de reduzidos, pois o primeiro tipo contém apatitas enriquecidas em ETRL, enquanto o segundo apresenta apatitas com teores mais baixos (Belousova *et al.* 2002, Fonseca 2016). Belousova *et al.* (2001) estudaram cristais de apatita em diferentes rochas ígneas e analisaram as concentrações de elementos traço, os quais indicaram que a sua distribuição está fortemente

relacionada às características químicas de sua rocha hospedeira. As variações nas concentrações desses elementos estão relacionadas a parâmetros como conteúdo de sílica, estado de oxidação, índice de saturação em alumínio (ASI) e total de álcalis. A concentração elevada de Mn nesse mineral, por exemplo, é típica de apatitas de granitos reduzidos, pois o Mn^{2+} substitui diretamente o Ca^{2+} . Logo, pelo fato da composição dos elementos traço refletirem a química da rocha total, ela pode ser utilizada como um importante traçador de mineralizações específicas.

Ding *et al.* (2015) utilizaram concentrações de elementos menores e traço e a razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ das apatitas do sul da China para interpretar que intrusões de granitos pórfiros relacionados a mineralizações de Cu-Pb-Zn são oxidadas, enquanto os depósitos relacionados

W e Sn são moderadamente oxidados a reduzidos. Nesse caso, as apatitas de granitos mineralizados em Sn são fortemente enriquecidas em F, ETR e (Y+La+Ce) em relação as apatitas do depósito de Cu-Pb-Zn dessa região, o que indica que a composição da apatita é um indicador importante para história petrogenética e metalogenética de seus magmas fonte.

As apatitas das fácies mineralizadas dos granitos paleoproterozoicos Antônio Vicente e Bom Jardim, ambos usados comparativamente neste trabalho, apresentaram maior enriquecimento em (Fe+Mn) e (Y+La+Ce), em relação às apatitas das fácies estéreis dessas mesmas rochas e dos granitos Jamon e Redenção, além dos granitos arqueanos. Esse enriquecimento está relacionado, segundo os estudos anteriores, ao elevado grau de fracionamento dessas rochas e da interação da rocha hospedeira com fluidos mineralizantes, o que seria um importante processo na origem das mineralizações de cassiterita nessas rochas. O F apresenta comportamento semelhante, o qual assume valores mais elevados em rochas mineralizadas, comparativamente às rochas isentas de mineralização. Tal fato corrobora para que o processo de cristalização fracionada tenha governado a evolução desses granitos, além da interação com fluidos pós-magmáticos ricos em voláteis (Teixeira *et al.* 2002, 2005). Os resultados obtidos para as apatitas dos corpos estudados, Velho Guilherme e Central, seguem a mesma tendência encontrada nos outros granitos estaníferos e indicam que a assinatura geoquímica da apatita pode ser um forte indicador de potencial metalogenético em rochas granitoides.

Os valores de Fe e Mn, apesar de baixos e variáveis, tendem a ser mais elevados nas apatitas de granitos estaníferos e, de acordo com Belousova *et al.* (2001), concentrações mais elevadas de Mn caracterizam apatitas de granitos reduzidos e altamente fracionados, correspondente às apatitas dos granitos deste estudo.

8 RESULTADOS

8.1 PETROGRAFIA

8.1.1 Granito Velho Guilherme

O GVG foi objeto de estudo em maior detalhe por Teixeira (1999), o qual caracterizou três principais variedades: (1) biotita-sienogranito heterogranular (BSGH); (2) biotita-sienogranito equigranular médio (BSGEm) e (3) microssienogranito. Os corpos graníticos mostram evidências de alterações pós-magmáticas em diferentes intensidades. São caracterizados por sienogranitos *subsolvus*, hololeucocráticos originados a partir de líquidos muito diferenciados e evoluídos, com altos conteúdos de SiO₂. Suas fases minerais são quartzo, plagioclásio e feldspato potássico, sendo a biotita o seu principal constituinte máfico. Quanto aos minerais acessórios primários destacam-se zircão, apatita, ilmenita e magnetita, e os secundários sericita, muscovita, clorita, fluorita, topázio, microclima, albita, esfalerita, allanita, epidoto, carbonato, fluocerita, cério-pirocloro, fergusonita e argilominerais (Teixeira *et al.* 2005).

Neste trabalho foram estudadas apatitas das fácies BSGH e BSGEm, a primeira, com textura heterogranular hipidiomórfica, é constituída principalmente por quartzo, feldspato potássico e plagioclásio, sendo a biotita seu constituinte máfico dominante. Quanto aos minerais acessórios destacam-se zircão, ilmenita, titanita (secundária) e a apatita comumente associada ou inclusa em feldspato potássico, biotita e ilmenita. Como fases secundárias ocorrem sericita, clorita e argilominerais. O quartzo é anédrico, fino a grosso e tipicamente ocorre na forma de veios, nas bordas de feldspatos ou dispersos aleatoriamente em uma matriz mais fina. O feldspato potássico é subédrico, com alguns cristais alterando para argilominerais e frequentemente com inclusões de quartzo e plagioclásio. O plagioclásio, por sua vez, é subédrico, médio a grosso, por vezes alterando para sericita. A biotita é subédrica, por vezes encontra-se cloritizada e contendo inclusões de apatita, zircão e ilmenita.

Os BSGEm, apresentam textura granular hipidiomórfica e são compostos por feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, tendo a biotita como mineral máfico predominante, seguida do anfibólio em quantidade bem inferior. Os acessórios são minerais opacos, zircão e a apatita e os minerais secundários muscovita, sericita, fluorita, clorita e argilominerais. O quartzo encontra-se anédrico a subédrico, com cristais predominantemente médios. O feldspato potássico é subédrico e na grande maioria argilizado. O plagioclásio é representado por cristais subédricos e, localmente intensamente sericitizado e cloritizado. A biotita forma cristais

subédricos parcialmente cloritizados. Nas rochas mais evoluídas e mineralizadas, onde há o predomínio de fluorita, as apatitas são finas e raras ou ausentes.

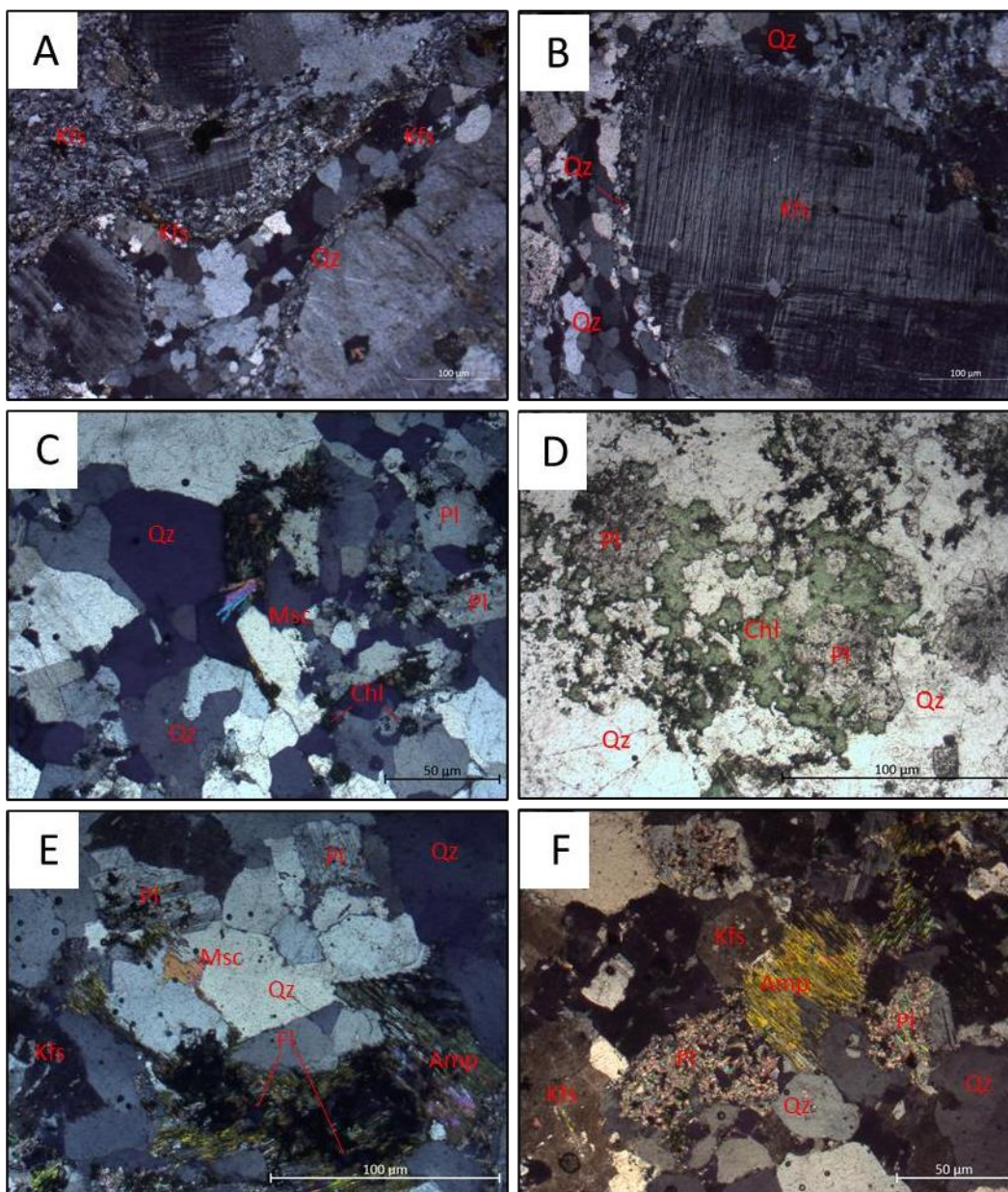


Figura 3 – Fotomicrografias do Granito Velho Guilherme. Figuras A e B pertencentes à fácies BSGH e Figuras C, D, E e F referentes à fácies BSGEm. A: textura característica da fácies BSGH; B: cristal de feldspato potássico rodeado por cristais de quartzo mais finos; C: textura típica da fácies BSGEm, mostrando cristais de quartzo subédricos a eédricos, plagioclásio, clorita e muscovita; D: clorita formando agregados globulares, plagioclásio alterado e quartzo; E: textura granular hipidiomórfica, mostrando cristais de plagioclásio alterando para clorita, feldspato potássico alterado para argilomineral, quartzo, anfibólio cloritizado, muscovita e cristais de fluorita associados à minerais opacos e anfibólio; F: cristais de plagioclásio intensamente sericitizados, feldspato potássico alterado para argilomineral, anfibólio e quartzo.

8.1.2 Granito Central

As principais fácies petrográficas descritas por Javier Rios *et al.* (1995) e estudadas neste trabalho foram: (1) anfibólio-biotita sienogranito (ABSG) e (2) anfibólio-biotita monzogranito (ABMG).

Os ABSG apresentam textura hipidiomórfica heterogranular e localmente granofírica. São constituídos essencialmente por feldspato potássico, quartzo e plagioclásio, nessa ordem de abundância, sendo a biotita o principal mineral máfico e o anfibólio subordinado. Os acessórios são representados por minerais opacos, apatita, zircão e allanita. Como secundários estão presentes a clorita, sericita, carbonato e argilominerais. Os cristais de feldspato potássico são subédricos a anédricos e variam de médios a grossos, apresentando comumente alteração para argilominerais e intercrescimento pertítico. O quartzo encontra-se anédrico a subédrico, com cristais variando de finos a grossos, formando contatos irregulares e, algumas vezes, está presente em intercrescimentos granofíricos junto com os feldspatos. O plagioclásio forma cristais subédricos, variando de médio a grosso, por vezes alterado para sericita, clorita e carbonato. Os dois principais minerais ferromagnesianos são anfibólio e biotita, ambos ocorrendo na forma de cristais subédricos, sendo a biotita comumente alterada para clorita, além de apresentar a maioria das inclusões de apatita. Em termos texturais, os ABMG se assemelham a fácies citada previamente. Os minerais acessórios são os opacos, zircão e apatita. Como secundários, estão presentes a sericita, clorita e argilominerais.

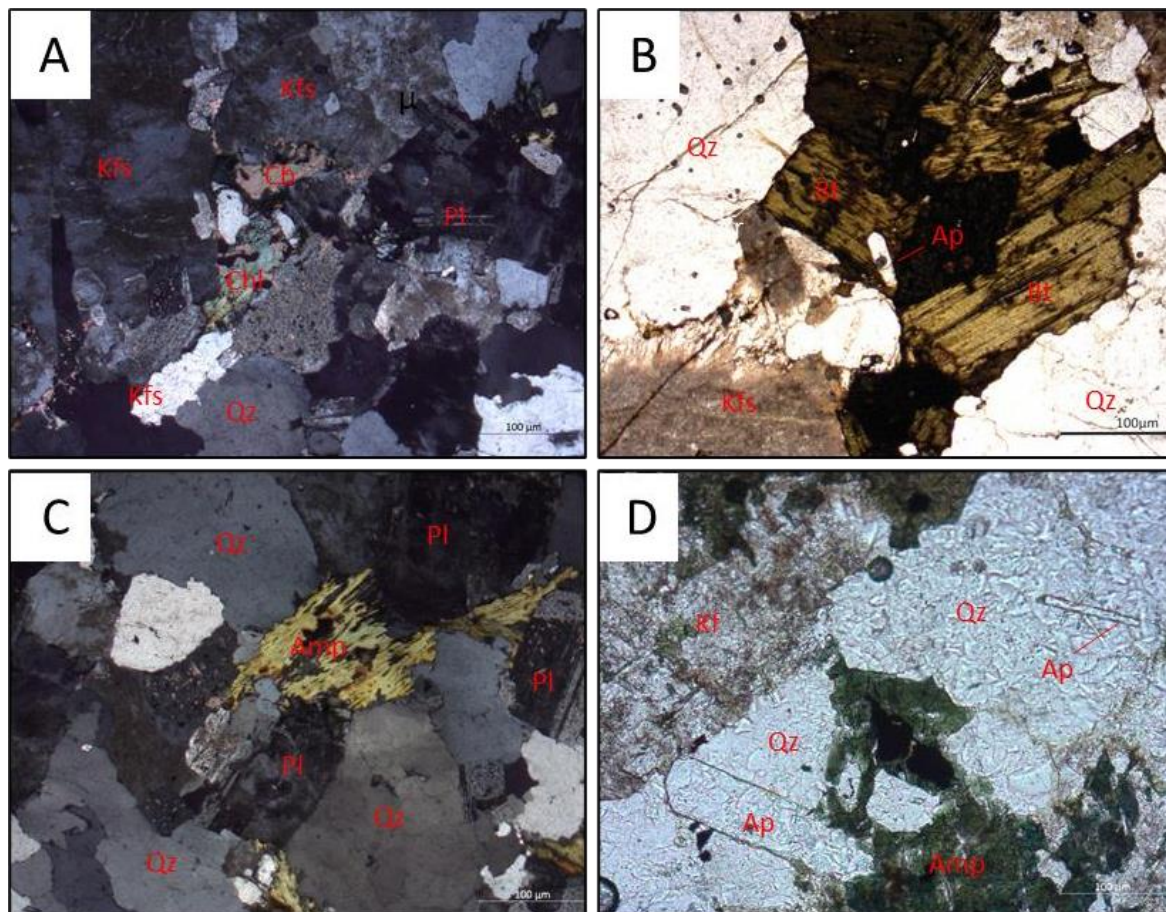


Figura 4 – Fotomicrografias do Granito Central. A e B mostrando a fácies ABSG e C e D referentes a fácies ABMG. A: textura característica da fácies ABSG; B: inclusão de apatita na biotita; C: textura característica da fácies ABMG; D: cristais de apatita inclusos no quartzo.

8.2 ASPECTOS MORFOLÓGICOS DAS APATITAS

Os cristais de apatita apresentam variações morfológicas nos diferentes corpos graníticos estudados, as quais foram melhor evidenciadas a partir de imagens de elétrons retroespalhados (ERE).

A Figura 5 exibe imagens de ERE de cristais de apatita associadas ao Granito Velho Guilherme. São apatitas anédricas a subédricas, subarredondadas, com grau de fraturamento incipiente a leve e com alguns cristais fracamente zonados. Na fácies BSGH as apatitas ocorrem, geralmente, como inclusões nas biotitas, feldspato potássico, quartzo e, em menor quantidade, associam-se à ilmenita e titanita (Figura 5A, B, C, D, E). Na fácies BSGEm, mais evoluída, as apatitas são finas e raras, ou mesmo ausentes (Figura 5F).

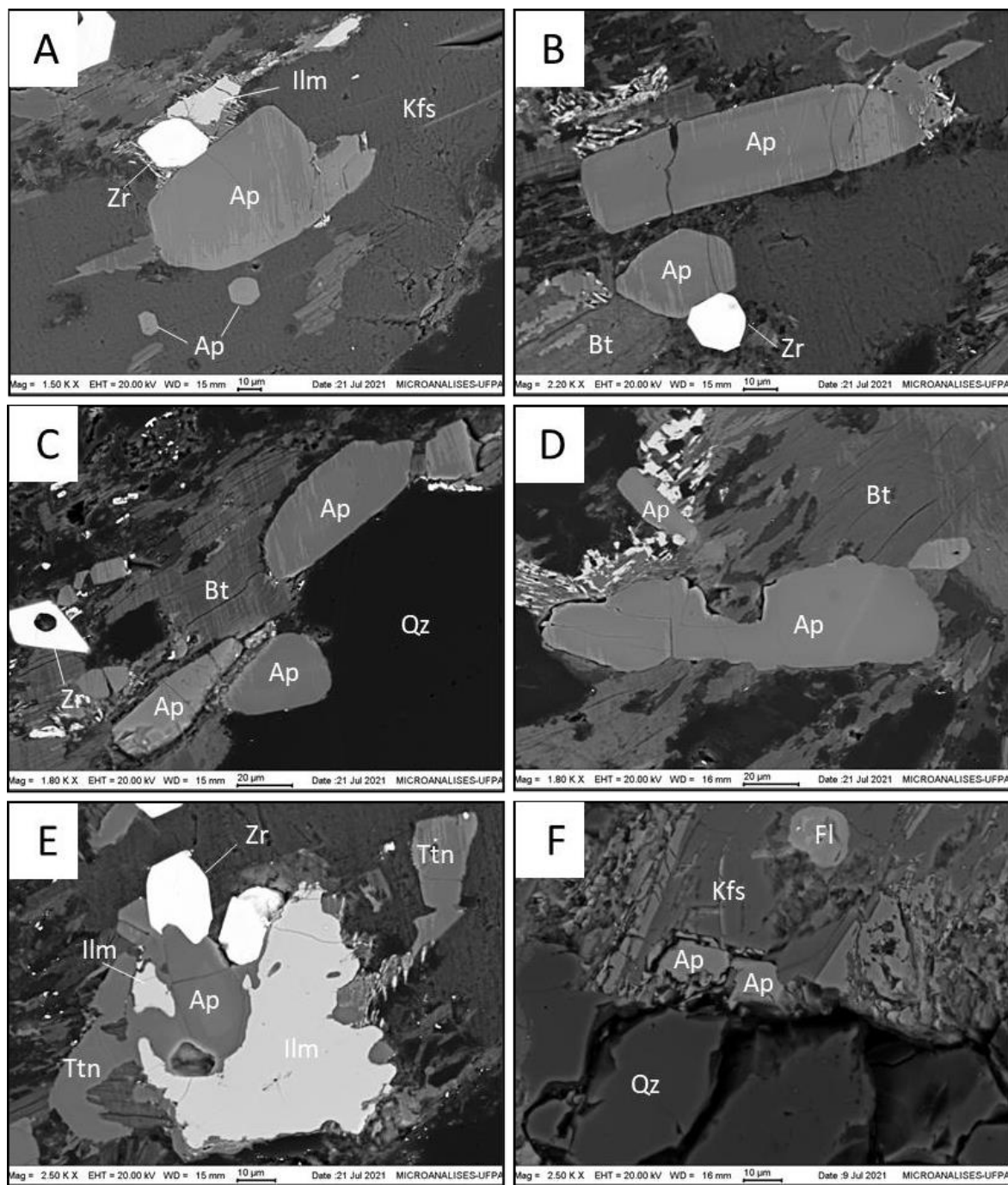


Figura 5 – Imagens de elétrons retroespalhados (ERE), mostrando os aspectos morfológicos das apatitas do Granito Velho Guilherme. Figuras A, B, C, D e E representam a fácies BSGH e a F a fácies BSGEm. A: cristal subédrico, arredondado e bem desenvolvido de apatita, e outros dois menores euédricos, inclusos no feldspato potássico. B: cristais de apatita subédricos a euédricos associados à biotita; o cristal mais desenvolvido apresenta leve zoneamento; C: apatitas anédricas a subédricas, associadas à biotita e quartzo; D: cristais anédricos de apatita inclusos na biotita cloritizada; E: apatita associada à ilmenita e titanita; F: raros cristais anédricos e finos de apatita na fácies mais evoluída e mineralizada (BSGEm); notar cristal de fluorita às proximidades Ap = Apatita; Bt = Biotita; Qz = Quartzo; Kfs = Feldspato potássico; Zr = Zircão; Ilm = Ilmenita; Ttn = Titanita.

A Figura 6 ilustra apatitas das fácies ABMG e ABSG do Granito Central, mostrando cristais subédricos a euédricos, por vezes zonados e inclusos ou associados a cristais de biotita, quartzo e feldspato potássico. As apatitas das fácies menos evoluídas (ABMG) encontram-se menos alteradas, porém alguns cristais apresentam fraturamento moderado a alto (Figura 6A, B e C). Por outro lado, os cristais de apatita da fácies mais evoluída (ABSG) apresentam-se frequentemente fraturados e alterando para monazita, sugerindo um enriquecimento tardio em ETRL (Figura 6D e E). Cristal de apatita zonada é bem evidenciado na Figura 6F.

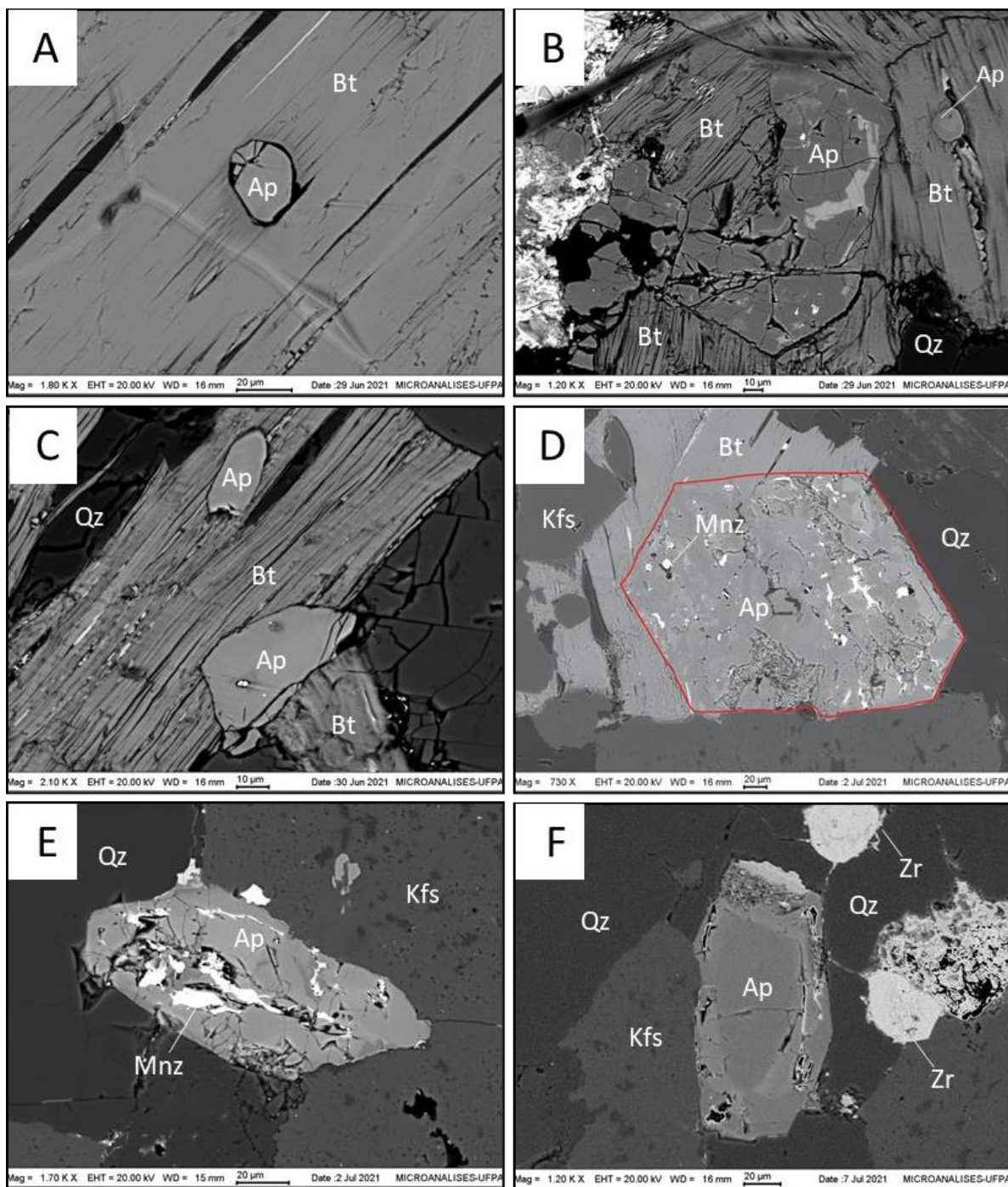


Figura 6 – Imagens de elétrons retroespalhados (ERE) mostrando os aspectos morfológicos das apatitas do Granito Central. Figuras A, B e C pertencentes a fácies ABMG, retratando inclusões de apatitas subbédricas, com fraturamento moderado a alto nas biotitas. Figuras D, E e F associadas a fácies ABSG, com apatitas fraturadas, alterando para monazita e alguns cristais zonados; D: seção basal de apatita euédrica, alterando para monazita, inclusa na biotita; E: cristal subbédrico de apatita, alterando para monazita, ocorrendo entre cristais de quartzo e feldspato potássico; F: cristal subbédrico de apatita, zonado entre cristais de quartzo e feldspato potássico. Ap = Apatita; Bt = Biotita; Qz = Quartzo; Kfs = Feldspato potássico; Mnz = Monazita; Zr = Zircão

8.3 ASPECTOS COMPOSICIONAIS

As análises de EDS realizadas em cristais de apatita dos corpos Velho Guilherme e Central seguiu uma rotina envolvendo 25 elementos representados por: O, Ca, P, Si, Al, Fe, Mg, Mn, Na, K, F, Cl, Rb, Sr, Y, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Ho, Yb e Lu. Foram realizadas somatórias entre os elementos que apresentaram as maiores variações (Ca+P), (Fe+Mn), (Y+La+Ce), (Fe+Mn+Y+La+Ce), fornecendo uma assinatura geoquímica particular para as apatitas dos corpos estudados (Tabela 2). As análises químicas referentes às apatitas dos corpos estaníferos Antônio Vicente e Bom Jardim, ambos pertencentes a Província Estanífera do Sul do Pará, dos granitos estéreis Jamon e Redenção, integrantes da Suíte Jamon (Fonseca 2016), além dos granitoides arqueanos da Suíte Sanukitoide Rio Maria e Trondhjemito Mogno (Fonseca 2019), foram utilizadas para fins comparativos (Tabela 3). As tabelas mostram os valores médios das análises realizadas (em % peso) e a somatória (Fe+Mn+Y+La+Ce) (em ppm).

8.3.1 Suíte Intrusiva Velho Guilherme

Granito Velho Guilherme

Análises das apatitas do GVG mostram algumas diferenças nas assinaturas das duas fácies estudadas. Em relação ao Ca e P, a fácies BSGEm é menos enriquecida (35,9% e 19,1%, respectivamente) quando comparada com a fácies BSGH (38,5% e 19,5%). Contudo, em relação ao F a fácies BSGEm apresenta teores mais elevados, com média de 2,8% em relação a fácies BSGH, a qual assume um valor médio de 2,1%. Em relação ao Fe e Mn, a fácies BSGH é ligeiramente mais enriquecida, com 0,2% e 0,1%, respectivamente. Na somatória de (Y+La+Ce) é onde ocorre a maior diferença, a fácies BSGH apresenta um valor médio de 5,5%, sendo mais enriquecida nesses elementos quando comparada com a fácies BSGEm (4,9%), principalmente por conta do Y.

Granito Bom Jardim

As apatitas do GBJ apresentam comportamento semelhante às do GAV, tanto para fácies mineralizadas quanto estéreis. Em relação ao Ca e P, apatitas da fácies BLMG, isenta de mineralização, são mais enriquecidas (43,3% e 22,9%), comparadas com apatitas da fácies estanífera BMG (37,4% e 19,1%). O comportamento inverso ocorre para os elementos Fe, Mn e somatória de (Y+La+Ce). As apatitas da fácies não mineralizada são empobrecidas em Fe (0,18%), Mn (0,04%) e na somatória de (Y+La+Ce) (2,7%), quando comparadas com as apatitas da fácies estanífera (0,3% Fe, 0,10% Mn, Y+La+Ce 3,2%). Em relação ao F, essa

diferença é bastante evidenciada entre as duas fácies e o comportamento é semelhante ao que ocorre no GAV. As apatitas da fácies estéril são menos enriquecidas nesse elemento, alcançando uma média de 2,1%, enquanto as apatitas da fácies mineralizada apresentam conteúdo elevado com uma média de 3,2%, sendo mais enriquecidas nesse elemento.

Granito Antônio Vicente

As apatitas das fácies isentas de mineralização (BASMG/BMG) são mais enriquecidas em Ca e P (40,9% e 21,6%, respectivamente) em relação as apatitas das fácies estaníferas BSG e BSGA (38,2% e 20,1%). Por outro lado, apatitas das fácies estéreis são mais empobrecidas em Fe e Mn (0,25% e 0,03 %, respectivamente) e (Y+La+Ce) (2,5%), quando comparadas com apatitas das fácies mineralizadas (0,5% Fe, 0,15% Mn, 4,4% Y+La+Ce). Em relação ao F, também ocorre uma diferença entre essas duas fácies. Apatitas das fácies estéreis são ligeiramente mais pobres em F (2,4%) em relação às apatitas das fácies mineralizadas em Sn (2,6%).

8.3.2 Suíte Jamon

Granito Jamon

Os teores de Ca e P nas apatitas do Granito Jamon são bastante homogêneos, assumindo um valor médio para as fácies ABMG e BMGH de 39,5% e 20,4%, respectivamente. Em relação ao Fe e Mn, apresentam valores variando de 0,0 a 0,3% e de 0,0% a 0,14%, nesta ordem. Para a somatória de (Y+La+Ce), as apatitas dessas fácies apresentam conteúdos variando de 1,4% a 4,1%, os mais baixos quando comparado às outras apatitas de granitoides paleoproterozoicos. Porém, para o F apresenta valores um pouco mais altos que a maior parte dos outros granitos anorogênicos, com uma média de 3,0%.

Granito Redenção

A assinatura geoquímica das apatitas do Granito Redenção é semelhante às do Granito Jamon, com valores de Ca e P um pouco mais baixos (38,6% e 19,5%, respectivamente) para a fácies BMG. As apatitas dessa fácies apresentam valores médios de 0,1% para Fe e Mn, um pouco mais baixos que as médias encontradas para esses mesmos elementos no Granito Jamon. Em relação ao F, apresenta uma média de 2,9% e para a somatória de (Y+La+Ce), assume um valor de 2,1%.

8.3.3 Suíte Serra dos Carajás

Granito Central

As apatitas do Granito Central apresentam algumas variações em suas assinaturas geoquímicas, de acordo com cada uma de suas fácies. As maiores diferenças são evidenciadas entre as fácies ABMG e ABSG, nos seguintes elementos: Ca, P, F, Fe e na somatória (Y+La+Ce). Entre os ABSG, as diferenças maiores estão, principalmente, nos conteúdos de Y, La e Ce, e por consequente na somatória dos mesmos. As apatitas do ABMG são mais enriquecidas em Ca e P (39,7% e 19,3%, respectivamente), quando comparadas com as apatitas dos ABSG, que apresentam valores médios de 37,8% e 18,3%, para a amostra RD-04, e 37,7% e 18,6% para a MR-158. Em contrapartida, as apatitas da fácies ABMG são depletadas em F (1,8%) e na somatória de (Y+La+Ce) (6,6%), comparativamente a fácies ABSG, que assume os valores de 1,9% e 7,3% nos respectivos elementos para a amostra RD-04 e 2,4% e 6,1% para amostra MR-158.

8.3.4 Granitoides Arqueanos

Sanukitoide de Ourilândia do Norte

No geral, as apatitas das rochas sanukitoides se diferenciam das apatitas dos granitos paleoproterozoicos principalmente em relação a ETR e Y, os quais são mais baixos nesses granitoides. Em relação ao Ca e P, o EHbGRD apresenta valores médios de 39,5% e 18,2%, respectivamente. O conteúdo de Y nessas apatitas é consideravelmente baixo, quando comparado às apatitas de rochas paleoproterozoicas, com um valor médio de 0,1%. Para o Fe e Mn, essa fácies também assume valores mais baixos, atingindo uma média de 0,15% e 0,03%, respectivamente. Em relação aos valores de La e Ce no EHbGRD, seguem a tendência do conteúdo Y e também apresentam valores baixos, totalizando uma somatória média de 0,3% para (Y+La+Ce).

Trondhjemito Mogno

Os teores dos elementos maiores, menores e traços dessas apatitas se assemelham com os das rochas Sanukitoides de Ourilândia. O Ca e o P, apresentam valores 39,3 e 18,1, respectivamente, em ambos os elementos quase não há variação. Um elemento que se diferencia em relação a outra rocha arqueana é o F. No Trondhjemito Mogno alcança um valor médio de 3,5%, maior se comparado ao dos sanukitoides. Em comparação com as rochas paleoproterozoicas, apresenta um comportamento semelhante ao da rocha supracitada, com

menores conteúdos de Y, La e Ce, principalmente. A somatória desses elementos assume um valor médio de 0,1% na fácies EBTrd.

Tabela 2 – Variações médias obtidas por MEV-EDS dos principais elementos contidos nas apatitas dos corpos estudados (% em peso). Entre parênteses o número de análises realizadas.

Unidade	Amostra	O	F	Na	P	Cl	Ca	Mn	Fe	Y	La	Ce	Ca+P	Y+La+Ce	∑ (ppm)
Granito Central															
ABMG (68)	RD-01	27,97	1,80	0,15	19,29	0,08	39,70	0,03	0,14	5,60	0,38	0,38	58,99	6,64	69.080,6
ABSG (193)	RD-04	29,13	1,92	0,10	18,34	0,09	37,81	0,01	0,08	6,02	0,45	1,02	56,91	7,27	74.147,7
ABSG (26)	MR-158	30,58	2,40	0,19	18,58	0,09	37,67	0,03	0,08	5,07	0,36	0,60	56,26	6,03	61.391,5
Granito Velho															
Guilherme															
BSGEm (101)	VG-01, 38 (Sn)	33,82	2,78	0,04	19,05	0,07	35,94	0,03	0,11	4,14	0,43	0,34	54,99	4,91	50.476,7
BSGH (78)	VG- 57A (Sn)	30,35	2,05	0,01	19,51	0,07	38,62	0,05	0,22	4,87	0,34	0,34	58,14	5,55	58.233,8

∑ (ppm) = (Fe+Mn+Y+La+Ce)

Fonte: Do autor.

ABMG = Anfibólio-biotita monzogranito

ABSG = Anfibólio-biotita-sienogranito

BSGEm = Biotita-sienogranito equigranular médio

BSGH = Biotita-sienogranito heterogranular

Sn = Especializado em estanho

Tabela 3 – Variações composicionais médias de apatitas obtidas por MEV-EDS e Microsonda (*SL-06-DT*, *MC-49*, *MASF-28*) em trabalhos anteriores utilizadas nesse trabalho para fins comparativos (% em peso, Σ em ppm). Entre parênteses o número de análises realizadas.

Unidade	Amostra	O	F	Na	P	Cl	Ca	Mn	Fe	Y	La	Ce	Ca+P	Y+La+Ce	Σ (ppm)	
Gr. Bom Jardim (#)																
BLMG (31)	SAL-NCBJ-124	23,78	2,05	0,15	22,89	0,07	43,33	0,04	0,18	1,64	0,32	0,76	66,22	2,73	29.494,8	
BMG (37)	SAL-42 (Sn)	32,28	3,2	0,14	19,11	0,04	37,38	0,1	0,32	2,21	0,27	0,67	56,49	3,15	35.746,7	
Gr. Antônio Vicente (*)																
BASMG/BMG (73)	GFE-01/GAM-CS-54	27,96	2,43	0,09	21,64	0,33	40,94	0,03	0,25	1,19	0,54	0,8	62,58	2,54	28.196,4	
BSG/BSGA (25)	SL-06-DT/NG-B-82 (Sn)	27,85	2,59	0,26	20,1	0,07	38,16	0,15	0,46	2,95	0,36	1,13	58,26	4,44	50.460,4	
Microsonda (25)	<i>SL-06-DT</i> (Sn)	-	3,86	-	17,107	0,015	37,242	0,26	0,60	1,2	0,3	0,85	54,85	2,35	30.189,7	
Gr. Jamon (*)																
ABMG/BMGH (90)	AU-391/AU-375	30,79	3,01	0,08	20,39	0,06	39,47	0,05	0,14	1,14	0,38	0,72	59,86	2,23	24.203,4	
Gr. Redenção (*)																
BMG (57)	DCR-33B	31,09	2,87	0,07	20,29	0,07	39,06	0,06	0,11	0,86	0,42	0,79	59,35	2,08	22.437,0	
Sanukitoide de Ourilândia do Norte (**)																
Microsonda																
EhBGRD (16)	<i>MC-49</i>	-	2,36	0,03	18,15	0,1	39,55	0,03	0,15	0,09	0,04	0,16	57,7	0,28	4.604,5	
Trondhjemitó Mogno (**)																
Microsonda																
EBTrd (19)	<i>MASF-28</i>	-	3,45	0,04	18,06	0,01	39,25	0,1	0,17	0,07	0,01	0,04	57,3	0,12	3.265,0	

Σ (ppm) = (Fe+Mn+Y+La+Ce)

= Faro (2019)

* = Fonseca (2016)

** = Fonseca (2019)

BLMG = Biotita-leucomonzogranito

BMG = Biotita-monzogranito

BASMG = Biotita-anfibólio-sienogranito a monzogranito

EhBGRD = Epidoto-biotita granodiorito

BSG = Biotita-sienogranito

ABMG = Anfibólio-biotita monzogranito;

Sn = Especializado em estanho

EBTrd = Epidoto-biotita trondhjemitó

8.4 DIAGRAMAS DISCRIMINANTES

Para melhor entendimento e visualização das variações elementares das apatitas obtidas por MEV-EDS e microsonda eletrônica, foram elaborados diagramas geoquímicos representativos. No diagrama Ca *versus* P (Figura 7A), é possível observar uma tendência de enriquecimento em P e Ca nas fácies estéreis, principalmente, dos granitos Antônio Vicente (GAV) e Bom Jardim (GBJ). Por outro lado, nas apatitas das fácies mineralizadas esses elementos são comparativamente menos abundantes, tanto nas análises de MEV-EDS, quanto de microsonda, sendo que esta última mostra um menor espalhamento nos resultados.

O diagrama Ca *versus* F (Figura 7B) mostra uma tendência de enriquecimento em flúor e empobrecimento em Ca nas apatitas das rochas mineralizadas dos granitos Antônio Vicente e Bom Jardim. Os resultados de microsonda no GAV, apesar de apresentarem uma tendência semelhante e algumas sobreposições, encontram-se menos espalhadas e com concentrações de Ca mais homogêneas. Os conteúdos de flúor também se encontram levemente elevados nas apatitas dos granitos estéreis da Suíte Jamon, com uma média de 3,0% no Granito Jamon e 2,87% no Granito Redenção (Tabela 3). As apatitas dos Granitos Velho Guilherme (GVG) e Central (GC), bem como as apatitas das rochas estéreis do GAV e GBJ, apresentam conteúdos mais baixos em flúor em relação as outras fácies citadas.

No diagrama Ca *versus* Y Figura (7C), as apatitas dos granitos Velho Guilherme e Central são mais enriquecidas em Y e mais empobrecidas em Ca, e acompanham aquelas das rochas mineralizadas dos granitos Antônio Vicente e Bom Jardim, tanto em análises de EDS quanto de microsonda. As apatitas das rochas estéreis dos granitos Antônio Vicente e Bom Jardim, bem como da Suíte Jamon, são comparativamente mais enriquecidas em Ca e empobrecidas em Y. Os granitoides arqueanos possuem apatitas mais empobrecidas em Y e com teores de Ca constantes (entre 38-40%) e se destacam no diagrama.

No diagrama Ca *versus* Fe+Mn (Figura 7D), as apatitas mostram comportamento semelhante ao observado no diagrama Ca *versus* F (Figura 7B), com um *trend* de enriquecimento em Fe+Mn nas apatitas dos granitos estaníferos Antônio Vicente e Bom Jardim. Nota-se também uma leve tendência de enriquecimento nesses elementos nas apatitas dos granitos Velho Guilherme e Bom Jardim.

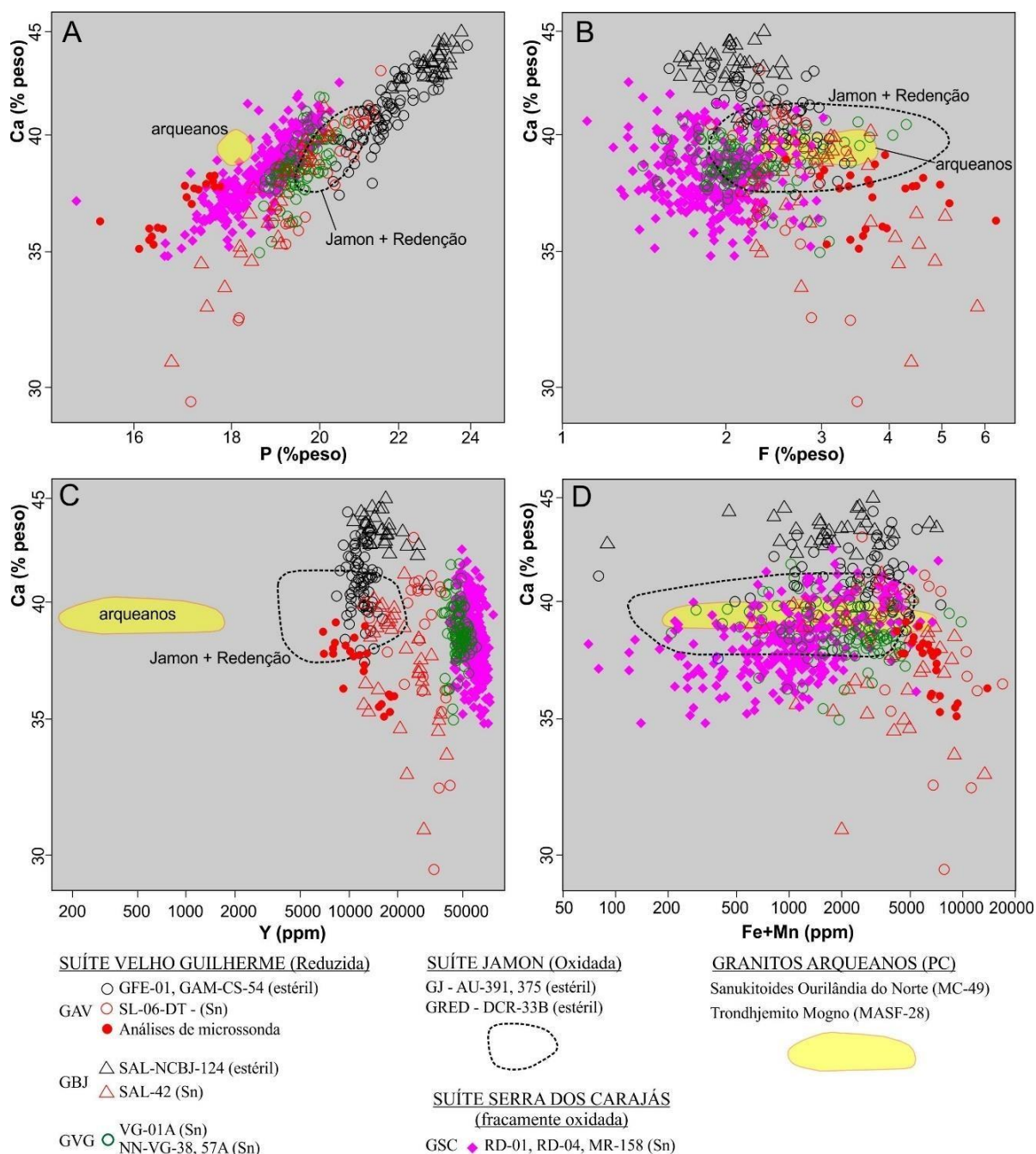


Figura 7 – Diagramas composicionais das apatitas estudadas. (A): Ca x P, (B) Ca x F, (C) Ca x Y, (D) Ca x Fe+Mn

No diagrama de Ca+P *versus* (Fe+Mn+Y+La+Ce) (Figura 8A), ocorre um comportamento semelhante ao do gráfico Ca *versus* Y, onde as apatitas dos granitos mineralizados empobrecem em Ca+P à medida que se enriquecem nesses outros elementos. As apatitas dos granitos estéreis mostram maiores conteúdos de Ca+P. As apatitas das rochas estéreis dos granitos Antônio Vicente e Bom Jardim apresentam comportamento semelhante aos estéreis reduzidos, porém são comparativamente menos enriquecidos em Ca+P.

Novamente, neste diagrama, as apatitas dos granitos GVG e GC, concentram-se na porção direita, demonstrando uma tendência de enriquecimento em (Fe+Mn+Y+La+Ce) e depleção em Ca+P. As apatitas do GAV, analisadas por microsonda eletrônica, acompanham a mesma tendência das apatitas analisadas por MEV para essa mesma rocha.

No diagrama Y *versus* (La+Ce+Pr+Nd+Sm) (Figura 8B) ocorre uma clara distinção entre as apatitas dos granitos mineralizados em Sn e aquelas associadas aos estéreis. Apatitas dos granitos mineralizados são mais enriquecidas em Y, com as apatitas do GVG e GC apresentando as maiores concentrações (dominantemente entre 40.000 e 60.000 ppm). As apatitas das rochas estéreis apresentam conteúdos de Y < 20.000 ppm.

Em relação ao diagrama (Gd+Yb+Y) *versus* (La+Ce+Pr+Nd+Sm) (Figura 8C), tanto as apatitas de rochas mineralizadas quanto estéreis apresentam conteúdos similares de ETR leves, porém aquelas do Granito Central (8.600-50.000 ppm) são mais enriquecidas do que as do Granito Velho Guilherme (8.000 - 17.000), conforme demonstrado também na Figura 8B. É possível observar, embora com superposições, que as apatitas das rochas mineralizadas são mais enriquecidas em (Gd+Yb+Y), com os granitos Central e Velho Guilherme possuindo apatitas mais enriquecidas nesses elementos (entre 46.000-85.000 ppm).

Por fim, no diagrama Ca+P *versus* (F+Cl+Na+Mn+Fe+Y+ETR) as apatitas dos granitos mineralizados em Sn formam um *trend* de empobrecimento em Ca+P e enriquecimento de (F+Cl+Na+Mn+Fe+Y+ETR), indicativo de substituição do Ca e P pelos outros elementos comumente presentes na estrutura das apatitas. Análises de microsonda nas apatitas das rochas estaníferas do Granito Antônio Vicente seguem o mesmo *trend*. As apatitas das rochas estéreis possuem conteúdos mais elevados de Ca e P e não mostram enriquecimento evidente com os demais elementos, sugerindo pouca ou nenhuma substituição entre eles.

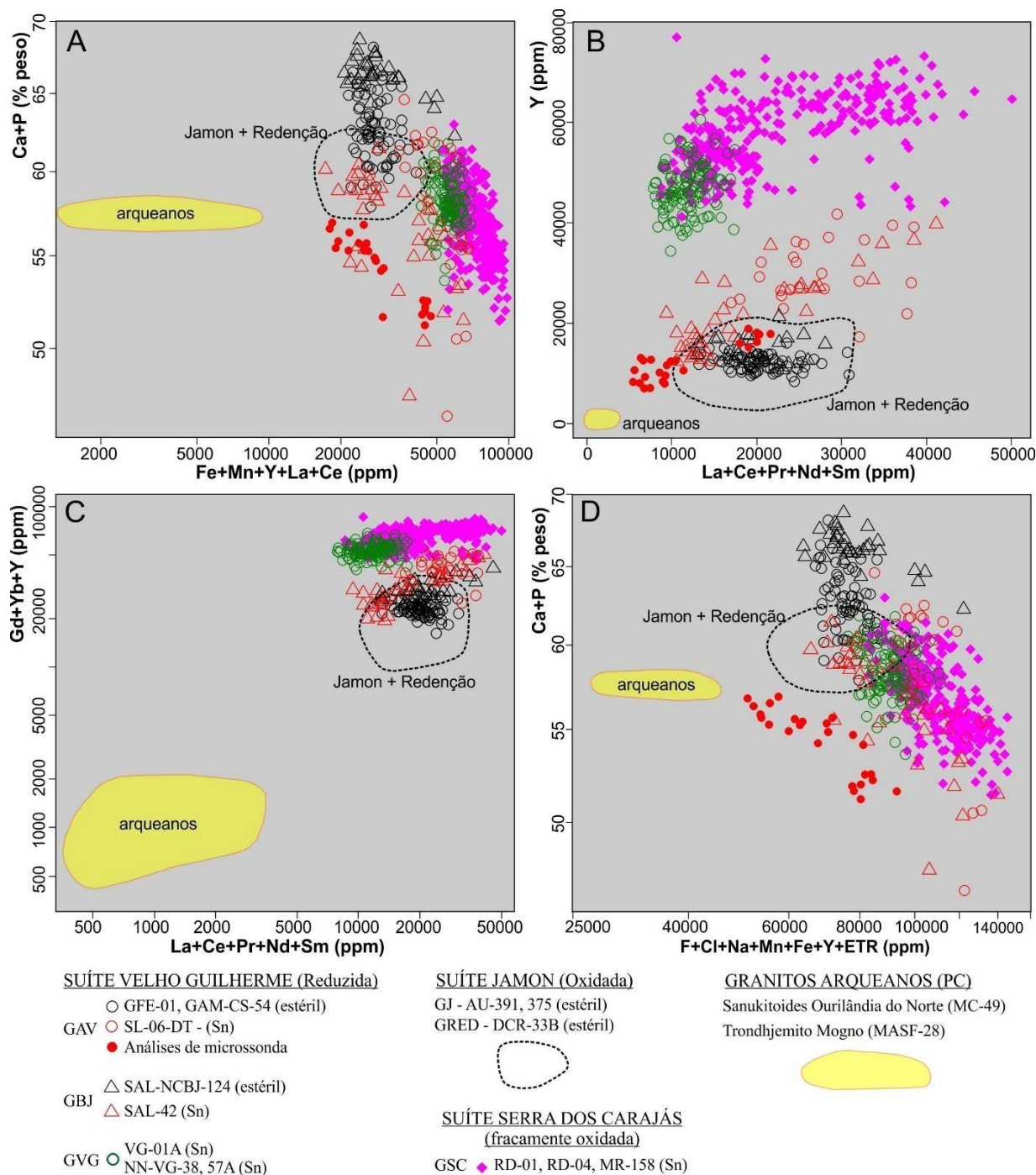


Figura 8 – Diagramas composicionais das apatitas estudadas. (A): Ca+P x Fe+Mn+Y+La+Ce, (B) Y x La+Ce+Pr+Nd+Sm, (C) Gd+Yb+Y x La+Ce+Pr+Nd+Sm, (D) Ca+P x F+Cl+Na+Mn+Fe+Y+ETR.

8.5 GRANITOS PALEOPROTEROZOICOS *VERSUS* GRANITOIDES ARQUEANOS

Como citado anteriormente, foram utilizadas apatitas da Suíte Sanukitoide Rio Maria, da região de Ourilândia do Norte e do Trondhjemito Mogno, ambos arqueanos e inseridos no Domínio Rio Maria, Província Carajás, para integrar o presente estudo e fomentar uma discussão a respeito das diferentes assinaturas geoquímicas com base na proveniência e idade dessas rochas.

Em relação ao diagrama Ca *versus* P (Figura 7A), as apatitas dos granitoides arqueanos mostram grande homogeneidade e se concentram em torno de 18% de P e 38-40% de Ca.

No diagrama Ca *versus* F (Figura 7B) as apatitas dos granitoides arqueanos mostram um menor espalhamento e se superpõem predominantemente às apatitas da Suíte Jamon.

No diagrama Ca *versus* Y (Figura 7C) há uma clara distinção entre rochas arqueanas e paleoproterozoicas, sendo as apatitas destas últimas bem mais enriquecidas em Y.

O diagrama Ca *versus* Fe+Mn (Figura 7D), mostra uma superposição das análises de apatitas das rochas arqueanas e paleoproterozoicas isentas de mineralização. Contudo, é possível observar que apatitas de granitos estaníferos paleoproterozoicos tendem a ser mais enriquecidas em Fe e Mn e mais empobrecidas em Ca.

Na Figura 8, a separação entre apatitas arqueanas e paleoproterozoicas é muito clara. Na Figura 8A, as apatitas arqueanas mostram conteúdos de Ca+P homogêneos e pouco variáveis (56-58%) e somatória de (Fe+Mn+Y+La+Ce) < 9.000 ppm. Nas apatitas paleoproterozoicas Ca+P é muito variável (47-69%) e a somatória de (Fe+Mn+Y+La+Ce) muito mais elevada (16.000-98.000 ppm).

Nas Figuras 8B e 8C as apatitas das rochas arqueanas se destacam das paleoproterozoicas por seus conteúdos muito inferiores de Y, Gd+Yb e (La+Yb+Pr+Nd+Sm).

Na Figura 8D a somatória de (F+Cl+Na+Mn+Fe+Y+ETR) também é muito menor nas apatitas dos granitoides arqueanos, proporcionando uma clara separação entre os dois grupos de rochas.

De modo geral, é possível distinguir claramente assinaturas geoquímicas de apatitas de rochas arqueanas e paleoproterozoicas. Tal fato indica que estudos composicionais em cristais de apatita podem ser utilizados, por exemplo, para registrar mudanças nas composições magmáticas que ocorreram ao longo da evolução crustal de uma região e distinguir rochas de diferentes idades que foram formadas em diferentes contextos geológicos.

9 CONCLUSÃO

O estudo da química mineral em minerais acessórios tem se mostrado um grande aliado na elucidação de diversos processos geológicos e questões metalogenéticas. Trabalhos desenvolvidos recentemente mostram a eficácia e a importância do estudo geoquímico das apatitas para o entendimento dos processos magmáticos e pós-magmáticos que marcaram a cristalização e evolução de rochas magmáticas, na petrogênese de rochas graníticas (Sha & Chappell 1999, Cao *et al.* 2011, Ding *et al.* 2015), além de ser útil como um guia de exploração mineral (Belousova *et al.* 2001, 2002, Mao *et al.* 2016).

Os aspectos morfológicos mostraram que há uma variação em relação à granulação, grau de fraturamento e morfologia das apatitas de fácies menos evoluídas e estéreis em comparação às apatitas de fácies mais evoluídas e mineralizadas. No Granito Central as apatitas das fácies menos evoluídas (ABMG) formam cristais mais preservados, com grau de fraturamento moderado a alto, mas isentas de alterações e zoneamentos. Na fácies mais evoluída (ABSG) as apatitas encontram-se fraturadas, com alguns cristais apresentando zoneamento e frequentemente alteradas para monazita, denotando um enriquecimento tardio em ETRL. No Granito Velho Guilherme, as apatitas da fácies não mineralizada são bem desenvolvidas, com alguns cristais subédricos e apresentando um leve zoneamento. Em contrapartida, as raras apatitas encontradas na fácies mineralizada são anédricas e de granulação fina.

Segundo Belousova *et al.* (2001) e Chu *et al.* (2009), em granitoides dominam fluorapatitas, as quais tendem a ser menos abundantes à medida que ocorre a diferenciação magmática. Tal fato pode ser reforçado pelo estudo morfológico deste trabalho, onde as apatitas das fácies mais evoluídas e mineralizadas dos granitos Velho Guilherme e Central são mais finas, anédricas e pouco abundantes, geralmente associadas com fluorita e monazita. Essas características ratificam que processos de alteração hidrotermal, bem como a própria cristalização fracionada, contribuíram para a formação de apatitas com as características supracitadas.

Os diagramas geoquímicos obtidos mostraram que as apatitas dos corpos mineralizados em Sn apresentam um enriquecimento principalmente em Fe, Fe, Mn, Y, La e Ce, paralelo a uma diminuição de Ca e P, indicando substituição dos elementos maiores constituintes das apatitas por esses elementos menores e traços. Em contrapartida, as apatitas dos granitos estéreis não apresentam esse comportamento, mostrando uma fraca ou inexistente substituição dos elementos maiores (Ca e P) pelos elementos menores e traço supracitados. As apatitas dos

granitos estudados, Central e Velho Guilherme acompanham a tendência de enriquecimento em Y, La e Ce, e mostram uma clara distinção dos outros corpos estéreis e de caráter mais oxidado. As análises de apatitas por Microsonda Eletrônica no GAV, mostram *trends* similares aos obtidos por MEV-EDS, ratificando a confiabilidade dos resultados obtidos por essa ferramenta.

As apatitas dos granitos paleoproterozoicos mineralizados ou não, mostram concentrações mais elevadas, principalmente em ETR e Y, quando comparadas com as apatitas das rochas arqueanas, fato que é destacado em todos os diagramas discriminantes desses elementos. Tal fato indica que composições de apatitas podem ser úteis no registro de processos petrogenéticos e que as mudanças que ocorreram durante a evolução crustal de uma região refletem diretamente nas diferentes composições magmáticas impressas nesse mineral, distinguindo, dessa forma, rochas de diferentes idades.

Dessa forma, esse estudo foi coerente com os trabalhos realizados anteriormente, reforçando que as apatitas de corpos estaníferos apresentam uma assinatura geoquímica característica e que esse mineral pode ser utilizado como uma importante ferramenta para elucidar questões petrológicas e metalogenéticas.

REFERÊNCIAS

- Abreu F.A.M. & Ramos C.R. 1974. Estanho do Sul do Pará. *In*: 28° SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, **Anais** [...], v: 5, p. 11-23.
- Almeida F.F.M., Hasui Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews* **17**: 1–29. doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9.
- 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*, v. **36** (2): 282-295.
- 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.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of the 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.
- Araújo O.J.B., Maia R.G.N., Jorge João X.S., Costa J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. *In*: 7° SBG, Congresso Latino-Americano de Geologia, Belém. **Anais**[...], p. 324-333.
- Araújo O.J.B. Maia R.G.N. 1991. *Serra dos Carajás. Folha SB-22-Z-A*. (Relatório Final) Brasília, DF, CPRM. 136p. (Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil.)
- 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.
- Barbosa J.P.O. 2004. *Geologia estrutural, geoquímica, petrografia e geocronologia de granitoides da região do Igarapé Gelado, norte da Província Mineral de Carajás*. MS Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 96 p.
- Barros C.E.M., Dall’Agnol, R., Soares A.D.V. & Dias G.S. 1994. Metagabros de Águas Claras, Serra dos Carajás: petrografia, geoquímica e transformações metamórfico-hidrotermais. *Acta Geol. Leopold*. **40**: 1-70.
- Barros C.E.M., Barbey P., Boullier A.M. 2001. Role of magma pressure, tectonic stress and crystallization progress in the emplacement of the syntectonic A-type Estrela Granite Complex (Carajás Mineral Province, Brazil). *Tectonophysics*, **343**: 93–109.
- 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**: 1423-1440.
- Belousova E.A., Walters S., Griffin W.L., O’Reilly S.Y. 2001. Trace element signatures of apatites from granitoids of Mount Isa Inlier, north-west Queensland, Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, **48**: 603- 619.

- Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Fisher N.I. 2002. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: trace-element compositions and their relationship to host rock type. *Journal of Geochemical Exploration*, **76**: 45-69.
- Breiter K., Lamarão C.N., Borges R.M.K., Dall'Agnol R. 2014. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites. *Lithos*, (**192-195**): 208-225.
- CPRM/DNPM. 1997. *Projeto especial mapas de recursos minerais, de solo e de vegetação para a Área do Projeto Grande Carajás – subprograma mapas metalogenéticos e de previsão de recursos minerais. Folha São Felix do Xingu-SB-22-Y-B*. CPRM, Superintendência Regional de Belém (Relatório Final).
- Cao M., Li G., Qin K., Seitmuratova E.Y., Liu Y. 2011. Major and trace element characteristic of apatites in granitoids from Central Kazakhstan: Implications for petrogenesis and mineralization. *Resource geology*, **62** (1): 63-83.
- Costa H.N.S. 2016. *Morfologia e assinatura geoquímica de zircão da Suíte Sanukitoide Rio Maria, Província Carajás: implicações petrológicas*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 84 p.
- Chu M-F., Wang K.L., Griffin W.L., Chung S-L., O'Reilly S.Y., Pearson N.J., Iizuka Y. 2009. Apatite composition: tracing petrogenetic processes in Transhimalayan granitoids. *Journal of Petrology*, (**50**): 1829-1855.
- 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., Teixeira N.P., Magalhães M.S. 1993. Diagnostic features of the Tin-specialized anorogenic granites of the Eastern Amazonian Region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **65**(1): 33-50.
- Dall'Agnol R., Lafon J.M., Macambira M.J.B. 1994. Proterozoic anorogenic magmatism in the Central Amazonian province, Amazonian Craton. Geochronological, Petrological and Geochemical aspects. *Mineralogy and Petrology*, **50**: 113-138.
- Dall'Agnol R., Rämö O.T., Magalhães M.S., Macambira M.J.B. 1999. Petrology of the anorogenic, oxidized Jamon and Musa granites, Amazonian craton: implications for genesis of Proterozoic A-type granites. *Lithos*, v. **46**(3): 431-462.
- 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**): 101-129.
- Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian craton. *In: Symposium on Magmatism, Crustal Evolution and Metallogenesis of the Amazonian Craton*. Belém. Abstract Volume and Field Trips Guide...Belém: PRONEX-UFPA/ SBG-NO, p. 99-150.
- 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*, v. **93**, n. 3-4: 215-233.

- Dall'Agnol R., Oliveira D.C., Lamarão C.N. 2013. Magmatismo granitoide arqueano e evolução geológica do Subdomínio de Transição da Província Carajás, sudeste do Cráton Amazônico. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais*, **8**(3): 251-256.
- Ding T., Ma D., Lu J., Zhang R. 2015. Apatite in granitoids related to polymetallic mineral deposits in southeastern Hunan Province, Shi-Hang zone, China: Implications for petrogenesis and metallogenesis. *Ore geology reviews*, **69** (2015): 104-117
- DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: 35° Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, *Anais* [...], p. 10-59.
- Eby G.N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications. *Geology* **20**: 641-644.
- Faro P.S.P. 2016. *Estudo de cristais de apatita do granito estanífero Bom Jardim, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Carajás: implicações metalogenéticas*. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 90 págs.
- Feio G.R.L. & Dall'Agnol R. 2012. Geochemistry and petrogenesis of the granites from the Canaã dos Carajás area, Carajás Province, Brazil: implications for the origin of Archean granites. *Lithos*, **154**: 33-52.
- 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 Cráton, Brazil. *Precambrian Research*, **227**: 157-185.
- Fonseca C.S. 2016. *Apatita como indicador de granitos estaníferos do sudoeste do Pará*. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 83 p.
- Fonseca C.S. 2019. *Assinatura geoquímica de apatita de rochas sanukitoides do sudeste do Cráton Amazônico, Província Carajás*. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 69 p.
- 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 sul do Domínio Carajás. Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais*. **9**: 533-564.
- Guimarães F.V., 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 mesoarqueano de Rio Maria, SE do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **40**(2): 196-211.
- Ishihara S. 1981. The granitoid series and mineralization. In: SKINNER, B. J. (ed.) *Economic Geology*, 75th anniversary volume: **458-484.7**
- Janousek V., Farrow C.M., Erban V. 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology* **47**:1255-1259.
- Javier Rios F. 1991. *O granito Central da Serra dos Carajás: fadas petrográficas e alteração hidrotermal do setor norte*. Belém, 152p. Dissertação de mestrado, CG/UFPA.
- Javier Rios F. & Villas R.N. 1991. Veios hidrotermais com mineralização de sulfetos, Granito Central, Serra dos Carajás. In: Simp. geol. Amaz., 3, Belém, 1991. *Anais* [...], Belém, SBG, Núcleo Norte, p. 336-349.

- Javier Rios F., Villas R.N.N., Dall'Agnol R. 1995. O Granito Serra dos Carajás: I. Fácies petrográficas e avaliação do potencial metalogenético para estanho no setor norte. *Revista Brasileira de Geociências*, **25**(1): 20-31.
- Jorge João X.S., Neves A.P., Leal J.W.L. 1982. Ouro da Serra Pelada: aspectos da geologia e garimpagem. In: SBG, 1º Simpósio de geologia da Amazônia, Belém. *Anais* [...], v. 2, p. 52–62.
- Jorge João X.S. & Araújo J.B. 1992. Magmatismo granítico sin-cisalhamento Itacaiúnas no SW do Estado do Pará. In: SBG, 37º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. Resumos Expandidos. v. 2, p. 36-38.
- Lafon J.M., Rodrigues E., Duarte K.D. 1994. Le granite Mata Surrão: um magmatisme monzogranitique contemporain des associations tonalitiquestrondhjemitiques-granodioritiques archéennes de la région de Rio Maria (Amazonie Orientale, Brésil). *Comptes Rendues de la Academie de Sciences de Paris*, **318**(2): 642–649.
- Lafon J.M., Rodrigues E., Macambira E.M.B., Pereira E.D. 1995. Magmatisme anorogénique du protérozoïque dans la région de São Felix do Xingu - Tucumã (Amazonie Orientale, Brésil). *Nouvelles données géochronologiques. C. R. Acad. Sci. Paris*, **320**(2): 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: International Geological Congress, 31, Rio de Janeiro. **Abstracts** [...] Rio de Janeiro, CD-ROM.
- Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Soledade G.L., Silva J.S. 2007. Variações composicionais de zircão em granitos anorogênicos proterozoicos do Cráton Amazônico: implicações metalogenéticas. *Revista Brasileira de Geociências*, **37** (4): 693-704.
- Lamarão C.N., Dall'Agnol R., Silva J.S., Soledade G.L. 2010. Morphological and compositional variation in zircons of tin-specialized Paleoproterozoic A-type granites of the Amazonian craton: Metallogenic implications. International Conference on A-type Granites and Related Rocks through Time (IGCP-510). Helsinki, Finland. **Abstract** [...], vol. p. 68-70.
- Lamarão C.N., Pinho S.C.C., Junior A.L.P., Toro M.A.G. 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.
- Lamarão C. N., Marques G. T., Oliveira D. C., Costi H. T., Borges R. M. K., Dall'Agnol R. 2018. Morphology and composition of zircons in rare metal granites from Brazilian tin provinces: *Journal of South American Earth Sciences*, vol. **84**, p. 1–15.
- Leite A.A.S., Dall'Agnol R. Estratigrafia e aspectos geológicos da região de ocorrência do Granito Xinguara (Se do Pará). In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 4, 1994, Belém. Boletim de Resumos Expandidos. SBG, p.325-327.
- Leite A.A.S., Dall'Agnol R., Macambira M.J.B., Althoff F.J. 2004. Geologia e Geocronologia dos granitoides arqueanos da região de Xinguara-Pa e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **34**(4): 447-458.
- Macambira M.J.B., Lafon J.M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: Síntese dos dados e novos desafios. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra. **7**: 263-287.

- Macambira E.M.B. & Vale A.G. 1997. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Félix do Xingu. Folha SB.22-Y-B, Estado do Pará*. Brasília, DNPM/CPRM, 384 p.
- Machado N., Lindenmayer Z.G., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**: 329–354
- Mao M., Rukhlov A.S., Rowins S.M., Spence J., Coogan L.A. 2016. Apatite trace element compositions: a robust new tool for mineral exploration. *Economic Geology*, **111**: 1187-1222.
- Medeiros Filho C.A. & Meireles E.M. 1985. Dados preliminares sobre a ocorrência de cromita na área de Luanga. In: SBG, 2º Simpósio de geologia da Amazônia, Belém. Atas. v.3, p. 1488-1499.
- Melo L.M.C. 2017. *Estudo de cristais de zircão do Granito Rio Xingu, Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Carajás, por MEV-EDS e suas implicações metalogenéticas*. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 59p.
- Melo L.M.C., Lamarão C.N., Conceição H., Oliveira D.C., Silva Rosa M.L., Costa U.A.P. 2021. Serra da Queimada Granite, Velho Guilherme Intrusive Suite, Carajás Province: Typology, petrological aspects and metallogenetic affinities. *Journal of South American Earth Sciences*, **112**, 103608.
- Mesquita C.J.S., Dall’Agnol R., Almeida J.A.C. 2018. Mineral chemistry and crystallization parameters of the A-type Paleoproterozoic Bannach Granite, Carajás Province, Pará, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **48**(3): 575-601.
- 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. Mesoarchean (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.
- 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. Mesoarchean (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.
- Nery P.H.S. 2017. *Composição química de apatita de granitos paleoproterozoicos da Província Carajás: implicações petrológicas e metalogenéticas*. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 70p.
- Nery P.H.S. 2019. *Química mineral e condições de cristalização do Granito Gradaús, sul do Pará, Província Carajás*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências, 86 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*. Bol. Mus. Par. Em. Goeldi, 7:177-277.
- Oliveira D.C., Dall’Agnol R., Barros C.E.M., Vale A.G. 2005. *Geologia e petrografia do granito Paleoproterozoico Redenção, SE do Cráton Amazônico*. Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi, série Ciências Naturais 2, **155–172**.
- Oliveira M.A., Dall’Agnol R., Althoff F.J. 2006. Petrografia e geoquímica do Granodiorito Rio Maria da região de Bannach e comparações com as demais ocorrências no Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria – Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **36**(2): 313-326.

- 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 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**(10): 2121-2148
- 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. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Pinho S.C.C. 2009. *Geologia, petrografia, geoquímica do Granito Bom Jardim, região de São Félix do Xingu, Província Mineral de Carajás*. Ms Dissertation, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Universidade Federal do Pará, 121 p.
- Reed S. J. B. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press. 1996. 201p.
- Reis Y.H.C. 2019. *Titanita de granitos paleoproterozoicos reduzidos e oxidados, Província Carajás: um estudo morfológico e composicional por MEV-EDS*. Trabalho de Iniciação Científica (IC). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 25p.
- 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, Pará – Província Carajás*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi 9 (3), **597–633**.
- Rolando A.P. & Macambira M.J.B. 2003. Archean crust formation in Inajá range área, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes. In: South American Symposium on Isotope Geology, 4. Salvador. **Expanded Abstracts** [...] Salvador: SIG, 2003. CD-ROM.
- Santos J.O.S. 2003. Geotectônica do Escudo das Guianas e Brasil-Central. In: L.A. Bizzi, Schobbenhaus C, Vidotti R.M., Gonçalves J.H. (Eds). *Geologia tectônica e recursos minerais do Brasil: texto mapas & SIG* (169-226), Brasília: CPRM-Serviço Geológico do Brasil.
- Santos J.O.S., Hartmann L.A., Gaudette H.E., Groves D.I. McNaughton N.J., Fletcher I.R.A. 2000. New understanding of the Provinces of the Amazon Craton based on integration of field and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, v. **3**, p. 453-488.
- Santos R.D., Galarza M.A., Oliveira D.C. 2012. *Caracterização Geoquímica, Geocronológica e Isotópica do Diopsídio-Norito Pium-Província Carajás*. XLVI Congresso Brasileiro de Geologia.
- Santos P.A.S., 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. *Brazilian Journal of Geology*. v. **43**, n. 1, p. 876-889, 2013.
- Santos M.N., Oliveira D.C. 2016. Rio Maria granodiorite and associated rocks of Ourilândia do Norte – Carajás Province: Petrography, geochemistry and implications for sanukitoid petrogenesis. *Journal of South American Earth Sciences*, **72**:279-301.
- Sardinha A.S., Barros C.E.M. & Krymsky R. 2006. Geology, geochemistry and U-Pb geochronology of the Archean (2.74 Ga) Serra do Rabo granite stocks, Carajás Metallogenic Province, northern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **20**: 327-339.

Sha L-K. & Chappell B.W. 1999. Apatite chemical composition, determined for electron microprobe and laser-ablation inductively coupled plasma mass spectrometry, as a probe into granite petrogenesis. *Geochemical Cosmochimica Acta*, **(63)**: 3861-3881.

Silva L.C. 2018. *Morfologia e química mineral de zircão e cassiterita, em concentrados de bateia, como guia prospectivo para mineralizações de Sn na Província Estanífera de Rondônia*. Dissertação de mestrado, Pós-Graduação em Geoquímica e Petrologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal, Belém, 63 p.

Silva L.R. & Oliveira D.C. 2019. In: Teixeira S.G., Chaves C.L. (Eds.). *Magmatismo Mesoarqueano de Ourilândia do Norte-PA: Afinidades Petrológicas e Implicações Tectônicas para a Província Carajás*, 11. Contribuições à Geologia da Amazônia, pp. **147-180**.

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.

Tassinari C.C.G., Macambira M.J.B. 2004. *Evolução tectônica do Cráton Amazônico*. In: Mantesso-Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds.). *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de F.F.M. de Almeida*. São Paulo, p. **471-486**.

Teixeira N.P. & Dall'Agnol R. 1991. *Geologia e petrografia do Maciço Granítico Antonio Vicente. Região de São Félix do Xingu/PA*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciência da Terra, v. **3**, p. 45-73.

Teixeira N.P. 1999. *Contribuição ao estudo das rochas granitoides e mineralizações associadas da Suíte intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP), 508 p.

Teixeira N.P. & Bettencourt J.S. 2000. Velho Guilherme Intrusive Suite. Pará, Brazil: petrogenetic aspects and associated mineralization. In: Intern. Geol. Congr., 31, Rio de Janeiro. Abstract. Granite Systems and Proterozoic Lithospheric Processes IGCP-426, IAGC/IMA. CDROM.

Teixeira N.P., Bettencourt J.S., Moura C.A.V., Dall'Agnol R., Macambira E.M.B. 2002. Pb-Pb geochronology and Sm-Nd isotopic composition of the Velho Guilherme Intrusive Suite and volcanic rocks of the Uatumã Group, south-southeast Pará - Brazil. *Precambrian Research*, **119**: 257-275.

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 paleoproterozoicos da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências* **35** (2): 217-226.

Teixeira M.F.B., Dall'Agnol R., Santos J.O.S., Oliveira D.C., Lamarão C.N., 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., 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**(3):1-22.

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., Anjos G.C., Silva H.R. 2008. Litoestratigráficas. *In: Vasquez M. L. & Rosa-Costa L. T. (org). Geologia e recursos minerais do estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000. CPRM. Belém. Unidade 3 p.113-215.*

Villas R.N.N. 1999. Granito Pojuca, Serra dos Carajás (PA): composição mineralógica, química mineral e controles químicos da alteração hidrotermal. *Revista Brasileira de Geociências*, **29**(3): 393- 404.