



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 505**

**ESTUDO DO VULCANO-PLUTONISMO  
PALEOPROTEROZOICO OCORRENTE NA REGIÃO DE VILA  
MANDI (PA), CRÁTON AMAZÔNICO**

**Dissertação apresentada por:**

**RAQUEL FERREIRA DOS SANTOS**

**Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro (UFPA)**

**Coorientador: Prof. Dr. Carlos Marcello Dias Fernandes (UFPA)**

---

**BELÉM  
2017**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)  
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

---

Santos, Raquel Ferreira dos, 1985-

Estudo do vulcano-plutonismo paleoproterozoico ocorrente na região de Vila Mandi (PA), Cráton Amazônico / Raquel Ferreira dos Santos. – 2017.

xii, 71 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marco Antonio Galarza Toro

Coorientador: Carlos Marcello Dias Fernandes

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2017.

1. Geocronologia – Santana do Araguaia (PA). 2. Petrogênese. 3. Cráton - Pará.. I. Título.

CDD 22. ed. 551.7009811

---



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

**ESTUDO DO VULCANO-PLUTONISMO  
PALEOPROTEROZOICO OCORRENTE NA REGIÃO DE VILA  
MANDI (PA), CRÁTON AMAZÔNICO**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR  
RAQUEL FERREIRA DOS SANTOS**

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de  
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.**

**Data de Aprovação: 01 / 10 / 2017**

**Banca Examinadora:**

**Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro**  
**Orientador-UFPA**

**Prof.ª Dr.ª Lena Virgínia Soares Monteiro**  
**Membro-UNICAMP**

**Prof. Dr. Régis Munhoz Krás Borges**  
**Membro-UFPA**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Pará que por meio do Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) do Instituto de Geociências (IG), que me concedeu a oportunidade para elaboração deste trabalho, fornecendo também infra-estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado;

Aos grupos de Pesquisa *de Metalogênese e Geologia Isotópica* do IG/UFPA, e o Grupo de Pesquisa *Interação fluido-rocha e alteração hidrotermal em processos petrogenéticos e metalogenéticos* do IG-USP pelo apoio em diversas etapas deste trabalho.

Ao Laboratório de Geologia Isotópica (PARÁ-ISO) pela infraestrutura disponibilizada, assim como a atenção dos profissionais durante o processo de obtenção de dados;

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Galarza Toro pela orientação e ensinamentos que foram de extrema importância para meu crescimento no decorrer deste trabalho;

Ao Prof. Dr. Carlos Marcello Dias Fernandes pela grande força, apoio, co-orientação e ensinamentos em todos os momentos e que foram de grande importância para o trabalho desenvolvido;

A empresa MbAC Fertilizer Corporation e ao seu Geólogo MsC. Bruno Lagler por todo o apoio logístico durante os trabalhos de campo e por ceder dados importantes;

Ao SIPAM/SIVAM pela concessão das imagens de radar R99B da área de estudo;

Aos seguintes projetos de pesquisa pelo apoio financeiro: 1) “Geologia e potencial metalogenético do vulcano–plutonismo paleoproterozoico da região de Santana do Araguaia (PA), SE do Cráton Amazônico” (Processo CNPq 483349/2012-7); 2) “Petrogênese e Metalogênese da LIP (*Large Igneous Province*) Uatumã, Cráton Amazônico” (Processo CNPq 550342/2011-7); e 3) INCT Geociências da Amazônia (Processo MCT/CNPq/FAPESPA 573733/2008-2);

Ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pela ajuda concedida nas análises em laboratório;

À Deus por me conceder o dom da vida;

Ao meu marido Saulo por todo o apoio e compreensão ao longo deste trabalho;

Ao meu pai, minha mãe e irmão que sempre estão ao meu lado;

Ao amigo Rodrigo Gouvêa, Danilo Strauss, Victor Matheus por toda ajuda concedida.

## RESUMO

O Cráton Amazônico encontra-se inserido na Plataforma Sul-americana e representa um dos mais expressivos terrenos pré-cambrianos do mundo. Esta mega-unidade tectônica é recoberta por sequências vulcânicas efusivas e explosivas do Paleoproterozoico que recobrem aproximadamente 1.500.000 km<sup>2</sup>. Próximo ao distrito de Vila Mandi, extremo sul do município de São Félix do Xingu (PA), este evento encontra-se representado por sequências vulcano-plutônicas predominantemente félsicas, com subordinados tipos intermediários e sedimentos associados, pouco estudadas, mas que podem ser correlacionáveis a sequências de outras porções do Cráton Amazônico. Desta forma o objetivo do trabalho é contribuir com a caracterização do sistema vulcano-plutônico que ocorre na região, no que diz respeito aos seus aspectos petrográficos, geoquímicos e geocronológicos. Foram individualizados na área de estudo duas unidades vulcano-plutônicas efusivas e explosivas, denominadas formações Cinco Estrelas e Vila Mandi. A unidade basal Formação Cinco Estrelas é composta por rochas vulcânicas básicas a intermediárias efusivas e subordinadamente explosivas, de composição subalcalina e revela ao menos duas fácies distintas: 1) fácies de fluxo de lava maciça subaérea, representada por rochas intermediárias com foliação de fluxo magmático horizontal; e 2) fácies vulcanoclástica com tufo de cinzas laminado. A unidade superior, Formação Vila Mandi, de composição subalcalina é composta por cinco fácies: 1) fácies de fluxo de lava de riolitos maciços; 2) fácies de *stocks* de granitoides equigranulares; 3) fácies de ignimbrito de composição félsica associado a tufos de cinza soldados e não-soldados; 4) fácies de brecha polimítica maciça e subordinados lapilli-tufo e tufo de cristais; 5) fácies de diques com pórfiros graníticos. Os dados geoquímicos dessas rochas mostram que as rochas da Formação Cinco Estrelas apresentam conteúdo de SiO<sub>2</sub> entre 55,49 e 73,31 % e razões K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O entre 0,56 e 1,64. Já as vulcânicas da Formação Vila Mandi compreendem uma suíte mais evoluída, com conteúdos de SiO<sub>2</sub> entre 69,10 e 78,31 % e muito altas razões K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O (0,24 – 111,66). A unidade basal exhibe caráter predominantemente cálcio-alcálico, levemente transicional entre cálcio-alcálico a shoshonítico, composição exclusivamente metaluminosa, razões A/NK entre 1 e 2, bem como afinidade geoquímica com granitoides de arcos vulcânicos. Já a Formação Vila Mandi apresenta características transicionais entre metaluminosa e peraluminosa com razão A/NK entre 1 e 1,5 e afinidade tectônica semelhante a Formação Cinco Estrelas. Apesar de algumas diferenças entre as rochas das duas formações, assinaladas pelos conteúdos de Elementos Terras Raras (ETR), existem também muitas similaridades. As rochas das duas formações exibem um enriquecimento dos Elementos Terras Raras leves (ETRL) em relação

aos Elementos Terras Raras pesados (ETRP). As fácies de fluxo de lava e vulcanoclástica da Formação Cinco Estrelas exibem conteúdos totais de ETR de baixo a moderado (177,6 – 475,9 ppm), com anomalia de Eu média a inexistente ( $Eu/Eu^* = 0,69 - 0,93$ ) para as duas fácies, caracterizando assim um comportamento compatível com as séries cálcio-alcálicas. Por sua vez, os litotipos da Formação Vila Mandi possuem padrões mais diversificados, provavelmente vinculado à sua evolução polifásica, com significativas anomalias negativas de Eu ( $Eu/Eu^* = 0,35 - 0,71$ ), apontando para o fracionamento expressivo de feldspatos. Nos diagramas de multi-elementos normalizados para o MORB as rochas da Formação Cinco Estrelas mostram expressivo enriquecimento dos elementos Sr, K, Rb, Ba e Th; expressivo empobrecimento em Ta e Nb em relação a Th e Ce; empobrecimento do P em relação Ce e Zr; e forte empobrecimento em Ti, Y e Yb. Os litotipos da Formação Vila Mandi possuem anomalias negativas de Ta e Nb, apesar de revelarem conteúdos mais elevados desses elementos, em relação a Formação Vila Mandi. Exibem ainda marcantes anomalias negativas de Sr, Ba, P, Ti e Yb, que podem refletir o fracionamento de feldspatos, apatita e óxidos de Fe e Ti nessas unidades. A evolução geológica da Formação Cinco Estrelas é vinculada a fases de vulcanismo efusivo de composição básica a intermediária e outro explosivo. Por sua vez, a Formação Vila Mandi tem evolução polifásica gerada por fissuras crustais que formam pares conjugados orientados nas direções NE–SW e NW–SE. A fase final envolveu vulcanismo efusivo que permitiu a acumulação de riolitos com foliação de fluxo vertical e subordinados diques de pórfiros graníticos e *stocks* de sienogranitos equigranulares que selaram as fissuras. Foram obtidas as idades U-Pb zircão em riolitos da Formação Vila Mandi de  $1889 \pm 4$  Ma e  $1983 \pm 18$  Ma, sugerindo que o magmatismo na área é polifásico, formado por pelo menos dois eventos vulcano-plutônicos distintos separados por aproximadamente 100 Ma.

Palavra-chave: Rochas Vulcânicas. Petrogênese. Geocronologia U-Pb. Santana do Araguaia. Cráton Amazônico.

## ABSTRACT

The Amazon Craton is part of the South American Platform and represents one of the most expressive pre-Cambrian lands in the world. This tectonic mega-unit is covered by volcanic effusive and explosive Paleoproterozoic sequences that cover approximately 1.500.000 km<sup>2</sup>. Near the district of Vila Mandi, extreme south of the municipality of São Félix do Xingu (PA), this event is represented by predominantly felsic volcano-plutonic sequences, with subordinate intermediate types and associated sediments, little studied, but which can be correlated to other portions of the Amazonian Craton. In this way the objective of the work is to contribute to the characterization of the volcano-plutonic system that occurs in the region, with respect to its petrographic, geochemical and geochronological aspects. Two effusive and explosive vulcano-plutonic units, named Formations Cinco Estrelas and Vila Mandi, were identified in the study area. The basal unit Cinco Estrelas Formation is composed of basic volcanic rocks to effusive and subordinately explosive intermediates of subalkaline composition and reveals at least two distinct facies: 1) facies of subaerial mass lava flow, represented by intermediate rocks with foliation of horizontal magmatic flow; And 2) Vulcanoclastic facies with laminated ash tuff. The upper unit, Vila Mandi Formation, of subalkaline composition is composed of five facies: 1) lava flow facies of massive rhyolites; 2) facies of equigranular granitoid stocks; 3) felsic composite ignimbrite associated with welded and unalloyed tuffs of ash; 4) Mass polymorphic facies and subordinate lapilli-tuff and tuff crystals; 5) facies of dikes with granite porphyries. The geochemical data of these rocks show that the rocks of the Cinco Estrelas Formation have SiO<sub>2</sub> content between 55.49 and 73.31% and K<sub>2</sub>O / Na<sub>2</sub>O ratios between 0.56 and 1.64. On the other hand, the volcanic ones of the Vila Mandi Formation comprise a more evolved suite, with SiO<sub>2</sub> contents between 69.10 and 78.31% and very high K<sub>2</sub>O / Na<sub>2</sub>O (0.24 - 111.66) ratios. The basal unit exhibits a predominantly calcium-alkaline character, slightly transitional between calcium-alkaline to shoshonite, exclusively metal-based composition, A/NK ratios between 1 and 2, as well as geochemical affinity with volcanic arches granitoids. However, the Vila Mandi Formation presents transitional characteristics between metaluminous and peraluminous with A/NK ratio between 1 and 1.5 and tectonic affinity similar to Cinco Estrelas Formation. Although some differences between the rocks of the two formations, marked by the contents of Rare Earth Elements (ETR), there are also many similarities. The rocks of the two formations exhibit an enrichment of the Light Rare Earth Elements (ETRL) relative to the Heavy Rare Earth Elements (ETRP). The facies of Lava Flow and Vulcanoclastic Formation of the Cinco

Estrelas Formation exhibit total low to moderate ETR contents (177.6 - 475.9 ppm), with average to non-existent Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.69-0.93$ ) For the two facies, thus characterizing a behavior compatible with the calcium-alkaline series. On the other hand, the lithotypes of the Vila Mandi Formation have more diversified patterns, probably linked to their polyphase evolution, with significant Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.35-0.71$ ) negative anomalies, pointing to the expressive fractionation of feldspars. In the normalized multi-element diagrams for MORB, the Cinco Estrelas Formation rocks show significant enrichment of the elements Sr, K, Rb, Ba and Th; Expressive impoverishment in Ta and Nb in relation to Th and Ce; Impoverishment of P in relation to Ce and Zr; And strong impoverishment in Ti, Y and Yb. The Vila Mandi Formation lithotypes have negative anomalies of Ta and Nb, although they reveal higher contents of these elements, in relation to the Vila Mandi Formation. They also show remarkable negative anomalies of Sr, Ba, P, Ti and Yb, which may reflect the fractionation of feldspar, apatite and Fe and Ti oxides in these units. The geological evolution of the Cinco Estrelas Formation is linked to phases of effusive volcanism of basic to intermediate composition and other explosive. On the other hand, the Vila Mandi Formation has polyphase evolution generated by crustal cracks that form conjugate pairs oriented in the NE-SW and NW-SE directions. The final phase involved effusive volcanism that allowed the accumulation of rhyolites with foliation of vertical flow and subordinate dikes of granitic porphyries and stocks of equigranular sienogranites that sealed the fissures. The U-Pb zircon ages were obtained in rhyolites of the Vila Mandi Formation of  $1889 \pm 4$  Ma and  $1983 \pm 18$  Ma, suggesting that the magmatism in the area is polyphase, formed by at least two distinct volcano-plutonic events separated by approximately 100 Ma.

Keywords: Volcanic rocks. Petrogenesis. U-Pb zircon dating. Santana do Araguaia. Amazonian Craton.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### Dissertação

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo .....	3
Figura 2 - Mapa Geológico de Vila Mandi .....	6
Figura 3 - Mapa Geológico de Vila Mandi. ....	7
Figura 4 - Imagem de radar da área de estudo com os pontos de afloramentos disponíveis para este trabalho.....	15

### Artigo

Figura 1. Mapa Geológico e de localização da região de Vila Mandi.....	20
Figura 2. Mapa geológico da região de Vila Mandi mostrando as formações Cinco Estrelas e Vila Mandi .....	24
Figura 3. Feições de campo representativas das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi .....	25
Figura 4. Aspectos petrográficos da Formação Cinco Estrelas.....	27
Figura 5. Aspectos petrográficos da Formação Vila Mandi.....	28
Figura 6. Aspectos microscópicos das alterações observadas na Formação Vila Mandi.....	31
Figura 7. A) Diagrama de classificação composicional; B) Diagrama AFM.....	31
Figura 8. A) Diagrama de classificação $K_2O$ vs $SiO_2$ . B) Diagrama de variação molar A/NK vs. A/CNK.....	31
Figura 9. Diagrama de variação dos elementos maiores vs sílica.....	35
Figura 10. Padrão dos ETR normalizados para o condrito de Nakamura.....	36
Figura 11. Padrão dos multi-elementos normalizados com relação ao MORB.....	37
Figura 12. Diagramas de afinidade tectônica para a Formação Cinco Estrelas e Formação Vila Mandi.....	38
Figura 13. Diagrama concórdia para os riolitos da Formação Vila Mandi.....	39
Figura 14. Diagrama de variação de elementos traço para as unidades estudadas.....	42

## LISTA DE TABELAS

### Dissertação

Tabela 1 - Dados geocronológicos de rochas vulcânicas e correlatas do Cráton Amazônico..10

### Artigo

Tabela 1. Dados geocronológicos de rochas vulcânicas e correlatas do Cráton Amazônico ..23

Tabela 2. Composição químicas das rochas representativas das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi .....32

Tabela 3 - Dados isotópicos U-Pb em zircão por LA-MC-ICP-MS das rochas vulcânicas da região de Vila Mandi .....40

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....	2
<b>2 GEOLOGIA</b> .....	4
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO.....	4
2.2 GEOLOGIA REGIONAL.....	5
2.3. VULCANISMO PROTEROZOICO NA AMAZÔNIA.....	9
2.4 GEOLOGIA DE VILA MANDI.....	10
<b>3 PROBLEMÁTICA</b> .....	13
<b>4 OBJETIVOS</b> .....	14
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS APLICADOS</b> .....	15
5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	15
5.2 AMOSTRAGEM.....	15
5.3 PETROGRAFIA.....	15
5.4 GEOQUÍMICA.....	16
5.5 GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO.....	17
<b>6 VULCANO-PLUTONISMO PALEOPROTEROZOICO ASSOCIADO AO DEPÓSITO DE FOSFATO SERRA DA CAPIVARA, REGIÃO DE VILA MANDI (PA), SUL DO CRÁTON AMAZÔNICO: GEOQUÍMICA E GEOCRONOLOGIA</b> .....	19
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	52
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

O Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981) encontra-se inserido na Plataforma Sul-americana e representa um dos mais expressivos terrenos pré-cambrianos do mundo. Apesar do grande potencial econômico que possui, ainda permanece pouco estudado, especialmente na área que corresponde ao território brasileiro. Esta mega-unidade tectônica é recoberta por sequências vulcânicas efusivas e explosivas que datam do final do Paleoproterozoico, representando um evento de caráter heterogêneo efusivo e explosivo que recobre aproximadamente 1.500.000 km<sup>2</sup> (Pessoa *et al.* 1977, Lamarão *et al.* 2002, Ferron *et al.* 2006, Juliani & Fernandes 2010, Misas 2010, Tokashiki 2015), desconsiderando-se as bacias sedimentares dos rios Amazonas e Solimões (Caputo *et al.* 1972).

Distante aproximadamente 90 km a oeste do distrito de Vila Mandi, localizado no extremo sul do município de São Félix do Xingu, fronteira PA/MT, este evento encontra-se representado por sequências vulcano-plutônicas predominantemente félsicas, bem como tipos intermediários e sedimentos associados, revelando texturas e estruturas excepcionalmente bem preservadas e pouco estudadas. Estas rochas foram cartografadas apenas na escala de 1:1.000.000 e pouco se conhecia a respeito das relações estratigráficas e evolução geológica (Faraco *et al.* 2004, Vasquez *et al.* 2008). Este quadro mudou muito recentemente com o desenvolvimento de trabalhos de detalhe que revelaram se tratar de um sistema vulcano-plutônico complexo e correlacionável aqueles que ocorrem nas regiões de São Félix do Xingu e Província Mineral do Tapajós (Fernandes *et al.* 2016, Vieira 2016). Complementarmente, essas unidades vulcânicas foram invadidas pelo Complexo Máfico-carbonatítico Santana (Chiquini 2011, Gonçalves 2016), o qual produziu mineralização de fosfato relacionada a perfil saprolítico resultado do intemperismo dessas rochas carbonatíticas ricas em apatita (Lagler *et al.* 2014).

Diante desse quadro, esta dissertação objetivou um estudo mais detalhado acerca das características petrográficas, geoquímicas e geocronológicas do sistema vulcano-plutônico da região de Vila Mandi, bem como compará-lo com as ocorrências paleoproterozoicas melhor estudadas em outras porções do Cráton Amazônico, como na região central de São Félix do Xingu (Juliani & Fernandes 2010, Fernandes *et al.* 2011, Cruz *et al.* 2015, Cruz *et al.* 2016) e Província Mineral do Tapajós (Lamarão *et al.* 2002, Juliani *et al.* 2005, Juliani *et al.* 2014, Misas 2015, Tokashiki 2015).

O presente trabalho representa um esforço conjunto entre os Grupos de Pesquisa *de Metalogênese e Geologia Isotópica* do IG-UFPA, e do Grupo de Pesquisa *Interação fluido-*

*rocha e alteração hidrotermal em processos petrogenéticos e metalogenéticos* do IG-USP, liderado e coordenado pelo Prof. Caetano Juliani, do qual também fazem parte o Geólogo Bruno Lagler e o Prof. Carlos Marcello Dias Fernandes.

A dissertação foi elaborada de acordo com o modelo de integração de artigo científico. O documento é composto por 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta um texto introdutório, que aborda o local e acesso à área de estudo.

O capítulo 2 apresenta o contexto geotectônico, geologia regional, uma síntese do vulcanismo Proterozoico na Amazônia e a geologia da região de Vila Mandi. Os capítulos 3, 4 e 5 compreendem a justificativa, objetivos, materiais e métodos aplicados neste trabalho. O capítulo 6 constitui o corpo central da dissertação. Inclui artigo a ser submetido a revista ainda a ser definida, intitulado “*Vulcano-plutonismo paleoproterozoico associado ao depósito de fosfato Serra da Capivara, região de Vila Mandi (PA), Sul do Cráton Amazônico: Geoquímica e Geocronologia*”. Nesse artigo foram abordados a petrologia, geoquímica e geocronologia das rochas vulcânicas da região de estudo.

O capítulo 7 compreende as considerações finais, contendo um texto conclusivo dos resultados alcançados durante o desenvolvimento da dissertação e o capítulo das referências bibliográficas do corpo da dissertação.

## 1.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A região de Vila Mandi está inserida próximo à divisa entre os Estados do Pará e Mato Grosso, legalmente incluída no extremo sul do município de São Félix do Xingu, distante aproximadamente 90 km a oeste do distrito de Vila Mandi, município de Santana do Araguaia (Fig. 1). O acesso à área de estudo a partir de Belém é realizado pelas rodovias BR-155 e BR-158 até o distrito de Vila Mandi. A partir deste ponto, o acesso é feito por vias secundárias privadas que ligam fazendas e povoados.

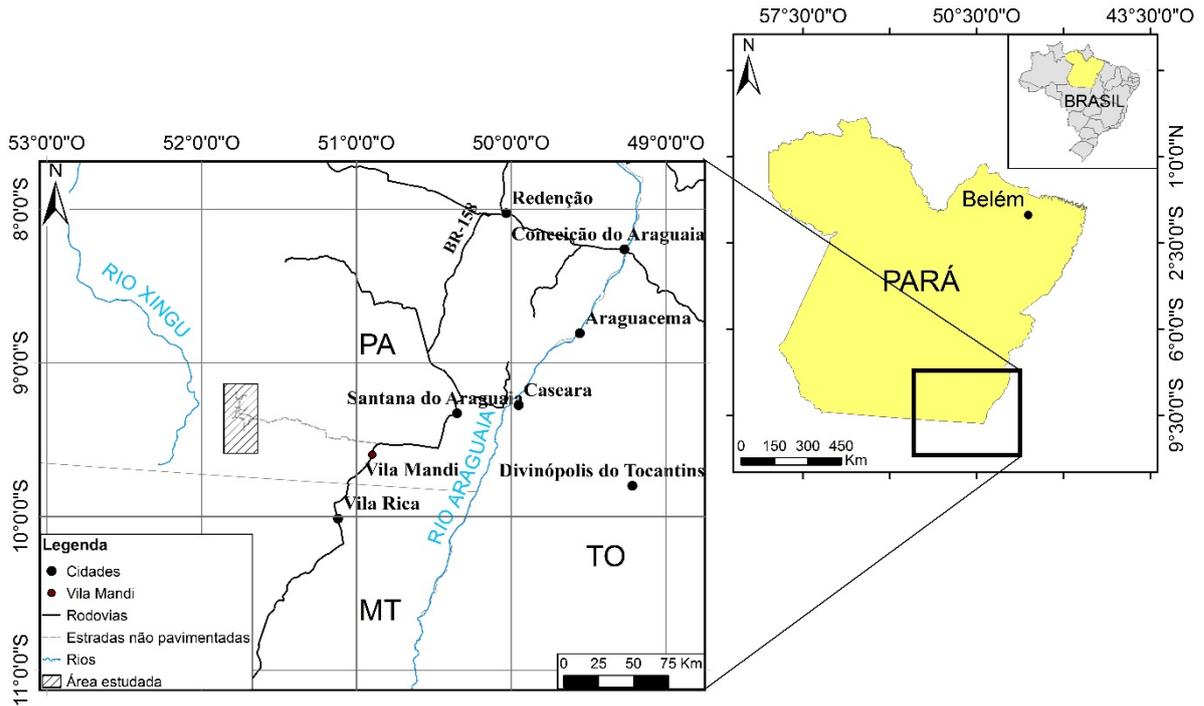


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, assim como suas principais vias de acesso. Fonte: (IBGE 2013).

## 2 GEOLOGIA

### 2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

A área de estudo está situada no contexto tectônico do Cráton Amazônico (Almeida *et al.* 1981). Essa megaunidade foi inicialmente considerada, com base em dados estruturais e geofísicos, uma grande plataforma arqueana retrabalhada e reativada durante o Paleoproterozoico no evento Transamazônico (Hurley *et al.* 1967). Com o avanço do conhecimento científico, em especial com a obtenção de dados geocronológicos e isotópicos, a região foi dividida em províncias geocronológicas, geneticamente relacionadas a eventos de acreção continental em torno de um núcleo arqueano representado pela Província Mineral de Carajás (Santos *et al.* 2000, Tassinari & Macambira 2004).

A integração dos dados geológicos, geocronológicos e metalogenéticos obtidos até então na porção sul do Cráton Amazônico para as várias ocorrências de vulcanismo cálcio-alcalino, sugeriu a existência de um possível zonamento metalogenético formado entre 2,0 e 1,88 Ga nessa unidade tectônica (Juliani *et al.* 2009). Esse modelo sugere que a região pode ter sido formada por uma orogênese oceano-contidente gerada por uma zona de subducção contínua para norte, orientada na direção EW. Nesse contexto, a ocorrência das associações mais jovens (~ 1,88 Ga) pode ser explicada pela mudança no ângulo da placa subductada conhecida como *flat subduction* (Fernandes *et al.* 2011). Assim, o vulcano-plutonismo exclusivamente crustal de ~ 1,87 Ga representado pela Formação Santa Rosa e os granitoides estaníferos de ~ 1,86 Ga da Suíte Intrusiva Velho Guilherme (Teixeira *et al.* 2002) estariam vinculados a um evento distensivo que se seguiu ao término do evento orogênico que se estendeu até o Mesoproterozoico, identificado em várias regiões do Cráton Amazônico (Brito Neves 1999).

Estudos geofísicos e geológicos recentes corroboram essa interpretação na Província Mineral do Tapajós (Carneiro *et al.* 2013, Juliani *et al.* 2014). O trend regional NW-SE nesta província está relacionado com as principais falhas e zonas de cisalhamento transcorrente que controlaram a colocação de associações vulcano-plutônicas félsicas pós-tectônicas, enquanto estruturas EW são significativas na porção norte. Essas estruturas apresentam características aeromagnetométricas que sugerem maior penetrabilidade crustal. A característica de maior profundidade das estruturas EW, inferida a partir de campo magnético residual, revela a direção mais provável dos cinturões móveis e arcos magmáticos mais antigos gerados na porção sul do Cráton Amazônico. Dados geocronológicos recentemente obtidos para esta

região permitiram a definição de novos arcos magmáticos, conhecidos como Arcos Tapajônicos (Misas 2015, Tokashiki 2015).

## 2.2 GEOLOGIA REGIONAL

Este trabalho utilizará os dados existentes no mapa geológico na escala 1:1.000.000 da Folha SC.22–Tocantins, parte integrante da “Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo”, elaborada por Faraco *et al.* (2004), bem como informações geológicas e o mapa Geológico do Estado do Pará preparado por Vasquez *et al.* (2008). Estes apresentam todas as unidades existentes na área de estudo, entretanto com pouco detalhe diante da falta de trabalhos detalhados e sistemáticos na área (Figs. 2 e 3).

Faraco *et al.* (2004) definiram seis unidades para a região (Complexo Xingu, Suíte Intrusiva Teles Pires, Suíte Intrusiva Rio Dourado, Grupo Iriri, Formação Gorotire e Formação Cubencranquém); ao passo que Vasquez *et al.* (2008) definiram apenas quatro (Formação Triunfo, Grupo Iriri, Granitos Tipo-A Indiferenciados e Complexo Santana do Araguaia).

O Complexo Xingu representa o embasamento da região, composto por ortognaisses e migmatitos, de composições predominantemente tonalíticas (Araújo & Maia 1991). Santos (2003) ressaltaram que esta unidade necessita de estudos localizados de maior detalhe, pois suas idades variam de  $> 3,0$  até  $2,0$  Ga e, portanto, agrupam rochas formadas em contextos distintos na mesma unidade.

A Suíte Intrusiva Rio Dourado foi descrita pela primeira vez por Cunha *et al.* (1981) como granodioritos, dioritos, granófiros, microgranitos e adamelitos em associação comagmática com as vulcânicas da Formação Iriri. Esses mesmos autores a englobaram no Supergrupo Uatumã (Pessoa *et al.* 1977). Barros *et al.* (2005) observaram que o contato entre a Suíte Intrusiva Rio Dourado e o Grupo Iriri é, em geral, difuso, sugerindo que as rochas são comagmáticas. Estas evidências de campo são comprovadas pela similaridade das idades obtidas de  $1890 \pm 11$  Ma para Suíte Intrusiva Rio Dourado e  $1880 \pm 43$  Ma para as vulcânicas do Grupo Iriri (Pinho *et al.* 2004). Barros *et al.* (2011) classificaram como rochas predominantemente sienograníticas com uma pequena variação para monzogranítica. Segundo esses mesmos autores os granitoides dessa Suíte podem ser divididos em: biotita granito, biotita granito com anfibólio e granito granofírico. É cortada por veios de quartzo em várias direções e contém xenólitos de rochas mais antigas, representadas principalmente por rochas máficas e mesocráticas.

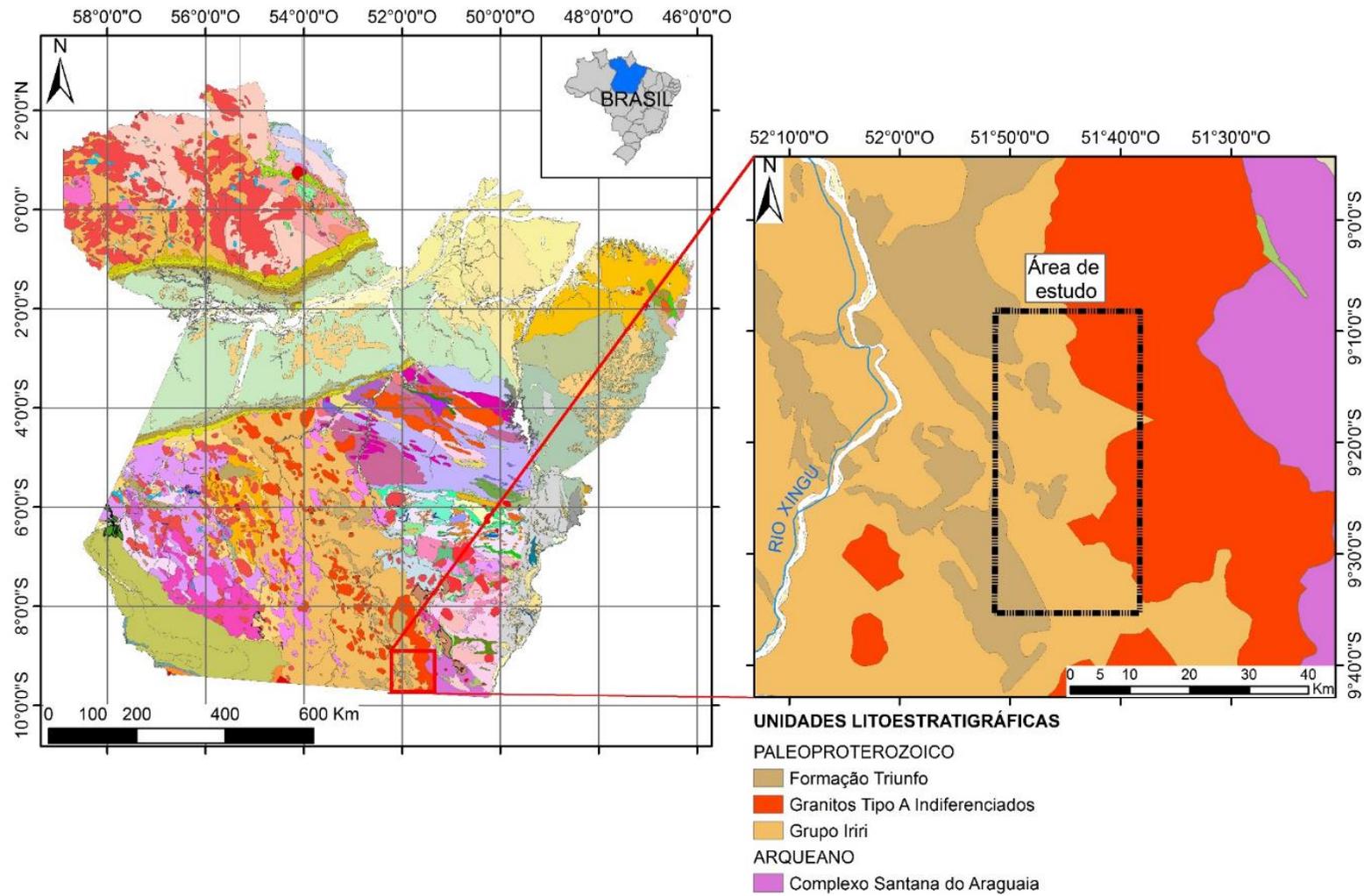


Figura 2 - Mapa Geológico da região de Vila Mandi.  
 Fonte: Modificado de Vasquez *et al.* (2008).

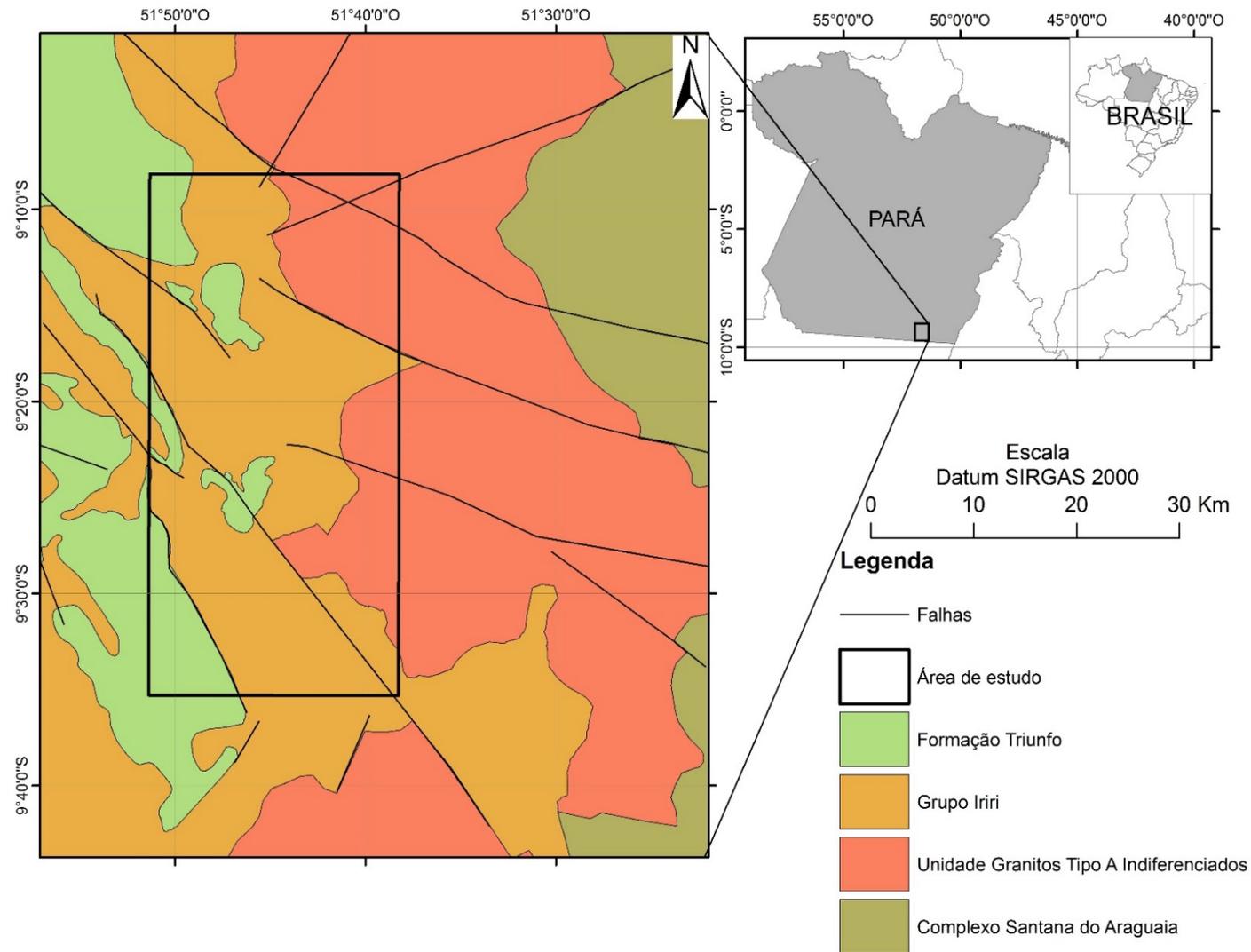


Figura 3: Mapa Geológico da região de Vila Mandi.  
Fonte: Modificado de Faraco *et al.* (2004).

Forman *et al.* (1972) reuniram rochas vulcânicas e vulcanoclásticas, predominantemente félsicas, que ocorrem extensivamente no Domínio Iriri-Xingu, nos interflúvios dos rios Iriri e Curuá, estendendo-se para leste até o Rio Xingu, e no Domínio Tapajós, na Formação Iriri. Em Silva *et al.* (1974) foram incluídos nesta unidade riolitos, dacitos, piroclásticas, ignimbritos, granófiros e conglomerados. Pessoa *et al.* (1977) elevaram esta unidade à categoria de grupo, subdividindo-o nas formações Salustiano e Aruri. De acordo com Bahia & Quadros (2000), na Formação Salustiano há predominância de riolitos, riodacitos e dacitos, pórfiros e porfiríticos, geralmente isotrópicos com fenocristais e microfenocristais de feldspato potássico, plagioclásio, quartzo, biotita e hornblenda, em matriz afanítica ou microcristalina. Vasquez *et al.* (1999) obtiveram uma idade Pb-Pb em zircão de  $1888 \pm 2$  Ma para os riolitos dessa formação. A Formação Aruri é constituída de ignimbritos, brechas vulcânicas, tufos félsicos, conglomerados, arenitos e siltitos vulcânicos. A maioria dos ignimbritos exibe orientação dos fragmentos líticos e de cristais, principalmente de feldspato potássico e quartzo, em uma matriz afanítica. As brechas apresentam fragmentos líticos subangulosos de riolitos, andesitos, tufos félsicos e intermediários e microgranitos. Os tufos félsicos são de cristal, litoclásticos/vitroclásticos e cineríticos, raramente exibem estratificação (Vasquez *et al.* 2008).

Vasquez *et al.* (2008) optaram pela designação informal de Granitos tipo A Indiferenciados para boa parte da unidade definida como Formação Iriri por Faraco *et al.* (2004). Esses corpos graníticos foram individualizados, na porção centro-sul do Pará, por sensores remotos e imagens aerogeofísicas, como corpos graníticos circulares com características semelhantes à dos granitoides tipo-A da região. Alguns corpos dessa unidade que afloram nos rios Iriri e Curuá são leucosienogranitos com feldspato potássico, isotropos, equi- a inequigranulares, com textura fina a grossa, variando de microgranitos a granitos porfiríticos. Também foi observado sienos e monzogranitos com biotita e hastingsita, inequigranulares e porfiríticos com textura rapakivi, além de subordinados quartzo sienitos com anfibólio e biotita.

Os granitoides da Suíte Intrusiva Teles Pires (Rizzoto 2004) ocorrem introduzidos nas rochas do Complexo Xingu. Tal suíte é composta por uma variedade de granitos, com assinatura cálcio-alcalina de alto potássio e idade de cristalização de  $1757 \pm 16$  Ma (Santos 2003).

Barbosa *et al.* (1986) descreveram arcóseos, *cherts* e siltitos na Serra Cubencranquém, reunidos na Formação Cubencranquém, que recobre discordantemente granitoides anorogênicos paleoproterozoicos. Pastana (1980) identificou a contribuição de

material vulcânico em arenitos da Formação Cubencranquém. A contribuição de material vulcânico retrabalhado e a intercalação com material piroclástico indicam que a Formação Cubencranquém é contemporânea ou bem próxima temporalmente ao vulcano-plutonismo anterior; o que poderia relacionar esta unidade à Formação Triunfo. No entanto, é mantida a distinção entre estas duas unidades, em função da inexistência de estudos que comprovem esta correlação.

Em posição estratigráfica duvidosa em relação aos centros vulcano-plutônicos anteriormente descritos, encontra-se a Formação Gorotire. Esta foi inicialmente definida por Barbosa (1966) sendo composta por arenitos. Porém, foram também incluídos siltitos, conglomerados, arcóseos e grauvacas (Silva *et al.* 1974, Montalvão & Bezerra 1980, Cunha *et al.* 1981). Barbosa *et al.* (1986) observaram ainda arenitos arcoseanos alterados, de granulação média a grossa, e quartzo arenitos de granulação média.

A Formação Triunfo (Silva *et al.* 1974) mostra-se assentada em discordância angular sobre as rochas do Complexo Xingu e unidades vulcano-plutônicas. Segundo Vasquez *et al.* (2008) é composta de quartzo arenitos, arenitos líticos e arenitos arcoseanos subordinados, com conglomerados polimíticos e siltitos associados. Os arenitos geralmente apresentam granulação média a fina, arredondamento dos grãos variados, seleção moderada com cimentos silicosos e ferruginosos. Nos arenitos líticos os clastos são de *chert* e rocha vulcânica, e nos arenitos arcoseanos, os grãos de feldspatos apresentam variado grau de argilização. Os siltitos são avermelhados e endurecidos, e por vezes, hospedam concreções argilosas centimétricas. Essas rochas foram afetadas por tectônica exclusivamente rúptil, com falhas de direção NE-SW e NW-SE, que perturbaram a horizontalidade das camadas, com acamamento sub-horizontal e mergulhos médios de 20° a 30° para NE e SW. Não existem datações nessa unidade e, embora as relações estratigráficas dessa formação ainda não estejam bem definidas, admite-se que a sedimentação continental sucedeu o vulcano-plutonismo paleoproterozoico anteriormente descrito.

### 2.3. VULCANISMO PROTEROZOICO NA AMAZÔNIA

Durante o Paleoproterozoico o Cráton Amazônico foi palco de um intenso magmatismo. Estas manifestações vulcânicas exibem caráter efusivo e explosivo, com composições intermediárias a ácidas, ocorre em uma grande extensão, recobrando aproximadamente 1.500.000 km<sup>2</sup>. Em decorrência da grande área de exposição, este magmatismo recebe distintas denominações regionais, dependendo da área de ocorrência,

sendo agrupadas, de forma genérica, em Supergrupo Uatumã (Santos *et al.* 1975); este supergrupo é considerado uma das unidades mais expressivas do Cráton, mas que ainda carece de estudos mais detalhados. Na região do Xingú, as unidades vulcânicas foram denominadas de Grupo Uatumã (Vasquez *et al.* 2008, Macambira & Vale 1997); na região do Tapajós, Grupo Iriri (Santos *et al.* 1975, Pessoa *et al.* 1977); na região do Pitinga no Amazonas e noroeste do Pará, Grupo Iricoumé (Montalvão 1975, Oliveira *et al.*, 1975); e por fim, no estado de Roraima, Grupo Surumu (Montalvão 1975). A Tabela 1 sintetiza os principais dados geocronológicos das rochas vulcânicas e correlatas aflorantes no Cráton Amazônico.

Tabela 1 - Dados geocronológicos de rochas vulcânicas e correlatas do Cráton Amazônico referentes a região de São Félix do Xingú, Tapajós, Roraima e Pitinga.

Área de ocorrência	Rocha	Idade (Ma)	Método	Referência
<b>Região de São Félix do Xingu</b>				
Supergrupo Uatumã	Andesito e riolito	1875 ± 5	Pb-Pb (Zr)	Teixeira <i>et al.</i> (2002)
Formação Sobreiro	Dacito	1880 ± 6	Pb-Pb (Zr)	Pinho <i>et al.</i> (2006)
Formação Santa Rosa	<i>Ash tuff</i>	1884 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Fernandes <i>et al.</i> (2011)
Formação Santa Rosa	Riolito	1879 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Fernandes <i>et al.</i> (2011)
Formação Iriri	Granito porfíritico	1887 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Pinho <i>et al.</i> (2006)
Formação Iriri	Granito porfíritico	1888 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Pinho <i>et al.</i> (2006)
Formação Iriri	Granito porfíritico	1881 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Pinho <i>et al.</i> (2006)
Formação Iriri	Granito porfíritico	1881 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Pinho <i>et al.</i> (2006)
Maciço Antônio Vicente	Granito	1867 ± 4	Pb-Pb (Zr)	Teixeira <i>et al.</i> (2002)
Maciço Serra da Queimada	Granito	1882 ± 12	Pb-Pb (Zr)	Pinho <i>et al.</i> (2006)
<b>Região da Província Mineral do Tapajós</b>				
Grupo Iriri	Riolito	1888 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Vasquez <i>et al.</i> (1999)
Formação Vila Riozinho	Traquito	1998 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Lamarão <i>et al.</i> (2002)
Formação Moraes de Almeida	Riolito	1890 ± 6	Pb-Pb (Zr)	Lamarão <i>et al.</i> (2002)
Granito Maloquinha	Monzogranito	1880 ± 9	Pb-Pb (Zr)	Lamarão <i>et al.</i> (2002)
<b>Região de Pitinga e Roraima</b>				
Grupo Iricoumé	Dacito	1966 ± 9	U-Pb (Zr)	Schobbenhaus <i>et al.</i> (1994)
Grupo Iricoumé	Riolito	1882 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Ferron <i>et al.</i> (2006)
Grupo Iricoumé	Riodacito	1885 ± 8	Pb-Pb (Zr)	Ferron <i>et al.</i> (2006)
Grupo Iricoumé	Ignimbrito	1890 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Ferron <i>et al.</i> (2006)
Grupo Iricoumé	Andesito porfíritico	1892 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Ferron <i>et al.</i> (2009)
Grupo Iricoumé	Riolitos	1882 ± 11	Pb-Pb (Zr)	Marques <i>et al.</i> (2014)
Granito Rastro	Sienogranito	1882 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Ferron <i>et al.</i> (2006)
Granito Simão	Biotita Granito	1882 ± 4	Pb-Pb (Zr)	Ferron <i>et al.</i> (2006)
Granito Bom Futuro	Sienogranito	1882 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Ferron <i>et al.</i> (2006)
Granito Alto Pitinga	Monzogranito	1888 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Ferron <i>et al.</i> (2006)

Zr = zircão

## 2.4 GEOLOGIA DE VILA MANDI

Chiquini (2011) descreveu na área de estudo associações litológicas vulcano-plutônicas genericamente agrupadas no Grupo Uatumã, objeto de estudo dessa Dissertação de Mestrado, muito semelhantes e correlatas às das formações Sobreiro (não cartografada) e Santa Rosa (Juliani & Fernandes 2010) na região de São Félix do Xingu, embora novos dados geológicos, geoquímicos e isotópicos mais refinados sejam necessários para confirmação

definitiva. Foram reconhecidos na área derrames de basaltos e andesitos amigdaloidais, riolitos, ignimbritos e diques de pórfiro granítico, rochas plutônicas ácidas a intermediárias, brechas e sedimentos siliciclásticos.

Os litotipos acima descritos são invadidos pelo Complexo Máfico-Carbonatítico Santana, potencialmente do Paleoproterozoico, que gerou o depósito supérgeno fosfático Serra da Capivara (Lagler *et al.*, 2014, Gonçalves 2016). Este complexo é formado por piroxenito, ijolito, basalto alcalino, sienito e carbonatito alaskítico que invadem as formações Cinco Estrelas e Vila Mandi; Fluxos preservados de unidades carbonatíticas piroclásticas, incluindo lapilli-tufos acrescionários, brechas polimíticas proximais e depósitos epiclásticos também estão presentes em torno desse magmatismo carbonatítico. Esta unidade apresenta relevo plano, com afloramentos geralmente na forma de blocos isolados. Nas rochas vulcanoclásticas que ocorrem nesta unidade, ocorrem clastos de riolitos e andesitos derivados das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, e sugerem uma possível relação intrusiva deste depósito nas sequências vulcano-plutônicas estudadas.

Mais recentemente (Fernandes *et al.* 2016) identificou pelo menos dois centros vulcano-plutônicos efusivos e explosivos muito bem preservados, denominados de Formação Cinco Estrelas e Formação Vila Mandi. Estudos mais detalhados destes litotipos realizados por Vieira (2016) mostraram que a estratigrafia e estilos de erupção que ocorrem na área tem características semelhantes a do vulcanismo que ocorre em outras porções do Cráton Amazônico; a exemplo da região de São Félix do Xingu (Juliani & Fernandes 2010), o Grupo Iriri na região da Província Mineral do Tapajós (Juliani *et al.* 2005), e Grupo Iricoumé na Província Estanífera de Pitinga (Ferron *et al.* 2010).

A unidade basal, corresponde à Formação Cinco Estrelas e ocorre geralmente na forma de pequenos lajedos e blocos isolados com pequena continuidade lateral (Vieira 2016). O autor identificou duas fácies na unidade, são elas: 1) fácies de fluxo de lava maciça subaérea, representada por andesitos com foliação de fluxo e subordinados dacitos porfiríticos ou não associados; e 2) fácies vulcanoclástica que compreende tufo de cinzas laminado e lapilli-tufos subordinados, topograficamente relacionados a fácies anterior (Vieira 2016). A Formação Vila Mandi aparece como grandes lajedos, serras e morrotes, ocorre em grande proporção na área e corresponde a pelo menos cinco fácies diferentes: 1) a fácies fluxo de lava abriga riolitos e dacitos, exibindo foliação de fluxo e grandes diques de riolito bandado. Comumente ocorrem alterações hidrotermais do tipo seletiva e fissural e por vezes pervasiva, assim como silicificação e carbonatação com zonas ricas em pirita; 2) a fácies *stocks* de granitoides equigranulares é intrusiva nos riolitos e dacitos e corresponde a biotita sienogranitos

equigranulares. A mineralogia desta fácies é semelhante às das vulcânicas da unidade, podendo representar um correspondente plutônico do sistema; 3) a fácies ignimbrito félsico ocorre em pequena proporção, aparece fortemente soldados ou não, exibindo porfiroclastos de diferente composições, rotacionados pelo fluxo magmático; 4) a fácies vulcanoclástica abriga brechas polimíticas maciça com clastos angulosos a subangulosos de composições variadas, com subordinados lapilli-tufo e tufo de cristais; 5) a fácies de diques com pequenos *stocks* aparece em pequena proporção e compreende pórfiros graníticos com mineralogia similar aos riolitos, porém a presença de cristais mais desenvolvidos sugere diferentes níveis crustais para a unidade, mas com origem magmática similar (Vieira 2016).

### 3 PROBLEMÁTICA

Em várias regiões do Cráton Amazônico há províncias com potencial metalogenético muito importante para o país, a exemplo das Províncias Mineraias de Carajás e do Tapajós, bem como as Províncias Estaníferas de Pitinga e do Sul do Pará. Como exemplo, a região do Tapajós ainda é muito carente de estudos de detalhe com diferentes enfoques parcialmente justificado pela sua densa cobertura vegetal, porém nos últimos anos houveram avanços em pesquisas sistemáticas na região e resultaram na identificação de mineralizações epitermais de Au e Ag *high-, intermediate- e low-sulfidation* paleoproterozoicas em vulcânicas félsicas cálcio-alcálicas do Grupo Iriri (Juliani *et al.* 2005, Juliani *et al.* 2014, Tokashiki 2015) e mineralizações do tipo pórfiro de Au(Cu) e Mo (Misas 2010, Juliani *et al.* 2014, Misas 2015, Bettencourt *et al.* 2016). Na região de São Félix do Xingu estudos estratigráficos, petrológicos e mineralógicos detalhados mostraram unidades vulcano-plutônicas hidrotermalmente alteradas e com evidências de mineralização aurífera e potencialidades para epitermais e pórfiro (Lagler 2011, Lagler *et al.* 2011, Cruz *et al.* 2015, Cruz *et al.* 2016).

Sabe-se que houve uma evolução considerável do conhecimento sobre a gênese de alguns depósitos mineraias e sua relação com o magmatismo proterozoico do Cráton Amazônico nos últimos anos (Monteiro *et al.* 2008, Bettencourt *et al.* 2016), mas outras áreas desta unidade tectônica ainda são mal conhecidas e não mereceram mapeamentos geológicos mais pormenorizados e consistentes, especialmente a ampla cobertura vulcano-plutônica ocorrente, visando a formulação de cartas geológicas mais detalhadas, modelos geológicos evolutivos consistentes, definição da ambiência tectônica de geração e que, de forma integrada, possam contribuir para as iniciativas de prospecção mineral. Dentre elas, está a região de Vila Mandi e adjacências. Nos últimos sete anos essa porção tem atraído vários pesquisadores em função da primeira descoberta de rochas carbonatíticas associadas ao sistema vulcano-plutônico paleoproterozoico, bem como de mineralizações de fosfato supergênico pela equipe de geólogos da MbAC Fertilizer Corporation.

Em razão disso, faz-se necessário o refinamento dos estudos petrográficos, geoquímicos e geocronológicos dessas rochas que ocorrem na região de Vila Mandi e adjacências, assim como a integração, análise e interpretação dos dados visando compreender melhor a sua evolução magmática e petrogenética e compará-las com exemplos já pormenorizados em várias outras áreas do Cráton Amazônico.

#### 4 OBJETIVOS

O objetivo central deste trabalho foi contribuir com a caracterização do sistema vulcano-plutônico que ocorre na região de Vila Mandi, no que diz respeito aos seus aspectos petrográficos, geoquímicos e geocronológicos. Diante desse quadro, os objetivos específicos desta pesquisa foram:

- ✓ Caracterização petrográfica das unidades vulcânicas da região de Vila Mandi;
- ✓ Inferir com base na geoquímica de rocha total a tipologia, natureza, afinidade geoquímica tectono-magmática e as séries magmáticas das rochas em questão, bem como compreender mais claramente sua evolução petrogenética;
- ✓ Comparação das suas assinaturas geoquímicas com as rochas vulcânicas de outras localidades, em especial, nas proximidades do município de São Félix do Xingu e da Província Mineral do Tapajós;
- ✓ Realizar análises geocronológicas U-Pb em zircão por LA-ICP-MS nessas unidades e comparar estes resultados com aqueles de vulcânicas de outras localidades, em especial daquelas que ocorrem nas proximidades.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS APLICADOS

### 5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Para a confecção deste trabalho fez-se necessário um extenso levantamento bibliográfico referente à geologia da área de estudo, que abrangeu a leitura de artigos, dissertações, teses e livros. Esta pesquisa compreendeu tópicos que tratam da geologia regional do Cráton Amazônico, em especial trabalhos que abordam as características das rochas vulcânicas na região e suas analogias com o seu vulcanismo paleoproterozoico. Além disso, foi realizada uma pesquisa sobre os fundamentos teóricos dos métodos geocronológicos a serem utilizados, assim como temas específicos, atinentes à evolução, petrogênese, geoquímica e geocronologia de rochas vulcânicas.

### 5.2 AMOSTRAGEM

As campanhas de amostragem na área de estudo foram realizadas pelo co-orientador deste trabalho e contou com o fornecimento de mapas geológicos, pontos de afloramento, amostras e descrições de furo de sondagem contidos no banco de dados da empresa MbAC Fertilizer Corporation, que também contou com a participação do seu Geólogo MsC. Bruno Lagler para acompanhamento nos afloramentos. Foram desenvolvidas duas etapas de campo na área de estudo entre 14 e 26 de outubro de 2014 e 05 a 13 de junho de 2016. Este projeto conta com mais de 500 pontos de afloramento (Fig. 4). Durante os trabalhos de campos foram descritos aproximadamente 130 pontos em seus aspectos litológicos, estruturais e estratigráficos, com a coleta sistemática de aproximadamente 70 amostras dos principais litotipos identificados.

### 5.3 PETROGRAFIA

Foram realizados exames meso e microscópios nas amostras de rochas vulcânicas e plutônicas, buscando a identificação e descrição sistemática dos minerais (Deer *et al.* 1992), bem como a descrição textural sistemática para classificação e nomenclatura das rochas conforme estabelecido pela IUGS e literaturas específicas de rocha vulcânicas (Fisher & Schmincke 1984, Le Maitre 2002, Gifkins *et al.* 2005). Dos 130 pontos descritos em campo, foram selecionados e coletadas 70 amostras para análise mais detalhadas, das quais foram selecionadas 31 para estudos petrográficos nessa dissertação.

#### 5.4 GEOQUÍMICA

Foram feitas análises químicas representativas em 20 amostras dos litotipos encontrados na região de estudo, as quais envolvem elementos maiores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), traço (Ba, Rb, Sr, Zr, Nb, Y, Ti, Ta, U, K, P e Ni), terras raras (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Yb e Lu). Foram selecionadas 20 amostras para análise geoquímica, sendo que a preparação das amostras para a análise química, envolveu a trituração, pulverização e quarteamento, visando-se obter uma boa representatividade do material. Essas análises foram realizadas no *Acme Analytical Laboratories Ltd.* (Vancouver, Canadá). Os elementos maiores e menores foram analisados por ICP-ES, e os traço por ICP-MS. Estas análises foram utilizadas para a caracterização petrogenética e classificação litogeoquímica dos litotipos estudados em conjunto com a petrografia e dados geológicos.

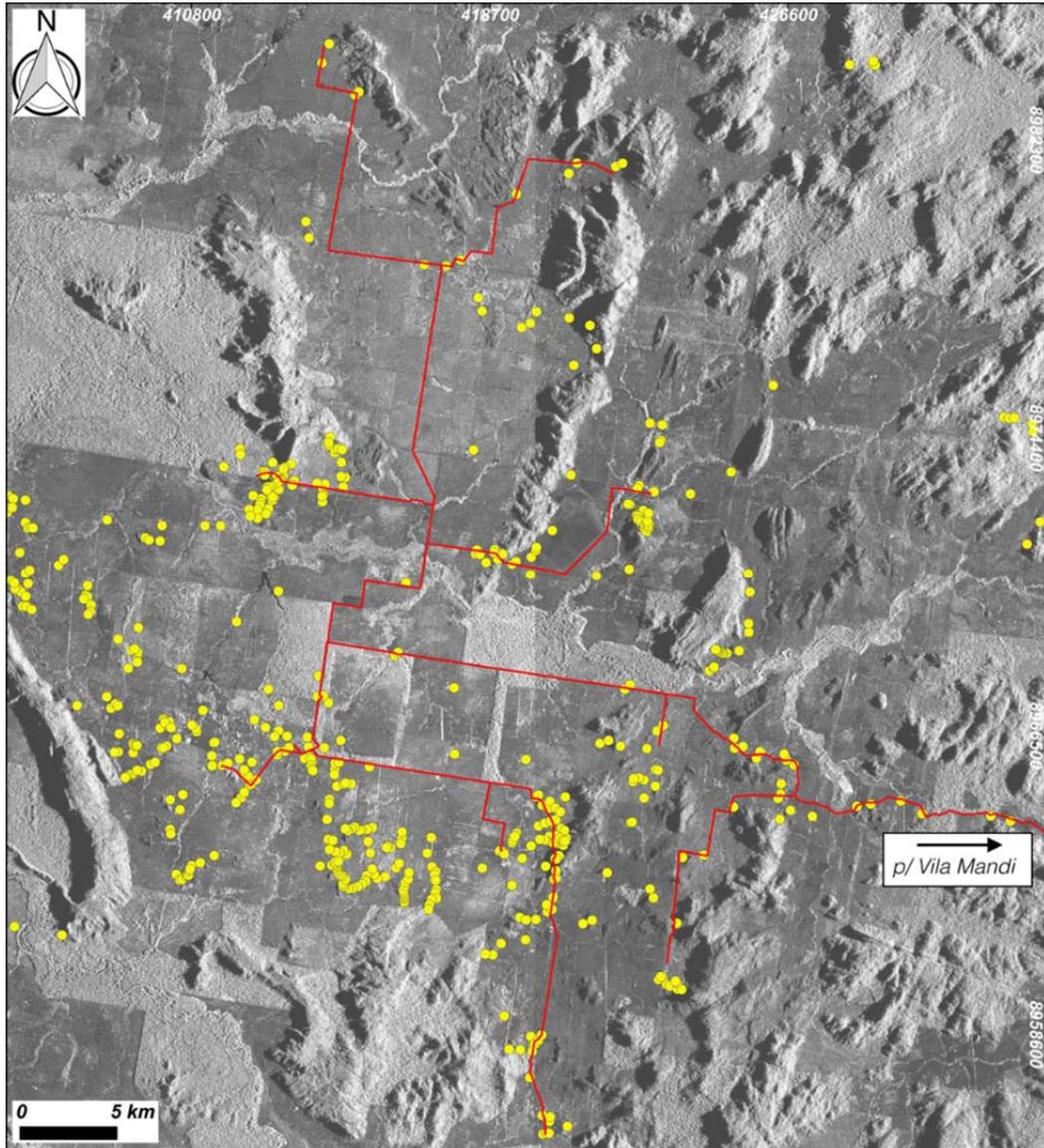


Figura 4 - Imagem de radar R99 da área de estudo com os pontos de afloramentos disponíveis para este trabalho. Estradas vicinais de acesso estão destacadas em vermelho.  
Fonte: Vieira (2016).

### 5.5 GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO

Para as análises U-Pb em zircão por LA-ICP-MS foram utilizados concentrados, extraídos de aproximadamente 5 a 10 kg de amostras. Foram selecionadas para datação geocronológica duas amostras de quartzo-plagioclásio-feldspato potássico riolito fírico (SA-43 e SA-52), da fração granulométrica 180-125 $\mu$ m. O princípio básico para representação do sistema U-Pb baseia-se na curva de referência Concórdia, a qual mostra em diagrama de eixos coordenados  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  (Wetherill 1956), as variações de razões isotópicas em função do tempo. Os pontos com razões localizadas fora da curva são designadas de discordantes.

Para a preparação das amostras foram seguidas etapas como a britagem/fragmentação, moagem, separação em frações granulométricas, separação magnética e concentração de minerais pesados por densidade. Os cristais de zircão foram selecionados em lupa binocular; e os cristais sem feições metamíticas visíveis, com poucas inclusões ou fraturas, foram colados em pastilhas com resina epóxi devidamente polidas, obtidas por fotomicrografias e imagens de catodoluminescência (CL) usando microscópio eletrônico de varredura (MEV). A obtenção das imagens por catodoluminescência foram realizadas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

A datação U-Pb em zircão por espectrometria de massa ICP-MS com ablação a laser (LA-ICP-MS) foi realizada no Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA (Pará-Iso) com o objetivo de obter as idades de cristalização das rochas vulcânicas. As análises U-Pb foram realizadas através do espectrômetro de massa multicoletor de alta resolução MC-ICP-MS modelo Neptune da marca Thermo Finnigan. Para as análises U-Pb *in situ* em zircão foi utilizada uma microsonda de ablação a laser Nd:YAG 213 nm modelo LSX-213 G2 da marca CETAC acoplada ao Neptune. Os *mounts* (pastilhas com os grãos de zircão) foram inseridos em um porta amostras preparado para abrigar até três seções polidas. Durante as análises com laser, o fluxo de gás hélio (He), responsável pelo transporte do material da ablação para o ICP-MS, variou de 450-500 mL/min. Os parâmetros de instrumentação do laser são variáveis, entretanto, nas condições mais frequentes, são produzidos furos com 25 µm de diâmetro (*Spot size*), frequência de 10 Hz e potência de 50 a 60% de modo a fornecer uma densidade de energia de 5-6 J/cm<sup>2</sup>. O fracionamento elementar induzido pelo laser e a discriminação instrumental de massa são corrigidos utilizando-se razões isotópicas homogêneas de um determinado material internacional de referência o zircão GJ-1 (608,5 ± 1,5 Ma; Jackson *et al.* 2004). A interferência de chumbo comum (<sup>204</sup>Pb) foi corrigida pelo monitoramento das massas de <sup>202</sup>Hg e <sup>204</sup>Pb (<sup>204</sup>Hg+<sup>204</sup>Pb) durante as análises, usando o modelo de composição do Pb (Stacey & Kramers 1975), sendo necessário assumir uma idade estimada (t) durante o tratamento de dados.

Para minimizar as incertezas decorrentes da correção aproximativa do Pb comum, foram excluídas do cálculo da idade valores médios da razão <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb abaixo de 2500 (Milhomen *et al.* 2017). As correções dos dados analíticos foram processadas em macro *Microsoft Excel* (adaptada de Chemale Jr. *et al.* 2012) e os cálculos das idades e a apresentação dos resultados isotópicos no diagrama Concórdia são realizados com auxílio do programa Isoplot/Ex de Ludwig (2011).

## 6. ARTIGO CIENTÍFICO:

**Vulcano-plutonismo paleoproterozoico associado ao depósito de fosfato Serra da Capivara, região de Vila Mandi (PA), Sul do Cráton Amazônico: Geoquímica e Geocronologia**

**Paleoproterozoic volcano-plutonism associated to the Serra da Capivara phosphate deposit, Vila Mandi (PA) region, South Amazonian Craton: Geochemistry and Geochronology**

**Raquel Ferreira dos Santos<sup>1</sup>; Marco Antonio Galarza<sup>1,2</sup>; Carlos Marcello Dias Fernandes<sup>1</sup>, Bruno Lagler<sup>3</sup>, Caetano Juliani<sup>3</sup>, Danilo Amaral Strauss Vieira<sup>1</sup>, Victor Matheus Lopes Gonçalves<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, raquelfds08@gmail.com, antogt@ufpa.br, cmdf@ufpa.br, strauss.danilo@gmail.com, victor.mlgoncalves@gmail.com

<sup>2</sup>Laboratório de Geologia Isotópica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará

<sup>3</sup>Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, nunislagler@gmail.com, cjuliani@usp.br

\* Autor correspondente:

Raquel Ferreira dos Santos. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. Cidade Universitária Professor José da Silveira Netto, Rua Augusto Corrêa nº 1, CEP 66075-110, Bairro do Guamá, Belém-PA, Brasil. Fone/Fax (91) 3201-7609, e-mail: raquelfds08@gmail.com

## RESUMO

No distrito de Vila Mandi, extremo sul do município de São Félix do Xingu (PA), afloram rochas vulcano-plutônicas paleoproterozoicas muito bem preservadas, predominantemente félsicas, com subordinados tipos intermediários e sedimentos associados. A unidade basal, Formação Cinco Estrelas, abriga rochas vulcânicas básicas a intermediárias efusivas e subordinadamente explosivas, predominantemente cálcio-alcalinas, com composição exclusivamente metaluminosa e afinidade geoquímica com granitoides de arcos vulcânicos; A unidade superior, Formação Vila Mandi, compreende rochas mais evoluídas, características transicionais entre metaluminosa a peraluminosa e afinidade geoquímica com granitoides de arcos vulcânicos. O vulcanismo foi controlado por um processo de cristalização fracionada contínua, que evoluiu de um magma andesítico para dacítico na Formação Cinco Estrelas e nos riolitos da Formação Vila Mandi. Idades U-Pb em zircão obtidas em riolitos da Formação Vila Mandi de  $1889 \pm 4$  Ma e  $1983 \pm 18$  Ma, sugerem que o magmatismo na área é polifásico, formado por pelo menos dois eventos vulcano-plutônicos distintos separados por  $\sim 100$  Ma. A evolução geológica da Formação Cinco Estrelas é vinculada a fases de vulcanismo efusivo de composição básica a intermediária e outra explosiva. Já a Formação Vila Mandi tem evolução polifásica gerada por fissuras crustais que formaram pares conjugados orientados nas direções NE-SW e NW-SE, com fases predominantemente efusivas e explosivas subordinadas.

**Palavra-chave:** Rochas Vulcânicas, Petrogênese, Geocronologia U-Pb, Santana do Araguaia, Cráton Amazônico.

## ABSTRACT

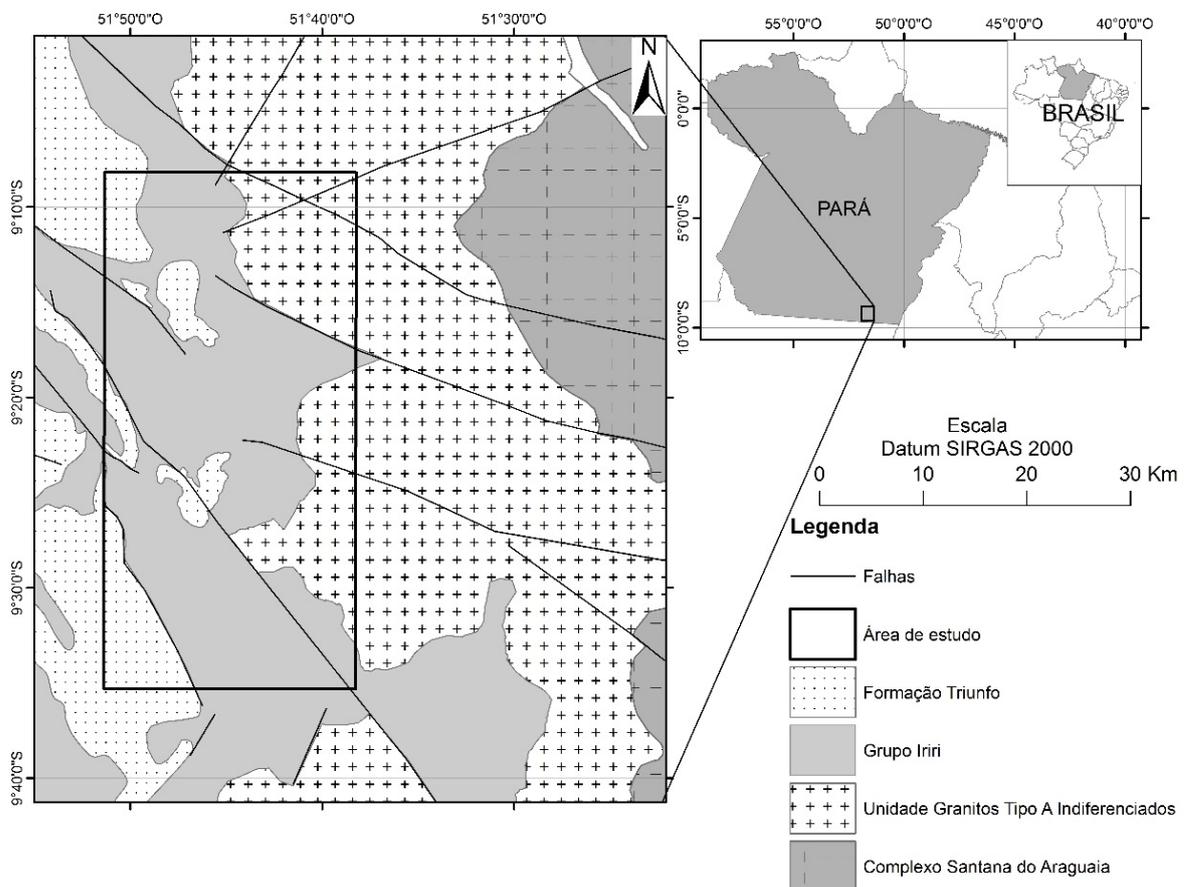
In the district of Vila Mandi, at the southern limit of the municipality of São Félix do Xingu (PA), there are very well preserved Paleoproterozoic volcano-plutonic rocks, predominantly felsic, with subordinate intermediate types and associated sediments. The basal unit, Cinco Estrelas Formation, harbors basic volcanic rocks to effusive and subordinately explosive intermediate rock, predominantly Calc-alkaline, exclusively metaluminous composition and geochemical affinity with granitoids of volcanic arcs; The upper unit, Vila Mandi Formation comprises more evolved rocks, transitional features between metaluminous to peraluminous and geochemical affinity with volcanic arcs granitoids. Volcanism was controlled by a continuous fractional crystallization process that evolved from an andesitic to dacitic magma in the Cinco Estrelas Formation and in the rhyolites of the Vila Mandi Formation. U-Pb zircon ages obtained in rhyolites of the Vila Mandi Formation of  $1889 \pm 4$  Ma and  $1983 \pm 18$  Ma, suggest that the magmatism in the area is polyphase, formed by at least two distinct volcano-plutonic events separated by  $\sim 100$  Ma. Geological evolution of the Cinco Estrelas Formation is linked to phases of effusive volcanism of basic to intermediate composition and other explosive. The Vila Mandi Formation has a polyphasic evolution generated by crustal fissures that formed conjugate pairs oriented in the NE-SW and NW-SE directions, with predominantly effusive and subordinate explosive phases.

**Keywords:** Volcanic rocks, Petrogenesis, U-Pb zircon dating, Santana do Araguaia, Amazonian Craton.

## INTRODUÇÃO

O Cráton Amazônico (Almeida et al., 1981) encontra-se inserido na Plataforma Sul-americana e representa um dos mais expressivos terrenos pré-cambrianos do mundo. Apesar do grande potencial econômico que possui ainda permanece pouco estudado, especialmente na área que corresponde ao território brasileiro. Esta mega-unidade tectônica é recoberta por sequências vulcânicas efusivas e explosivas que datam do final do Paleoproterozoico, representando um evento de caráter heterogêneo efusivo e explosivo que recobre aproximadamente 1.500.000 km<sup>2</sup> (Pessoa et al., 1977; Lamarão et al., 2002; Ferron et al., 2006; Juliani e Fernandes, 2010; Misas, 2010; Tokashiki, 2015), desconsiderando-se as bacias sedimentares dos rios Amazonas e Solimões (Caputo et al., 1972).

Próximo ao distrito de Vila Mandi, extremo sul do município de São Félix do Xingu, fronteira PA/MT, este evento é representado por sequências vulcano-plutônicas predominantemente félsicas, bem como tipos intermediários e sedimentos associados, revelando texturas e estruturas excepcionalmente bem preservadas e pouco estudadas (Fig. 1). Estas rochas foram cartografadas apenas na escala de 1:1.000.000 e pouco se conhecia a respeito das suas relações estratigráficas e evolução geológica (Faraco et al., 2004; Vasquez et al., 2008). Este quadro mudou muito recentemente com o desenvolvimento de trabalhos de detalhe que revelaram se tratar de um sistema vulcano-plutônico complexo e correlacionável aqueles que ocorrem nas regiões de São Félix do Xingu e Província Mineral do Tapajós (Fernandes et al., 2016; Vieira, 2016). Complementarmente, essas unidades vulcânicas foram invadidas pelo Complexo Máfico-carbonatítico Santana (Chiquini, 2011; Gonçalves, 2016), o qual produziu mineralização de fosfato relacionada a perfil saprolítico resultado do intemperismo dessas rochas carbonatíticas ricas em apatita (Lagler et al., 2014).



**Figura 1.** Mapa Geológico e de localização da região de Vila Mandi modificado de Faraco et al. (2004).

Apesar da evolução do conhecimento nos últimos anos, faz-se necessário um estudo mais detalhado das características estratigráficas, petrográficas, geoquímicas e geocronológicas do sistema vulcano-plutônico da região de Vila Mandi, bem como compará-lo com as ocorrências paleoproterozoicas melhor estudadas em outras porções do Cráton Amazônico, como na região central de São Félix do Xingu (Juliani e Fernandes, 2010; Fernandes et al., 2011; Cruz et al., 2015; Cruz et al., 2016) e Província Mineral do Tapajós (Lamarão et al., 2002; Juliani et al., 2005; Juliani et al., 2014; Tokashiki, 2015; Roverato et al., 2016).

## CONTEXTO GEOTECTÔNICO

A área de estudo está situada no contexto tectônico do Cráton Amazônico. Essa megainidade foi inicialmente considerada, com base em dados estruturais e geofísicos, uma grande plataforma arqueana retrabalhada e reativada durante o Paleoproterozoico no evento Transamazônico (Hurley et al., 1967). Com o avanço do conhecimento científico, em especial com a obtenção de dados geocronológicos e isotópicos, a região foi dividida em províncias geocronológicas, geneticamente relacionadas a eventos de acreção continental em torno de um núcleo arqueano representado pela Província Mineral de Carajás (Santos et al., 2000; Tassinari e Macambira, 2004).

A integração dos dados geológicos, geocronológicos e metalogenéticos obtidos até então na porção sul do Cráton Amazônico para as várias ocorrências de vulcanismo cálcio-alcalino, sugeriu a existência de um possível zonamento metalogenético formado entre 2000 e 1880 Ma nessa unidade tectônica (Juliani et al., 2009). Esse modelo sugere que a região pode ter sido formada por uma orogênese oceano-contidente gerada por uma zona de subducção contínua para norte, orientada aproximadamente EW. Nesse contexto, a ocorrência das associações mais jovens (ca. 1880 Ma) pode ser explicada pela incomum mudança no ângulo da placa subductada conhecida como *flat subduction* (Fernandes et al., 2011). Assim, o vulcano-plutonismo exclusivamente crustal de ca. 1870 Ma representado pela Formação Santa Rosa e os granitoides estaníferos de ca. 1860 Ma da Suíte Intrusiva Velho Guilherme (Teixeira et al., 2002) estariam vinculados a um evento distensivo que se seguiu ao término do evento orogênico que se estendeu até o Mesoproterozoico, identificado em várias regiões do Cráton Amazônico (Brito Neves, 1999).

Estudos geofísicos recentes fortalecem essa interpretação na Província Mineral do Tapajós (Carneiro et al., 2013; Juliani et al., 2014). O trend regional NW-SE nesta província está relacionado com as principais falhas e zonas de cisalhamento transcorrente que controlavam a colocação de associações vulcano-plutônicas félsicas pós-tectônicas, enquanto estruturas EW são significativas na porção norte. Essas estruturas apresentam características aeromagnetométricas que sugerem maior penetrabilidade crustal. A característica de maior profundidade das estruturas EW, inferida a partir de campo magnético residual, revela a direção mais provável dos cinturões móveis e arcos magmáticos mais antigos gerados na porção sul do Cráton Amazônico. Dados geocronológicos recentemente obtidos para esta região permitiram a definição de novos arcos magmáticos, conhecidos como Arcos Tapajônicos (Tokashiki, 2015).

## VULCANISMO PROTEROZOICO NA AMAZÔNIA

Durante o Paleoproterozoico o Cráton Amazônico foi palco de um intenso magmatismo. Estas manifestações vulcânicas exibem caráter efusivo e explosivo, com composições intermediárias a ácidas, recobrando aproximadamente 1.500.000 km<sup>2</sup>. Em decorrência da grande área de exposição, este magmatismo recebe distintas denominações regionais, dependendo da área de ocorrência, reunidas de forma simplificada no Supergrupo

Uatumã (Santos et al., 1975). Na região de São Félix do Xingu (PA), este vulcanismo foi denominado de Grupo Uatumã (Macambira e Vale, 1997); na região da Província Mineral do Tapajós de Grupo Iriri (Pessoa et al., 1977); na região do Pitinga no Amazonas e noroeste do Pará, Grupo Iricoumé (Montalvão et al., 1975; Oliveira et al., 1975); e por fim, no Estado de Roraima, Grupo Surumu (Montalvão et al., 1975).

O Grupo Surumu ocorre na porção norte do Estado de Roraima e abriga rochas vulcânicas de composição dacítica, com subordinados andesitos, riolitos e riodacitos (Reis et al., 2000). Schobbenhaus et al. (1994) obtiveram idades U-Pb em zircão de  $1966 \pm 9$  Ma e  $1984 \pm 8$  Ma em andesitos desta unidade. O Grupo Iricoumé ocorre na região do Pitinga, Norte do Estado do Amazonas, e abriga rochas efusivas e piroclásticas de composições ácidas a intermediárias. Schobbenhaus et al. (1994) obtiveram idades U-Pb em zircão de 1960 Ma. Contudo, trabalhos mais recentes indicam idades U-Pb em zircão mais jovens para esta unidade de  $1896 \pm 7$  Ma (Costa et al., 2001).

A região de São Félix do Xingu abriga rochas de composição predominantemente intermediária, composta por diques e andesitos reunidos na Formação Sobreiro (Macambira e Vale, 1997). Pinho et al. (2006) obtiveram idade de  $1880 \pm 6$  Ma pelo método U-Pb em zircão em dacitos desta unidade. A Formação Santa Rosa compreende rochas mais félsicas, e é composta predominantemente por álcali-riolitos e subordinados riolitos e riodacitos (Juliani e Fernandes, 2010). Fernandes et al. (2011) dataram riolitos desta unidade pelo método Pb-Pb em zircão e obtiveram idade  $1879 \pm 2$  Ma.

Na região da Província Aurífera do Tapajós esse Vulcano-plutonismo paleoproterozoico encontra-se representado pelas Formações Moraes de Almeida, Grupo Iriri e Suíte Intrusiva Maloquinha. Foram obtidas idades de 1890 Ma para a Formação Moraes de Almeida, e 1881 Ma para rochas do Grupo Iriri e Granito Maloquinha (Vasquez et al., 1999; Lamarão et al., 2002). Lamarão et al. (2002) obtiveram idades em torno de 1990 Ma para vulcânicas da Formação Vila Riozinho, interpretada como formadas no evento magmático mais antigo na região. Na Tabela 1 é apresentada uma compilação dos dados geocronológicos referente a parte do magmatismo paleoproterozoico na região.

## GEOLOGIA REGIONAL

Faraco et al. (2004) individualizaram na região as unidades Complexo Xingu, Suíte Intrusiva Teles Pires, Suíte Intrusiva Rio Dourado, Grupo Iriri, Formação Gorotire e Formação Cubencranquém; ao passo que Vasquez et al. (2008) consideram apenas Formação Triunfo, Grupo Iriri, Granitos Tipo-A Indiferenciados e Complexo Santana do Araguaia.

O Complexo Xingu representa o embasamento da região com ortognaisses predominantemente tonalíticos e migmatitos (Araújo e Maia, 1991). Santos (2003) ressaltou que esta unidade necessita de estudos localizados de maior detalhe, pois suas idades variam de  $> 3000$  até 2000 Ma e, portanto, agrupam rochas de contextos distintos na mesma unidade.

Ao Paleoproterozoico são atribuídas as rochas do Grupo Iriri que compreende as formações Salustiano e Aruri (Pessoa et al. (1977). De acordo com Bahia e Quadros (2000), na Formação Salustiano há predominância riolitos, riodacitos e dacitos. Vasquez et al. (1999) obtiveram idade Pb-Pb em zircão de  $1888 \pm 2$  Ma para os riolitos dessa formação. A Formação Aruri é constituída de ignimbritos, brechas vulcânicas, tufos félsicos, conglomerados, arenitos e siltitos vulcânicos. Ocorrem ainda Granitos tipo A Indiferenciados na porção centro-sul do Pará distinguidos por sensores remotos e imagens aerogeofísicas; compreendendo corpos graníticos circulares (Vasquez et al. (2008).

A cobertura sedimentar na região é composta pela Formação Cubencranquém que abriga arcóseos, *cherts* e siltitos e recobre discordantemente granitoides anorogênicos paleoproterozoicos (Barbosa et al., 1986). Pastana (1980) identificou contribuição de material vulcânico retrabalhado em arenitos da Formação Cubencranquém, intercalação com material

piroclástico, sugerindo que esta pode ser contemporânea ou bem próxima temporalmente ao vulcano-plutonismo anterior. Com posicionamento estratigráfico duvidoso em relação aos centros vulcano-plutônicos anteriormente descritos, encontra-se a Formação Gorotire, inicialmente definida por Barbosa (1966) como arenitos. Barbosa et al. (1986) observaram ainda arenitos arcoseanos alterados, de granulação média a grossa, e quartzo arenitos de granulação média. Por fim temos a Formação Triunfo (Silva et al., 1974), assentada em discordância angular sobre as rochas do Complexo Xingu e unidades vulcano-plutônicas. Segundo Vasquez et al. (2008) é composta de quartzo arenitos, arenitos líticos e arenitos arcoseanos subordinados, com conglomerados polimíticos e siltitos associados. Embora as relações estratigráficas dessa formação ainda não estejam bem definidas, admite-se que a sedimentação continental sucedeu o vulcano-plutonismo paleoproterozoico anteriormente descrito.

**Tabela 1.** Dados geocronológicos de rochas vulcânicas e correlatas do Cráton Amazônico referentes a região de São Félix do Xingu, Tapajós, Roraima e Pitinga.

Área de ocorrência	Rocha	Idade (Ma)	Método	Referência
<b>Região de São Félix do Xingu</b>				
Supergupo Uatumã	Andesito e riolito	1875 ± 158	Pb-Pb (Zr)	Teixeira et al. (2002)
Formação Sobreiro	Dacito	1880 ± 6	Pb-Pb (Zr)	Pinho et al. (2006)
Formação Santa Rosa	Ash tuff	1884 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Fernandes et al. (2011)
Formação Santa Rosa	Riolito	1879 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Fernandes et al. (2011)
Formação Iriri	Granito porfíritico	1887 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Pinho et al. (2006)
Formação Iriri	Granito porfíritico	1888 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Pinho et al. (2006)
Formação Iriri	Granito porfíritico	1881 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Pinho et al. (2006)
Formação Iriri	Granito porfíritico	1881 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Pinho et al. (2006)
Maciço Antônio Vicente	Granito	1867 ± 4	Pb-Pb (Zr)	Teixeira et al. (2002)
Maciço Serra da Queimada	Granito	1882 ± 12	Pb-Pb (Zr)	Pinho et al. (2006)
<b>Região da Província Mineral do Tapajós</b>				
Grupo Iriri	Riolito	1888 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Vasquez et al. (1999)
Formação Vila Riozinho	Traquito	1998 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Lamarão et al. (2002)
Formação Moraes de Almeida	Riolito	1890 ± 6	Pb-Pb (Zr)	Lamarão et al. (2002)
Granito Maloquinha	Monzogranito	1880 ± 9	Pb-Pb (Zr)	Lamarão et al. (2002)
<b>Região de Pitinga e Roraima</b>				
Grupo Iricoumé	dacito	1966 ± 9	U-Pb (Zr)	Schobbenhaus et al. (1994)
Grupo Iricoumé	Riolito	1882 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Ferron et al. (2006)
Grupo Iricoumé	Riodacito	1885 ± 8	Pb-Pb (Zr)	Ferron et al. (2006)
Grupo Iricoumé	Ignimbrito	1890 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Ferron et al. (2006)
Grupo Iricoumé	Andesito porfíritico	1892 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Ferron et al. (2009)
Grupo Iricoumé	Riolitos	1882 ± 11	Pb-Pb (Zr)	Marques et al. (2014)
Granito Rastro	Sienogranito	1882 ± 2	Pb-Pb (Zr)	Ferron et al. (2006)
Granito Simão	Biotita Granito	1882 ± 4	Pb-Pb (Zr)	Ferron et al. (2006)
Granito Bom Futuro	Sienogranito	1882 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Ferron et al. (2006)
Granito Alto Pitinga	Monzogranito	1888 ± 3	Pb-Pb (Zr)	Ferron et al. (2006)

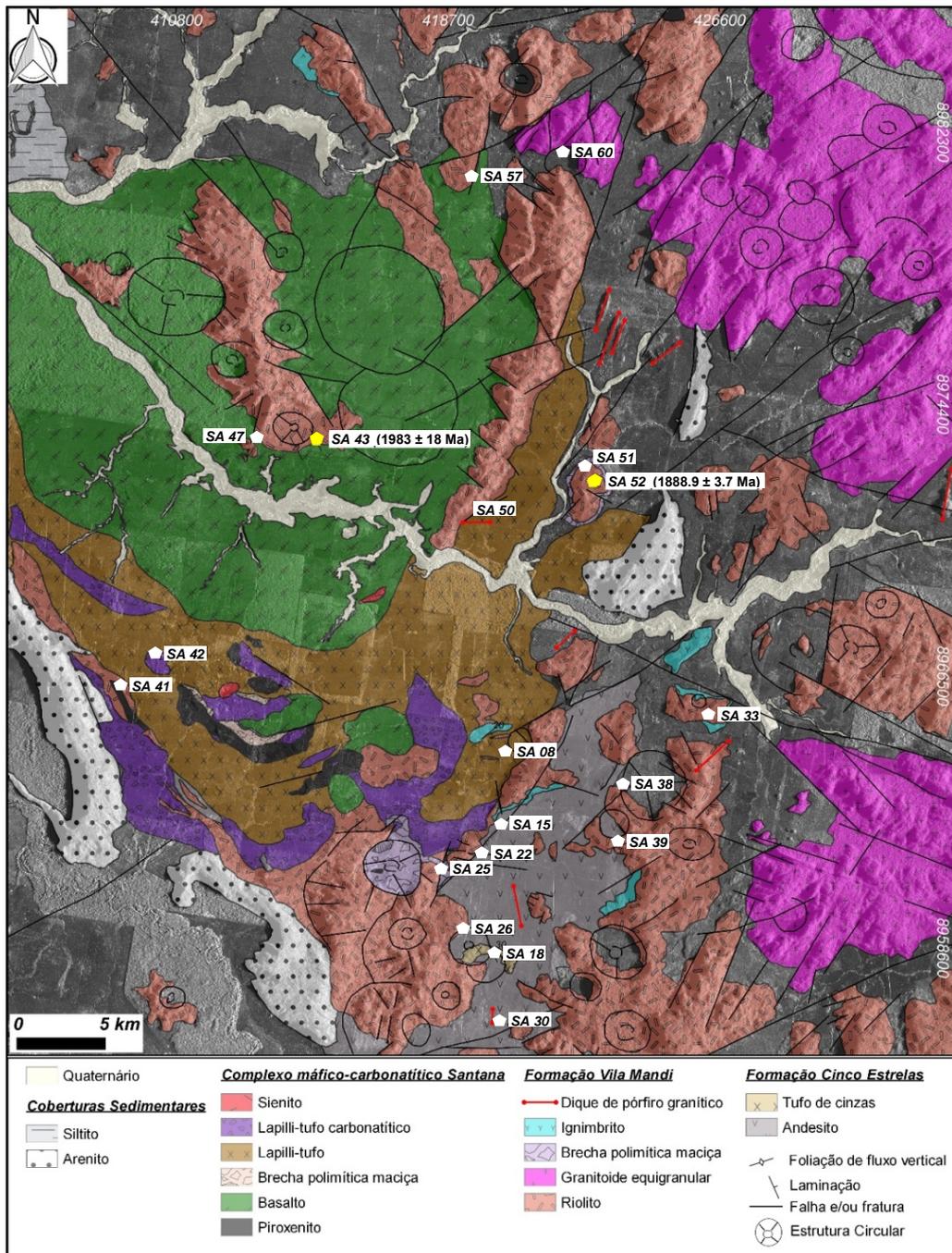
Zr = zircão

## GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

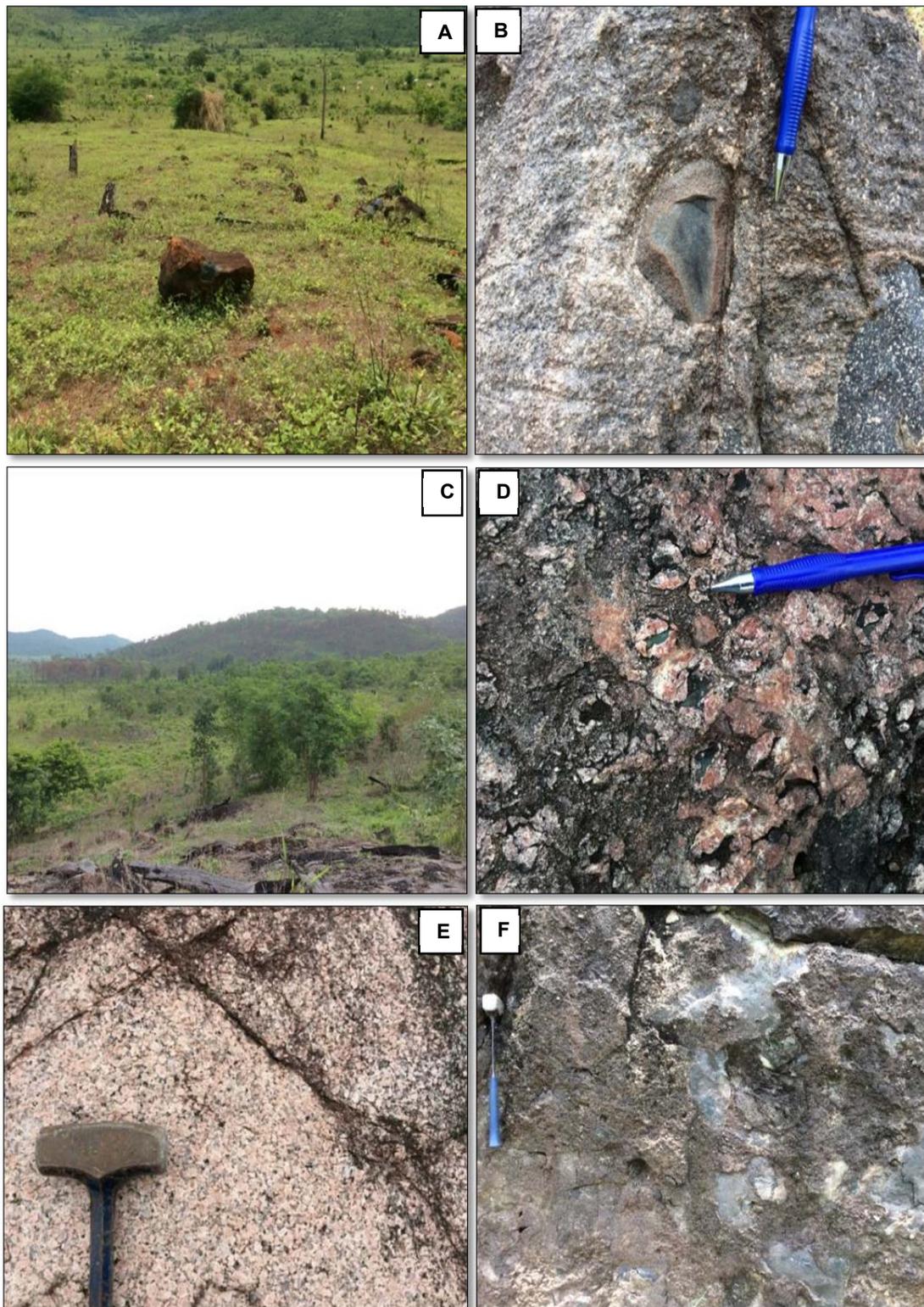
A área de estudo abriga ao menos dois centros vulcano-plutônicos efusivos e explosivos bem preservados, recentemente individualizados nas formações Cinco Estrelas e Vila Mandi (Fernandes et al., 2016). Revelam fluxos de lavas e vulcanoclásticos, bem como rochas subvulcânicas e plutônicas associadas (Fig. 2). Essas rochas são claramente invadidas pelo Complexo máfico-carbonatítico Santana que materializou litotipos alcalinos, vulcânicos e vulcanoclásticos carbonatíticos e apatititos, percussores do Depósito de Fosfato Serra da Capivara (Chiquini, 2011; Lagler et al., 2014; Gonçalves, 2016). Este complexo exhibe relevo plano, com afloramentos geralmente na forma de blocos isolados. As rochas vulcanoclásticas que ocorrem no depósito, exibem clastos de riolitos e andesitos derivados das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, sugerindo uma possível relação intrusiva deste depósito nas sequências vulcano-plutônicas estudadas.

Estudos mais detalhados destes litotipos realizados por Vieira (2016) mostraram que a estratigrafia e estilos de erupção que ocorrem na área tem características semelhantes ao vulcanismo que ocorre em outras porções do Cráton Amazônico; a exemplo das formações Sobreiro e Santa Rosa na região de São Félix do Xingu (Juliani e Fernandes, 2010), o Grupo Iriri na região da Província Mineral do Tapajós (Juliani et al., 2005), e Grupo Iricoumé na Província Estanífera de Pitinga (Ferron et al., 2010). Contudo, o nível topográfico das rochas mapeadas aponta para grau de erosão muito mais acentuado quando comparados com outras áreas, o que por outro lado favorece a geração de depósitos supergênicos.

A unidade basal Formação Cinco Estrelas é mais restrita e ocorre geralmente na forma de pequenos lajedos e blocos isolados com rara continuidade lateral (Fig. 3). Foram identificadas duas fácies na unidade, são elas: 1) fácies de fluxo de lava maciça subaérea, representada por andesitos com foliação de fluxo horizontal e subordinados dacitos porfíricos ou não associados; e 2) fácies vulcanoclástica que compreende tufo de cinzas laminado e lapilli-tufos subordinados, topograficamente relacionados a fácies anterior que sugere evento explosivo (Vieira, 2016).



**Figura 2.** Mapa geológico da região de Vila Mandi modificado de Vieira (2016) mostrando as formações Cinco Estrelas e Vila Mandi.



**Figura 3.** Feições de campo representativas das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi. A) Topografia comum na Formação Cinco Estrelas, com aspecto plano, fortemente arrasada, com raras elevações e alguns blocos de andesitos; B) Detalhe de dacito porfírico com xenólitos de andesito; C) Serras de riolitos comum na área, orientadas predominantemente na direção NE–SW e NW–SE; D) Intercrescimentos de esferulitos e *lithophysae* comuns nos riolitos; E) Afloramento de biotita sienogranito; e F) Brecha polimítica maciça com a presença de clastos angulosos com composições variadas.

A unidade superior Formação Vila Mandi é fissural e aflora como grandes lajedos, serras e morrotes e ocorre em grande proporção na área em ao menos cinco diferentes fácies (Fig. 3): 1) fácies de fluxo de lava aproximadamente vertical com riolitos e dacitos, exibindo foliação de fluxo e grandes diques de riolito bandado. Comumente ocorre alteração hidrotermal do tipo seletiva e fissural e por vezes pervasiva, assim como silicificação e carbonatação com zonas ricas em pirita; 2) a fácies de *stocks* de biotita sienogranitos equigranulares intrusiva nos riolitos e dacitos. A mineralogia desta fácies é semelhante as vulcânicas da unidade, podendo representar um correspondente plutônico do sistema; 3) fácies ignimbrito félsico soldado ou não, revelando clastos de diferente composições rotacionados pelo fluxo magmático; 4) fácies vulcanoclástica de brechas polimíticas maciça com clastos angulosos a subangulosos de composições variadas, com subordinados lapilli-tufo e tufo de cristais; e 5) fácies de diques em pequena proporção com pórfiros graníticos de mineralogia similar aos riolitos, porém a presença de cristais mais desenvolvidos sugere diferentes níveis crustais para a unidade, mas com origem magmática similar (Vieira, 2016).

## PETROGRAFIA

### Formação Cinco Estrelas

A fácies fluxo de lavas é composta por andesitos, dacitos e traquitos/traquidacitos com cor variável desde negra, cinza-escuro a púrpura escuro (Fig. 4a). Os andesitos são holocristalinos a hipocristalinos, textura porfirítica a glomeroporfirítica, com conteúdo variável de fenocristais (até 10% vol.). Os fenocristais são essencialmente de plagioclásio (Fig. 4d), com intensa alteração clorítica. Minerais opacos, apatita, titanita figuram como acessórios primários. A matriz dessas rochas é composta por micrólitos de plagioclásio e minerais opacos, comumente exibindo estruturas de fluxo magmático.

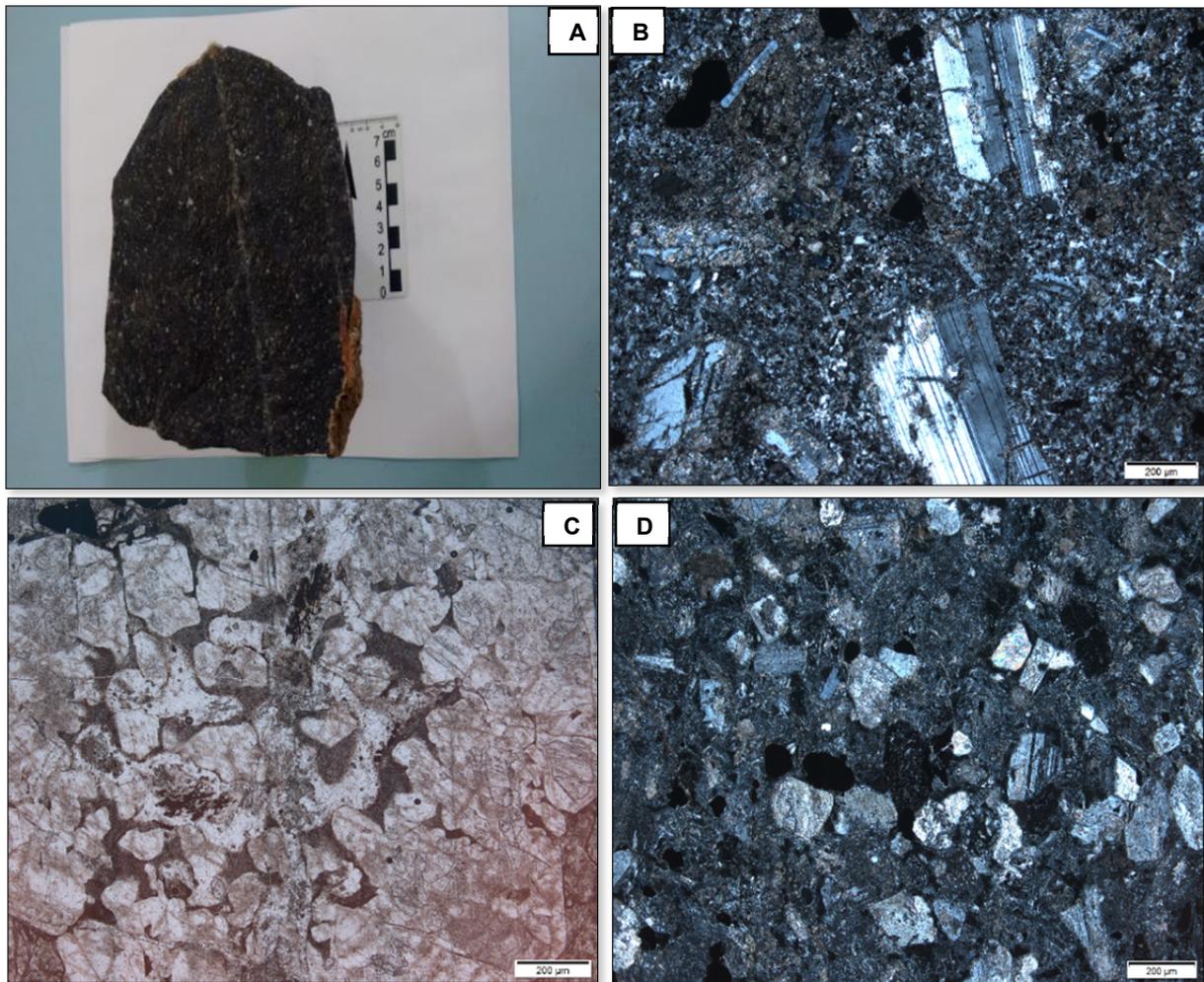
Os dacitos e traquitos/traquidacitos apresentam textura porfirítica a glomeroporfirítica, compostos essencialmente por fenocristais de plagioclásio, feldspato potássico e quartzo, com conteúdo variável (até 12 % vol.). Minerais opacos, piroxênio, apatita, zircão e titanita figuram como os principais acessórios primários. Por sua vez, a matriz tem composição quartzo-feldspática, muito fina, aspecto avermelhado e exibe comumente foliação de fluxo (Figuras 4b-c). Observa-se também cristais de plagioclásio com geminações deformadas e cristais de quartzo bipiramidados e com embaiamentos (golfs).

As rochas vulcanoclástica associadas ocorrem em pequena proporção na área e correspondem a lapilli-tufos de cor cinza claro a escuro. São compostas por fragmentos de cristais (75 % vol.) angulosos a subangulosos de quartzo, plagioclásio e, raros, feldspato potássico e opacos. A matriz é muito fina, criptocristalina de composição quartzo-feldspática. As alterações sericítica e clorítica ocorrem tanto na matriz como nos fenocristais. Ocorrem também brechas de composição intermediária, com blocos angulosos e subangulosos (até 50 cm) suportado por matriz de cor cinza e composição semelhante à da fácies de fluxo de lava.

### Formação Vila Mandi

A fácies fluxo de lavas tem composição homogênea, compreende riolitos de cor variável entre vermelho escuro, púrpura a rosa escura, com textura porfirítica a glomeroporfirítica. Os fenocristais (até 12 % vol.) e microfenoicristais de feldspato potássico, plagioclásio, quartzo, piroxênio e minerais opacos ocorrem imersos em matriz felsiférica muito fina de coloração avermelhada. Localmente ocorrem tipos afíricos e frequentemente exibem estruturas de fluxo magmático. Os fenocristais de plagioclásio apresentam geminação albíta bem definidas, embora localmente sejam deformadas. Por vezes são zonados, aspecto ressaltado pela intensa alteração sericítica, clorítica e carbonática, presente na maioria dos fenocristais (Figuras 5a-c). As alterações observadas ocorrem tanto nos fenocristais como na

matriz e por vezes alteram a maioria das características originais dos litotipos. (Figuras 6 a-c)  
Os cristais de quartzo são límpidos, bipiramidado e com embaçamento.



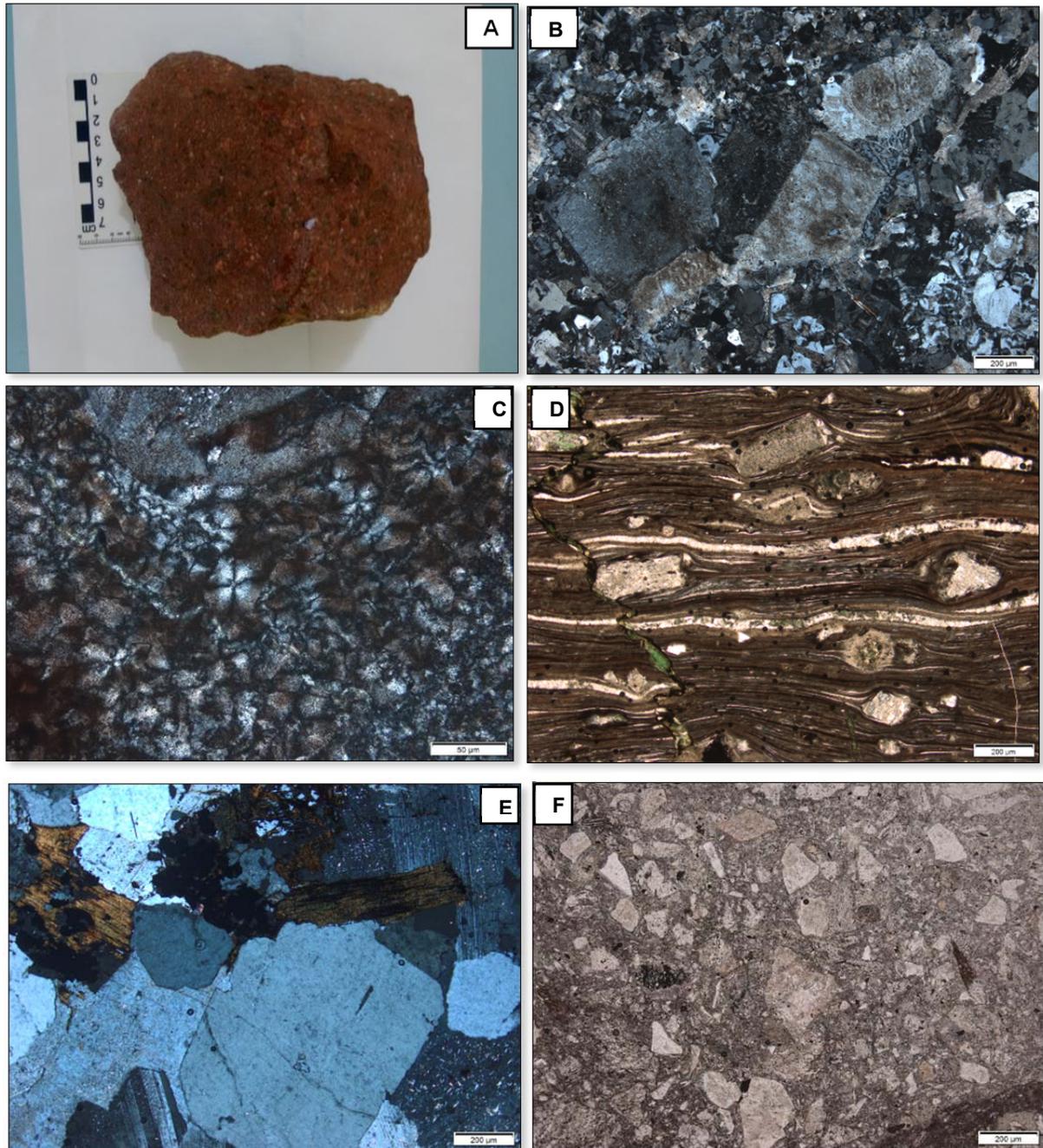
**Figura 4.** Aspectos petrográficos representativos da Formação Cinco Estrelas. A) Dacito porfírico. Exibe fenocristais de plagioclásio, quartzo e feldspato potássico; B) Detalhe de fenocristais de plagioclásio muito alterados, com algumas características originais, envoltos por matriz quartzo-feldspática fina; C) Megacristais de plagioclásio com intensa alteração carbonática seletiva que oblitera a maioria de suas características; e D) Fotomicrografia com nicóis cruzados mostrando aspecto geral dos andesitos representados por ripas de plagioclásio a maioria diminutos e sem orientação preferencial. Notar que alguns desses cristais revelam forte alteração clorítica.

Os ignimbritos tem cor cinza escuro, textura vulcanoclástica laminada, com cristais euédricos e fragmentos de quartzo, feldspato potássico e, subordinadamente, plagioclásio que alcançam até 3 % vol., sustentados por matriz criptocristalina fortemente soldada. O alto grau de soldagem é materializado por púmices transformados em *fiammes*. Localmente ocorre reomorfismo, com púmices em sigmóides e cristais rotacionados (Fig. 5d). Em algumas amostras não-soldadas ocorrem *glassy shards* em formatos “cúspide” e “Y”.

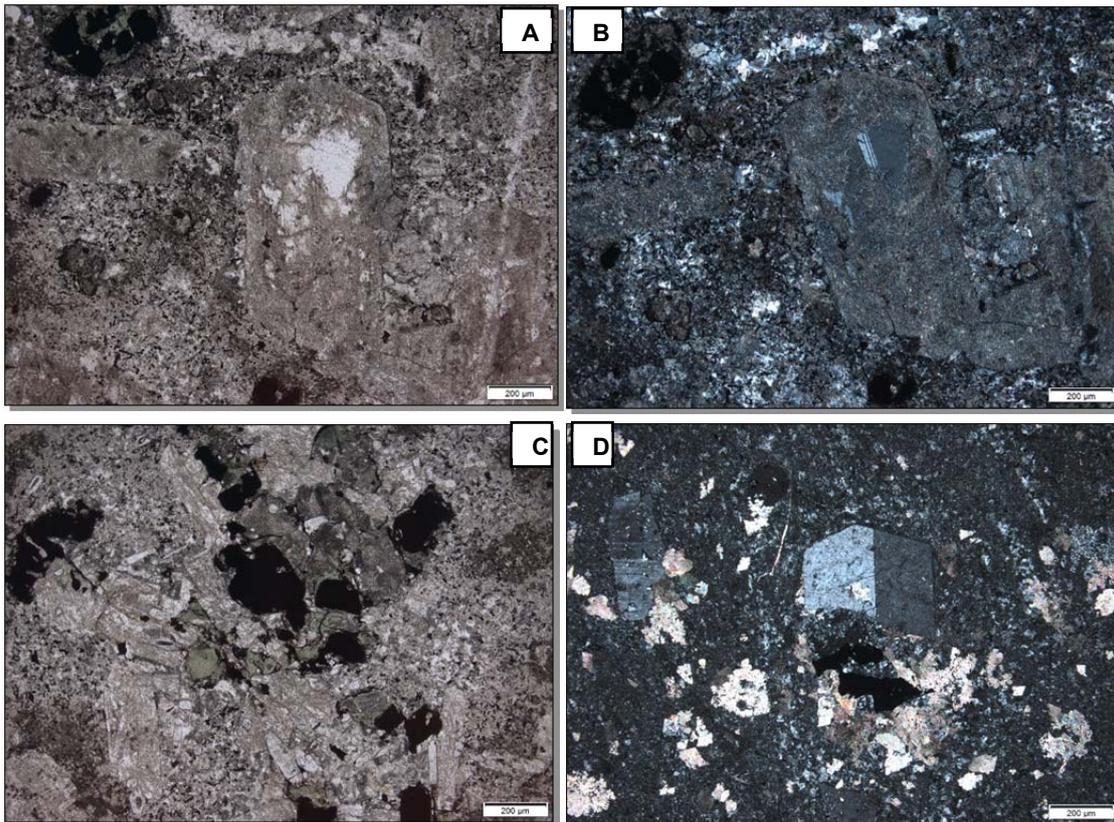
Os pórfiros graníticos são isotrópicos, cor rosa claro e exibem fenocristais bem desenvolvidos de feldspato potássico, quartzo e plagioclásio (até 7 mm). Minerais opacos, biotita, apatita e zircão figuram como os principais acessórios primários (< 1 % vol.) (Fig. 5e). As alterações hidrotermais observadas foram a clorítica, sericítica e carbonática. Os cristais de quartzo aparecem límpidos, moderadamente fraturados, bipiramidais, com feições de reabsorção e exibem mosaico de intercrescimento entre quartzo e feldspato potássico. Na

maioria das vezes os cristais de plagioclásio aparecem intensamente alterados, obliterando quase todas as características ígneas dos grãos.

As rochas vulcanoclásticas associadas são de cor cinza escuro a esverdeado compostas por fragmentos de quartzo, plagioclásio, feldspato potássico e minerais opacos (até 75 % vol.) angulosos a subangulosos (Fig. 5f). Revela pequenos veios de quartzo e vênulas preenchidas por carbonato. A matriz é muito fina, criptocristalina e de composição quartzo-feldspática. Ocorrem ainda alterações sericítica, clorítica e carbonática, tanto na matriz como nos fenocristais.



**Figura 5.** Aspectos petrográficos representativos da Formação Vila Mandi. A) Riolito fírico; B) Fenocristais subédricos de feldspato potássico alterados para argilominerais nos riolitos. Observa-se intercrescimento granofírico; C) Marcante textura esferulítica em riolito; D) Ignimbrito fortemente soldado com fragmentos de cristais rotacionados e finas lentes de quartzo (*fiammes*); E) Pórfiro granítico isotrópico; e F) Lapilli-tufo com fragmentos angulosos a subangulosos.



**Figura 06:** Aspectos microscópicos gerais das alterações observadas na Formação Vila Mandi. A-B) Nicóis paralelos e nicóis cruzados, respectivamente dos riolitos exibindo alteração sericítica; notar que a alteração intensa já obliterou a maioria das características originais dos cristais de plagioclásio. C) Alteração clorítica muito comum nos riolitos da unidade. D) Alteração carbonática seletiva muito comum nos riolitos. Notar que essa alteração é comum tanto nos fenocristais quanto na matriz.

## METODOLOGIA

Pós de rocha (90 % < 200 *mesh*) de dezenove amostras representativas foram preparadas em moinho de anel de carbeto de tungstênio e analisados por meio do pacote personalizado LF202 no Acme Labs (Acme Analítica Laboratórios Ltda., Vancouver, Canadá) após fusão com metaborato/tetraborato de lítio. ICP-ES foi usado para elementos maiores e ICP-MS para os menores, incluindo Elementos Terras Raras.

A geocronologia foi aplicada em amostras representativas dos riolitos. A datação U-Pb em zircão por espectrometria de massa ICP-MS com ablação a laser (LA-ICP-MS) foi realizada no Laboratório de Geologia Isotópica da UFPA (Pará-Iso) com o objetivo de obter as idades de cristalização. A obtenção dos cristais consistiu na britagem e peneiramento na fração granulométrica 180 – 125 μm, conforme a rotina do laboratório. Os cristais selecionados foram colocados em pastilhas com resina *epoxy* e polidos com lixa e pasta de diamante. Por fim, a obtenção das imagens por catodoluminescência no microscópio eletrônico de varredura, foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Serviço Geológico do Brasil (CPRM). As análises U-Pb foram realizadas através do espectrômetro de massa multicoletor de alta resolução MC-ICP-MS modelo Neptune da marca Thermo Finnigan. Para as análises U-Pb *in situ* em zircão foi utilizada uma microsonda de ablação a laser Nd:YAG 213 nm modelo LSX-213 G2 da marca CETAC acoplada ao Neptune. Durante as análises com laser, o fluxo de gás hélio (He), responsável pelo transporte do material da ablação para o ICP-MS, variou de 450 – 500 mL/min. Os parâmetros de instrumentação do laser são variáveis, entretanto, nas condições mais frequentes, são produzidos furos com 25

um de diâmetro, frequência de 10 Hz e potência de 50 a 60 % de modo a fornecer uma densidade de energia de 5 – 6 J/cm<sup>2</sup>. Em análises por LA-MC-ICP-MS, o fracionamento elementar induzido pelo laser e a discriminação instrumental de massa são corrigidos utilizando-se razões isotópicas homogêneas de um determinado material internacional de referência, como por exemplo, o zircão GJ-1 de 608,5 ± 1,5 Ma (Jackson et al., 2004). O princípio básico para representação do sistema U-Pb baseou-se na curva de referência Concórdia, a qual mostra em diagrama de eixos coordenados <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U e <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U (Wetherill, 1956), as variações de razões isotópicas em função do tempo. A interferência de chumbo comum (<sup>204</sup>Pb) foi corrigida pelo monitoramento das massas de <sup>202</sup>Hg e <sup>204</sup>Pb (<sup>204</sup>Hg + <sup>204</sup>Pb) durante as análises, usando o modelo de composição do Pb (Stacey e Kramers, 1975), sendo necessário assumir uma idade estimada (t) durante o tratamento de dados. As incertezas decorrentes da correção aproximativa do Pb comum, foram minimizadas excluindo do cálculo da idade valores médios da razão <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb abaixo de 2500 (Milhomem Neto et al., 2017). As correções dos dados analíticos foram processadas em macro *Microsoft Excel* (Chemale Jr et al., 2012) e os cálculos das idades e a apresentação dos resultados isotópicos no diagrama Concórdia foram realizados com auxílio do programa Isoplot/Ex (Ludwig, 2011).

## GEOQUÍMICA

### Classificação geoquímica e comparação com correlatos no Cráton Amazônico

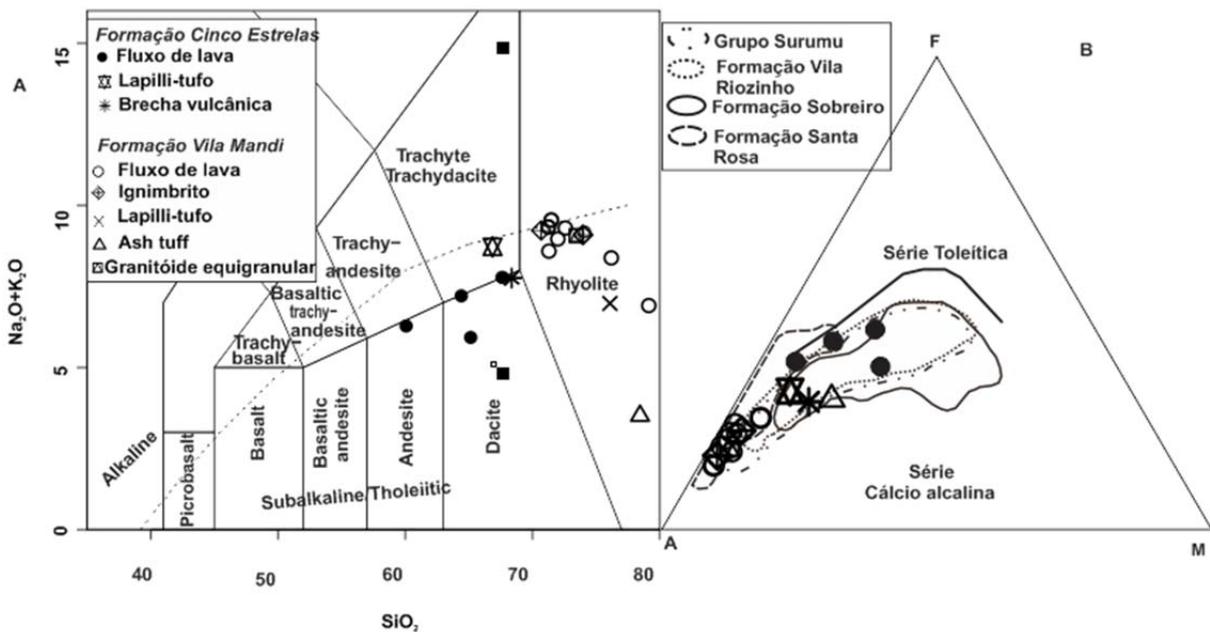
Os dados geoquímicos representativos das amostras analisadas são apresentados na Tabela 2. De acordo com diagrama composicional Total Álcalis vs. SiO<sub>2</sub> (Le Maitre, 2002) as unidades vulcânicas estudadas possuem composições distintas (Fig. 7a), como sugerido por evidências de campo e petrográficas. As fácies de fluxo de lava e vulcanoclástica da Formação Cinco Estrelas apresentam predominantemente composição 999dacítica, com subordinados andesito e traquidacito (quartzo normativo > 20 %), bem como incidem no campo subalcalino. As fácies de fluxo de lava, vulcanoclástica e granitoide equigranular associado da Formação Vila Mandi são exclusivamente riolito e, a exemplo da anterior, são subalcalinas, apontando para unidade extremamente evoluída. O intervalo relativamente amplo com valores de SiO<sub>2</sub> (55,49 – 73,31 peso %) e baixas razões K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O (0,56 – 1,64) das rochas da Formação Cinco Estrelas são claramente distintos do intervalo mais restrito de SiO<sub>2</sub> com conteúdos de (69,10 – 78,31 peso %) e muito altas razões K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O (0,24 – 111,66) da Formação Vila Mandi.

Com base no diagrama triangular A-F-M (Irvine e Baragar, 1971) as fácies de fluxo de lava e vulcanoclástica da Formação Cinco Estrelas mostram comportamento típico de suítes cálcio-alcálicas, com moderado enriquecimento em álcalis nos litotipos mais evoluídos e ausência de enriquecimento inicial em ferro; ao passo que as fácies de fluxo de lava, vulcanoclástica e granitoide equigranular associado a Formação Vila Mandi são predominantemente agrupadas próximas ao vértice A (Fig. 7b). A Formação Cinco Estrelas exibe características geoquímicas similares às formações Sobreiro, Grupo Surumu e Vila Riozinho; com tendência mais evoluída das duas últimas unidades em relação as formações Sobreiro e Cinco Estrelas. Já a Formação Vila Mandi mostra características geoquímicas similares à da Formação Santa Rosa.

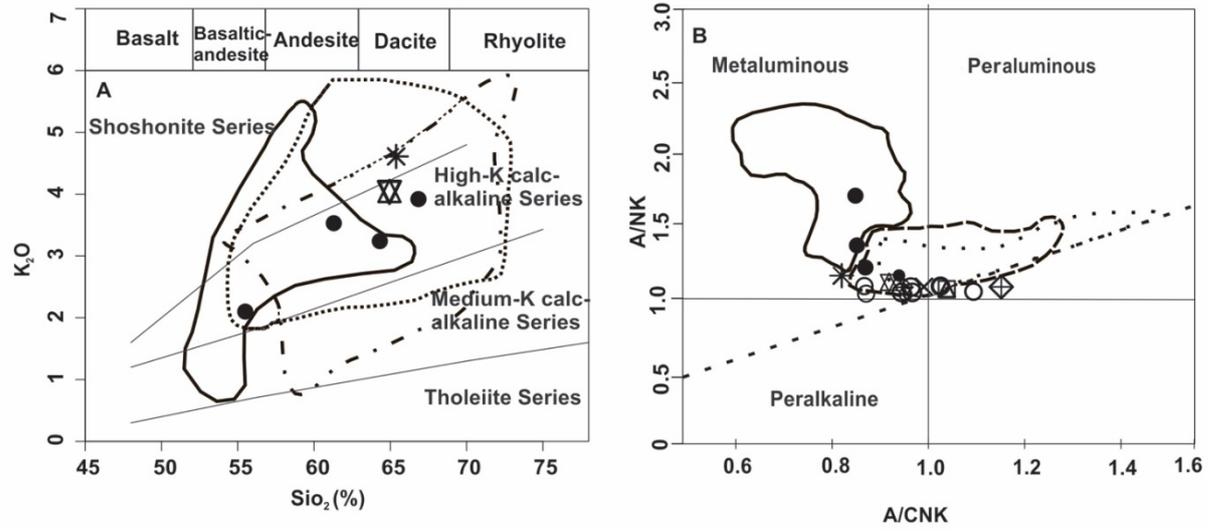
As rochas das fácies de fluxo de lava e vulcanoclástica da Formação Cinco Estrelas mostra uma correlação positiva no diagrama K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub> (Peccerillo e Taylor, 1976), onde a grande maioria das amostras incidem no campo de séries cálcio-alcálicas de alto-K e somente uma de brecha vulcânica se posiciona no campo shoshonítico (Fig. 8a). Estas variações podem indicar assinatura transicional para esta unidade entre séries de alto-K e shoshonítica ou aumento da maturidade do arco magmático (Morrison, 1980). Contudo, apesar de incipiente, o enriquecimento ou lixiviação de álcalis não é descartado em função da complexidade do arcabouço evolutivo vulcânico. Este mesmo comportamento também é

observado em unidades correlatas como na Formação Vila Riozinho (Lamarão et al., 2002) na região da Província Mineral do Tapajós, no Grupo Surumu (Montalvão et al., 1975) no Estado de Roraima e na Formação Sobreiro (Fernandes et al., 2011) na região de São Félix do Xingu.

As fácies de fluxo de lava e vulcanoclástica da Formação Cinco Estrelas tem composição predominantemente metaluminosa no diagrama A/NK vs. A/CNK (Maniar e Piccoli, 1989), com razões A/NK posicionadas entre 1 e 2 (Fig. 8b). Por sua vez, as fácies de fluxo de lava, vulcanoclástica e granitoide equigranular associado da Formação Vila Mandi possuem características transicionais entre metaluminosa e peraluminosa com razão A/NK entre 1 e 1,5. Essa tendência mais peraluminosa justifica-se por se tratarem de rochas mais evoluídas e indicam a constante diminuição dos conteúdos de CaO e aumento de álcalis em decorrência da evolução magmática. As rochas da Formação Cinco Estrelas, a exemplo da Formação Sobreiro, exibem caráter exclusivamente metaluminoso. No entanto a média da razão  $K_2O/Na_2O$  de 1,20, que embora seja menor que da Formação Vila Mandi que é de 1,44, são bem diferentes daqueles da Formação Sobreiro que é de 0,88. Por sua vez, a composição das rochas da Formação Vila Mandi é semelhante à da Suíte Intrusiva Velho Guilherme (Teixeira et al., 2005) e Formação Santa Rosa (Fernandes et al., 2011), no entanto o caráter peraluminoso a metaluminoso das unidades citadas não é observado com clareza, visto que os litotipos em questão exibem comportamento mais metaluminoso, com leve tendência peraluminosa.



**Figura 7.** A) Diagrama de classificação composicional (Le Maitre, 2002) para as associações de rochas estudadas; e B) Diagrama AFM (Irvine e Baragar, 1971) para as formações Sobreiro e Santa Rosa. Os campos das formações Vila Riozinho, Sobreiro, Santa Rosa e Grupo Surumu são plotados para comparação.



**Figura 8.** A) Diagrama de classificação  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  (Peccerillo e Taylor, 1976). Os limites composicionais superiores são de Le Maitre (2002); e B) Diagrama de variação molar  $A/NK$  vs.  $A/CNK$  (Maniar e Piccoli, 1989). Símbolos e campos conforme Figura 7.

**Tabela 2.** Composição química das rochas representativas das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi.

Unidades Rochas Amostras	Formação Cinco Estrelas						Formação Vila Mandi												
	AND	DAC	DAC	TTD	LT	BR	RLT	RLT	RLT	RLT	RLT	RLT	RLT	RLT	IGN	IGN	LT	GRN	AT
	39	38	30a	30b	08	25	15	33b	41c	43	17	42	22	50	26	51	18	60	47
SiO <sub>2</sub> (%)	55,49	61,29	64,31	66,84	64,94	65,38	69,94	71,88	78,31	70,68	69,94	75,29	73,03	70,81	69,1	73,14	74,71	72,82	74,79
TiO <sub>2</sub>	0,65	1	0,52	0,8	0,6	0,47	0,45	0,4	0,18	0,42	0,39	0,28	0,35	0,35	0,46	0,31	0,33	0,26	0,33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,46	14,13	14,63	14,53	14,91	13,35	13,85	14,05	10,13	14,07	13,73	12,56	12,97	13,29	14,18	14,07	12,72	13,71	13,95
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,62	6,03	5,04	5,1	4,28	3,58	2,62	2,09	1,91	2,25	2,63	1,9	1,85	3,05	2,66	1,78	1,97	2,09	1,83
MnO	0,15	0,12	0,09	0,1	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,07	0,12	0,06	0,05	0,06	0,07	0,03	0,05	0,04	0,04
MgO	2,51	1,54	3,02	0,83	1,15	1,61	0,17	0,33	0,18	0,22	0,4	0,18	0,26	0,72	0,46	0,22	0,24	0,37	1,02
CaO	6,54	3,82	5,15	2,76	2,51	3,66	1,81	0,95	0,78	1,6	1,24	0,21	0,93	2,46	1,72	0,31	1,27	0,83	0,01
Na <sub>2</sub> O	3,7	3,33	2,61	3,77	4,43	2,81	4,78	3,26	3,01	3,84	3,85	3,79	3,77	3,03	3,62	3,41	5,52	3,48	0,03
K <sub>2</sub> O	2,1	3,53	3,24	3,92	4,04	4,61	4,38	5,95	3,79	4,96	5,49	4,49	5,28	5,5	5,4	5,58	1,33	5,51	3,35
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,15	0,37	0,11	0,22	0,19	0,09	0,09	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06	0,06	0,09	0,04	0,06	0,05	0,03
LOI	7,3	4,5	1	0,9	2,6	4,1	1,5	0,7	1,4	1,5	1,9	1	1,3	0,4	1,9	0,8	1,6	0,7	4,5
Total	99,67	99,66	99,72	99,77	99,73	99,74	99,66	99,74	99,81	99,68	99,75	99,82	99,85	99,73	99,66	99,69	99,8	99,86	99,84
Ni (ppm)	69,2	4	23,2	6,2	4,3	22,7	2,4	3	3,1	1,9	4	2,3	1,3	7,3	2,6	1,5	2,4	1,7	2,6
K	17432	29303	26896	32541	33537	38269	36360	49393	31462	41174	45574	37273	43831	45657	44827	46321	11041	45740	27809
Rb	75,2	109,4	114,1	120,8	126,5	155,4	134,7	198	81,1	162,8	160,8	104,6	200	186,2	169	148,9	62	312,7	122
Ba	794	1339	1136	1296	1520	1335	1737	1575	872	1590	1566	940	906	1356	1564	1533	644	707	435
Sr	360,1	384,4	345,9	284,8	307,7	208,9	263,1	121,4	96,4	191,1	177,9	80	118	208,4	239,1	104,2	216,5	100,6	7,1
Ta	0,6	0,7	0,8	0,9	0,8	0,9	1	1,2	0,6	1,2	1,1	0,8	1,1	0,9	0,9	1,1	1	1,7	0,9
Nb	6,2	9,7	9,5	11,2	9,5	11	12,8	13,9	8	13,6	12,3	11,3	13,7	11,7	12,1	11,9	11,3	17	11,3
Hf	3	6,5	5,7	6,9	6,8	7	8,6	9,2	7,2	8,5	7,2	7,6	6,8	8,2	8	8,4	7,2	8,9	6,5
Zr	116,1	239,7	230,5	259	275,3	283,8	346,4	347,1	270,1	357,1	293,5	305,9	232,8	294,8	312,7	320,6	285,2	274,9	247,1
Ti	3896	5995	3117	4796	3597	2817	2697	2398	1079	2517	2338	1678	2098	2098	2757	1858	1978	1558	1978
Y	229,7	30,6	22,8	28,3	26,1	22,8	27	32,4	25,3	28,6	26	27,6	31,4	36,2	26	28,8	24,6	34,4	25,4
P	654,7	1614,9	480,1	960,2	829,3	392,8	392,8	261,9	261,9	305,5	261,9	261,9	261,9	261,9	392,8	174,6	261,9	218,2	130,9
Th	6,8	12,2	13,3	13,5	12,9	13,7	16,6	20,2	13,1	16	16,8	17,4	20,8	19,3	16,8	19,5	16,4	23,4	16,1
La	146,1	47,3	40,8	45	45,5	43,6	52	60,4	37,3	52	49,8	53,1	56,5	52,5	51,8	57,9	47,1	39,3	72,9
Ce	49,6	93,5	78,2	86,7	86,5	83,6	100,8	115,7	71	102,9	94,9	104,7	107,6	101,1	96,4	110,5	92,1	76,6	99,6
Pr	25,09	10,35	8,43	9,4	9,57	9,13	10,91	12,66	7,38	10,82	10,41	11,11	11,49	11,03	10,37	11,81	9,74	8,23	13,85
Nd	110,5	40	29,7	35	33,9	31,3	39,4	45,4	26,2	38,8	38,5	39,5	40,9	38,7	37,6	42	36,3	29,7	46,4
Sm	22,36	7,51	4,74	6,6	6,06	5,69	6,57	7,66	4,39	6,79	5,75	6,79	6,69	7,05	6,36	7,04	5,92	5,75	6,91
Eu	9,02	2,06	1,03	1,51	1,47	1,21	1,44	1,3	0,57	1,24	1,11	0,93	1,01	1,17	1,38	1,25	1,08	0,62	1,17
Gd	39,74	6,84	4,36	6,17	5,45	4,93	5,87	6,74	4,15	5,96	5,17	5,73	5,95	6,55	5,62	5,85	4,95	5,05	5,1
Tb	5,16	0,96	0,64	0,85	0,8	0,72	0,86	0,98	0,67	0,79	0,78	0,83	0,85	1,02	0,81	0,87	0,69	0,84	0,71

	Continuação Tabela 2.																		
Dy	29,04	5,63	3,58	5,32	4,45	4,45	4,92	5,64	4,18	4,82	4,48	4,95	5,22	6,62	4,99	5,19	4,27	5,51	4,38
Ho	6,51	1,12	0,77	1,04	0,92	0,88	0,97	1,15	0,82	0,99	0,97	1,01	1,03	1,32	0,89	0,95	0,79	1,15	0,81
Er	16,95	3,46	2,42	3,12	2,83	2,55	3,07	3,62	2,69	3,02	2,64	2,95	3,19	3,95	2,8	2,95	2,51	3,41	2,63
Tm	2,02	0,46	0,35	0,43	0,38	0,37	0,45	0,5	0,39	0,43	0,38	0,46	0,48	0,58	0,43	0,44	0,37	0,59	0,39
Yb	11,91	3,15	2,21	3,11	2,7	2,62	2,9	3,71	2,88	3,11	2,73	3,13	3,34	4,02	2,88	3,07	2,6	3,97	2,62
Lu (ppm)	1,9	0,48	0,35	0,45	0,46	0,4	0,46	0,54	0,43	0,43	0,41	0,47	0,49	0,61	0,43	0,47	0,4	0,59	0,4
ΣREE	213,0	234,6	206,6	221,9	249,1	223,9	276,3	256,7	152,7	258,7	246,7	171,6	175,6	234,5	255,8	240,9	146,3	164,3	111,6
FeOt	5,96	5,43	4,54	4,59	3,85	3,22	2,36	1,88	1,72	2,02	2,37	1,71	1,66	2,74	2,39	1,60	1,77	1,88	1,65
Mg#	42,89	33,60	54,28	24,38	34,74	47,12	11,39	23,83	15,73	16,23	23,15	15,80	21,78	31,87	25,52	19,67	19,44	25,97	52,48
Eu/Eu*	0,93	0,88	0,69	0,72	0,78	0,70	0,71	0,55	0,41	0,60	0,62	0,46	0,49	0,53	0,71	0,60	0,61	0,35	0,60
(La/Yb)N	8,80	10,77	13,24	10,38	12,09	11,94	12,86	11,68	9,29	11,99	13,08	12,17	12,13	9,37	12,90	13,53	12,99	7,10	19,96
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0,568	1,060	1,241	1,040	0,912	1,641	0,916	1,825	1,259	1,292	1,426	1,185	1,401	1,815	1,492	1,636	0,241	1,583	111,6
Ce/Ce*	0,201	1,036	1,034	1,034	1,016	1,027	1,038	1,026	1,049	1,064	1,022	1,057	1,035	1,030	1,020	1,036	1,054	1,044	0,769
Q	11,81	19,70	22,85	23,63	17,67	23,00	22,58	27,79	44,65	26,02	23,84	35,52	28,98	27,13	23,58	31,08	34,61	29,31	60,28

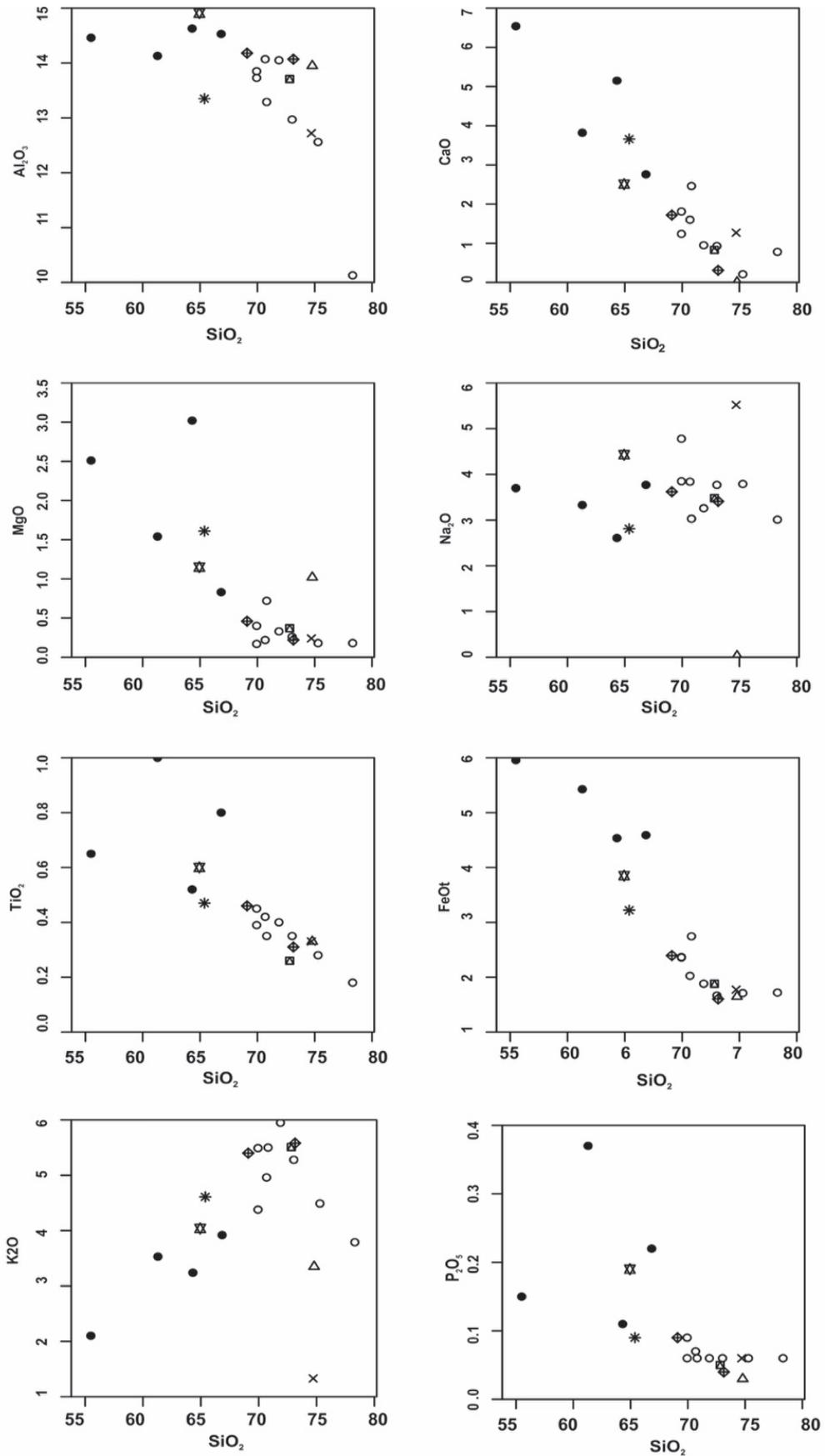
RLT=Riolito; AND=Andesito; IGN=Ignimbrito; LT= Lapilli-tufo; GRN=Granito; DAC=Dacito; TTD=Traquito-Traquidacito; BR=Brecha; AT=Ash tuff.

### Variações dos elementos maiores e traço

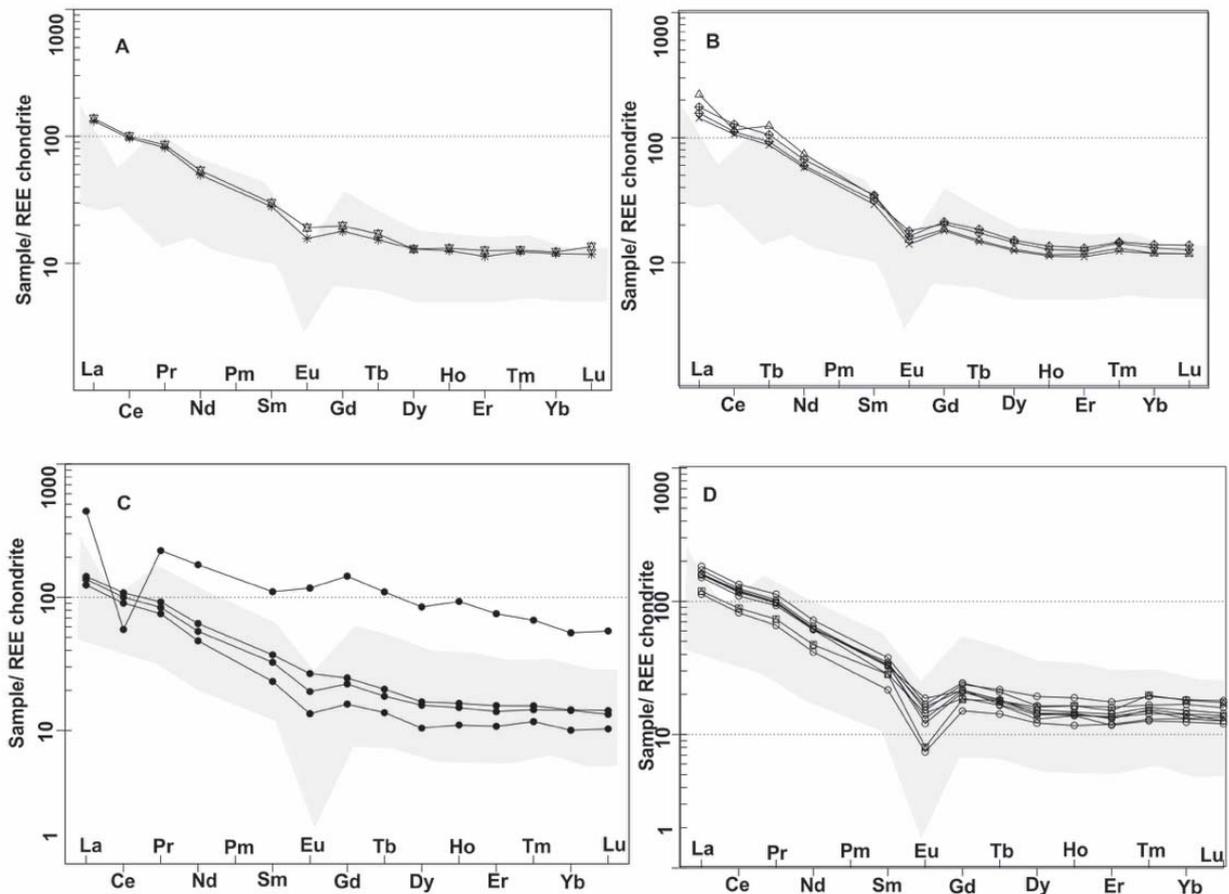
O Mg# correspondente a fácies de fluxo de lava da Formação Cinco Estrelas varia de 24 a 54, ao passo que a fácies vulcanoclástica posiciona-se em um intervalo mais restrito (35 – 47). Este fato sugere que essas rochas poucas evoluídas não são oriundas de magmas mantélicos primitivos, e foram submetidos a diferenciação magmática durante sua história evolutiva (Green e Ringwood, 1967; Fernandes et al., 2011). No geral, essas fácies são caracterizadas por restrito intervalo nos conteúdos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13,35 – 14,31 peso %),  $\text{TiO}_2$  (0,47 – 1,0 peso %),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (0,09 – 0,37 peso %),  $\text{FeO}_t$  (3,22 – 5,96 peso %), e variações relativamente mais amplas nos de  $\text{MgO}$  (0,83 – 3,02 peso %), Sr (308,9 – 384,4 ppm) e Ni (4,3 – 69,2 ppm). Comparativamente, a fácies de fluxo de lava da Formação Vila Mandi revela Mg# mais restrito e variável entre 11 e 32, contrastante com o intervalo mais amplo da fácies vulcanoclástica (19 – 52) e compatível com o granitoide equigranular associado, sugerindo várias fontes crustais que contribuíram para a gênese dessa unidade. As fácies dessa unidade possuem intervalos mais amplos nos conteúdos de  $\text{K}_2\text{O}$  (1,33 – 5,95 peso %),  $\text{Na}_2\text{O}$  (0,03 – 5,52 peso %), Rb (62 – 312,7 ppm), e mais restritos nos de Zr (247,1 – 357,1 ppm) e Y (24,6 – 36,2 ppm).

Diagramas de variação de elementos maiores mostram também diferenças entre as rochas das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, bem como *gap* composicional em alguns óxidos (Fig. 9). Apesar de algumas dispersões com o aumento de sílica, a fácies de fluxo de lava da Formação Cinco Estrelas mostra correlação negativa de CaO, MgO,  $\text{FeO}_t$  e  $\text{TiO}_2$ , e correlação positiva de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ . O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mostra comportamento relativamente homogêneo no curso da evolução magmática. As fácies de fluxo de lava e granitoide equigranular associado da Formação Vila Mandi mostra correlação negativa de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{FeO}_t$ , sugerindo história evolutiva similar entre elas. Relacionamentos mais dispersos são observados com  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e MgO, provavelmente relacionado ao restrito intervalo de variação de sílica ou, alternativamente, a remobilização incipiente de elementos móveis por alterações hidrotermais pós-magmáticas.

Apesar de algumas diferenças entre as rochas das unidades estudadas assinaladas pelos conteúdos de Elementos Terras Raras (ETR) normalizados para o condrito (Nakamura, 1974), existem também muitas similaridades. As rochas das duas unidades exibem enriquecimento dos Elementos Terras Raras leves (ETRL) em relação aos Elementos Terras Raras pesados (ETRP) visualmente identificado pela inclinação das curvas (Figuras 10a-d). As fácies de fluxo de lava e vulcanoclástica da Formação Cinco Estrelas exibem conteúdos totais de ETR de baixo a moderado (177,6 – 475,9 ppm), padrão relativamente inclinado para a fácies de fluxo de lava com  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 8,84 - 13,24$  e para a fácies vulcanoclásticas com  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 11,94 - 12,09$ , bem como anomalia de Eu média a inexistente ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,69 - 0,93$ ) para as duas fácies, caracterizando assim um comportamento compatível com as séries cálcio-alcalinas e demonstrando que o plagioclásio não teve uma participação fundamental na evolução magmática dessa unidade. Os litotipos da Formação Vila Mandi possuem padrões mais diversificados, provavelmente vinculado à sua evolução polifásica. A sua fácies de fluxo de lava revela conteúdos totais de ETR variando entre 166,1 e 266,0 ppm, com padrão inclinado revelado por  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 9,29 - 12,86$ . A fácies de granitoide equigranular possui conteúdo total de ETR comparável com as fácies anteriores de 181,3 ppm, mas relativamente distinta inclinação no seu padrão, com  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 7,10$ . A fácies vulcanoclástica com ignimbrito, *ash tuff* e lapilli-tufo possuem conteúdos totais de ETR muito restritos (208,8 – 257,9 ppm) e homogênea inclinação no padrão com  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 12,90 - 19,96$ , revelando ligação genética entre esses litotipos como sugerido pelas observações petrográficas. Significativas anomalias negativas de Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,35 - 0,71$ ) são registradas em todas as amostras desta unidade, apontando para o fracionamento expressivo de feldspatos.



**Figura 9.** Variações dos elementos maiores selecionados vs. sílica para as rochas estudadas. Símbolos conforme Figura 7.

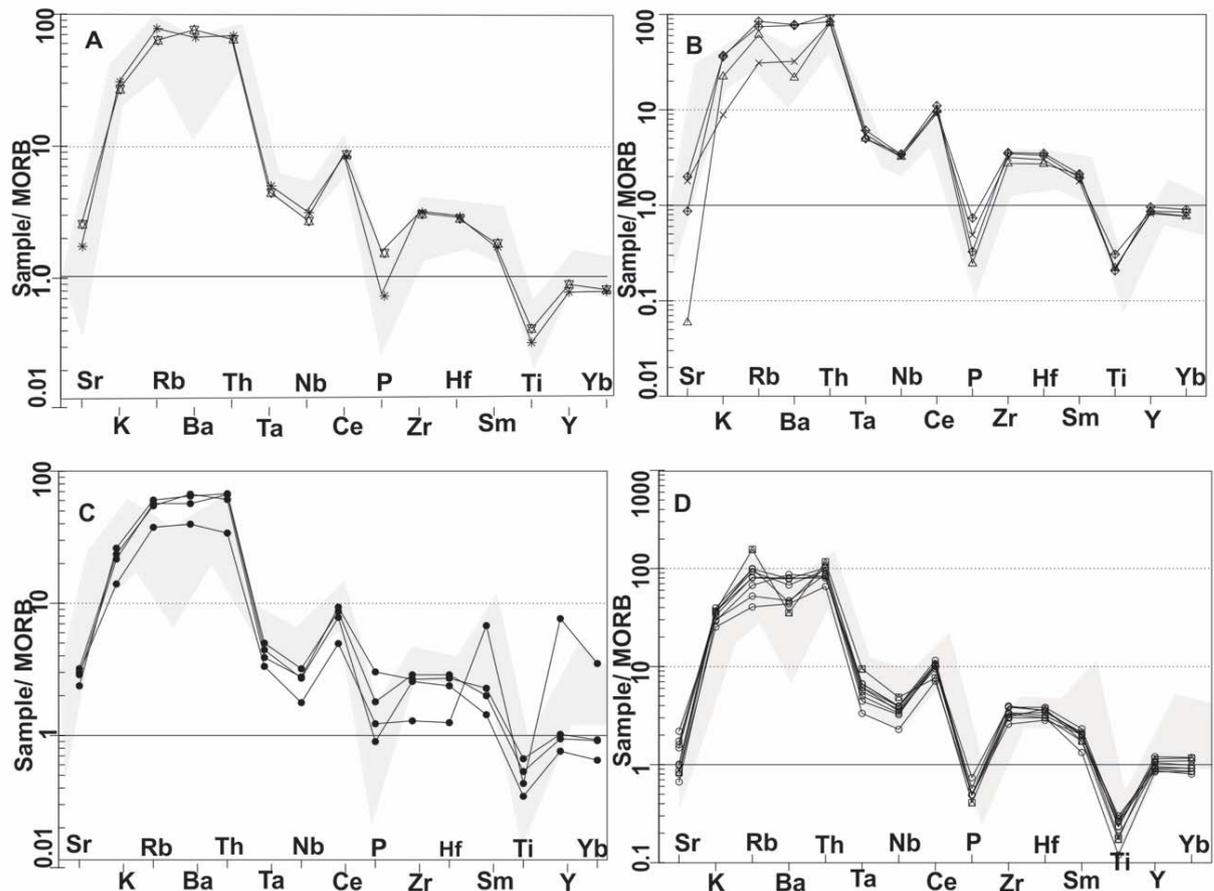


**Figura 10.** Padrões de ETR normalizados para condrito (Nakamura, 1974). A e B) Fácies vulcanoclásticas das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, respectivamente; C e D) Fácies de fluxo de lava das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, respectivamente. Símbolos conforme Figura 7. Campos delimitados em cinza mostra o padrão dos ETR da Formação Santa Rosa (Fernandes et al., 2011)

Uma das amostras de andesito revela expressiva anomalia negativa de Ce ( $Ce/Ce^* = 0,20$ ) (Figura 10c), bem como padrão de ETR distinto das demais amostras, mas que no geral acompanha o comportamento das demais amostras em vários outros diagramas de correlação. Apesar de ainda necessitar de muita investigação, essa anomalia pode estar relacionada a assimilação de metassedimentos marinhos pelágicos (Othman et al., 1989); basaltos ou andesitos derivados da fusão parcial de crosta oceânica previamente intemperizada (Humphris, 1984); ou metassedimentos intemperizados (Borg e Clynnne, 1998). Esta amostra anômala exibe ainda o maior conteúdo de ETR e distinta razão  $La/Yb_N$  em relação as demais, sugerindo também fonte distinta. Esta característica também foi identificada e caracterizada em riolitos fissurais e rochas associadas do tipo-A da Formação Santa Rosa (Fernandes et al., 2011).

Nos diagramas de multi-elementos normalizados em relação ao MORB (Pearce, 1983) as fácies de fluxo de lava e vulcanoclástica da Formação Cinco Estrelas mostram expressivo enriquecimento em elementos do grupo LILE (*Large-ion lithophile elements*), tais como Sr, K, Rb, Ba e Th; expressivo empobrecimento em Ta e Nb em relação a Th e Ce; empobrecimento de P em relação Ce e Zr; e forte empobrecimento em Ti, Y e Yb (Fig. 11a-b). As fácies de fluxo de lava, vulcanoclástica e granitoide equigranular associado da Formação Vila Mandi possuem anomalias negativas de Ta e Nb, apesar de revelarem conteúdos mais elevados desses elementos. Contudo, esses litotipos possuem enriquecimentos distintos em K, Rb e Th (Fig. 11 c-d). Exibem ainda marcantes anomalias negativas de Sr, Ba,

P, Ti e Yb, que podem refletir o fracionamento de feldspatos, apatita e óxidos de Fe e Ti nessas unidades.



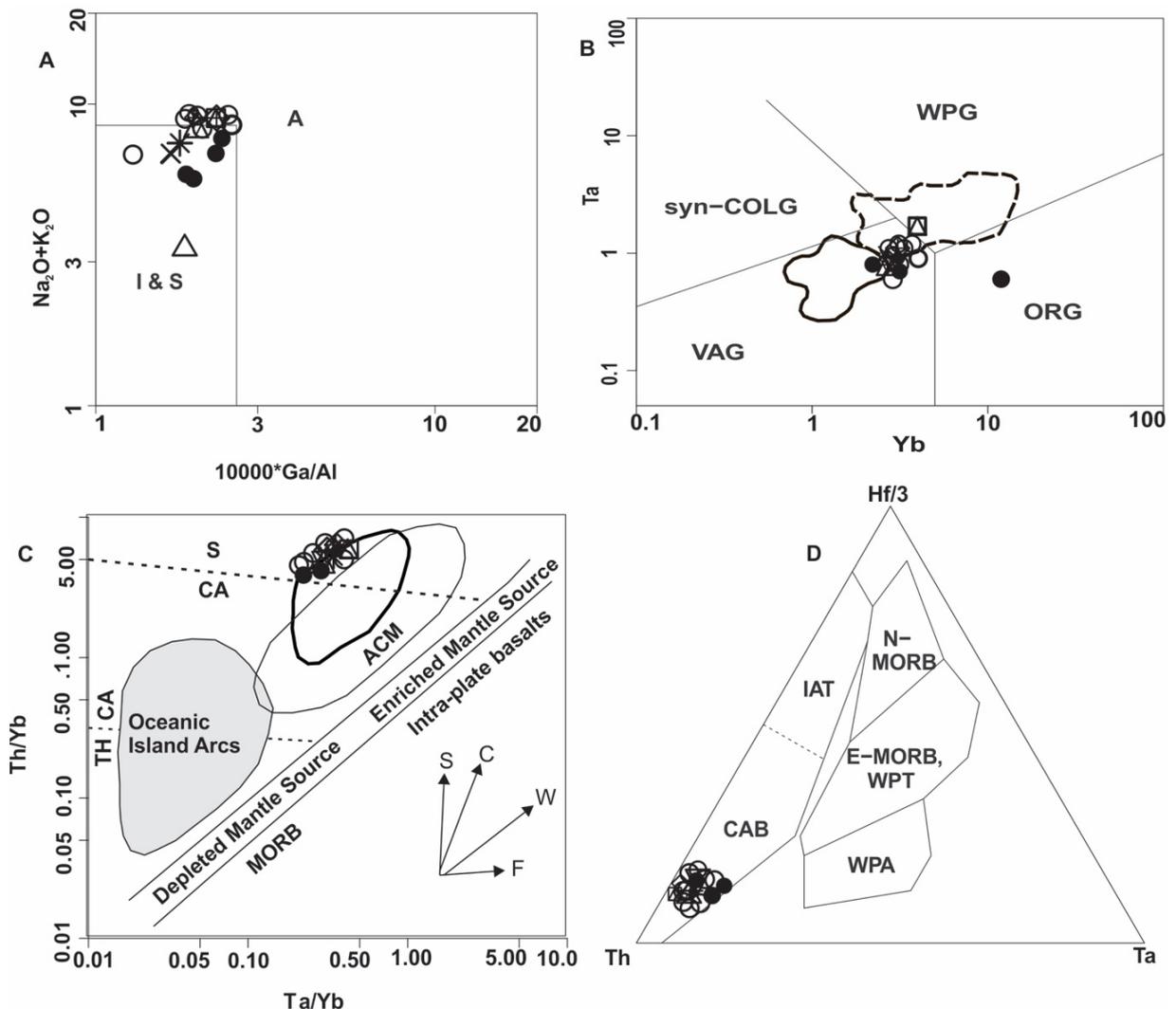
**Figura 11.** Padrões de multi-elementos normalizados para MORB (Pearce, 1983). A e B) Fácies vulcanoclásticas das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, respectivamente; C e D) Fácies de fluxo de lava das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, respectivamente. Símbolos conforme Figura 7. Campos delimitados em cinza mostra o padrão dos diagramas de multi-elementos da Formação Santa Rosa (Fernandes et al., 2011)

### Afinidade tectono-magmática

Os dados de elementos traço e maiores das fácies de fluxo de lava, vulcanoclástica e rochas associadas das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi mostram marcante afinidade geoquímica com granitoides não-fracionados dos tipos I, S e M no diagrama Nb vs.  $10000 \cdot Ga/Al$  (Whalen et al., 1987). Essa relação se mostra, a princípio, confiável considerando-se que altas razões Ga/Al parecem ser particularmente diagnósticas de granitoides do tipo-A (Fig. 12a).

Nos diagramas Ta vs. Yb e Th/Yb vs. Ta/Yb (Pearce et al., 1984) a grande maioria das amostras das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi também mostram afinidade geoquímica com granitoides de arco vulcânico (VAG). Somente uma amostra da fácies de fluxo de lava da Formação Cinco Estrelas mostra afinidade com granitoides intraplaca ou de cordilheira oceânica (Fig. 12b–c). A afinidade geoquímica com rochas de arco vulcânico também é vista nas rochas da Formação Vila Riozinho (Lamarão et al., 2002) e Formação Sobreiro. Ainda segundo o autor, as rochas pertencentes à Formação Santa Rosa possuem afinidades geoquímicas com granitoides intraplaca, comportamento visto em apenas uma amostra da fácies fluxo de lavas da Formação Cinco Estrelas.

A afinidade cálcio-alcalina dessas unidades são assinaladas também pelo diagrama triangular Th–Hf–Ta (Wood, 1980). Segundo Fernandes et al. (2011) este caráter cálcio-alcalino também é observado na Formação Sobreiro, onde nota-se uma tendência no enriquecimento do elemento Th, sem mudança significativa nas razões Th/Ta. As razões de Th, Hf e Ta são muito sensíveis a processos de contaminação crustal. Rochas básicas e fracionadas contaminadas por materiais da crosta continental superior são ricas em Th e possuem altas razões Th/Ta. Assim, um relativo *trend* de enriquecimento em Th sem mudanças nas razões Th/Ta é observado nessas unidades (Fig. 12d), o que indica possível contaminação crustal ou que os magmas que geraram essas unidades foram modificados por metassomatismo relacionado à subducção.



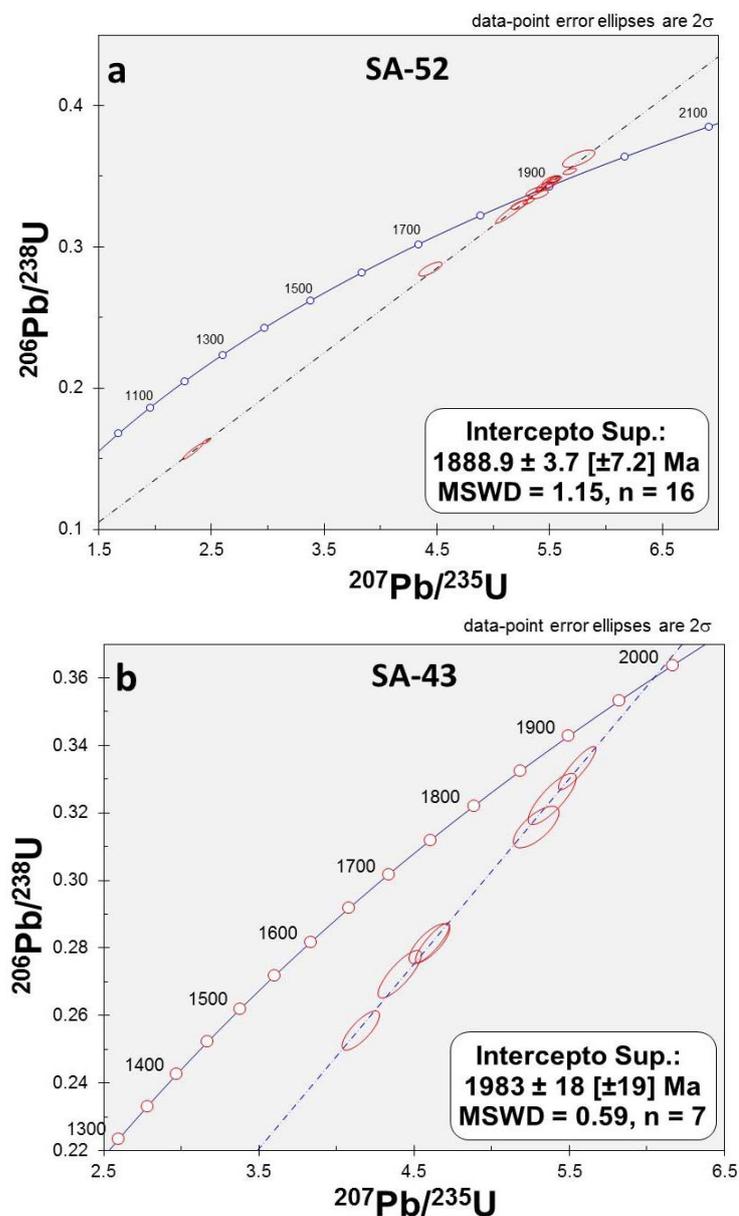
**Figura 12.** Diagramas de afinidade tectônica para as formações Cinco Estrelas e Vila Mandi. A)  $K_2O+Na_2O$  vs.  $Ga/Al$ ; B)  $Ta$  vs.  $Yb$ ; C)  $Th/Yb$  vs.  $Ta/Yb$ ; e D)  $Th-Hf-Ta$ . ACM=Margem continental ativa; VAG=granitos de arco vulcânico; syn-COLG=granitos sin-colisionais; WPG=granitos intraplaca; ORG=granitos de cordilheira oceânica; CAB=basaltos cálcio-alcalinos; IAT=Tholeiito de arco de ilha; WPA=basaltos intraplaca alcalinos; WPT=basaltos intraplaca tholeiíticos; E-MORB=basaltos oceânicos enriquecidos; N-MORB= basaltos oceânicos normais; TH=Tholeiítico; CA=Cálcio-alcalino; S=Shoshonítico. Símbolos e campos conforme Figura 7.

## GEOCROLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO

Foram analisados cristais de zircão de amostras de riolito SA-52 e SA-43. Embora sejam rochas de mesma composição, as feições de campo sugerem que são formadas em momentos e associações petrogenéticas distintas. A primeira amostra foi coletada no topo de uma serra de

riolito fissural com marcante foliação de fluxo vertical. Por sua vez, a segunda ocorre na superfície aplainada da porção central da área de estudo na forma de blocos, sugerindo tratar-se de um membro evoluído da Formação Cinco Estrelas. Os resultados analíticos são apresentados na Tabela 3.

Os cristais das amostras SA-52 e AS-43 são prismáticos, bipiramidais, límpidos, com poucas fraturas e inclusões e ausência de metamitização. Um conjunto de 16 cristais da amostra SA-52, de um total de 35 forneceram uma idade de intercepto superior de  $1888,9 \pm 3,7$  Ma com MSWD= 1,15 (Fig. 13a). De um total de 18 cristais de zircão da amostra SA-43, sete zircões forneceram uma idade de  $1983 \pm 18$  Ma com MSWD= 0,59 (Fig. 13b). As idades obtidas foram interpretadas como as idades de cristalização das rochas riolíticas da região de Vila Mandi sugerindo se tratar de dois pulsos vulcânicos de aproximadamente 100 Ma de diferença.



**Figura 13.** Diagramas Concórdia mostrando em a) e b) as idades de intercepto superior para as rochas riolíticas SA-52 e SA-43 da região de Vila Mandi.

**Tabela 3.** Dados isotópicos U-Pb em zircão por LA-MC-ICP-MS das rochas vulcânicas da região de Vila Mandi.

Amostra Zircão	$f_{206}^a$ (%)	Pb (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Th/U <sup>b</sup>	Razoes isotópicas <sup>c</sup>						Idades (Ma)							
						$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 $\sigma$ (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 $\sigma$ (%)	Rho <sup>d</sup>	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ <sup>e</sup>	2 $\sigma$ (%)	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 $\sigma$ (%)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 $\sigma$ (%)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 $\sigma$ (%)	Conc. <sup>f</sup> (%)
SA52 A1	0,05	260	49	116	0,45	4,4430	1,9	0,2843	1,4	0,75	0,1133	1,3	1613	23	1720	33	1854	23	94
SA52 A2	0,03	45	20	25	0,56	5,7584	2,0	0,3625	1,4	0,68	0,1152	1,5	1994	27	1940	39	1883	28	103
SA52 A3	0,07	87	32	42	0,49	5,6800	0,8	0,3534	0,5	0,59	0,1166	0,7	1951	10	1928	16	1904	13	101
SA52 A4	0,05	63	24	27	0,42	5,5310	0,9	0,3475	0,6	0,67	0,1154	0,6	1923	11	1905	16	1887	12	101
SA52 A7	0,02	53	19	20	0,38	5,5005	1,1	0,3447	0,7	0,68	0,1157	0,8	1909	14	1901	21	1892	15	100
SA52 A8	0,06	100	24	31	0,31	5,2302	1,2	0,3296	0,8	0,67	0,1151	0,9	1837	14	1858	21	1881	16	99
SA52 A10	0,05	208	69	127	0,61	5,1631	2,2	0,3252	2,1	0,94	0,1152	0,7	1815	38	1847	41	1882	14	98
SA52 B1	0,05	249	33	71	0,29	5,4244	0,7	0,3406	0,5	0,71	0,1155	0,5	1890	9	1889	13	1888	9	100
SA52 B2	0,00	173	32	72	0,42	2,4590	1,2	0,1626	0,9	0,78	0,1097	0,7	971	9	1260	15	1794	13	77
SA52 B3	0,05	44	16	17	0,38	5,5152	1,2	0,3471	0,8	0,67	0,1153	0,9	1921	15	1903	22	1884	17	101
SA52 B4	0,04	52	18	19	0,37	5,4618	1,2	0,3429	0,8	0,65	0,1155	0,9	1900	15	1895	22	1888	17	100
SA52 B5	0,00	199	35	90	0,45	2,3335	3,1	0,1551	3,0	0,95	0,1091	1,0	930	28	1223	38	1785	17	76
SA52 B6	0,00	112	33	38	0,34	5,5522	0,8	0,3478	0,5	0,62	0,1158	0,6	1924	10	1909	15	1892	12	101
SA52 B7	0,08	88	31	40	0,45	5,3157	0,8	0,3324	0,5	0,71	0,1160	0,5	1850	10	1871	14	1895	10	99
SA52 B8	0,04	59	21	21	0,35	5,3639	1,1	0,3390	0,8	0,69	0,1148	0,8	1882	15	1879	21	1876	15	100
SA52 B9	0,07	59	21	22	0,38	5,3999	1,3	0,3371	0,7	0,56	0,1162	1,1	1873	14	1885	25	1898	21	99
SA43 A1	0,02	146	50	110	0,76	4,5972	2,3	0,2813	1,7	0,74	0,1219	0,8	1598	28	1749	41	1984	16	91
SA43 A2	0,00	138	40	76	0,55	4,6184	1,9	0,2816	1,7	0,87	0,1211	0,7	1599	27	1753	34	1972	13	91
SA43 B2	0,00	145	52	135	0,94	4,4069	2,6	0,2722	2,1	0,82	0,1174	1,1	1552	33	1714	44	1917	20	91
SA43 C1	0,00	148	61	119	0,81	5,3894	2,3	0,3242	1,9	0,82	0,1206	0,7	1810	35	1965	14	1883	44	92
SA43 C2	0,07	141	49	82	0,59	5,5503	1,8	0,3333	1,6	0,89	0,1229	0,7	1854	29	1908	34	1999	14	97
SA43 C3	0,00	5	4	18	3,81	4,1560	2,4	0,2556	1,9	0,78	0,1140	2,7	1467	27	1665	40	1865	50	88
SA43 C4	0,00	5	4	17	3,75	5,2859	2,3	0,3158	1,6	0,70	0,1167	2,6	1769	28	1867	43	1906	49	95

<sup>a</sup> Fração do  $^{206}\text{Pb}$  não-radiogênico do ponto do zircão analisado, onde  $f_{206} = (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{comum}}^t / (^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{\text{amostra}}$ ; <sup>b</sup> Razão Th/U e concentrações de Pb, Th e U (ppm) calculadas com base no zircão de referência *GJ-1*; <sup>c</sup> Corrigidas para o branco analítico (*background*), para o fracionamento interno Pb/U e normalizadas ao zircão de referência *GJ-1* (ID-TIMS-valores/valores-medidos); <sup>d</sup>  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  calculada usando a equação =  $(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) * (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) * (137,88)$ ; <sup>e</sup> Rho é a correlação de erro definido como o quociente dos erros propagados das razões  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  e  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ; <sup>f</sup> Corrigida para o fracionamento de massa (*mass-bias*) por normalização ao zircão de referência *GJ-1* e para Pb comum usando o modelo de evolução de Pb de Stacey e Kramers (1975); <sup>g</sup> Grau de concordância:  $(\text{idade } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) / (\text{idade } ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}) * 100$  (Horstwood et al., 2016).

## **DISCUSSÃO**

### **Evolução geológica**

Os dados apresentados permitem atribuir aos litotipos vulcano-plutônicos das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi correlação temporal com o vulcanismo paleoproterozoico amplamente identificado em várias porções do Cráton Amazônico (Juliani et al., 2005; Ferron et al., 2010; Juliani e Fernandes, 2010; Misas, 2015; Tokashiki, 2015; Bettencourt et al., 2016; Vieira, 2016). O Complexo Santana formou-se tardiamente e invade essas unidades, este complexo vulcano-plutônico de características efusivas e explosivas, tem evolução polifásica, representada pela formação dos carbonatitos (alvikitos) primários e apatititos associados, e posteriormente por processo de alteração hidrotermal (Vieira, 2016). A área do depósito compreende um sistema vulcano-plutônico em que a base abriga o complexo máfico-ultramáfico. Esse complexo gerou um intenso vulcanismo explosivo carbonatítico com brechas polimíticas, lapilli-tufos e bombas vulcânicas de composição carbonatítica e clastos de diferentes naturezas (Chiquini, 2011). As vulcanoclásticas pertencentes a esta unidade abriga clastos de riolitos e andesitos de litologia semelhante as formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, que sugerem uma possível relação intrusiva deste depósito nas sequências vulcano-plutônicas estudadas.

Assim, a primeira unidade gerada foi a Formação Cinco Estrelas a partir de um vulcanismo monogenético com derrames de lavas andesíticas que produziram foliação de fluxo de lava aproximadamente horizontal resultado de sua cristalização em superfície. A descontinuidade lateral dos afloramentos dificulta o melhor entendimento da geologia, porém é possível observar que esses derrames podem ter possuído uma grande extensão lateral através de dados dos furos de sondagem e sua correlação com outras unidades no Cráton Amazônico. Embora restrita, uma fase explosiva foi materializada por tufos de cinza sobrepostos as lavas andesíticas basais.

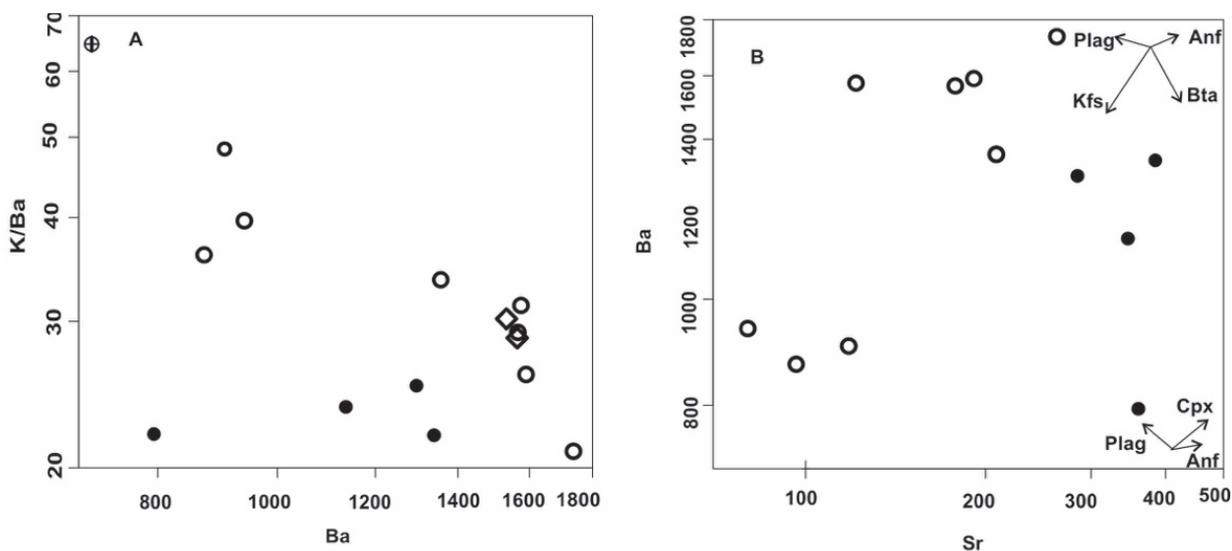
As rochas vulcânicas e vulcanoclástica félsicas da Formação Vila Mandi são relacionadas a evolução polifásica. É oriunda da ascendência de magma viscoso por fissuras crustais NE-SW e NW-SE vinculadas ao evento distensivo pós-tectônico paleoproterozoico ocorrido no Cráton Amazônico (Brito Neves, 1999; Juliani e Fernandes, 2010). A primeira fase consiste em vulcanismo explosivo com fluxos piroclásticos de ignimbritos em função da degaseificação do magma próximo da superfície. Esse magma que ascendia começou a se acumular próximo da fonte formando depósitos vulcanoclásticos por fragmentação autoclástica, com clastos angulosos. Esses depósitos também fluíram para locais um pouco mais distais formando clastos subarredondados. Após a fase explosiva começou uma fase exclusivamente efusiva com acumulação de lavas riolíticas com foliações de fluxo subverticais e várias recargas pelas fissuras, formando depósitos espessos de riolito. A última fase consiste na colocação dos sienogranitos e dos pórfiros graníticos em porções mais profundas da crosta, porém ainda subordinados às fissuras crustais, já que são controlados pelas falhas fotointerpretadas principalmente na parte norte da área estudada. Dessa forma, após a forte erosão identificada na área, foram expostos riolitos e granitoides na superfície.

### **Diferenciação magmática**

A cristalização fracionada foi provavelmente o principal processo de diferenciação magmática atuante nas unidades estudadas, produzindo magma andesítico e dacítico na Formação Cinco Estrelas e dacito e riolito na Formação Vila Mandi. Embora sejam necessários estudos detalhados de modelamento petrogenético e de geoquímica isotópica, esta interpretação é compatível com a evolução magmática proposta para as unidades vulcânicas das regiões de São Félix do Xingu (Fernandes et al., 2011) e Província Mineral do Tapajós (Lamarão et al., 2002; Misas, 2010).

Fenocristais de clinopiroxênio e plagioclásio são dominantes nos andesitos estudados, ao passo plagioclásio e feldspato potássico nas amostras de dacitos, traqui-dacitos da Formação Cinco Estrelas. Nos riolitos da Formação Vila Mandi os fenocristais são exclusivamente de feldspato potássico, com raro plagioclásio. Tais associações mineralógicas sugerem que estas rochas podem ser derivadas de rochas pouco evoluídas tais como andesito basáltico ou basalto por cristalização fracionada. Essa tendência também é sugerida pelos diagramas geoquímicos de  $K_2O$  vs.  $SiO_2$ , A-F-M e  $K_2O/Na_2O$  vs.  $SiO_2$ , bem como pelos padrões de ETR, mostrando que embora a Formação Cinco Estrelas seja menos evoluída que a Formação Vila Mandi, tem evolução magmática similar.

O diagrama Ba vs. K/Ba para a Formação Cinco Estrelas sugere uma tendência geral de fracionamento com maiores conteúdos de Ba e leve diminuição das razões K/Ba, que pode sugerir que a cristalização fracionada foi um fator importante durante a evolução dessas rochas (Fig. 14a). Já a Formação Vila Mandi mostra conteúdos mais elevados de Ba o que pode sugerir a contribuição de múltiplas fontes crustais na geração desta unidade. Vetores de fracionamento calculado para as amostras menos evoluídas, com base na equação de Fracionamento *Rayleigh* (Rollinson, 1993), no diagrama Ba vs. Sr (Fig. 14b) indicam que a cristalização do plagioclásio com participação subordinada do feldspato potássico, desempenhou um papel significativo durante a evolução geoquímica da Formação Cinco Estrelas. A Formação Vila Mandi e o granitoide equigranular associado tem sua evolução magmática impulsionada principalmente pelo fracionamento de feldspato potássico e plagioclásio. Tais comportamentos estão de acordo com as observações petrográficas e diagramas de variação elementos maiores.



**Figura 14.** Diagramas de variação de elementos traço selecionados para as unidades estudadas: A) K/Ba vs. Ba. B) Ba vs. Sr. As setas indicam vetores de fracionamento calculados para a influência de Plag=plagioclásio, Kfs=feldspato potássico, Bta=biotita, Anf=anfíbólio, Cpx=clinopiroxênio; calculado com base no Fracionamento *Rayleigh*. Valores de  $K_d$  de Rollinson (1993).

### Implicações tectono-magmáticas

Os cristais de zircão analisados foram interpretados como de origem magmática e as idades obtidas, consideradas como a idade de cristalização e colocação destes vulcanitos. O intervalo relativamente amplo das idades, sugerem que o magmatismo na área é polifásico, formado por pelo menos dois eventos vulcano-plutônicos distintos separados por aproximadamente 100 Ma. A idade de  $1888,9 \pm 3,7$  Ma obtida para a amostra de riolito (SA-52), litotipo dominante na área de estudo, permite sugerir que grande parte das rochas estudadas pode ser relacionada ao magmatismo efusivo paleoproterozoico que ocorre em

outras porções do Cráton Amazônico; a exemplo da região de São Félix do Xingu (Juliani e Fernandes, 2010), do Grupo Iriri na região da Província Mineral do Tapajós (Juliani et al., 2005), e Grupo Iricoumé na Província Estanífera de Pitinga (Ferron et al., 2010). Assim, a idade de  $1983 \pm 18$  Ma obtida em amostra de riolito (SA-43) sugere que parte das rochas estudadas está relacionada a um evento magmático efusivo mais antigo. Idades mais antigas também foram relacionadas ao evento vulcânico paleoproterozoico na região, a exemplo do Grupo Iricoumé com idades U-Pb em zircão de 1960 Ma (Schobbenhaus et al., 1984). Na região da Província Mineral do Tapajós idades Pb-Pb em zircão de Lamarão et al. (2002) revelaram dois eventos magmáticos de 1880 e 2000 Ma, que indicam que estas rochas podem fazer parte de um evento mais antigo. Mais recentemente, Tokashiki (2015) datou riolitos cálcio-alcálicos e álcali-riolitos na região do Tapajós, através do método U-Pb em zircão e obteve idades de cerca de  $1975 \pm 5$  Ma, a autora atribui um ambiente de arco vulcânico continental de margem ativa para estas rochas, sugerindo que tais litotipos fariam parte do arco magmático cálcio-alcálico continental mais antigo, conhecido como Arco Tapajônico I.

As rochas estudadas mostram marcante afinidade geoquímica com granitoides de arco vulcânico, e apenas uma amostra de biotita sienogranito mostrou afinidade geoquímica com granitoides intraplaca. Esta afinidade geoquímica mostrada pela maioria das amostras também foi descrita nas regiões da Província Mineral do Tapajós (Lamarão et al., 2002; Misas, 2010) e São Félix do Xingu (Fernandes et al., 2011). Assim, apesar da ausência de dados isotópicos de evolução crustal, os dados agora apresentados sugerem um modelo tectono-magmático compatível e complementar aquele que ocorre mais a Norte na região do Xingu, vinculada à geração de arco magmático continental aproximadamente EW em ca. 2000 Ma que culminou com a geração da Formação Cinco Estrelas. A idade obtida neste trabalho de  $1889 \pm 4$  Ma e as características geoquímicas fornecem duas possibilidades para a geração da Formação Vila Mandi: 1) Formação de um segundo arco magmático mais maturo; ou 2) Ambiente transicional entre final de orogenia e início de evento distensivo fissural, a exemplo da Formação Santa Rosa na região do Xingu (Fernandes et al., 2011).

## CONCLUSÃO

A área de estudo abriga unidades vulcano-plutônicas recentemente individualizadas em formações Cinco Estrelas e Vila Mandi. A unidade basal Formação Cinco Estrelas compreende rochas vulcânicas básicas a intermediárias efusivas e subordinadamente explosivas, predominantemente cálcio-alcálicas, levemente transicional entre cálcio-alcálico a shoshonítico, composição exclusivamente metaluminosa e afinidade geoquímica com granitoides de arcos vulcânicos; A unidade superior, abriga rochas mais evoluídas, com características transicionais entre metaluminosa a peraluminosa e ambiente tectônico similar a unidade basal. Esta unidade formou-se a partir da ascensão de um magma de alta viscosidade que fluiu através de fissuras na crosta, que podem estar relacionadas ao evento distensivo pós-tectônico descrito por Brito Neves (1999).

O Complexo Santana, que ocorre na região, mas não é objeto de estudo detalhado deste trabalho, formou-se tardiamente e invade essas unidades, este complexo vulcano-plutônico de características efusivas e explosivas, sendo atribuída uma evolução polifásica para esta unidade (Vieira, 2016). A área correspondente ao depósito compreende um sistema vulcano-plutônico em que a base abriga o complexo máfico-ultramáfico. As vulcanoclásticas que ocorrem nesta unidade exhibe clastos de riolitos e andesitos de litologia semelhante as formações Cinco Estrelas e Vila Mandi, sugerindo assim uma relação intrusiva deste depósito nas seqüências vulcano-plutônicas estudadas.

É atribuído a Formação Vila Mandi uma evolução polifásica, caracterizadas por uma fase vulcânica mais efusiva, seguida por uma fase mais explosiva que fluíram através das

fissuras, formando lapilli-tufos, brecha e ignimbritos. A fase final deste evento tem características efusivas e formaram os riolitos com foliação de fluxo subvertical, originando serras de riolitos muito comuns na região. Os vários pulsos magmáticos ocorridos deram origem a espessas camadas que foram soterradas e colocadas no mesmo nível crustal de formação das rochas graníticas que ocorrem na área e que posteriormente em decorrência da erosão acentuada foram expostas lado a lado.

O vulcanismo registrado na região foi controlado por um processo de cristalização fracionada contínua, evoluindo de um magma andesítico para dacítico na Formação Cinco Estrelas e nos riolitos da Formação Vila Mandi. A associação mineralógica das rochas estudadas, composta essencialmente por fenocristais de plagioclásio nos andesitos, fenocristais de plagioclásio e feldspato potássico nos dacitos e riolitos, sugerem que estas rochas podem ser derivadas de rochas menos evoluídas por processos de cristalização fracionada. Tais características petrográficas e geoquímicas nos permitem sugerir que os litotipos vulcano-plutônicos das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi mostram correlação temporal com o vulcanismo paleoproterozoico amplamente identificado em várias porções do Cráton Amazônico, em especial na região de São Félix do Xingu (Juliani et al., 2005; Ferron et al., 2010; Juliani e Fernandes, 2010; Misas, 2015; Tokashiki, 2015; Bettencourt et al., 2016; Vieira, 2016).

As idades U-Pb em zircão nos riolitos permitiu a individualização de dois eventos magmáticos distintos na região. O primeiro pulso magmático forneceu idade  $1983 \pm 18$  Ma e o segundo pulso magmático tem idade  $1888.9 \pm 3,7$  Ma. Tais pulsos magmáticos sugerem a existência de pelo menos dois eventos vulcânicos na região, separados por aproximadamente 100 Ma. Idades semelhantes também foram encontradas em diferentes pontos do Cráton Amazônico, sugerindo que a idade de  $1888.9 \pm 3,7$  Ma pode estar relacionada ao magmatismo efusivo paleoproterozoico que ocorre em outras porções do cráton; a exemplo da região de São Félix do Xingu (Juliani e Fernandes, 2010), do Grupo Iriri na região da Província Mineral do Tapajós (Juliani et al., 2005), e Grupo Iricoumé na Província Estanífera de Pitinga (Ferron et al., 2010). A idade de  $1983 \pm 18$  Ma obtida em riolito sugere que parte das rochas estudadas pode estar relacionada a um evento magmático efusivo mais antigo. Idades mais antigas também foram relacionadas ao evento vulcânico paleoproterozoico na região, a exemplo do Grupo Iricoumé com idades U-Pb em zircão de 1960 Ma (Schobbenhaus et al., 1984) e Província Mineral do Tapajós com idades Pb-Pb e U-Pb em zircão de 1975 e 2000 Ma respectivamente (Lamarão et al., 2002).

## AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem: ao CNPq (Processos 555066/2006-1, 306130/2007-6 e 475164/2011-3) pelo apoio financeiro; à UFPA pela concessão de Bolsa de Mestrado para a primeira autora; ao Laboratório de Geologia Isotópica (PARÁ-ISO) pela infraestrutura disponibilizada; ao Dr. Marcelo Vasquez, da CPRM, pelo apoio na realização de análises em Microscópio Eletrônico de Varredura; e aos funcionários e técnicos da MbAC Fertilizer Corporation pelo apoio durante os trabalhos de campo. Este trabalho é uma contribuição ao projeto INCT Geociências da Amazônia (Processo CNPq/MCT/FAPESPA 573733/2008-2).

## REFERÊNCIAS

- Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth Science Reviews*, 17(1-2), 1-29.
- Araújo, O. J. B., Maia, R. G. N., 1991. Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A, CPRM, Rio de Janeiro.

- Bahia, R. B. C., Quadros, M. L. E. S., 2000. Projeto Especial Província Mineral do Tapajós. Geologia e recursos minerais da Folha Caracol (SB.21-X-C). Estado do Pará. Escala 1:250.000. Nota explicativa e mapas, Brasília.
- Barbosa, O., 1966. Geologia básica e econômica da área da região do Médio Tapajós, Estado do Pará. 126, DFPM/DNPM, Rio de Janeiro.
- Barbosa, O., Andrade Ramos, J. R., Gomes, F. A., Hembold, R., 1986. Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia, Monografia 19. DNPM/DGM, Rio de Janeiro, pp. 95.
- Bettencourt, J. S., Juliani, C., Xavier, R. P., Monteiro, L. V. S., Bastos Neto, A. C., Klein, E. L., Assis, R. R., Leite Jr, W. B., Moreto, C. P. N., Fernandes, C. M. D., Pereira, V. P. (2016). Metallogenic systems associated with granitoid magmatism in the Amazonian Craton: An overview of the present level of understanding and exploration significance. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 22-49.
- Borg, L. E., Clyne, M. A. (1998). The Petrogenesis of Felsic Calc-alkaline Magmas from the Southernmost Cascades, California: Origin by Partial Melting of Basaltic Lower Crust. *Journal of Petrology*, 39(6), 1197–1222.
- Brito Neves, B. B. (1999). América do Sul: quatro fusões, quatro fissões e o processo acrescionário andino. *Revista Brasileira de Geociências*, 29, 379–392.
- Caputo, M. V., Rodrigues, R., Vasconcelos, D. N. N., (1972). Nomenclatura Estratigráfica da Bacia do Amazonas: História e Atualização. 26º Congresso Brasileiro de Geologia, v. 35-46. Belém: SBG.
- Carneiro, C. C., Carneiro-Araújo, S. A., Juliani, C., Crosta, A. P., Monteiro, L. V. S., Fernandes, C. M. D. (2013). Estruturação Profunda na Província Mineral do Tapajós Evidenciada por Magnetometria: Implicações para a Evolução Tectônica do Cráton Amazonas. *Boletim SBGf*, 86, 29-31.
- Chemale Jr, F., Kawashita, K., Dussin, I. A., Ávila, J. N., Justino, D., Bertotti, A. (2012). U-Pb zircon in situ dating with LA-MC-ICP-MS using a mixed detector configuration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 84, 275-296.
- Chiquini, A. P. (2011). Estudo geológico e petrográfico das vulcânicas e das alterações hidrotermais associados no médio Rio Xingu. Trabalho de Formatura. São Paulo: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo.
- Costa, J. A. V., Costa, J. B. S., Macambira, M. J. B., (2001). Grupo Surumu e Suíte Intrusiva Saracura, RR: novas idades Pb-Pb em zircão e interpretação tectônica. 7º Simpósio de Geologia da Amazonia, v. 1, Belém: SBG.
- Cruz, R. S., Fernandes, C. M. D., Villas, R. N. N., Juliani, C., Monteiro, L. V. S., de Almeida, T. I. R., Lagler, B., de Carvalho Carneiro, C., Misas, C. M. E. (2015). A study of the hydrothermal alteration in Paleoproterozoic volcanic centers, São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil, using short-wave infrared spectroscopy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 324-335.
- Cruz, R. S., Fernandes, C. M. D., Villas, R. N. N., Juliani, C., Monteiro, L. V. S., Lagler, B., Misas, C. M. E. (2016). Paleoproterozoic volcanic centers of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Hydrothermal alteration and metallogenic potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320, 75-87.
- Faraco, M. T. L., Marinho, P. A. C., Vale, A. G., Costa, J. S., Ferreira, A. L., Valente, C. R., Lacerda Filho, J. V., Moreton, L. C., Camargo, L. C., Camargo, M. A., Frasca, A. A., Ribeiro, P. S. E., Vasconcelos, A. M., Oliveira, M., Oliveira, I. W. B., Abreu Filho, W., Gomes, I. P. (2004). Folha SC.22 - Tocantins. In: C. Schobbenhaus, J.H. Gonçalves, J.O.S. Santos, M.B. Abram, R. Leão Neto, G.M.M. Matos, R.M. Vidotti, M.A.B. Ramos, J.D.A.d. Jesus (Eds.), *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas ed.*, v. CD-ROM). Brasília: CPRM.
- Fernandes, C. M. D., Juliani, C., Monteiro, L. V. S., Lagler, B., Echeverri Misas, C. M. (2011). High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences*, 32(4), 351-368.
- Fernandes, C. M. D., Lagler, B., Juliani, C., Monteiro, L. V. S., Rocha Júnior, J. M., (2016). Metallogeny of the Paleoproterozoic volcanic centers in the Vila Mandi region, Uatumã SLIP,

- southernmost Amazonian Craton, Brazil. 26° Goldschmidt 2016, v. Abstracts, PDF Program. Yokohama:
- Ferron, J. M. T. M., Bastos Neto, A. C., Lima, E. F., Costi, H. T., Moura, C. A. V., Prado, M., Pierosan, R., Galarza, M. A. (2006). Geologia e geocronologia Pb-Pb de rochas graníticas e vulcânicas ácidas a intermediárias Paleoproterozóicas da Província Pitinga, Craton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(3), 501–519.
- Ferron, J. M. T. M., Bastos Neto, A. C., Lima, E. F., Nardi, L.V.S., Costi, H. T., Pierosan, R., Prado, M. (2009). Petrology, geochemistry, and geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks (1.89–1.88 Ga) of the Pitinga Province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Ferron, J. M. T. M., Bastos Neto, A. C., Lima, E. F., Nardi, L. V. S., Costi, H. T., Pierosan, R., Prado, M. (2010). Petrology, geochemistry, and geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks (1.89–1.88 Ga) of the Pitinga Province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(2), 483-497.
- Gonçalves, V. M. L. (2016). Petrografia dos carbonatitos e vulcanoclásticas associados ao Depósito de Fosfato Serra da Capivara, região de Vila Mandi (PA), Sul do Cráton Amazônico. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém: Faculdade de Geologia - Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará.
- Green, D. H., Ringwood, A. E. (1967). The genesis of basaltic magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 15(2), 103–190.
- Horstwood, M. S. A., Košler, J., Gehrels, G., Jackson, S. E., McLean, N. M., Paton, C., Pearson, N. J., Sircombe, K., Sylvester, P., Vermeesch, P., Bowring, J. F., Condon, D. J., Schoene, B. (2016). Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-(Th)Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 40(3), 311-332.
- Humphris, S. E. (1984). The mobility of the rare earth elements in the crust. In: P. Henderson (Ed.), *Rare earth element geochemistry ed.*, v. 2, 317-342). Netherlands: Elsevier.
- Hurley, P. M., Almeida, F. F. M., Melcher, G. E., Cordani, U. G., Rand, J. R., Kawashita, K., Vandomos, P., Pinson Jr., W. H., Fairbairn, H. W. (1967). Test of continental drift by means of radiometric ages. *Science*, 157(3788), 495-500.
- Irvine, T. N., Baragar, W. R. A. (1971). A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8, 523–547.
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L., Belousova, E. A. (2004). The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, 211, 47–69.
- Juliani, C., Fernandes, C. M. D. (2010). Well-preserved Late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 191(3-4), 167-179.
- Juliani, C., Fernandes, C. M. D., Monteiro, L. V. S., Misas, C. M. E., Lagler, B., (2009). Possível zonamento metalogenético associado ao evento vulcano-plutônico de ~2,0 a 1,88 Ga na parte sul do Cráton Amazônico. 2° Simpósio Brasileiro de Metalogenia, v. CD-ROM. Gramado: UFRGS.
- Juliani, C., Rye, R. O., Nunes, C. M. D., Snee, L. W., Correa Silva, R. H., Monteiro, L. V. S., Bettencourt, J. S., Neumann, R., Neto, A. A. (2005). Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints. *Chemical Geology*, 215(1-4), 95-125.
- Juliani, C., Vasquez, M. L., Klein, E. L., Villas, R. N. N., Echeverri-Misas, C. M., Santiago, E. S. B., Monteiro, L. V. S., Carneiro, C. C., Fernandes, C. M. D., Usero, G. (2014). Metalogenia da Província Tapajós. In: M.G. Silva, M.G. Rocha Neto, H. Jost, R.M. Kuyumajian (Eds.), *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras ed.*, v. 1, 229-268). Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Lagler, B. 2014. Geologia do Depósito de Fosfato Serra da Capivara - São Félix do Xingu, Pará, MbAC Fertilizer Corp.
- Lagler, B., Tedesco, M. A., Oliveira, A. S. D., Juliani, C., Waring, M. H., 2014. Geologia do Depósito de Fosfato Serra da Capivara - São Félix do Xingu, Pará, MbAC Fertilizer Corp.

- Lamarão, C. N., Dall'Agnol, R., Lafon, J.-M., Lima, E. F. (2002). Geology, geochemistry, and Pb-Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic magmatism of Vila Riozinho, Tapajos Gold Province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, 119(1-4), 189–223.
- Le Maitre, R. W. (2002). A classification of igneous rocks and glossary of terms (2a ed.). London: Elsevier.
- Ludwig, K. R., 2011. Isoplot: A Plotting and Regression Program for Radiogenic Isotope Data. Version 4.13, USGS.
- 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, CPRM, Brasília.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M. (1989). Tectonic Discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101, 635–643.
- Marques, S. N. R., Souza, V. S., Dantas, E.L., Valério, C. S., Nascimento, R. S. C. (2014). Contributions to the petrography, geochemistry and geochronology (U-Pb and Sm-Nd) of the Paleoproterozoic effusive rocks from Iricoumé Group, Amazonian Craton, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 44(1): 121-138, March 2014
- Milhomem Neto, J. M., Lafon, J. M., Galarza, M. A., Moura, C. A. V. (2017). U-Pb em zircão por LA-ICP-MS no laboratório Pará-Iso (UFPA): metodologia e aplicação na porção sudeste do Escudo das Guianas. In: A.E.d.A. Santos Júnior (Ed.), *Contribuições à Geologia da Amazônia ed.*, v. 10, em impressão). Belém: SBG-No.
- Misas, C. M. E. (2010). Evolução magmática, alteração hidrotermal e gênese da mineralização de ouro e cobre do Palito, Província Aurífera do Tapajós (PA). Dissertação de Mestrado. São Paulo: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo.
- Misas, C. M. E. (2015). Geologia e alteração hidrotermal nas rochas vulcânicas e plutônicas paleoproterozóicas na porção sul da Província Mineral do Tapajós (PA). Tese de Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo.
- Montalvão, R. M. G., Bezerra, P. E. L., Issler, R. S., Dall'Agnol, R., Lima, M. I. C., Fernandes, C. A. C., Silva, C. G. (1975). Folha NA.20-Boa Vista e parte das folhas NA.21-Tumucumaque, NB.20-Roraima e NB.21. In: B.D.N.D.P.M.P. RADAMBRASIL (Ed.), *Geologia ed.*, v. 8, Rio de Janeiro: CPRM.
- Morrison, G. W. (1980). Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association. *Lithos*, 13(1), 97-108.
- Nakamura, N. (1974). Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(5), 757-775.
- Oliveira, A. S., Fernandes, C. A. S., Issler, R. S., Abreu, A. S., Montalvão, R. M. G., Teixeira, R. S., 1975. Geologia da Folha NA.21–Tumucumaque e parte da Folha NB.21, DNPM, Rio de Janeiro.
- Othman, D. B., White, W. M., Patchett, J. (1989). The geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis, and crust-mantle recycling. *Earth and Planetary Science Letters*, 94(1/2), 1-21.
- Pastana, J. M. N., 1980. Projeto Rio Chiché: Relatório Final. Texto. DNPM/CPRM, Belém, pp. 125.
- Pearce, J. A. (1983). The role of subcontinental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. In: C.J.H.a.M.J. Norry (Ed.), *Continental basalts and mantle xenoliths ed.*, v. 230–249). Shiva: London.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. C. (1984). Trace Elements discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956–983.
- Peccherillo, A., Taylor, S. R. (1976). Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58, 63-81.
- Pessoa, M. R., Andrade, A. F., Nascimento, J. O., Santos, J. O. S., Oliveira, J. R., Lopes, R. C., Prazeres, W. V., 1977. Projeto Jamanxim, DNPM/CPRM, Manaus.
- Pinho, S. C. C., Fernandes, C. M. D., Teixeira, N. P., Paiva Jr., A. L., Cruz, V. L., Lamarão, C. N., Moura, C. A. V. (2006). O magmatismo paleoproterozóico da região de São Félix do Xingu, Província Estanífera do Sul do Pará: Petrografia e Geocronologia. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(4), 793–802.
- Reis, N. J., Faria, M. S. G., Fraga, L. M. B., Haddad, R. C. (2000). Orosirian calc-alkaline volcanism and the Orocaina event in the northern Amazonian craton, eastern Roraima state, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30, 380-383.
- Rollinson, H. R. (1993). *Using Geochemical data: evaluation, presentation, interpretation.* London: Longman Group UK Ltd.

- Roverato, M., Giordano, D., Echeverri-Misas, C. M., Juliani, C. (2016). Paleoproterozoic felsic volcanism of the Tapajós Mineral Province, Southern Amazon Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310, 98-106.
- Santos, D. B., Fernandes, P. E. C. A., Dreher, A. M., Cunha, F. M. B., Basei, M. A. S., Teixeira, J. B. G., 1975. Geologia da Folha SB.21-Tapajós, DNPM, Rio de Janeiro.
- Santos, J. O. S. (2003). Geotectônica dos Escudos da Guiana e Brasil Central. In: L.A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R.M. Vidotti, J.H. Gonçalves (Eds.), *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Texto, mapas e SIG ed.*, v. 169-226). Brasília: CPRM.
- Santos, J. O. S., Hartmann, L. A., Gaudette, H. E., Groves, D. I., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R. (2000). A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology. *Gondwana Research*, 3(4), 453-488.
- Schobbenhaus, C., Campos, D. A., Derze, G. R., Asmus, H. E., 1984. Geologia do Brasil. Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Escala 1:2.500.000, Ministério das Minas e Energia/DNPM, Brasília.
- Schobbenhaus, C., Hoppe, A., Lork, A., Baumann, A., (1994). Idade U/Pb do magmatismo Uatumã no norte do Cráton Amazônico, Escudo das Guiana (Brasil): primeiros resultados. 38º Congresso Brasileiro de Geologia, v. 395–397. Camboriú:
- Silva, G. G., Lima, J. J. C., Andrade, A. R. F., Issler, R. S., Guimarães, G., 1974. Geologia da Folha Sc.22 – Tocantins, DNPM, Rio de Janeiro.
- Stacey, J. S., Kramers, J. D. (1975). Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26(2), 207-221.
- Tassinari, C. C. G., Macambira, M. J. B. (2004). A evolução tectônica do Craton Amazônico. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (Eds.), *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida ed.*, v. 471-486). São Paulo: BECA.
- Teixeira, N. P., Bettencourt, J. S., Dall’Agnol, R., Moura, C. A. V., Fernandes, C. M. D., Pinho, S. C. C. (2005). Geoquímica de granitos Paleoproterozóicos da Suíte Intrusiva Velho Guilherme, Província Estanífera do Sul do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(2), 217–226.
- Teixeira, N. P., Bettencourt, J. S., Moura, C. A. V., Dall’Agnol, R., Macambira, E. M. B. (2002). Archean crustal sources for Paleoproterozoic tin-mineralized granites in the Carajas Province, SSE Para, Brazil: Pb-Pb geochronology and Nd isotope geochemistry. *Precambrian Research*, 119(1-4), 257-275.
- Tokashiki, C. C. (2015). Mineralizações Low- e Intermediate-sulfidation de ouro e de metais de base em domos de riolito paleoproterozoicos na porção sul da Província Mineral do Tapajós. Tese de Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo.
- Vasquez, M. L., Klein, E. L., Quadros, M. L. E., Bahia, R. B. C., Santos, A., Ricci, P., Sachett, C. R., Silva, C. M. G., Macambira, M. J. B., (1999). Magmatismo Uatumã na Província Tapajós – Novos dados geocronológicos. 6º Simpósio de Geologia da Amazônia, v. 471-474. Manaus: SBG.
- Vasquez, M. L., Rosa-Costa, L. T., Silva, C. G., Ricci, P. F., Barbosa, J. O., Klein, E. L., Lopes, E. S., Macambira, E. M. B., Chaves, C. L., Carvalho, J. M., Oliveira, J. G., Anjos, G. C., Silva, H. R. (2008). 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(ed.). Belém: CPRM.
- Vieira, D. A. S. (2016). Cartografia e evolução geológica do vulcano–plutonismo paleoproterozoico associado ao Depósito de Fosfato Serra da Capivara, região de Vila Mandi (PA), sul do Cráton Amazônico. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém: Faculdade de Geologia - Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará.
- Wetherill, G. (1956). Discordant uranium–lead ages. *Transactions of the American Geophysical Union*, 37, 320-326.
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W. (1987). A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4), 407–419.
- Wood, D. A. (1980). The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50, 11–30.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A área de estudo enquadra unidades vulcano-plutônicas recentemente individualizadas nas formações Cinco Estrelas e Vila Mandi. A unidade basal Formação Cinco Estrelas abriga rochas vulcânicas básicas a intermediárias efusivas e subordinadamente explosivas, ocorre de forma restrita na área, geralmente na forma de pequenos lajedos e blocos isolados com rara continuação lateral. Foram descritas duas fácies nesta unidade: 1) fácies de fluxo de lava maciça subaérea, representada por andesitos com foliação de fluxo horizontal e subordinados dacitos porfiríticos e afaníticos associados, com cor variável desde negra, cinza-escuro a púrpura escuro nos dacitos; 2) fácies vulcanoclástica abriga tufo de cinzas laminado e lapillitufos subordinados, de cor cinza claro a escuro e topograficamente relacionados a fácies anterior mas com pouca representatividade na área (Vieira 2016). A unidade superior Formação Vila Mandi é fissural e aflora como grandes lajedos, serras e morrotes, ocorre em grande proporção na área e abriga ao menos cinco diferentes fácies, são elas: 1) fácies de fluxo de lava abriga riolitos e dacitos, com cor variável entre vermelho escuro, púrpura a rosa escuro, exibem foliação de fluxo, assim como grandes diques de riolito bandado; 2) a fácies de *stocks* de biotita sienogranitos equigranulares, tem coloração rosa claro, é intrusiva nos riolitos e dacitos da unidade, com mineralogia semelhante as vulcânicas da unidade, podendo representar um correspondente plutônico do sistema; 3) A fácies ignimbrito félsico soldado ou não abriga clastos de diferentes composições rotacionados pelo fluxo magmático; 4) fácies vulcanoclástica de brechas polimíticas maciça com clastos angulosos a subangulosos de composições variadas, com subordinados lapilli-tufo e tufo de cristais; e 5) fácies de diques com pórfiros graníticos, de mineralogia similar aos riolitos, porém a presença de cristais mais desenvolvidos sugere diferentes níveis crustais para a unidade, mas com origem magmática similar (Vieira 2016).

Geoquimicamente as rochas da Formação Cinco Estrelas são predominantemente cálcio-alcalinas, caráter levemente transicional entre cálcio-alcalino a shoshonítico, composição exclusivamente metaluminosa, com razões A/NK posicionadas entre 1 e 2 e afinidade geoquímica com granitoides de arcos vulcânicos. As características geoquímicas desta unidade são similares às formações Sobreiro, Grupo Surumu e Vila Riozinho; com uma tendência mais evoluída das duas últimas unidades em relação as formações Sobreiro e Cinco Estrelas (Fernandes *et al.* 2011, Lamarão *et al.* 2002, Montalvão *et al.* 1975). A unidade superior, abriga rochas mais evoluídas, com características transicionais entre metaluminosa a peraluminosa e ambiente tectônico similar a Formação Cinco Estrelas. O intervalo

relativamente amplo de  $\text{SiO}_2$  (55,49-73,31 peso %) e baixas razões  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (0,56-1,64) das rochas da Formação Cinco Estrelas são claramente distintos do intervalo restrito de  $\text{SiO}_2$  (69,10-78,31 peso %) e muito altas razões  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  (0,24-111,66) da Formação Vila Mandi.

É atribuído a formação Vila Mandi uma evolução polifásica, formada a partir da ascensão de um magma de alta viscosidade que fluiu através de fissuras na crosta, que podem estar relacionadas ao evento distensivo pós-tectônico descrito por Brito Neves, 1999. Foi identificado uma fase vulcânica mais efusiva, formando riolitos, seguida por uma fase mais explosiva que fluíram através das fissuras, que formou os lapilli-tufos, brecha e ignimbritos. A fase final deste evento tem características efusivas e formaram os riolitos com foliação de fluxo sub-vertical, dando origem a serras de riolitos muito comuns na região. Os vários pulsos magmáticos ocorridos formaram espessas camadas que foram soterradas e colocadas no mesmo nível crustal de formação das rochas graníticas que ocorrem na área e que posteriormente em decorrência da erosão acentuada foram expostas lado a lado.

O vulcanismo registrado na região foi controlado por um processo de cristalização fracionada contínua, que evoluiu de um magma andesítico para dacítico na Formação Cinco Estrelas e nos riolitos da Formação Vila Mandi. A associação mineralógica das rochas estudadas, compreende essencialmente fenocristais de plagioclásio nos andesitos, fenocristais de plagioclásio e k-feldspato nos dacitos e riolitos, sugerem que estas rochas podem ser derivadas de rochas menos evoluídas por processos de cristalização fracionada. Tais características petrográficas e geoquímicas nos permitem sugerir que os litotipos vulcano-plutônicos das formações Cinco Estrelas e Vila Mandi mostram correlação temporal com o vulcanismo paleoproterozoico amplamente identificado em várias porções do Cráton Amazônico, em especial a região de São Félix do Xingu (Juliani *et al.* 2005, Ferron *et al.* 2010, Juliani & Fernandes 2010, Misas 2015, Tokashiki 2015, Bettencourt *et al.* 2016, Vieira 2016).

Apesar de algumas diferenças entre as rochas das unidades estudadas assinaladas pelos conteúdos de Elementos Terras Raras (ETR) normalizados para o condrito (Nakamura 1974), existem também muitas similaridades. As rochas das duas unidades exibem enriquecimento dos Elementos Terras Raras leves (ETRL) em relação aos Elementos Terras Raras pesados (ETRP). As fácies fluxo de lava e vulcanoclástica da Formação Cinco Estrelas exibem conteúdos totais de ETR de baixo a moderado (177,6-475,9 ppm), padrão relativamente inclinado para a fácies de fluxo de lava com razões  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 8,84-13,24$  e para a fácies vulcanoclásticas, razões  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 11,94-12,09$ . Os litotipos da Formação Vila Mandi possuem padrões mais diversificados, provavelmente vinculado à sua evolução polifásica. A

fácies de fluxo de lava revela conteúdos totais de ETR variando entre 166,1 e 266,0 ppm, com padrão inclinado revelado por  $(La/Yb)_N = 9,29-12,86$ . A fácies vulcanoclástica exhibe conteúdos totais de ETR muito restritos (208,8-257,9 ppm) e homogênea inclinação no padrão com  $(La/Yb)_N = 12,90-19,96$ .

Segundo os diagramas de multi-elementos normalizados para o MORB (Pearce 1983) as fácies de fluxo de lava e vulcanoclástica da unidade basal exibem expressivo enriquecimento em elementos do grupo LILE e forte empobrecimento em Ti, Y e Yb. Já a unidade superior mostra marcantes anomalias negativas de Sr, Ba, P, Ti e Yb, que podem refletir o fracionamento de feldspatos, apatita e óxidos de Fe e Ti nesta unidade.

O comportamento dos elementos traço e maiores para as formações Cinco Estrelas e Vila Mandi revelam acentuada afinidade geoquímica com granitoides não-fracionados dos tipos I, S e M no diagrama Nb vs.  $10000 * Ga/Al$  (Whalen *et al.* 1987). Nos diagramas Ta vs. Yb e Th/Yb vs. Ta/Yb (Pearce *et al.* 1984) grande parte das amostras também confirmam a afinidade geoquímica com granitoides de arco vulcânico (VAG) nas duas unidades. A afinidade geoquímica vista na maioria das amostras também se faz presente em outras porções do Cráton Amazônico, como nas regiões da Província Mineral do Tapajós (Lamarão *et al.* 2002, Misas 2010) e São Félix do Xingu (Fernandes *et al.* 2011).

As idades U-Pb em zircão nos riolitos da Formação Vila Mandi permitiu a individualização de dois eventos magmáticos distintos na região. O primeiro pulso magmático forneceu idade  $1983 \pm 18$  Ma e o segundo pulso magmático tem idade  $1888.9 \pm 3,7$  Ma. Tais pulsos foram interpretados como a idade de cristalização destes vulcanitos e sugerem a existência de pelo menos dois eventos vulcânicos na região, separados por aproximadamente 100 Ma. Idades semelhantes também foram encontradas em diferentes porções do cráton, sugerindo que a idade de  $1888.9 \pm 3,7$  Ma pode estar relacionada ao magmatismo efusivo paleoproterozoico que ocorre em outras porções do Cráton Amazônico; a exemplo da região de São Félix do Xingu (Juliani & Fernandes 2010), do Grupo Iriri na região da Província Mineral do Tapajós (Juliani *et al.* 2005), e Grupo Iricoumé na Província Estanífera de Pitinga (Ferron *et al.* 2010). A idade de  $1983 \pm 18$  Ma também obtida em riolitos sugere que parte das rochas estudadas pode estar relacionada a um evento magmático efusivo mais antigo. Idades mais antigas também foram relacionadas ao evento vulcânico paleoproterozoico na região, a exemplo do Grupo Iricoumé com idades U-Pb em zircão de 1960 Ma (Schobbenhaus *et al.* 1984) e Província Mineral do Tapajós com idades Pb-Pb e U-Pb em zircão de 1975 e 2000 Ma respectivamente (Lamarão *et al.* 2002, Tokashiki 2015).

## REFERÊNCIAS

- Almeida F. F. M., Hasui Y., Brito Neves B. B., Fuck R. A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth Science Reviews*, **17**(1-2): 1-29.
- Araújo O. J. B., Maia R. G. N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A*. CPRM, Rio de Janeiro.
- Bahia R. B. C., Quadros M. L. E. S. 2000. *Projeto especial Província Mineral do Tapajós. geologia e recursos minerais da Folha Caracol (SB.21-X-C). Estado do Pará. Escala 1:250.000*. Nota explicativa e mapas, Brasília-DF.
- Barbosa O. 1966. Geologia básica e econômica da área da região do Médio Tapajós, estado do Pará. *Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral*, DFPM/DNPM, Rio de Janeiro. (126).
- Barbosa O., Andrade Ramos J. R., Gomes F. A., Hembold R. 1986. Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia. *Divisão de Geologia e Mineralogia*. DNPM/DGM, Rio de Janeiro, p. 95. (Monografia, 19).
- Barros M.A.S. 2005. Idade U-Pb para o Granito Rio Dourado e sua correlação com o vulcanismo Iriri (Província Amazônia Central-Cráton Amazônico, Nordeste de Mato Grosso). *In: SBG-Núcleo Centro Oeste, 9º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia. Resumos... Goiânia: p. 105-107.*
- Barros M.A.S., Pimentel M.M., Rocha M.L.B.P., Silva F.R.d., Padilha R.A., Dantas E.L., Moura E.D. 2011. A suíte intrusiva Rio Dourado - um granito tipo A de 1,88 Ga - Sudeste do Craton Amazônico - Mato Grosso - Brasil. *Geologia USP. Série Científica* 11, 75-93.
- Bettencourt J. S., Juliani C., Xavier R. P., Monteiro L. V. S., Bastos Neto, A. C., Klein E. L., Assis R. R., Leite Jr W. B., Moreto C. P. N., Fernandes C. M. D., Pereira V. P. 2016. Metallogenic systems associated with granitoid magmatism in the Amazonian Craton: an overview of the present level of understanding and exploration significance. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**: 22-49, Jul.
- Brito Neves B. B. 1999. América do Sul: quatro fusões, quatro fissões e o processo acrescionário andino. *Revista Brasileira de Geociências*, **29** (3): 379-392.
- Caputo M. V., Rodrigues R., Vasconcelos D. N. N. 1972. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: história e atualização. *In: SBG, 26º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Anais... p. 35-46.*
- Carneiro C. C., Araújo, S. A., Juliani C., Crosta A. P., Monteiro L. V. S., Fernandes C. M. D. 2013. Estruturação profunda na Província Mineral do Tapajós evidenciada por magnetometria: implicações para a evolução tectônica do Cráton Amazonas. *In: SBGf, 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Abstract... v. 6, p. 29-31.*
- Chemale F., Kawashita K., Dussin I.V., Ávila J.N., Justino D., Bertotti A. 2012. U-Pb zircon in situ dating with LA-MC-ICP-MS using a mixed detector configuration. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **84**(2): 275-295.

Chiquini A. P. 2011. *Estudo geológico e petrográfico das vulcânicas e das alterações hidrotermais associados no médio Rio Xingu*. Trabalho de conclusão de curso. São Paulo: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, 68p.

Cruz R. S., Fernandes C. M. D., Villas R. N. N., Juliani C., Monteiro L. V. S., Almeida T. I. R., Lagler B., C. C., Misas C. M. E. 2015. A study of the hydrothermal alteration in Paleoproterozoic volcanic centers, São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil, using short-wave infrared spectroscopy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v304, 324-335.

Cruz, R. S., Fernandes, C. M. D., Villas, R. N. N., Juliani, C., Monteiro, L. V. S., Lagler, B., Misas, C. M. E. 2016. Paleoproterozoic volcanic centers of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Hydrothermal alteration and metallogenetic potential. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 320, 75-87.

Cunha B.C.C., Potiguar L.A.T., Ianhez A.C., Bezerra P.E.L., Pithan J.H.L., Souza Júnior J.J., Montalvão R.M.G., Souza A.M.S., Hildred P.R., Tassinari C.C.G. 1981. Geologia. Folha SC.22 - Tocantins. Projeto RADAMBRASIL, Programa de Integração Nacional, Levantamento de Recursos Naturais, Rio de Janeiro, v.22, p.21-196.

Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. 1992. *Rock-forming minerals*. London, Longmans, 696 p.

Faraco M. T. L., Marinho P. A. C., Vale A. G., Costa J. S., Ferreira A. L., Valente C. R., Lacerda Filho J. V., Moreton L. C., Camargo L. C., Camargo M. A., Frasca A. A., Ribeiro P. S. E., Vasconcelos A. M., Oliveira M., Oliveira I. W. B., Abreu Filho W., Gomes I. P. 2004. Folha SC.22 - Tocantins. In: Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos, J.O.S. Abram, M.B. Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B., J.D. Jesus A.D. (eds.). *Carta geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas-SIG*. CPRM, Brasília, DF. 1 CD-ROM.

Fernandes C. M. D., Juliani C., Monteiro L. V. S., Lagler B., Echeverri Misas C. M. 2011. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences*, **32**(4), 351-368.

Fernandes C. M. D., Lagler B., Juliani C., Monteiro L. V. S., Rocha Júnior J. M. 2016. Metallogeny of the Paleoproterozoic volcanic centers in the Vila Mandi region, Uatumã SLIP, southernmost Amazonian Craton, Brazil. In: *Journal of South American Earth Sciences 26° Goldschmidt, Abstracts...*, Program. Yokohama. PDF.

Ferron J. M. T. M., Bastos Neto A. C., Lima E. F., Costi H. T., Moura C. A. V., Prado M., Pierosan R., Galarza M. A. 2006. Geologia e geocronologia Pb-Pb de rochas graníticas e vulcânicas ácidas a intermediárias Paleoproterozóicas da Província Pitinga, Craton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, **36**(3), 501–519.

Ferron J. M. T. M., Neto, A. C. B., Lima E. F., Nardi L.V.S., Costi H. T., Pierosan R., Prado M. 2009. Petrology, geochemistry, and geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks (1.89–1.88 Ga) of the Pitinga Province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*.

- Ferron J. M. T. M., Neto A. C. B., Lima E. F., Nardi L. V. S., Costi H. T., Pierosan R., Prado M. 2010. Petrology, geochemistry, and geochronology of Paleoproterozoic volcanic and granitic rocks (1.89–1.88 Ga) of the Pitinga Province, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **29**(2), 483-497.
- Forman J.H.A. 1972. *Pesquisa Mineral no Iriri/Curuá: relatório preliminar*. Belém, Sudam/ Departamento de Recursos Naturais, 62 p.
- Gifkins C., Hermann W., Large R. 2005. *Altered volcanic rocks*. Hobart, Tasmania, centre for Ore Deposits Research, University of Tasmania, 275 p.
- Gonçalves V. M. L. 2016. *Petrografia dos carbonatitos e vulcanoclásticas associados ao Depósito de Fosfato Serra da Capivara, região de Vila Mandi (PA), Sul do Cráton Amazônico*. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém: Faculdade de Geologia - Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará, 60p.
- Hurley P. M., Almeida F. F. M., Melcher G. E., Cordani U. G., Rand J. R., Kawashita K., Vandomos P., Pinson Jr., W. H., Fairbairn H. W. 1967. Test of continental drift by means of radiometric ages. *Science*, **157**(3788): 495-500.
- Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*, **211**: 47–69.
- Juliani C., Fernandes C. M. D. 2010. Well-preserved Late Paleoproterozoic volcanic centers in the São Félix do Xingu region, Amazonian Craton, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **191**(3-4), 167-179.
- Juliani C., Fernandes C. M. D., Monteiro L. V. S., Misas C. M. E., Lagler B. 2009. Possível zonamento metalogenético associado ao evento vulcano-plutônico de ~2,0 a 1,88 Ga na parte sul do Cráton Amazônico. In: *2º Simpósio Brasileiro de Metalogenia*, v. CD-ROM. Gramado: UFRGS.
- Juliani C., Rye R. O., Nunes C. M. D., Snee L. W., Silva R. H. C., Monteiro L. V. S., Bettencourt J. S., Neumann R., Neto A. A. 2005. *Paleoproterozoic high-sulfidation mineralization in the Tapajós gold province, Amazonian Craton, Brazil: geology, mineralogy, alunite argon age, and stable-isotope constraints*. *Chemical Geology*, **215**(1-4), 95-125.
- Juliani C., Vasquez M. L., Klein E. L., Villas R. N. N., Misas C. M. E., Santiago E. S. B., Monteiro L. V. S., Carneiro C. C., Fernandes C. M. D., Usero G. 2014. Metalogenia da Província Tapajós. In: M.G. Silva, M.G. Rocha Neto, H. Jost, R.M. Kuyumajian (Eds.), *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras* ed., v. 1, 229-268). Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil.
- Lagler B., Juliani C., Pessoa F.F., Fernandes C.M.D. 2011. Petrografia e geoquímica das sequências vulcânicas Paleoproterozóicas na região de Vila Tancredo, São Félix do Xingu (PA). In: *Cong. Bras. Geol.*, 13 ed. SBGq, Gramado, pp. [CD-ROM].
- Lagler B. 2011. *Estudo do vulcano-plutonismo paleoproterozóico e da metalogênese na região de São Félix do Xingu, porção sul do Cráton Amazônico*. Dissertação de Mestrado Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 169p.

- Lagler B. 2014. *Geologia do Depósito de Fosfato Serra da Capivara - São Félix do Xingu, Pará, MbAC Fertilizer Corp.*
- Lagler B., Tedesco M. A., Oliveira A. S. D., Juliani C., Waring M. H. 2014. *Geologia do Depósito de Fosfato Serra da Capivara - São Félix do Xingu, Pará, MbAC Fertilizer Corp.*
- Lamarão C. N., Dall'Agnol R., Lafon J.-M., Lima E. F. 2002. Geology, geochemistry, and Pb-Pb zircon geochronology of the Paleoproterozoic magmatism of Vila Riozinho, Tapajós Gold Province, Amazonian craton, Brazil. *Precambrian Research*, **119**(1-4), 189–223.
- Le Maitre R. W. 2002. *A classification of igneous rocks and glossary of terms* (2a ed.). London:
- Ludwig K.R. 2011. *Isoplot: a plotting and regression program for radiogenic isotope data*. Version 4.13-March. (US Geological Survey Open-File Report, 445).
- Macambira E. M. B., Vale A. G. 1997. *São Félix do Xingu. Folha SB-22-Y-B*. Estado do Pará. CPRM, Brasília,DF. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- Marques S. N. R., Souza V. S., Dantas E.L., Valério C. S., Nascimento R. S. C. 2014. Contributions to the petrography, geochemistry and geochronology (U-Pb and Sm-Nd) of the Paleoproterozoic effusive rocks from Iricoumé Group, Amazonian Craton, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, **44**(1): 121-138, Mar.
- Milhomem N. J. M., Lafon J. M., Galarza M. A., Moura C.A.V. 2017. *U-Pb em zircão por LA-ICP-MS no laboratório Pará-Iso (UFPA): metodologia e aplicação na porção sudeste do Escudo das Guianas*. Contribuições à Geologia da Amazônia, 10, em impressão.
- Misas, C. M. E. 2010. *Evolução magmática, alteração hidrotermal e gênese da mineralização de ouro e cobre do Palito, Província Aurífera do Tapajós (PA)*. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo, 235p.
- Montalvão, R. M. G., Bezerra, P. E. L., Issler, R. S., Dall'Agnol, R., Lima, M. I. C., Fernandes, C. A. C., Silva, C. G. 1975. Folha NA.20-Boa Vista e parte das folhas NA.21-Tumucumaque, NB.20-Roraima e NB.21. In: *B.D.N.D.P.M.P. RADAMBRASIL* (Ed.), Geologia ed., v. 8, Rio de Janeiro:
- Montalvão, R.M.G., Bezerra, P.E.L. 1980. Geologia e Tectônica da Plataforma (Cráton) Amazônico (parte da Amazônia Legal brasileira). In: *Revista Brasileira de Geociências* **10**, 1–27.
- Monteiro, L. V. S., Xavier R. P., Carvalho E. R., Hitzman M. W., Jhonson C. A. Souza Filho C. R. Torresi I. 2008. *Spatial and temporal zoning of hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints*. Mineralium Deposita, v. 43, p. 129-159.
- Nakamura, N. 1974. *Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites*. Geochimica et Cosmochimica Acta, **38**(5), 757-775.
- Oliveira, A. S., Fernandes, C. A. S., Issler, R. S., Abreu, A. S., Montalvão, R. M. G., Teixeira, R. S. 1975. *Geologia da Folha NA.21–Tumucumaque e parte da Folha NB.21, DNPM, Rio de Janeiro*.

- Pastana, J. M. N., 1980. *Projeto Rio Chiché: Relatório Final. Texto*. DNPM/CPRM, Belém, pp. 125.
- Pearce, J. A. 1983. The role of subcontinental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins. *In: C.J.H.a.M.J. Norry (Ed.)*, Continental basalts and mantle xenoliths ed., v. 230–249. Shiva:
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. C. 1984. Trace Elements discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 956–983.
- Pessoa, M. R., Andrade, A. F., Nascimento, J. O., Santos, J. O. S., Oliveira, J. R., Lopes, R. C., Prazeres, W. V., 1977. *Projeto Jamanxim*, DNPM/CPRM, Manaus.
- Pinho, S. C. C., Fernandes, C. M. D., Teixeira, N. P., Paiva Jr., A. L., Cruz, V. L., Lamarão, C. N., Moura, C. A. V. 2006. O magmatismo paleoproterozóico da região de São Félix do Xingu, Província Estanífera do Sul do Pará: Petrografia e Geocronologia. *In: Revista Brasileira de Geociências*, 36(4), 793–802.
- Pinho, M.A.S.B., Rubert, R.R., Silva, G.D., Chemale JR., F., Dussin, I.A., Costa, E.C., 2004. Dados petrográficos, geoquímicos e idades U-Pb da vulcânica félsica do Grupo Iriri na porção nordeste de Mato Grosso - Serra dos Magalhães, *In: SBG (Ed.)*, 42º Congresso Brasileiro de Geologia, 42 ed, Araxá, pp. CD-ROM.
- Rizzoto G.J. 2004. Folha SC.21 Juruena. *In: Schobbenhaus C., Gonçalves J.H., Santos J.O.S., Abram M.B., Leão Neto R., Matos G.M.M., Vidotti R.M., Ramos M.A.B., Jesus J.D.A. de (eds.)*. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas. Programa Geologia do Brasil. Brasília, CPRM, 1 CD-ROM.
- Santos, D. B., Fernandes, P. E. C. A., Dreher, A. M., Cunha, F. M. B., Basei, M. A. S., Teixeira, J. B. G. 1975. *Geologia da Folha SB.21-Tapajós*, DNPM, Rio de Janeiro.
- Santos, J. O. S. 2003. Geotectônica dos Escudos da Guiana e Brasil Central. *In: L.A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R.M. Vidotti, J.H. Gonçalves (Eds.)*, Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. Texto, mapas e SIG ed., v. 169-226). Brasília: CPRM.
- Santos, J. O. S., Hartmann, L. A., Gaudette, H. E., Groves, D. I., McNaughton, N. J., Fletcher, I. R. 2000. *A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology*. Gondwana Research, 3(4), 453-488.
- Schobbenhaus, C., Campos, D. A., Derze, G. R., Asmus, H. E. 1984. *Geologia do Brasil*. Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Escala 1:2.500.000, Ministério das Minas e Energia/DNPM, Brasília.
- Schobbenhaus, C., Hoppe, A., Lork, A., Baumann, A. 1994. Idade U/Pb do magmatismo Uatumã no norte do Cráton Amazônico, Escudo das Guiana (Brasil): primeiros resultados. *In: 38º Congresso Brasileiro de Geologia*, v. 395–397. Camboriú:
- Silva, G. G., Lima, J. J. C., Andrade, A. R. F., Issler, R. S., Guimarães, G. 1974. *Geologia da Folha Sc.22 – Tocantins*, DNPM, Rio de Janeiro.

Stacey J.S. & Kramers J.D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, **26**(2):207-221.

Tassinari, C. C. G., Macambira, M. J. B. 2004. A evolução tectônica do Craton Amazônico. In: V. Mantesso-Neto, A. Bartorelli, C.D.R. Carneiro, B.B. Brito Neves (Eds.), *Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques Almeida ed.*, v. 471-486). São Paulo: BECA.

Teixeira, N. P., Bettencourt, J. S., Moura, C. A. V., Dall'Agnol, R., Macambira, E. M. B. 2002. Archean crustal sources for Paleoproterozoic tin-mineralized granites in the Carajas Province, SSE Para, Brazil: Pb-Pb geochronology and Nd isotope geochemistry. *Precambrian Research*, **119**(1-4), 257-275.

Tokashiki, C. C. 2015. *Mineralizações Low- e Intermediate-sulfidation de ouro e de metais de base em domos de riolito paleoproterozoicos na porção sul da Província Mineral do Tapajós*. Tese de Doutorado. São Paulo: Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo.

Vasquez, M. L., Klein, E. L., Quadros, M. L. E., Bahia, R. B. C., Santos, A., Ricci, P., Sachett, C. R., Silva, C. M. G., Macambira, M. J. B. 1999. Magmatismo Uatumã na Província Tapajós – Novos dados geocronológicos. In: *6º Simpósio de Geologia da Amazônia*, v. 471-474. Manaus: SBG.

Vasquez, M. L., Rosa-Costa, L. T., Silva, C. G., Ricci, P. F., Barbosa, J. O., Klein, E. L., Lopes, E. S., Macambira, E. M. B., Chaves, C. L., Carvalho, J. M., Oliveira, J. G., Anjos, G. C., Silva, H. R. 2008. *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*, ed.). Belém: CPRM.

Vieira D. A. S. 2016. *Cartografia e evolução geológica do vulcano-plutonismo paleoproterozoico associado ao Depósito de Fosfato Serra da Capivara, região de Vila Mandi (PA), Sul do Cráton Amazônico*. Trabalho de Conclusão de Curso, Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 41p.

Wetherill G. 1956. Discordant uranium–lead ages. *Transactions of the American Geophysical Union*, **37** (3): 320-326, Jun.

Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **95**(4): 407–419.