



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

---

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 467**

**PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E GEOCRONOLOGIA DE  
DIQUES MÁFICOS A FÉLSICOS DA REGIÃO ÁGUA AZUL DO  
NORTE, PROVÍNCIA CARAJÁS, SUDESTE DO PARÁ**

**Dissertação apresentada por:**

**PAULO ROBERTO SOARES RODRIGUES**

**Orientador: Prof. CLAUDIO NERY LAMARÃO (UFPA)**

---

**BELÉM  
2015**

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

---

Rodrigues, Paulo Roberto Soares, 1989-

Petrografia, geoquímica e geocronologia de diques máficos a félsicos da região de Água Azul do Norte, Província Carajás, sudeste do Pará / Paulo Roberto Soares Rodrigues. – 2015

xiii, 68 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Claudio Nery Lamarão

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2015.

1. Diques (Geologia) - Água Azul do Norte (PA). 2. Petrologia - Água Azul do Norte (PA). 3. Geoquímica - Água Azul do Norte (PA). I. Título.

CDD 22. ed. 551.88098115

---



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

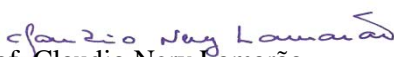
**PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E GEOCRONOLOGIA DE  
DIQUES MÁFICOS A FÉLSICOS DA REGIÃO DE ÁGUA AZUL  
DO NORTE, PROVÍNCIA CARAJÁS, SUDESTE DO PARÁ**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR  
PAULO ROBERTO SOARES RODRIGUES**


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

**Data de Aprovação: 08 / 10 / 2015**

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Claudio Nery Lamarão  
(Orientador-UFPA)

  
Prof. Davis Carvalho de Oliveira  
(Membro-UFPA)

  
Prof. Sergio de Castro Valente  
(Membro-UFRRJ)





## AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve a contribuição de diversas pessoas e instituições, às quais devo a minha gratidão. Por essa razão quero expressar meus sinceros agradecimentos:

- A Deus;
- Aos meus pais, pela batalha diária, esforços e incentivo à educação e por acreditarem sempre no meu sucesso;
- Aos meus irmãos, que contribuíram, de certa forma, para esse trabalho com momentos de descontração;
- Aos meus familiares, que mesmo distantes, sempre acreditaram no meu sucesso;
- À Universidade Federal do Pará e ao Instituto de Geociência, que ofereceram a estrutura necessária para realização deste trabalho;
- A CAPES, pela concessão de bolsa de mestrado;
- Ao INCT de Geociências da Amazônia (GEOCIAM), pelo apoio financeiro ao desenvolvimento deste trabalho;
- Ao Prof. Claudio Nery Lamarão, pela orientação, dedicação e paciência prestada durante todas as fases deste trabalho;
- Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV) do Instituto de Geociências, em especial à técnica Ana Paula pela paciência e atenção prestadas durante uma fase do trabalho;
- Aos meus amigos e irmãos Aldemir e Chafic, pelo o apoio e amizade durante esses anos;
- Ao meu grande amigo Rafael, pela ajuda e contribuição neste trabalho;
- Aos meus amigos da sala de estudos quatro (4), pelos momentos de descontração e confraternizações, em especial à Bruna, Carlos, Luisa, Juvenal, Carla, Ingrid, Camila, Mauricio, Renato e Victor;
- Aos integrantes do GPPG, que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho;
- A todos os meus amigos da turma de 2008, desde a graduação, que estarão para sempre nessa história.



## RESUMO

Na região de Água Azul do Norte, sudeste do Pará, diques máficos a félsicos afloram em área peneplanizada sob a forma de cristas descontínuas seccionando granitos anorogênicos e rochas encaixantes arqueanas. Eles ocorrem preferencialmente segundo a direção NW-SE formando corpos tabulares subverticais com espessuras de até 30m. Quatro grupos de diques foram individualizados: diabásios, andesitos, riolitos e feldspato-alcálico riolitos. Geoquimicamente são basaltos, andesitos basálticos, andesitos e riolitos metaluminosos a fracamente peraluminosos de afinidade toleítica. Nos diagramas de Harker, os diabásios apresentam os menores conteúdos de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$  e os mais elevados de  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ , refletindo a composição mineralógica dessas rochas formadas predominantemente por plagioclásio e clinopiroxênio. Os andesitos mostram valores intermediários de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  quando comparados aos diabásios e riolitos, similares a outros diques de andesito já estudados no Domínio Rio Maria (DRM). Os diques de feldspato-alcálico riolito e riolito possuem as mais elevadas e variadas concentrações de  $\text{SiO}_2$ .  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$  exibem correlação negativa, enquanto  $\text{K}_2\text{O}$  apresenta correlação positiva com a sílica.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  não apresentam correlação clara. Os diques de diabásios mostram padrão subhorizontal com leve fracionamento dos elementos terras raras (ETR), enriquecimento dos ETR leves (ETRL) em relação aos ETR pesados (ETRP) e anomalias de Eu pouco acentuadas a levemente negativas. Comparativamente, os diques de andesito apresentam fracionamento mais acentuado dos ETR, maior enriquecimento dos ETRL frente aos ETRP e anomalia negativa de Eu mais acentuada. O dique de riolito exibe fracionamento de ETR e anomalia negativa de Eu moderados, enquanto os de feldspato-alcálico riolito mostram maior fracionamento de ETR, um enriquecimento maior dos ETRL em relação aos ETRP e anomalias negativas de Eu fortemente pronunciadas. A presença de lacunas composicionais entre os grupos de diques de Água Azul do Norte descarta a existência de uma série magmática contínua; o magmatismo máfico, representado pelos diques de diabásio, não evoluiu para formar os de andesito. Por outro lado, os diques de riolito e feldspato-alcálico riolito estariam ligados ao magmatismo granítico anorogênico tipo-A de aproximadamente 1,88 Ga atuante no DRM. O estudo comparativo mostra similaridades entre os diques de Água Azul do Norte e os de outras áreas do DRM, sugerindo origem comum.

Palavras-chave: Província Carajás. Água Azul do Norte. Diques. Petrografia. Geoquímica.

### ABSTRACT

In the Água Azul do Norte region, southeast of Pará, mafic to felsic dikes arise in razed area in the form of discontinuous ridges sectioning anorogenic granites and Archean country rocks. Preferentially they occur under NW-SE direction forming tabular subvertical bodies with thicknesses of up to 30m. Four groups were individualized: diabases, andesites, rhyolites and alkali-feldspar rhyolites. Geochemically, are basalts, basaltic andesites, andesites and rhyolites metaluminous to weakly peraluminous of tholeiitic affinity. In Harker diagrams diabase displays the lowest contents of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  and the highest contents of  $\text{FeOt}$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{CaO}$ , reflecting the mineralogical composition of these rocks predominantly formed by plagioclase and clinopyroxene. The andesites show intermediate  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeOt}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{K}_2\text{O}$  values compared to diabases and rhyolites, similar to other andesite dykes already studied in the Rio Maria Domain (RMD). The dikes of alkali-feldspar rhyolite and rhyolite have higher and varied concentrations of  $\text{SiO}_2$ .  $\text{FeOt}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{CaO}$  exhibit negative correlation, while  $\text{K}_2\text{O}$  is positively correlated with the silica.  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{P}_2\text{O}_5$  have no clear correlation. The diabase dikes show sub-horizontal pattern of rare earth elements (REE), with light REE fractionation, enrichment of light REE (LREE) relative to heavy REE (HREE) and not too prominent to slightly negative Eu anomalies. Comparatively, the andesite dykes have more accentuated REE fractionation, greater enrichment of LREE compared to the HREE and more pronounced Eu negative anomalies. The rhyolite dyke displays moderate REE fractionation and negative anomaly of Eu, while the alkali-feldspar rhyolites show greater fractionation of REE and enrichment of LREE compared to HREE, besides strongly pronounced Eu negative anomalies. The presence of compositional gaps between groups of Água Azul do Norte dikes rule out the existence of a continuous magmatic series; the mafic magmatism, represented by diabase dikes, has not evolved to form the andesite. On the other hand, the dikes of rhyolite and alkali-feldspar rhyolite would be linked to the anorogenic A-type granite magmatism of approximately 1.88 Ga active in the RMD. The comparative study shows similarities between the Água Azul do Norte dikes and those of other areas of the RMD, suggesting a common origin.

Keywords: Carajás Province. Água Azul do Norte. Dikes. Petrography. Geochemistry.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### FIGURAS

#### CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Mapa de localização dos diques estudados neste trabalho. ....	2
Figura 1.2 - Províncias Geocronológicas do Cráton Amazônico .....	5
Figura 1.3 - Mapa geológico do TGGRM com a ocorrência dos diques estudados e dados geocronológicos representativos das unidades arqueanas. Modificado de Almeida <i>et.al</i> (2011) e Santos <i>et al.</i> (2013). ....	8

#### CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Mapa geológico do TGGRM com a ocorrência dos diques estudados e dados geocronológicos representativos das unidades arqueanas. Modificado de Almeida <i>et.al</i> (2011) e Santos <i>et al.</i> (2013). ....	18
Figura 2.2 - Mapa geológico da região de Água Azul do Norte com a ocorrência dos diques estudados.....	20
Figura 2.3 - Aspectos de campo dos diques de Água Azul do Norte.....	22
Figura 2.4 - Diagrama modal Q-A-P (Le Matrie, 2002) .....	23
Figura 2.5 - Aspectos petrográficos dos diques de diabásios.....	26
Figura 2.6 - Aspecto macroscópico do andesito.....	27
Figura 2.7 - Aspectos macroscópicos e microscópicos dos diques de feldspato-alcálico riolito e riolito.....	30
Figura 2.8 - Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por MEV.....	32
Figura 2.9 - Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por MEV.....	33
Figura 2.10 - Diagrama geoquímicos comparativos entre os diques da região de Água Azul do Norte e outras ocorrências do DRM .....	35
Figura 2.11 - Diagrama geoquímicos comparativo de afinidade tectônica entre os diques da região de Água Azul do Norte e outras ocorrências do DRM.....	37
Figura 2.12 - Diagramas de Harker e o comportamento dos elementos maiores e menores.....	41

Figura 2.13 - Diagramas geoquímicos e o comportamento dos elementos traços .....	43
Figura 2.14 - Diagramas geoquímicos envolvendo razões de elementos traços. ....	44
Figura 2.15 - Padrões de elementos do grupo Terras Raras.....	45
Figura 2.16 - Diagrama comparativo dos padrões de ETR. ....	47

## TABELAS

### CAPÍTULO 1

Tabela 1.1 - Idades obtidas em diques de composição máfica a félsica no DRM.....	9
--	---

### CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Idades obtidas em diques de composição máfica a félsica no DRM.....	21
Tabela 2.2 - Composição modais dos diques de Água Azul do Norte.....	24
Tabela 2.3 - Principais fases acessórias presentes nos diques de Água Azul do Norte..	31
Tabela 2.4 - Composições química dos diques da região de Água Azul do Norte.....	38
Tabela 2.5 - Resultados isotópicos obtidos através do método de evaporação do Pb em monocristais de zircões do dique de feldspato-alcálico riolito (MC-95b) de Água Azul do Norte.....	49

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	iv
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	v
<b>EPIÍGRAFE</b> .....	vi
<b>RESUMO</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	ix

## CAPÍTULO 1

<b>1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 - APRESENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .....	1
<b>2 - CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL</b> .....	4
2.1 - PROVÍNCIAS GEOCRONOLÓGICAS DO CRÁTON AMAZÔNICO .....	4
2.2 - PROVÍNCIA CARAJÁS .....	5
2.3 - DIQUES PALEOPROTEROZÓICOS DO DOMÍNIO RIO MARIA .....	9
<b>3 - JUSTIFICATIVA</b> .....	10
<b>4 - OBJETIVOS</b> .....	10
<b>5 - MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	11
5.1 - PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....	11
5.2 - PETROGRAFIA .....	11
5.3 - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) .....	11
5.4 - GEOQUÍMICA .....	12
5.5 - GEOCRONOLOGIA .....	12

## CAPITULO 2

<b>6 - PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E GEOCRONOLOGIA DE DIQUES MÁFICOS A FÉLSICOS DA REGIÃO DE ÁGUA AZUL DO NORTE, SUDESTE DO PARÁ, PROVÍNCIA CARAJÁS .....</b>	<b>14</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>14</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>15</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....</b>	<b>16</b>
<b>GEOLOGIA DE ÁGUA AZUL DO NORTE .....</b>	<b>19</b>
<b>ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOCRONOLOGIA DOS DIQUES .....</b>	<b>19</b>
<b>PETROGRAFIA.....</b>	<b>23</b>
<b>COMPOSIÇÃO MODAL E CLASSIFICAÇÃO (QAP).....</b>	<b>23</b>
<b>ASPECOS TEXTURAIIS.....</b>	<b>25</b>
<b>Diabásio .....</b>	<b>25</b>
<b>Andesito.....</b>	<b>26</b>
<b>Riolito.....</b>	<b>27</b>
<b>Feldspato-alcálico riolito .....</b>	<b>28</b>
<b>FASES ACESSÓRIAS.....</b>	<b>31</b>
<b>GEOQUÍMICA.....</b>	<b>33</b>
<b>PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS.....</b>	<b>33</b>
<b>ELEMENTOS MAIORES E MENORES .....</b>	<b>34</b>
<b>ELEMENTOS TRAÇO .....</b>	<b>41</b>
<b>ELEMENTOS TERRAS RARAS .....</b>	<b>44</b>
<b>ESTUDO COMPARATIVO COM OUTROS DIQUES DO DRM .....</b>	<b>46</b>
<b>GEOCRONOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
<b>PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS.....</b>	<b>48</b>
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
<b>DISCUSSÕES E CONCLUSÕES .....</b>	<b>49</b>



ASPECTOS PETROGRAFICOS E GEOQUÍMICOS .....	49
GEOCRONOLOGIA DOS DIQUES DO DRM.....	50
SIMILARIDADE COM OUTROS DIQUES DO DRM.....	50
AGRADECIMENTOS .....	52
REFERÊNCIAS .....	52

### **CAPÍTULO 3**

<b>7 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>58</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO A - COORDENADAS DOS PONTOS ESTUDADOS.....</b>	<b>68</b>

---

---

## CAPITULO 1

---

---

### 1 INTRODUÇÃO

#### 1.1 – APRESENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

Ao longo dos anos, o Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM, Souza *et al.* 1996), ou Domínio Rio Maria (DRM, Vasquez *et al.* 2008), localizado no sudeste do Cráton Amazônico, foi objeto de inúmeros trabalhos geológicos abordando diversos aspectos sobre as rochas que o constituem (Dall’Agnol *et al.* 1999, 2005, 2012; Althoff *et al.* 2000; Teixeira *et al.* 2002, 2005; Leite *et al.* 2004; Oliveira 2005; Almeida *et al.* 2006, 2011, 2013; Dall’Agnol & Oliveira 2007; Guimarães 2009; Oliveira *et al.* 2009, 2010; Oliveira M.A. *et al.* 2009, Guimarães *et al.* 2010). No entanto, pesquisas de detalhes voltadas para o estudo dos diques máficos a félsicos da região de Água Azul do Norte, que seccionam as rochas arqueanas e paleoproterozoicas encaixantes, ainda são pouco difundidos.

Trabalhos realizados por Mesquita (2010), Santos *et al.* (2013) e Lima *et al.* (2014) permitiram o mapeamento de diversas ocorrências de diques na área compreendida entre as cidades de Ourilândia do Norte e Água Azul do Norte, sudeste do Estado do Pará. Em função dos objetivos dos referidos trabalhos, os estudos efetuados nos diques ficaram restritos ao seu reconhecimento geológico e amostragem. Estudos petrográficos nesses diques foram realizados por Costa (2012) e Rodrigues (2013), os quais permitiram classificá-los preliminarmente como diabásio, andesito, dacito, riolito e feldspato-alcálico riolito. Datações geocronológicas realizadas pelo método de evaporação de Pb em zircão indicaram idade de  $1887 \pm 2$  Ma para um dique de riolito porfirítico (Costa 2012), interpretada como idade de cristalização. Porém, não foram realizados estudos geoquímicos nesses diques, dificultando assim, possíveis correlações dos mesmos com outros diques já estudados das regiões de Bannach e Rio Maria (Silva Jr. *et al.* 1999, Dall’Agnol *et al.* 2002, Almeida 2005, Oliveira 2005, Ferreira 2009), ambas pertencentes ao DRM.

A área de ocorrência dos diques estudados está situada a sudeste da cidade de Ourilândia do Norte e a sudoeste de Água Azul do Norte, sudeste do Estado do Pará, nos domínios da Província Carajás, mais especificamente entre as coordenadas  $50^{\circ}23'0''/50^{\circ}42'0''$  W e  $6^{\circ}55'0''/7^{\circ}12'0''$  S (Figura 1.1). O acesso à área é feito pelas rodovias PA-150 (Belém – Marabá – Xinguara) e PA-279 (Xinguara – Tucumã – Água Azul do Norte – Ourilândia do Norte – São Félix do Xingu). O acesso aos diques estudados é feito pela rodovia PA-279 e por

estradas vicinais que levam a fazendas e vilarejos, permitindo uma amostragem sistemática e representativa dos mesmos.

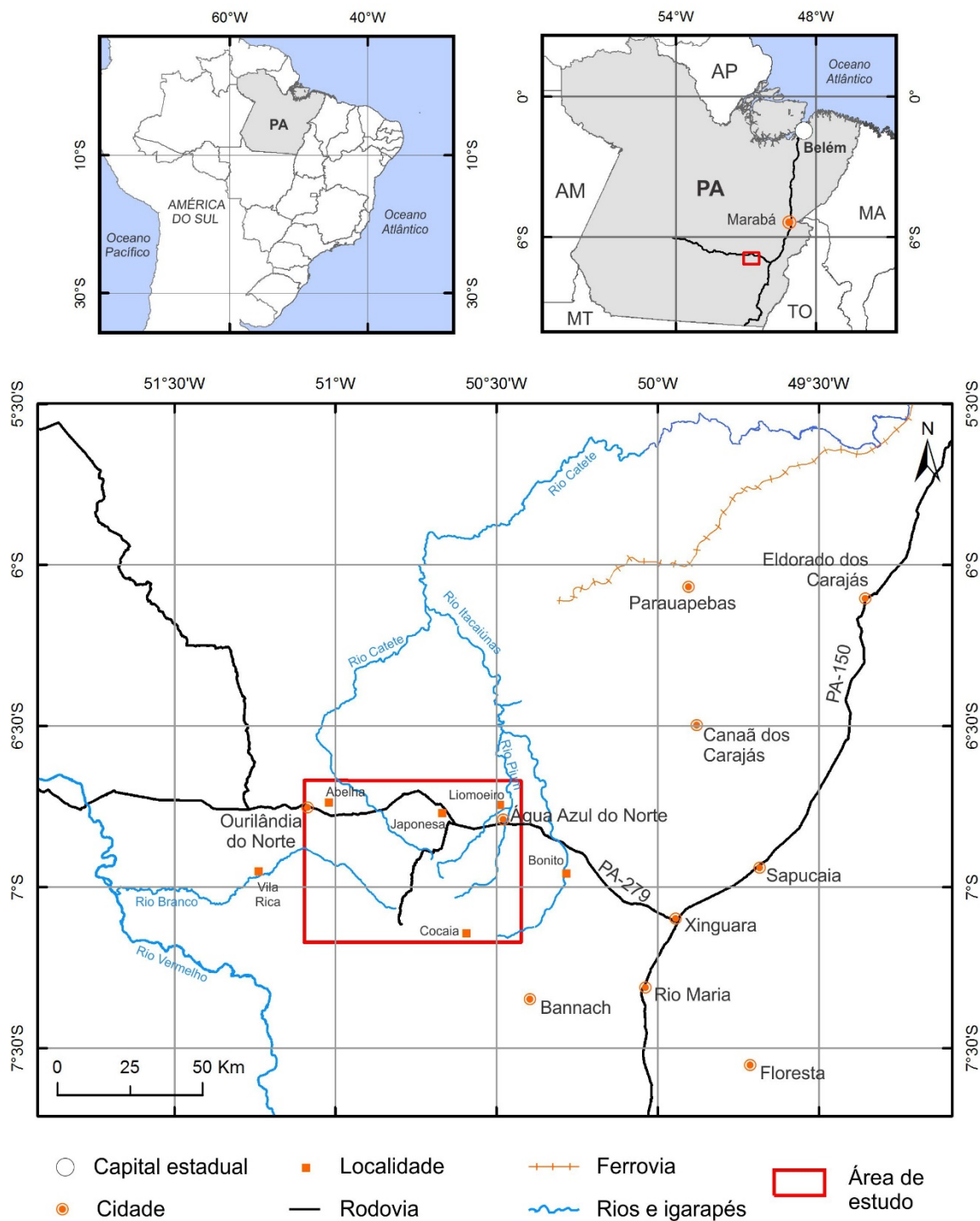


Figura 1.1 - Mapa de localização da área de ocorrência dos diques estudados neste trabalho.

Este trabalho tem como objetivo contribuir para ampliar o conhecimento petrográfico, geoquímico e geocronológico dos diques da região da Água Azul do Norte e está vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) e ao Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

A presente dissertação é composta por três capítulos. O Capítulo 1 aborda pontos relacionados à apresentação e localização da área de estudo, o contexto geológico regional, com ênfase nos aspectos geológicos, geocronológicos e ao magmatismo anorogênico atuante na Província Carajás. São definidos, ainda, a problemática, os objetivos do trabalho e os procedimentos metodológicos.

No Capítulo 2 os resultados obtidos são apresentados e discutidos na forma de um artigo científico intitulado “**PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E GEOCRONOLOGIA DE DIQUES MÁFICOS A FÉLSICOS DA REGIÃO DE ÁGUA AZUL DO NORTE, PROVÍNCIA CARAJÁS, SUDESTE DO PARÁ**”, submetido ao Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais. Este artigo apresenta dados petrográficos complementares, geoquímicos e geocronológicos inéditos relacionados a este magmatismo máfico a félsico da região de Água Azul do Norte. Os dados geoquímicos foram utilizados na caracterização dos diques e de suas séries magmáticas, na correlação com outras ocorrências de diques presentes no DRM, bem como na associação com o magmatismo anorogênico atuante neste Domínio.

O Capítulo 3 completa a dissertação com a integração dos dados obtidos, apresentando as discussões e conclusões finais deste trabalho.

## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Cráton Amazônico representa uma das principais unidades tectônicas da Plataforma Sulamericana, localizado na porção norte da América do Sul; corresponde a uma área de aproximadamente 4.500.000 km<sup>2</sup> e engloba parte do Brasil, Guiana Francesa, Guiana, Suriname, Venezuela, Colômbia e Bolívia. É limitado a norte pela margem atlântica e em suas bordas oriental e meridional por faixas orogênicas neoproterozóicas marginais do Escudo Atlântico (Paraguai-Araguaia-Tocantins), geradas durante o Ciclo Orogênico Brasileiro (Vasquez *et al.* 2008).

### 2.1 PROVÍNCIAS GEOCRONOLÓGICAS DO CRÁTON AMAZÔNICO

Ao longo dos anos, vários modelos de compartimentação tectônica têm sido propostos para o Cráton Amazônico (Cordani *et al.* 1979, Teixeira *et al.* 1989, Tassinari 1996, Santos *et al.* 2000, Tassinari *et al.* 2000). Porém, as propostas mais mencionadas na literatura são as de Tassinari & Macambira (1999, 2004) e Santos *et al.* (2006), com diferenças sobretudo em relação aos limites entre as províncias tectônicas. Por outro lado, estas propostas são similares em admitir que a evolução do Cráton Amazônico é resultante de sucessivos episódios de acreção crustal durante o Paleoproterozoico e o Mesoproterozoico em volta de um núcleo mais antigo, estabilizado no final do Arqueano.

Neste trabalho foi adotada a proposta de Tassinari & Macambira (2004) (Figura 1.2) que subdivide o cráton em seis províncias geocronológicas principais, sendo elas: Província Amazônia Central - PAC (>2,5 Ga), Província Maroni-Itacaiunas - PMI (2,2-1,95 Ga), Província Ventuari-Tapajós - PVT (1,95-1,8 Ga), Província Rio Negro-Juruena - PRNJ (1,8-1,55 Ga), Província Rondoniana-San Ignacio - PRSI (1,55-1,3 Ga) e Província Sunsas - PS (1,3-1,0 Ga).

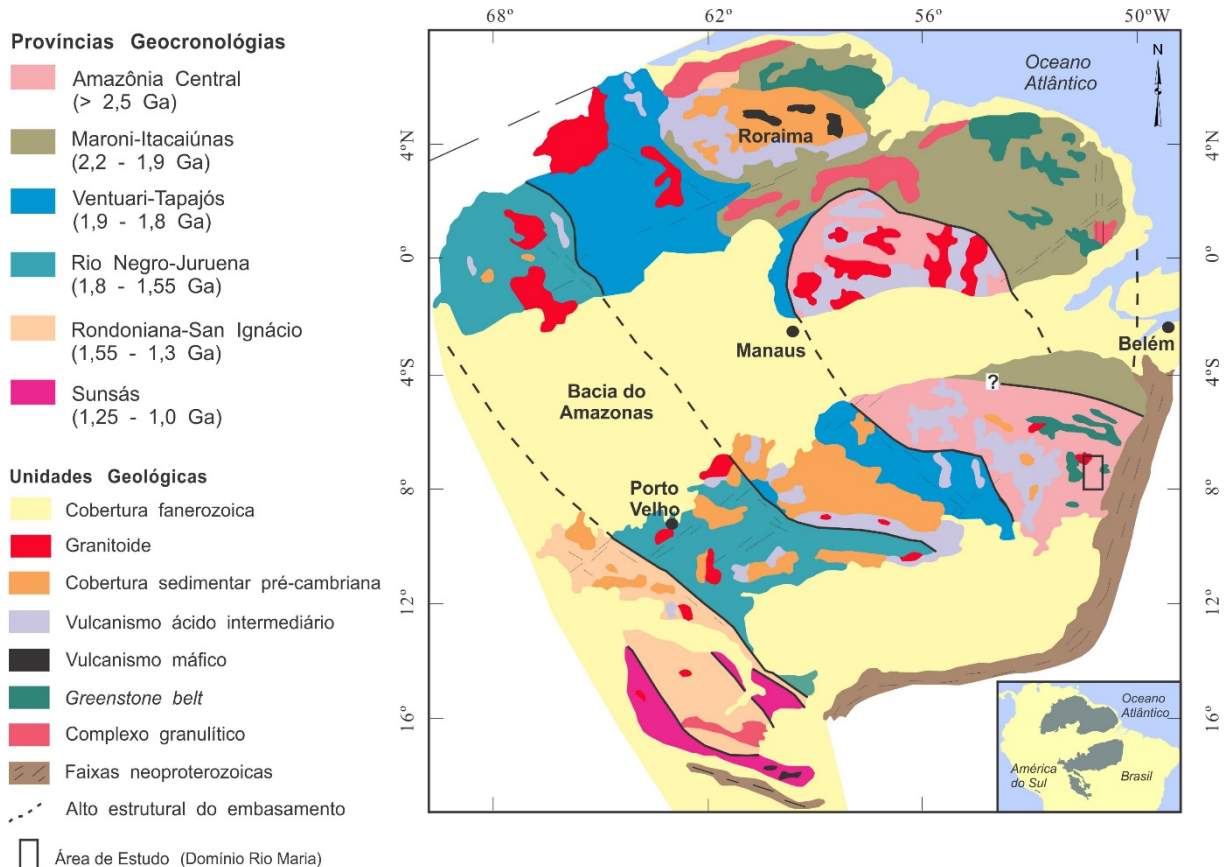


Figura 1.2 - Províncias Geocronológicas do Cráton Amazônico (modificado de Tassinari & Macambira 2004).

Segundo Vasquez *et al.* (2008), nos modelos recentes de compartimentação tectônica do Cráton Amazônico a porção arqueana da PAC foi denominada Bloco Carajás (Tassinari & Macambira 2004) e Província Carajás (Santos *et al.* 2000, 2006).

## 2.2 PROVÍNCIA CARAJÁS

A Província Carajás (PC) compreende a porção sudeste do Cráton Amazônico, mais precisamente a parte sul-oriental da Província Amazônia Central (Tassinari & Macambira 2004); ao norte é limitada pela Província Maroni-Itacaiúnas (2,2-2,1 Ga), a leste pelo Cinturão de Cisalhamento Araguaia do Neoproterozoico e relacionado ao Ciclo Brasileiro, e a oeste pelas associações vulcânico-piroclásticas do Supergrupo Uatumã e granitoides paleoproterozoicos (Texeira *et al.* 2002).

Inicialmente, a PC foi subdividida em três blocos: Cinturão de cisalhamento Itacaiúnas (CCI), Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria (TGGRM) e Cinturão de cisalhamento Pau D'Arco (CCPD; Araújo & Maia 1991, Costa *et al.* 1995). Souza *et al.* (1996) consideram que a PC é formada por dois blocos tectônicos, ficando o TGGRM situado a sul e o Bloco Carajás (BC) a norte. Para Althoff *et al.* (2000) e Dall'Agnol *et al.* (1997, 2006), o CCPD é somente uma extensão para sul do TGGRM, que se prolongaria até

Redenção. Rolando & Macambira (2002, 2003), com base em dados geológicos e geocronológicos, confirmaram a extensão do TGGRM a, pelo menos, 100 km a sul da cidade Redenção, reduzindo dessa forma a PC a dois blocos, o BC e o TGGRM.

O TGGRM (Figura 1.3) é a porção mais bem estudada da PC e o conjunto de dados petrográficos, geoquímicos e geocronológicos disponíveis revelam a existência de cinco principais grupos de rochas arqueanas para esta região (Dall'Agnol *et al.* 1997, Althoff *et al.* 2000, Leite 2001, Almeida *et al.* 2008, Guimarães 2009, Oliveira *et al.* 2009, Almeida *et al.* 2011, Feio 2011): 1) Granitoides TTGs antigos, representados pelo Tonalito Arco Verde e Trondhjemitó Mogno ( $2,96\pm 0,02$  Ga) e pelo Complexo Tonalítico Caracol e Tonalito Mariazinha ( $2,93\pm 0,02$  Ga); 2) Granodioritos com alto Cr, Ni e Mg, incluídos na Suíte Sanukitoide Rio Maria (Oliveira *et al.* 2009) com idade geocronológica de 2,87 Ga, além de rochas máficas e intermediárias associadas; 3) Leucogranodioritos e leucomonzogranitos calcialcalinos com alto Ba e Sr representados pela Suíte Garantã e similares (2,87 Ga); 4) TTGs mais jovens representados pelo Trondhjemitó Água Fria (2,86 Ga); 5) Leucogranitos potássicos de afinidade calcialcalina representados pelos granitos Xinguara, Mata Surrão e correlatos. Metassedimentos do Grupo Rio Fresco de idade arqueana recobrem parte das unidades do TGGRM, as quais são cortadas também por granitos anorogênicos paleoproterozóicos (Huhn *et al.* 1988, Araújo *et al.* 1994, Dall'Agnol *et al.* 1999, 2005).

DOCEGEO (1988) afirma que o BC formou-se sobre o TGGRM, mas Dall'Agnol *et al.* (1997, 2006) admitem que a região compreendida entre Xinguara e a porção sul da BC seria uma extensão do TGGRM intensamente afetada pelos eventos magmáticos e tectônicos registrados na BC. Dessa forma, estes autores denominaram esta porção de “Domínio de Transição”. Para Vasquez *et al.* (2008) o BC compreende dois domínios: Domínio Carajás, a norte, formado por rochas meso e neoarqueanas (3,0 – 2,76 Ga), e Domínio Rio Maria, a sul, de idade mesoarqueana (3,0 – 2,87 Ga). O limite entre o TGGRM e a BC permanecia indefinido. Dessa forma, Feio *et al.* (2012) introduziram o termo “Subdomínio de Transição” para a região compreendida entre o TGGRM e o BC, o qual se estenderia a partir da borda sul da BC até porção norte da cidade de Sapucaia; sua extensão lateral se prolongaria até o município de São Félix do Xingu, passando por Água Azul do Norte, Ourilândia do Norte e Tucumã. Porém, recentemente um novo modelo evolutivo foi proposto por Dall'Agnol *et al.* (2013), o qual admite que o Subdomínio de Transição não é homogêneo quanto a sua evolução geológica e tectônica; tais autores admitem a distinção de dois novos domínios, o Domínio Canaã dos Carajás, situado ao norte e caracterizado pela dominância de granitos *stricto sensu* e associações charnockíticas com raras ocorrências de TTGs, e o Domínio

Sapucaia, ocorrendo mais a sul e delimitado por expressiva zona de cisalhamento com orientação próxima de E-W nas proximidades de Água Azul do Norte; o Domínio Sapucaia se estenderia até o limite com o Cinturão Araguaia, a leste, sendo marcado por corpos de granitoides neoarqueanos das suítes Planalto e Vila Jussara.



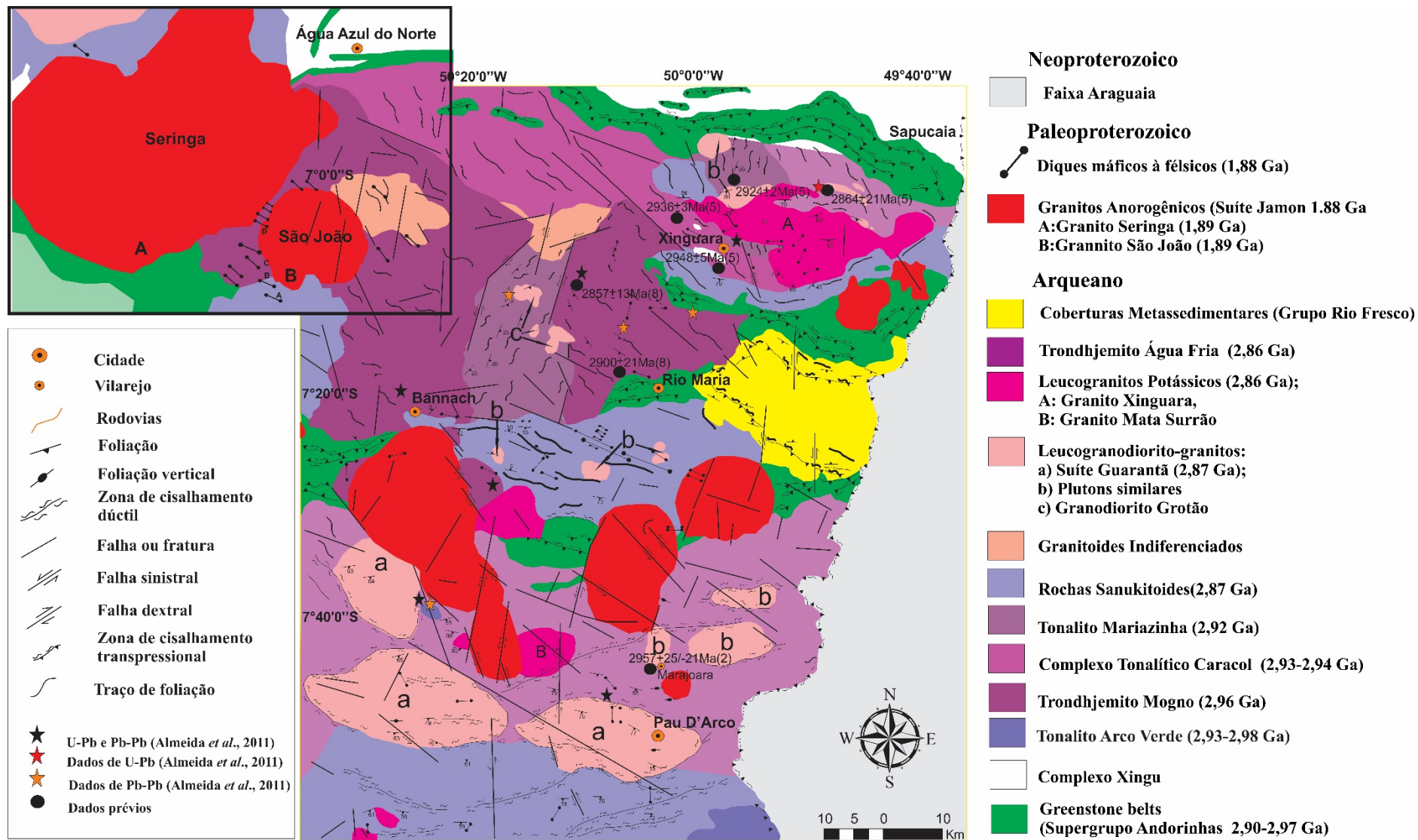


Figura 1.3 - Mapa geológico do TGGRM com a ocorrência dos diques estudados e dados geocronológicos representativos das unidades arqueanas. Modificado de Almeida *et al.* (2011) e Santos *et al.* (2013).

### 2.3 DIQUES PALEOPROTEROZÓICOS DO DOMÍNIO RIO MARIA.

Em torno de 1,88 Ga, a região correspondente ao Domínio Rio Maria (DRM) foi palco de um intenso magmatismo granítico anorogênico (Dall’Agnol *et al.* 2005, Oliveira 2006, Almeida *et al.* 2006) representado pelos corpos graníticos da Suíte Jamon e por diques máficos a félsicos contemporâneos (Silva Jr. *et al.* 1999). Os diques do DRM são corpos tabulares subverticais com espessuras variando de 10 a 20m, mais raramente podendo alcançar 30m; possuem grandes expressões em escala de alforamentos com comprimentos de até 2 km. Seccionam, principalmente, as unidades arqueanas e, localmente, granitos paleoproterozóicos (Gastal 1987, Huhn *et al.* 1988, Souza *et al.* 1990, Silva Jr. 1996, Rivalenti *et al.* 1998, Silva Jr. *et al.* 1999). O conjunto de dados geocronológicos para os diques do DRM é apresentado na Tabela 1.1 e mostra que os mesmos se formaram no final do Paleoproterozóico, sendo dessa forma contemporâneos com o magmatismo anorogênico atuante no DRM.

Tabela 1.1 - Idades obtidas em diques de composição máfica e félsica no DRM.

Rocha	Método	Material analisado	Idade (M.a)
Diques máficos	K-Ar	Concentrados máficos	1802 ± 22 (1)
Diques intermediários	Rb-Sr	Rocha total	1874±110 (2)
Diques félsicos	Rb-Sr(a)/ Pb-Pb(b)	Rocha total/ Zircão	1707±17 (a)(3) 1885±2 e 1885±4(b)(4)
Granito Pórfiro	Pb-Pb	Zircão	1885±2 (5)
Riolito	Pb-Pb	Zircão	1879±2 (6)
Riolito	Pb-Pb	Zircão	1887±2 (7)

Legenda - (1) Silva Jr. (1996); (2) Rivalenti *et al.* (1998); (3) Gastal *et al.* (1987); (4) Oliveira (2006); (5) Dall’Agnol *et al.* (2002); (6) Ferreira (2009); (7) Costa (2012).

Silva Jr. *et al.* (1999) definiram, em termos petrográficos e geoquímicos, na Região de Rio Maria três principais tipos litológicos: (1) diabásios, (2) andesitos e quartzo-andesitos, (3) diques félsicos classificados como dacitos e riolitos pórfiros, similares quanto a mineralogia e geoquímica aos granitos anorogênicos. Os dados geoquímicos apresentados mostram que tais associações não evoluíram a partir de um mesmo magma parental por cristalização fracionada ou outros processos magmáticos.

Dall’Agnol *et al.* (2002) estudaram na região de Rio Maria um dique composto formado por um granito pórfiro e um diabásio seccionando o Granodiorito Rio Maria e aflorando próximo ao contato deste com o Granito Musa. Os dados geocronológicos forneceram uma idade de 1885 ± 4 Ma para o granito pórfiro; por apresentarem texturas e

evidências de coexistência, a idade obtida foi estendida também para a parte máfica associada (Dall’Agnol *et al.* 2002, Oliveira 2006). Trabalhos de campo realizados por Almeida (2005) e Oliveira (2005) levaram a descoberta de diques máficos, intermediários e félsicos aflorando na área de Bannach, SE do Pará.

Ferreira (2009) caracterizou em termos petrográficos e geoquímicos a ocorrência de diques que afloram na região de Bannach, separando-os em quatro grupos litológicos: (1) diabásios, (2) andesitos, (3) dacitos e (4) riolitos. Os dados geoquímicos descartam uma história evolutiva por processo de cristalização fracionada a partir de um mesmo magma. Silva Jr. *et al.* (1999) chegaram a mesma conclusão sobre a relação genética entre os diferentes grupos litológicos de diques da região de Rio Maria, porção oeste de Bannach.

Estudos petrográficos realizados por Costa (2012) em oito diques na região de Água Azul do Norte identificaram diabásio, andesito, dacito, riolito e feldspato-alcálico riolito tendo sido obtida uma idade Pb-Pb em zircão de  $1887 \pm 2$  Ma para um dique de riolito, interpretada como a idade de cristalização. Rodrigues (2013) realizou estudos petrográficos em outros oito diques nesta mesma região, identificando diabásio, andesitos, riolito e feldspato-alcálico riolitos.

### **3 JUSTIFICATIVA**

Inúmeros estudos têm tentado esclarecer os processos de formação e evolução dos granitoides arqueanos e granitos anorogênicos paleoproterozoicos do TGGRM. Entretanto, os diques, que constituem um mecanismo importante para o transporte de magma e podem representar o início de processos de rifteamento da crosta ou resultar de outras manifestações de extensão crustal, também necessitam de estudos geológicos de detalhe.

Os diques da região de Água Azul do Norte carecem, portanto, de estudos petrográficos complementares, geoquímicos de detalhe e geocronológicos a fim de permitir interpretações e comparações mais seguras com outras ocorrências já estudadas nas regiões de Bannach e Rio Maria, no DRM.

### **4 OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo contribuir para a ampliação do conhecimento petrográfico, geoquímico e geocronológico dos diques da região da Água Azul do Norte e para sua correlação com o enxame de diques que ocorre nas regiões de Bannach e Rio Maria, permitindo um melhor entendimento da natureza deste magmatismo no DRM. Os objetivos específicos são:

- Complementar a petrografia e realizar o estudo geoquímico de diques máficos a félsicos da região de Água Azul do Norte, Província Carajás;
- Discutir suas afinidades geoquímicas, tipologia e os processos magmáticos que contribuíram para a evolução desses corpos;
- Determinar a idade de cristalização de um desses diques félsicos;
- Definir as fases acessórias presentes nos diques estudados por análises de microscopia eletrônica de varredura-espectroscopia por dispersão de energia (MEV-EDS);
- Realizar estudo comparativo entre os diques da região mencionada e os ocorrentes nas regiões de Bannach e Rio Maria, DRM, bem como com aqueles aflorantes da Bacia Carajás.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

### 5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa consistiu no levantamento bibliográfico referente à geologia da região enfocada, bem como na ocorrência de diques proterozoicos da região do DRM. Esta etapa foi continuamente atualizada à medida que novos dados foram publicados. Foram consultados, ainda, artigos e livros sobre temas relacionados à geologia de diques na região, com ênfase à petrografia e geoquímica, além de leitura envolvendo técnicas de análises por MEV-EDS.

### 5.2 PETROGRAFIA

Para a caracterização petrográfica foram realizadas descrições macroscópicas de amostras e microscópicas de 16 lâminas polidas de diques da área de Água Azul do Norte. A análise textural abrangeu exame microscópico e interpretação de feições texturais e de transformações pós-magmáticas. Foram realizadas 13 análises modais em amostras representativas dos diferentes litotipos, utilizando-se um contador eletrônico de pontos da marca *Swift*, com uma média de 1.800 pontos para cada lâmina polida, o que permitiu uma classificação preliminar das rochas estudadas (Streckeisen 1976, Le Maitre 2002).

### 5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As análises de MEV foram realizadas no Laboratório de Microanálises do IG da UFPA. O equipamento utilizado foi um MEV LEO-ZEISS modelo 1430, com detector de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) Sirius-SD acoplado. As análises de EDS utilizaram o padrão ZAF (Z=nº atômico, A=absorção atômica, F=fluorescência de Raios-X),

que já vem instalado com o *software* e faz correções entre pico e *background* do elemento. O tempo de duração das análises foi de 30s, com 4000 a 5000 contagens/segundo para cada análise.

O estudo de MEV foi aplicado na obtenção de imagens de elétrons retroespalhados (ERE) e na realização de análises químicas qualitativas e semiquantitativas pontuais de fases minerais acessórias previamente selecionadas. As condições de análises estabelecidas para o MEV foram: corrente do feixe de elétrons igual 90  $\mu$ a, voltagem de aceleração constante = 20 KV, distância de trabalho igual 15 mm, tempo de análise igual 30s. Foram caracterizados minerais opacos, além de outras fases acessórias representativas de cada dique estudado.

#### 5.4 GEOQUÍMICA

Amostras representativas dos diques estudados foram selecionadas para análises químicas em rocha total a partir dos estudos petrográficos. A preparação das amostras envolveu trituração, pulverização, homogeneização e quarteamento na Oficina de Preparação de Amostras (OPA) do IG da UFPA. Após esta etapa, as mesmas foram enviadas ao laboratório comercial *Acme Analytical Laboratories* (Vancouver, Canadá). Os elementos maiores e menores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) foram analisados por ICP-ES (*Inductively Coupled Plasma – Emission Spectrometry*) e os elementos traço (Rb, Sr, Ba, Ga, Y, Zr, Nb, U, Th, Cr, Ni, V), incluindo os Terras Raras (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb e Lu) por ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*).

Os resultados analíticos foram tratados e interpretados em diagramas geoquímicos apropriados e a classificação geoquímica utilizada seguiu os procedimentos indicados em Rolisson (1993). O estudo dos Elementos Terras Raras (ETR) foi aplicado na determinação das possíveis fases fracionadas durante a geração do magma ou de seu processo de cristalização (Henderson 1984, Dall’Agnol *et al.* 1999).

Por se tratar de rochas com matriz muito fina, a classificação final foi baseada no quimismo dos litotipos utilizando-se o diagrama de classificação de rochas vulcânicas TAS, que relaciona o total de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) *versus*  $\text{SiO}_2$  (Le Maitre 2002). Os dados obtidos permitiram discriminar e classificar com maior segurança as rochas estudadas, bem como compará-las com outros diques do DRM.

## 5.5 GEOCRONOLOGIA

Uma amostra de dique de feldspato-alcálico riolito (MC-95), localizado a sul de Água Azul do Norte, foi selecionada para análise geocronológica pelo método de evaporação de Pb em zircão. As etapas envolveram trituração, pulverização e peneiramento de cerca de 15 kg de amostra na OPA do IG da UFPA. Os cristais de zircão provenientes de frações granulométricas entre 0,088 e 0,250 mm foram separados em um elutriador e separador magnético isodinâmico Frantz em posição vertical e horizontal. A concentração dos minerais pesados foi feita por gravidade com a utilização de líquido pesado (bromofórmio) no Laboratório de Geologia Isotópica (Pará-Iso) do IG da UFPA. Após esta etapa, os zircões foram selecionados com o auxílio de uma lupa binocular (aumento de até 60x) sendo escolhidos aqueles com propriedades mais adequadas para datação (limpeza, transparência e hábito).

A datação pelo método de evaporação-ionização de Pb em zircão (Kober 1987, Gaudette *et al.* 1998) foi realizada no Laboratório Pará-Iso do IG da UFPA e envolveu a utilização de um espectrômetro de massa de ionização termal FINNIGAN MAT 262.

---

---

## CAPITULO 2

---

---

### **PETROGRAFIA, GEOQUÍMICA E GEOCRONOLOGIA DE DIQUES MÁFICOS A FÉLSICOS DA REGIÃO DE ÁGUA AZUL DO NORTE, PROVÍNCIA CARAJÁS, SUDESTE DO PARÁ**

Paulo Roberto Soares Rodrigues<sup>1,2</sup> (psoares29@hotmail.com), Claudio Nery Lamarão<sup>1,2,3</sup> (lamarao@ufpa.br), Hévila de Nazaré Silva da Costa<sup>1,2</sup> (hevilageo@gmail.com), Davis Carvalho de Oliveira<sup>1,2,3</sup> (davis@ufpa.br), Marco Antônio Galarza<sup>1,2,3</sup> (antogt@ufpa.br) Aldemir de Melo Sotero<sup>1,2</sup> (aldemir.sotero@hotmail.com)

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) - IG - UFPA.

<sup>2</sup> Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) - IG - UFPA.

<sup>3</sup> Instituto de Geociências (IG) - (UFPA).

Submetido ao Boletim Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais.

#### **RESUMO**

Na região de Água Azul do Norte, sudeste do Pará, diques máficos a félsicos com direção NW-SE dominante e espessuras de até 30 metros afloram em área peneplanizada sob a forma de cristas descontínuas, seccionando granitos anorogênicos e rochas arqueanas encaixantes. Foram individualizados diabásios, andesitos, riolitos e feldspato-alcálico riolitos metaluminosos a fracamente peraluminosos de afinidade toleítica. Os diabásios apresentam os menores conteúdos de SiO<sub>2</sub> e TiO<sub>2</sub> e os mais elevados de FeO, MgO e CaO. Os andesitos apresentam valores intermediários quando comparados aos diabásios e riolitos. Os diques de riolito e feldspato-alcálico riolito são mais enriquecidos em SiO<sub>2</sub> e exibem correlação negativa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO e CaO e positiva de K<sub>2</sub>O em relação a sílica. Os diques de Água Azul do Norte mostram grande similaridade com aqueles de outras regiões do Domínio Rio Maria, implicando em uma mesma origem para os diques dessa região. Entretanto, a evolução dos diques de Água Azul do Norte não aponta para a existência de uma série magmática contínua. Os dados geocronológicos confirmam o sincronismo dos diques félsicos com os granitos anorogênicos de aproximadamente 1,88 Ga do DRM.

Palavras-chave: Província Carajás, Água Azul do Norte, diques, petrografia, geoquímica.

## ABSTRACT

In the Água Azul do Norte region, southeast of Pará, mafic to felsic dikes, with dominant NW-SE direction and thicknesses of about 30 meters outcrop in razed areas as discontinuous ridges sectioning anorogenic granites and Archean country rocks. Metaluminous to weakly peraluminous diabases, andesites, rhyolites and alkali-feldspar rhyolite with tholeiitic affinity were individualized. The diabase has the lowest content of  $\text{SiO}_2$  and  $\text{TiO}_2$  and the highest content of  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{CaO}$ . The andesites have intermediate values when compared to diabases and rhyolites. The dikes of rhyolite and alkali-feldspar rhyolite are more enriched in  $\text{SiO}_2$  and exhibit negative correlation of  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  and positive correlation of  $\text{K}_2\text{O}$  in relation to silica. The dikes of Água Azul do Norte show great similarity to those of other regions of the Rio Maria Domain, implying the same origin to the dykes of that region. However, the evolution of the dikes of Água Azul do Norte does not point to the existence of a continuous magmatic series. The geochronological data confirm the synchronism of felsic dykes with anorogenic granites of approximately 1.88 Ga of the Rio Maria Domain.

Keywords: Carajás Province, Água Azul do Norte, dikes, petrography, geochemistry.



## INTRODUÇÃO

A Província Carajás é marcada por grandes ocorrências de diques máficos a félsicos; trabalhos iniciais (Gastal, 1987; Huhn *et al.*, 1988; Souza *et al.*, 1990; Silva Jr, 1996; Rivalenti *et al.*, 1998; Silva Jr. *et al.*, 1999) mostraram os aspectos petrográficos e geoquímicos dessas ocorrências. No DRM esses enxames de diques seccionam tanto os granitos anorogênicos paleoproterozoicos quanto suas rochas encaixantes arqueanas.

Trabalhos recentes (Trabalho de Conclusão de Curso de J. C. L. Mesquita, 2010; Santos *et al.*, 2013 e Lima *et al.*, 2014) permitiram o mapeamento de diversas ocorrências de diques na área compreendida entre as cidades de Ourilândia do Norte e Água Azul do Norte, sudeste do Estado do Pará. Estudos petrográficos preliminares nesses diques (Trabalho de Conclusão de Curso de H. N. S. Costa, 2012 e P. R. S. Rodrigues, 2013), permitiram classificá-los como diabásio, andesito, dacito, riolito e feldspato-alcálico riolito. Datações geocronológicas realizadas pelo método de evaporação de Pb em zircão, indicaram idade de  $1887 \pm 2$  Ma para um dique de riolito porfirítico, (Trabalho de Conclusão de Curso de H. N. S. Costa, 2012) interpretada como idade de cristalização.

Neste trabalho são apresentados novos dados petrográficos, geoquímicos e geocronológicos dos diques da região de Água Azul do Norte, na Província Carajás e uma proposta de correlação entre eles e outros já estudados nas regiões de Bannach e Rio Maria (Silva Jr. *et al.*, 1999; Dall’Agnol *et al.*, 2002; Almeida *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2006; Trabalho de Conclusão de Curso de A. T. R. Ferreira, 2009), ambas pertencentes ao DRM.

## CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Amazônia Central (PAC), na qual está inserida a área de ocorrência dos diques deste estudo, é considerada a mais antiga dentre as províncias do Cráton Amazônico e corresponde a uma crosta continental com idade  $> 2,5$  Ga que não foi afetada pela orogenia Transamazônica. A PAC é separada em dois grandes domínios pela Província Maroni-Itacaiúnas (2,2-1,95 Ga), o Bloco Carajás (Tassinari & Macambira, 2004) a sul e o Bloco Roraima a norte. Foi inserida na PAC a Província Carajás (PC), definida por Santos *et al.* (2000) como uma província independente.

O Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM; Figura 2.1) ou Domínio Rio Maria (DRM) segundo Vasquez *et al.* (2008), situado no sudeste do Cráton Amazônico, faz parte da PC. Ele é representado por *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas, com idades que variam de 2,98 a 2,90 Ga (Pimentel & Machado, 1994; Souza *et al.*, 2001), além de corpos granitoides da série TTG originados entre 2,98 e 2,92 Ga. O conjunto de dados

petrográficos, geoquímicos e geocronológicos disponíveis revelam a existência de cinco principais grupos de rochas arqueanas para esta região (Almeida *et al.*, 2008; Almeida *et al.*, 2011; Althoff *et al.*, 2000; Dall'Agnol *et al.*, 1997; Feio *et al.*, 2013; Guimarães *et al.*, 2010; Leite *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2009): 1) Granitoides TTGs antigos, representados pelo Tonalito Arco Verde e Trondhjemito Mogno ( $2,96\pm 0,02$  Ga) e pelo Complexo Tonalítico Caracol e Tonalito Mariazinha ( $2,93\pm 0,02$  Ga); 2) Rochas granodioríticas com alto Cr, Ni e Mg (2,87 Ga), tipo sanukitoide, representados pelo Granodiorito Rio Maria e rochas máficas e intermediárias associadas; 3) Leucogranodioritos e leucomonzogranitos calcialcalinos com alto Ba e Sr, representados pela Suíte Guarantã e similares (2,87 Ga); 4) TTGs mais jovens representados pelo Trondhjemito Água Fria (2,86 Ga), aflorante na região de Xinguara e intrusivo no Complexo Tonalítico Caracol; 5) Leucogranitos potássicos de afinidade calcialcalina, representados pelos granitos Xinguara, Mata Surrão e correlatos, com idades entre 2,87-2,86 Ga. Os metassedimentos do Grupo Rio Fresco de idade arqueana recobrem parte das unidades do TGGRM, as quais são cortadas por granitos anorogênicos paleoproterozóicos (Huhn *et al.*, 1988; Araújo *et al.*, 1994; Dall'Agnol *et al.*, 1997, 2005).

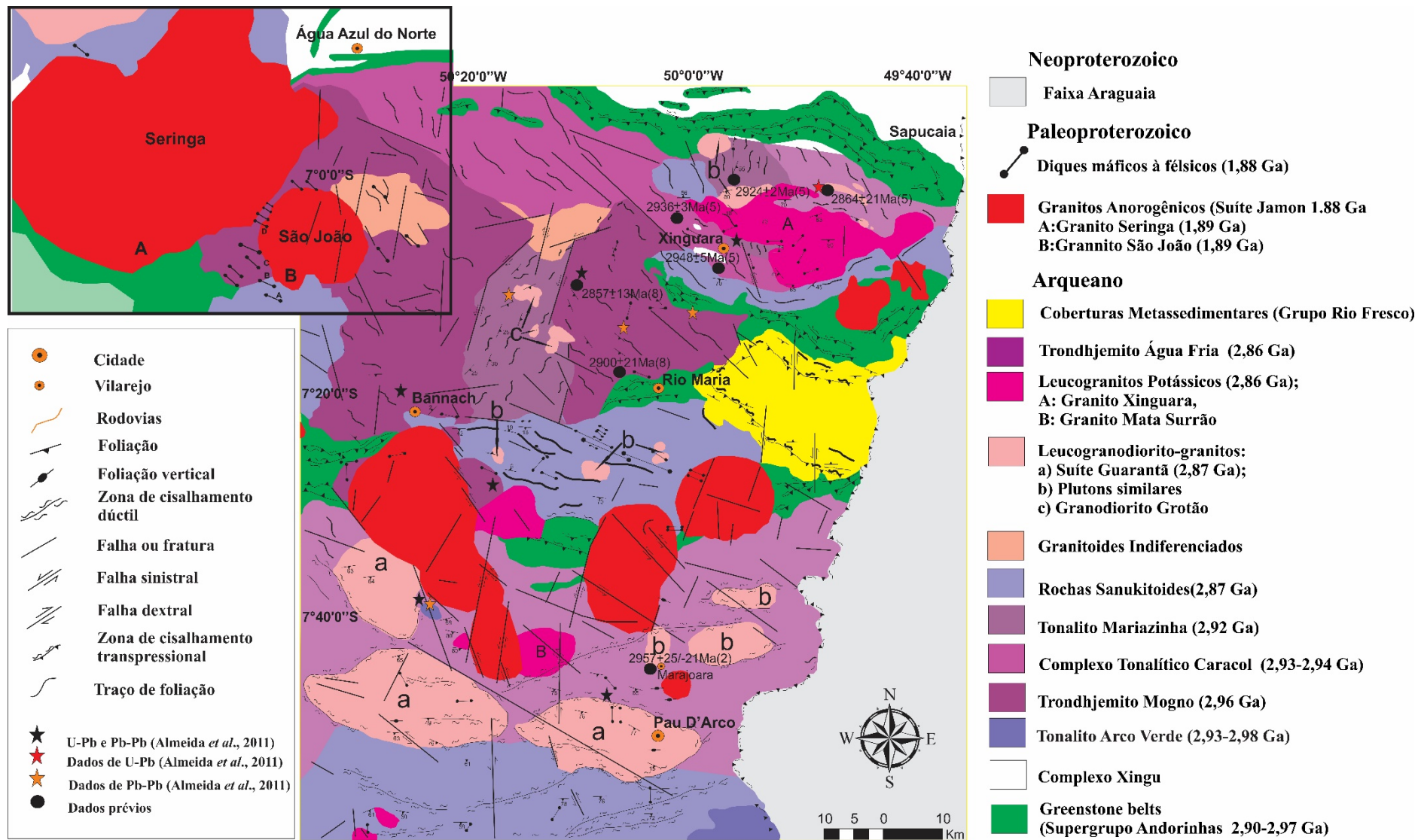


Figura 2.1 - Mapa geológico do TGGRM com a ocorrência dos diques estudados e dados geocronológicos representativos das unidades arqueanas. Modificado de Almeida *et al.* (2011) e Santos *et al.* (2013).

## **GEOLOGIA DA REGIÃO DE ÁGUA AZUL DO NORTE**

A região de Água Azul do Norte (Figura 2.2) compreende *greenstones belts*, granitoides arqueanos, os granitos paleoproterozoicos Seringa ( $1895\pm 1$  Ma) e São João ( $1890 \pm 2$  Ma) e diques de composição máfica a félsica. Santos *et al.* (2013) agruparam as rochas arqueanas desta região em associações granodioríticas e trondhjemiticas. As rochas granodioríticas são formadas por: (1) anfibólio-biotita granodioritos (ABGrd) fortemente saussuritizados, aflorantes às proximidades de Ourilândia do Norte, com idade de cristalização de  $2875\pm 2$  Ma e teores elevados de Ni, Cr e Mg, correlatos às rochas da Suíte Sanukitoide Rio Maria (Oliveira *et al.*, 2009); (2) biotita-granodioritos, texturalmente distintos dos ABGrd sem anfibólio, saussuritização dos plagioclásios e epidoto magmático, e idade de cristalização obtida por análise Pb-Pb em zircão de  $2884\pm 3$  Ma; (3) leucogranodioritos-granitos pouco deformados, com coloração esbranquiçada a rosada, contendo fenocristais de plagioclásio e feldspato-alcalino, correlacionados às rochas da Suíte Garantã (Almeida *et al.*, 2013). As rochas trondhjemiticas são representadas por biotita-epidoto trondhjemitos com bandamento composicional, foliação NE-SW dominante e saussuritização intensa dos plagioclásios, geoquimicamente correlacionáveis às rochas do Trondhjemito Mogno (Almeida *et al.*, 2011).

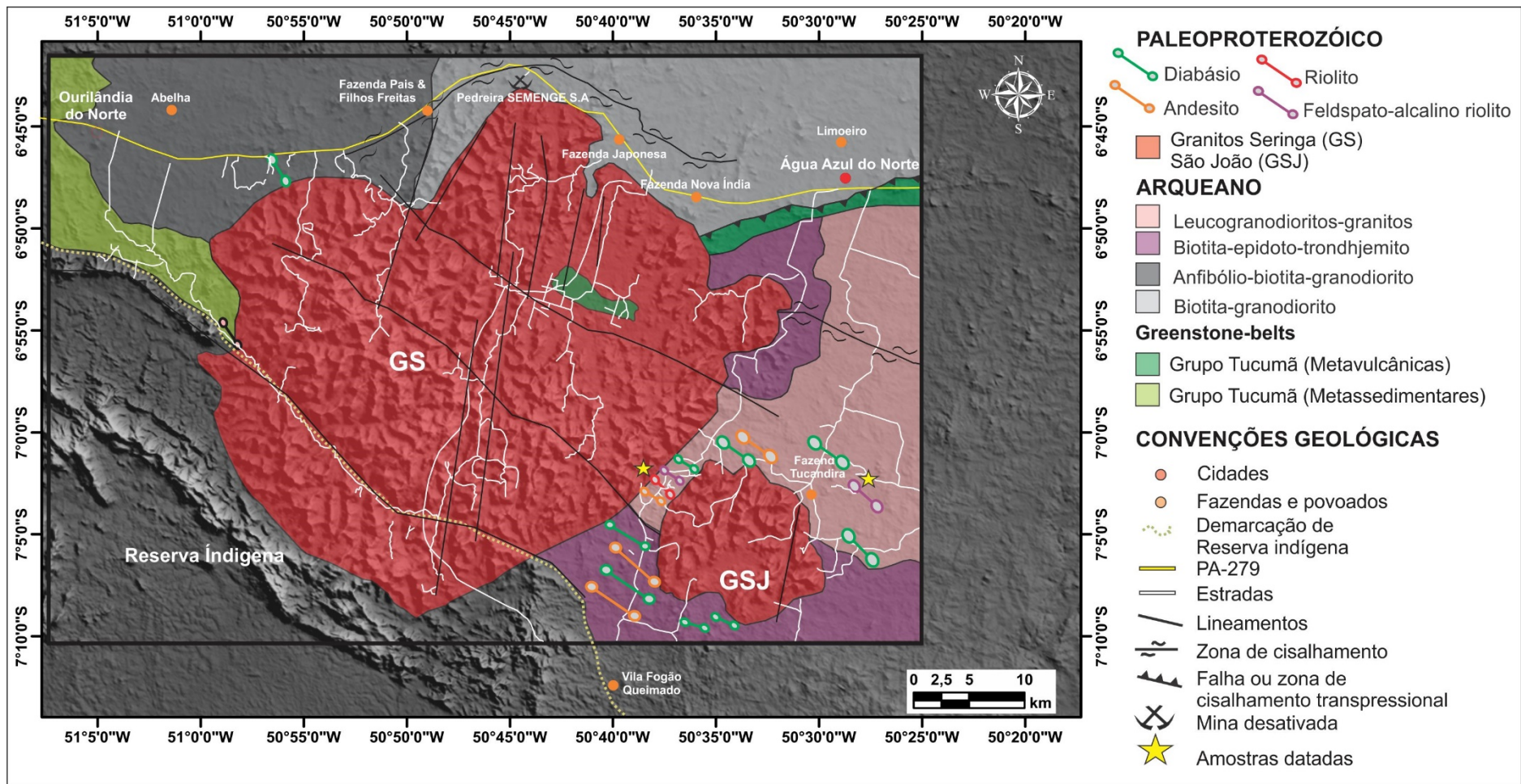


Figura 2.2 - Mapa geológico da região de Água Azul do Norte com a ocorrência dos diques estudados. Modificado de Santos *et al.* (2013).

## ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOCRONOLÓGICOS DOS DIQUES

Os diques estudados de Água Azul do Norte compreendem corpos tabulares, subverticais, orientados na direção NW-SE, com extensão em torno de 500m, podendo alcançar 2 km, e espessura de até 30m (Figura 2.2). Estão localizados em área peneplanizada onde afloram sob a forma de cristas descontínuas e blocos rolados, ou formando pequenos morros alinhados. Ao longo de estradas vicinais é possível observar alguns desses diques encaixados em rochas trondhjêmíticas arqueanas, entre serras que formam os granitos paleoproterozoicos Seringa e São João e a oeste do primeiro (Figuras 2.3).

Os dados geocronológicos demonstram que esses diques se formaram no final do paleoproterozoico e são sincrônicos ao magmatismo granítico anorogênico que ocorreu na Amazônia Oriental. (Trabalho de Conclusão de Curso de H.N.S. Costa, 2012) tendo sido obtida uma idade Pb-Pb em zircão de  $1887 \pm 2$  Ma para um dique de riolito, interpretada como idade de cristalização.

A Tabela 2.1 mostra as idades geocronológicas obtidas para os diques do DRM e suas respectivas metodologias.

Tabela 2.1 - Idades obtidas em diques de composição máfica e fêlsica no DRM.

Rocha	Método	Material analisado	Idade (M.a)
Diques máficos	K-Ar	Concentrados máficos	$1802 \pm 22$ (1)
Diques intermediários	Rb-Sr	Rocha total	$1874 \pm 110$ (2)
Diques fêlsicos	Rb-Sr(a)/ Pb-Pb(b)	Rocha total/ Zircão	$1707 \pm 17$ (a)(3) $1885 \pm 2$ e $1885 \pm 4$ (b)(4)
Granito Pórfiro	Pb-Pb	Zircão	$1885 \pm 2$ (5)
Riolito	Pb-Pb	Zircão	$1879 \pm 2$ (6)
Riolito	Pb-Pb	Zircão	$1887 \pm 2$ (7)

Legenda - (1) Silva Jr. (1996); (2) Rivalenti *et.al.* (1998); (3) Gastal *et.al.* (1987); (4) Oliveira (2006); (5) Dall'Agnol *et al.* (2002); (6) Ferreira (2009); (7) Costa (2012).



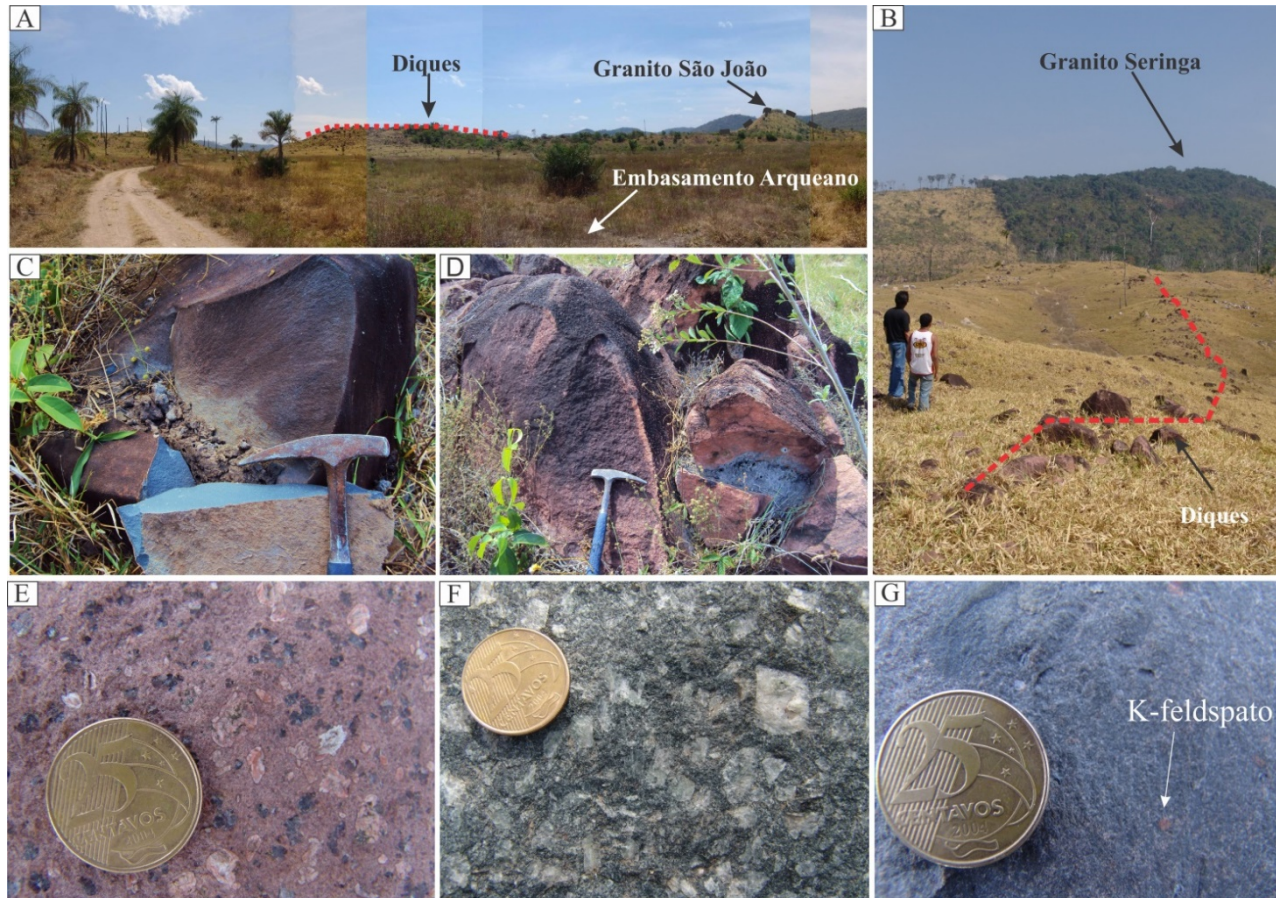


Figura 2.3 – Aspectos de campo mostrando o modo de ocorrência dos diques de Água Azul do Norte: A - Dique cortando o embasamento arqueano; ao fundo, granito paleoproterozoico São João; B - Dique de riolito encaixado em rochas arqueanas; ao fundo serra do granito paleoproterozoico Seringa; C - Afloramento de dique máfico; D - Afloramento de dique félsico. E – Textura porfírica do dique de riolito; F - Textura porfírica do dique de diabásio; G – Textura porfírica e matriz afanítica do feldspato-alcalino riolito.

## PETROGRAFIA

### COMPOSIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO MODAL

As composições modais representativas de treze das dezesseis amostras de diques de Água Azul do Norte foram obtidas com base em 1.500 pontos (Tabela 2.2), permitindo a classificação dessas rochas nos diagramas Q-A-P para rochas vulcânicas (A) e plutônicas (B) (Streckeisen, 1976; Le Maitre, 2002; Figura 2.4). A partir dos aspectos petrográficos e do conteúdo mineralógico modal dessas rochas, foram definidos quatro tipos distintos: diabásios, andesito, riolito e feldspato-alcálico riolito. A textura fanerítica dos diabásios permitiu classificá-los no diagrama de rochas gabróicas (C). As fases varietais presentes nos diferentes diques são anfibólio, piroxênio e biotita. Entre os acessórios primários, zircão, apatita, allanita, titanita, magnetita, titanomagnetita e ilmenita são comumente encontrados. Os minerais secundários são representados por clorita, sericita, epidoto e argilominerais.

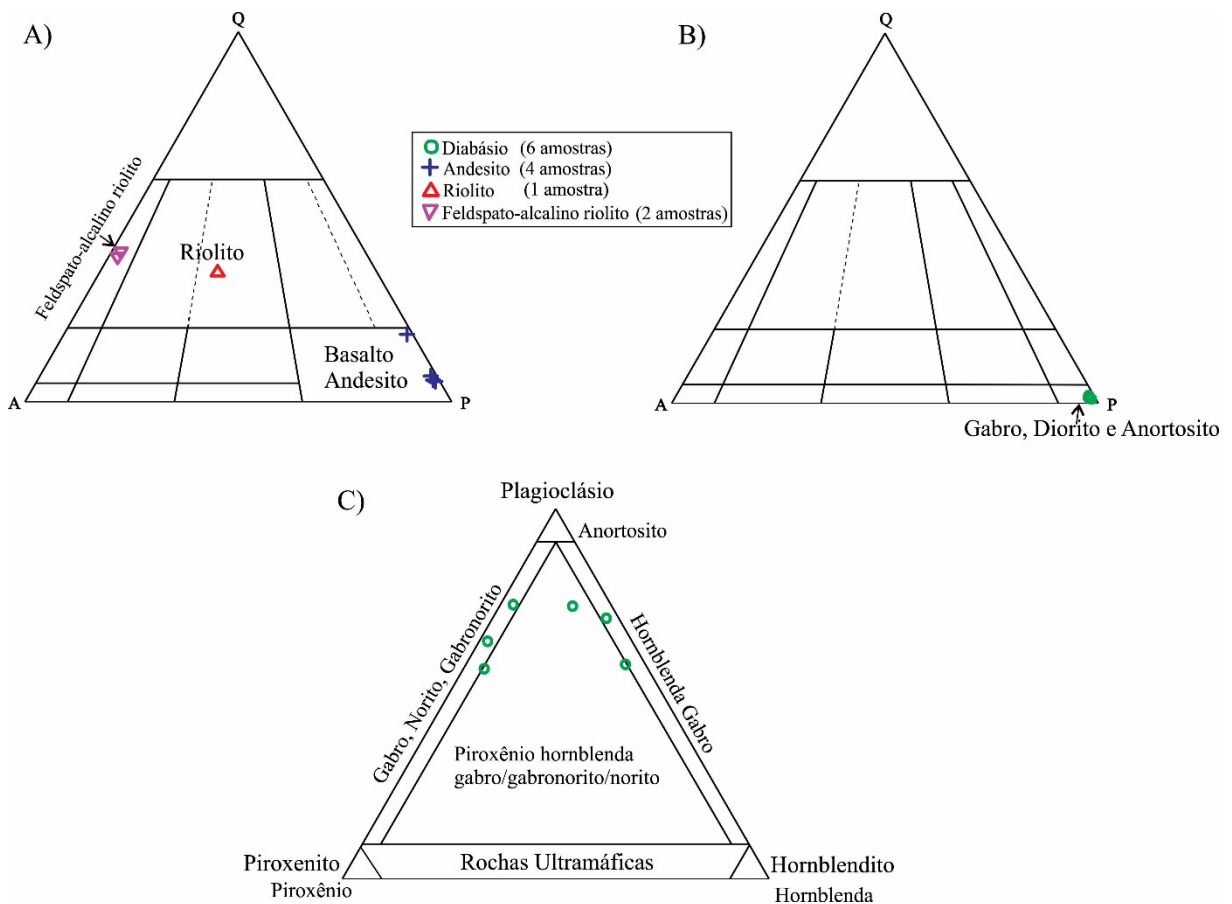


Figura 2.4 - Diagrama Q-A-P e Plagioclásio-Piroxênio-Hornblenda (Le Maitre, 2002) para os diques de Água Azul do Norte.



Tabela 2.2 - Composições modais dos diques de Água Azul do Norte

<b>Rocha</b>	<b>Diabásio</b>						<b>Andesito</b>				<b>Riolito</b>	<b>Feldspato-alcalino riolito</b>	
<b>Mineral (%)</b>	MC-120	MC-118	MC-127	MC-96	PCJ-15	PCJ-19	PCJ-11	PCJ-18	PCJ-12b	PCJ-34a	PCJ-24a	MC-95b	PCJ-34b
Plagioclásio	68,80	55,50	51,80	69,90	67,60	52,00	47,60	55,80	59,40	58,10	22,50	0,30	0,50
Quartzo					0,80	1,80	9,20	3,00	1,80	2,20	28,20	22,80	33,70
K-feldspato							3,20				31,80	67,50	53,20
Biotita					0,50		19,80				0,90	8,00	2,10
Anfibólio	1,20	35,50	5,30	2,40	19,15	37,50	0,50	20,20	22,80	16,30	6,30		
Clinopiroxênio	27,20	2,00	37,40	24,50	4,35	2,00							
Opacos	2,70	5,80	5,10	3,10	5,30	6,40	0,20	19,80	14,80	21,90	7,10	0,60	10,50
Acessórios	0,10	1,20		0,10	0,50	0,20	1,00	0,80	1,00	0,80	3,20	0,60	
Secundários			0,40		1,80	0,10	18,50	0,40	0,20	0,70		0,20	
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
Félsicos	68,8	55,5	51,8	69,9	68,4	53,8	60,0	58,8	61,2	60,3	82,5	90,6	87,4
Máficos	31,2	44,5	48,2	30,1	31,6	46,2	40,0	41,2	38,8	39,7	17,5	9,4	12,6
Matriz					74,6	67,8					35,8	71,20	67,3
A 100%													
P	100	100	100	100	98,83	96,65	79,33	94,90	97,06	96,35	27,27	0,33	0,57
A	0	0	0	0	0	0	5,33	0	0	0	38,55	74,50	60,87
Q	0	0	0	0	1,17	3,35	15,33	5,10	2,94	3,65	34,18	25,17	38,56

Legenda: minerais acessórios - titanita, allanita, zircão e apatita; minerais secundários: epidoto, clorita, sericita, argilominerais.

## ASPECTOS TEXTURAIS

### **Diabásio**

Em geral, os diabásios apresentam coloração cinza escura a levemente esverdeada, com finas manchas esbranquiçadas correspondentes a cristais de plagioclásio (Figura 2.5A). São rochas faneríticas, equigranulares ou porfíricas, de granulação fina a média, contendo fenocristais prismáticos de plagioclásio com até 1cm de comprimento. A textura intergranular a subofítica (Figura 2.5B) é a principal, com a textura porfírica ocorrendo localmente. A matriz dos diabásios porfíricos é composta por plagioclásio e minerais máficos como anfibólio e piroxênio, além de minerais opacos, titanita e apatita como fases acessórias. As fases secundárias são representadas por clorita, epidoto, sericita e argilominerais.

Os cristais de plagioclásio são ripiformes, subédricos, com tamanhos entre 0,5 e 1 cm. Encontram-se moderadamente alterados para argilominerais e sericita, geralmente envolvidos por cristais de clinopiroxênio e hornblenda, desenvolvendo contatos retos a irregulares, respectivamente. Os fenocristais de plagioclásio são prismáticos, subédricos a euédricos e alterados para sericita (Figura 2.5C).

O clinopiroxênio ocorre na forma de cristais subédricos prismáticos com 0,1 a 3,0 mm; possui coloração neutra a amarronzada, por vezes mostra-se moderadamente fraturado e transformado para anfibólio (Figura 2.5D). Ocorre entre ripas de plagioclásio ou envolvendo parcialmente este mineral, caracterizando uma textura intergranular a subofítica.

Os cristais de anfibólio são subédricos a anédricos com pleocroísmo verde a verde claro. Ocorrem ocupando parcialmente o espaço entre cristais de piroxênio ou como produto de sua alteração. Frequentemente preenchem os interstícios entre os cristais de plagioclásio.

A biotita, geralmente proveniente da alteração do anfibólio, é rara a ausente neste litotipo. Quando presente perfaz menos de 1% do volume de moda e apresenta-se alterada para clorita. O quartzo se apresenta em raros microcristais constituindo a matriz. A presença de minerais opacos é comum nessas rochas, geralmente associados a cristais de titanita. Epidoto secundário também ocorre disperso na matriz dos diabásios.

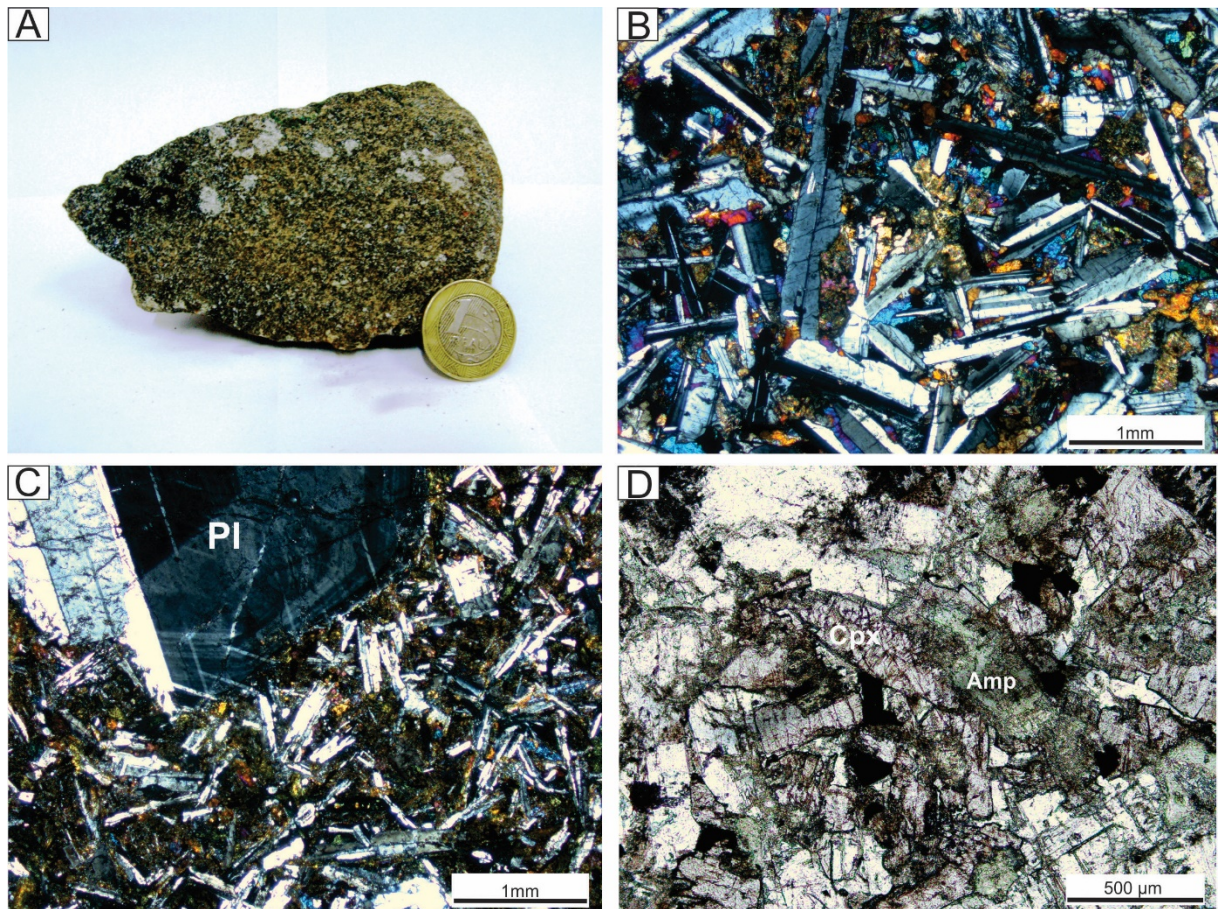


Figura 2.5 - Aspectos petrográficos dos diques de diabásio de Água Azul do Norte. A) Aspecto macroscópico de diabásio porfirítico de granulação média; B) Aspecto da textura intergranular (NC); C) Textura porfirítica, com fenocristais de Plagioclásio (Pl), imersos em matriz intergranular (NC); D) Cristal de clinopiroxênio (Cpx) alterado para anfibólio (Amp) (NP). NC= nicóis cruzados; NP= nicóis paralelos. Nomenclatura segundo Whitney e Evans (2010).

### Andesito

São rochas de coloração cinza escura (Figura 2.6A), granulação fina e textura microcristalina (Figura 2.6B), constituídas essencialmente por plagioclásio, quartzo e, em menor proporção, feldspato-alcalino; localmente quartzo e feldspato-alcalino aparecem como microfenocristais dispersos na matriz (Figura 2.6C). Intercrescimentos granofíricos podem ser observados na matriz microcristalina. O anfibólio é o mineral máfico dominante e os principais minerais acessórios são opacos e apatita. Os minerais secundários presentes são epidoto, sericita e argilominerais.

O plagioclásio é a fase dominante (47,6 a 59,4%). Seus cristais são subédricos, finos a médios e moderadamente saussuritizados. O quartzo apresenta conteúdo modal variável (1,8 a 9,20%) e ocorre como microfenocristais dispersos em matriz de granulação fina (Figura 2.6C).

O feldspato-alcalino é raro, porém forma microfenocristais muito alterados para argilominerais dispersos na matriz. Os cristais de anfibólio são subédricos a anédricos,



levemente corroídos e com contatos irregulares; mostrando leve pleocroísmo verde claro a verde escuro (Figura 2.6D).

Os minerais opacos possuem volume considerável nos diques de andesito, alcançando aproximadamente 22%, e associam-se, comumente, aos cristais de apatita. O epidoto ocorre disperso na rocha.

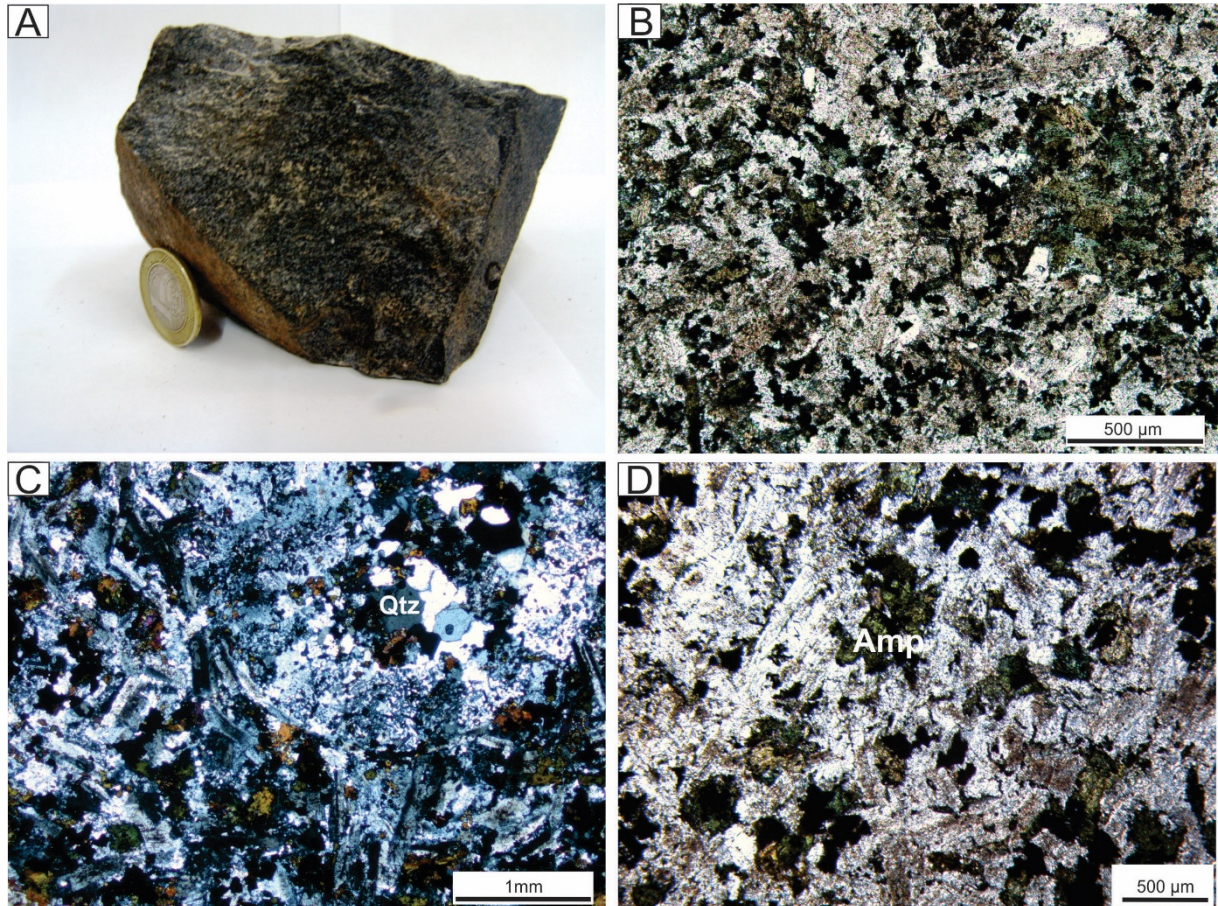


Figura 2.6 - A) Aspecto macroscópico do andesito. B) Textura microcristalina; C) Cristais de quartzo entre cristais de plagioclásio. D) Cristais anédricos de anfibólio (Amp) entre cristais de plagioclásio e minerais opacos (NP) = nicóis paralelos; NC= nicóis cruzados. Nomenclatura segundo Whitney e Evans (2010).

### Riolito

O riolito é caracterizado por sua cor avermelhada (Figura 2.7A), granulação variando de fina a grossa e texturas afanítica e porfírica. Contudo, texturas esferulítica e granofírica (Figura 2.7B e D) podem ser observadas com frequência. Fenocristais de quartzo, feldspato-alcálico, plagioclásio e minerais opacos encontram-se dispersos em uma matriz afanítica. O riolito é composto, essencialmente, por feldspato-alcálico, quartzo e plagioclásio, tendo como minerais varietais anfibólio e biotita. Minerais opacos, zircão e apatita compõem as fases acessórias. As principais fases secundárias são clorita, epidoto, sericita e argilominerais.

O feldspato-alcálico, intensamente alterado para argilominerais, apresenta-se como fenocristais subédricos com contatos retos com quartzo e anfíbólio. Ocorre também na matriz microcristalina, onde comumente forma intercrescimentos granofíricos com o quartzo.

O quartzo apresenta inclusões de feldspato, caracterizando uma textura poiquilítica. Os contatos com os cristais de feldspato, em sua maioria, são retos, porém também aparecem contatos corroídos. Com base nas características morfológicas, o quartzo ocorre de duas maneiras distintas: o Qtz1 se constitui em fenocristais subédricos a euédricos com dimensões entre 0,5mm e 4,0 mm; o Qtz2 ocorre como intercrescimentos granofíricos (Figura 2.7B).

Os cristais de plagioclásio são variáveis nos riolitos e podem ser encontrados como fenocristais subédricos e moderadamente alterados para sericita, ou como cristais subédricos a anédricos finos constituindo a matriz.

Os cristais de anfíbólio são subédricos a anédricos, exibem um pleocroísmo verde escuro e contatos retos com K-feldspato e retos a irregulares com o quartzo. Estão moderadamente alterados para clorita, epidoto e óxido de ferro (Figura 2.7C).

A biotita, em pequena proporção modal no riolito (0,9%), forma cristais anédricos, por vezes fortemente alterada para clorita e comumente associados aos opacos.

Os minerais opacos são subédricos a anédricos, finos a médios e associados à biotita e anfíbólio. Apatita pode ser encontrada como inclusão nesses dois últimos. O zircão é euédrico a subédrico e geralmente incluso em cristais de biotita ou disperso na matriz.

Os minerais secundários são formados por epidoto e clorita, que ocorrem como produtos de alteração de anfíbólio e biotita, enquanto sericita e argilominerais são oriundos da alteração dos feldspatos.

### **Feldspato-alcálico riolito**

Os feldspato-alcálicos riolitos são caracterizados por sua cor avermelhada, granulação fina a média e textura porfírica. Fenocristais de quartzo, em média com 4,0 mm, e feldspato-alcálico na forma de prismas alongados e irregulares com até 1,0 cm e coloração rosada, encontram-se dispersos em matriz afanítica (Figura 2.7A). A textura predominante é a porfírica (Figura 2.7G), porém de forma subordinada, mas não menos importantes, ocorrem texturas granofírica e esferulítica (Figura 2.7I). Sua mineralogia é composta predominantemente por álcali feldspato e quartzo. A biotita ocorre como único mineral varietal e os minerais acessórios são representados principalmente por minerais opacos. Os minerais secundários são clorita, sericita e argilominerais.

O álcalifeldspato forma fenocristais subédricos com contatos retos com o quartzo e, por vezes, sinuosos. Seus cristais apresentam-se intensamente alterados para argilominerais. Também ocorrem na matriz microcristalina, onde comumente formam intercrescimentos granofíricos com o quartzo.

O quartzo ocorre em três variedades: a primeira (Qtz1) forma fenocristais subédricos a anédricos bem desenvolvidos; a segunda (Qtz2) ocorre como mineral intersticial de granulação fina à média, e a terceira (Qtz3) está presente como finos cristais dispersos na matriz. O Qtz1 apresenta feições em baía, sugerindo corrosão e reabsorção (Figura 2.7H).

A biotita ocorre dispersa na matriz como cristais subédricos com até 1mm; mostra contatos corroídos com os cristais de álcali feldspato e, por vezes, aparece como inclusões no quartzo, mostrando leve pleocroísmo marrom claro.

Os minerais opacos são subédricos a anédricos, de granulação fina a média, e geralmente associados à biotita (Figura 2.7E). O zircão é euédrico a subédrico e gera comumente incluso em cristais de biotita ou disperso na matriz. A allanita é euédrica e ocorre dispersa na matriz (Figura 2.7F). As fases secundárias são clorita, como produto da alteração da biotita, sericita e argilominerais oriundos da alteração de minerais feldspáticos.



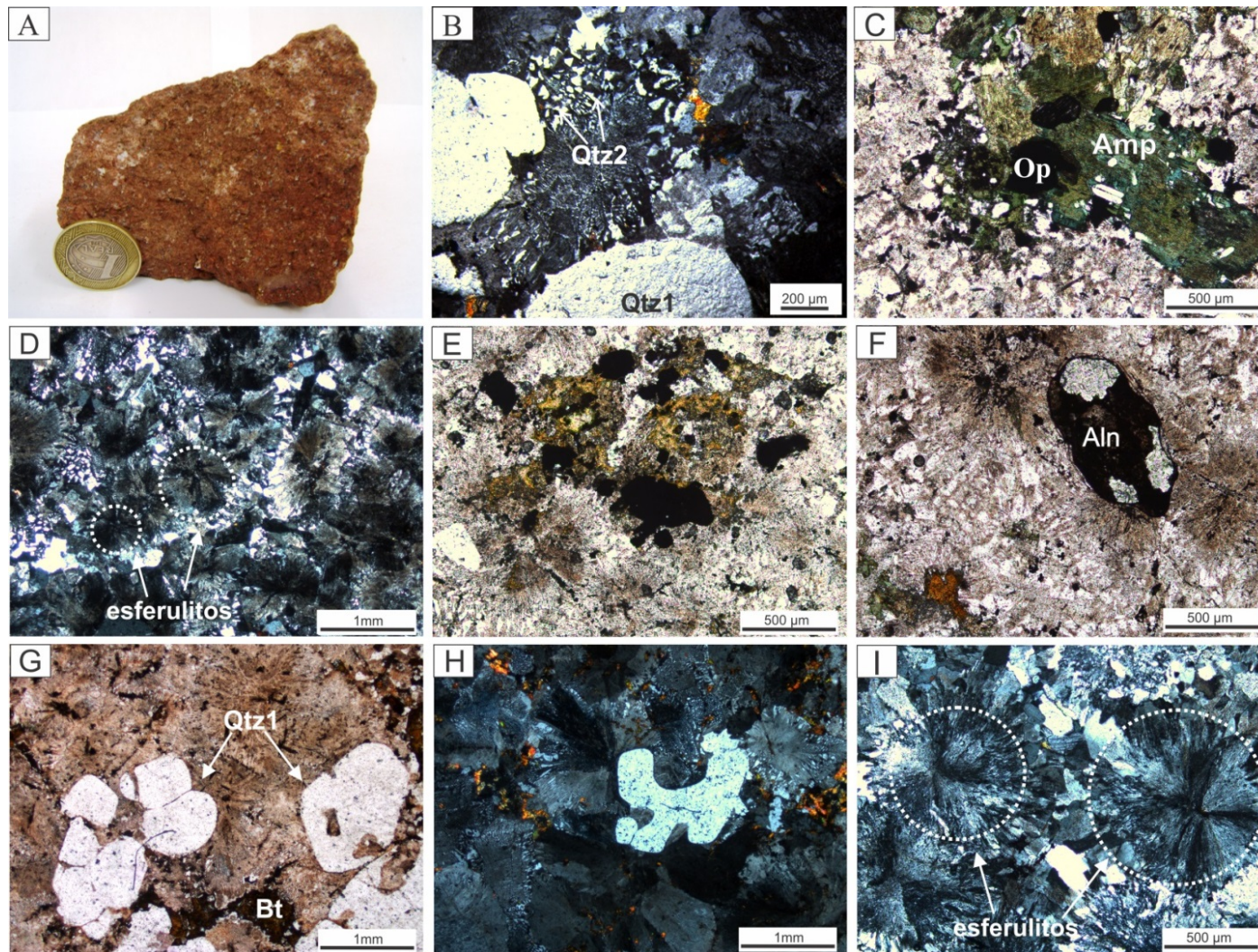


Figura 2.7 - Aspectos macroscópicos e microscópicos dos diques de riolito (B-D) e feldspato-alcálico riolito (A,F-I) de Água Azul do Norte; A) Aspecto macroscópico do feldspato-alcálico riolito porfírico; B) Cristais porfíricos de Qtz1 e textura granofírica (Qtz2) no riolito (NC); C) Cristal corroído de anfíbólio (Amp) em riolito (NP); D) Textura esferulítica em matriz granofírica do riolito (NC); E) Aspecto textural do feldspato-alcálico riolito (NP); F) Cristal de Allanita (NP) G) Fenocristais de Qtz1 e biotita cloritizada (NP); H) Qtz1 do riolito com feições de reabsorção em matriz granofírica (NC); I) Textura esferulítica característica do dique de feldspato-alcálico riolito (NC); NP: Nicóis Paralelos; NC: Nicóis Cruzados. Abreviações segundo Whitney e Evans (2010).

## FASES ACESSÓRIAS

As fases acessórias presentes nos diques estudados foram caracterizadas por análises de MEV-EDS (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Principais fases acessórias presentes nos diques de Água Azul do Norte.

<b>Litotipo</b>	<b>Amostra</b>	<b>Fases acessórias</b>
Diabásio	MC-127, MC-101	Py, Ccp, Ttn, Ap, Tmt, Mag, Ilm
Andesito	PCJ-18	Py, Ccp, Ttn, Ap, Mag, Ilm
Riolito; Feldspato-alcalino riolito	PCJ-34b, PC-24a	Mag, Ilm, Brt, Aln, Ap, Zrn

Legenda: Py=pirita, Ccp=calcopirita, Brt=barita, Mag=magnetita, Ilm=ilmenita, Tmg=titanomagnetita, Ap=apatita, Zrn=zircão, Aln=allanita, Ttn=titanita.

As análises de MEV-EDS (Tabela 2.3) revelaram que os principais minerais acessórios são os óxidos de Fe e Ti, (magnetita, titanomagnetita e ilmenita), além de titanita, apatita e raros sulfetos (pirita e calcopirita). A magnetita é subédrica e ocorre em todos os litotipos, por vezes associada a texturas de oxi-exsolução originando ilmenita (Figura 2.8A). A ilmenita, comum a todos os litotipos, é subédrica a anédrica; por vezes forma manchas irregulares na magnetita decorrentes, provavelmente, de processos de oxi-exsolução (Figura 2.8B). A titanomagnetita foi identificada nos diabásios e andesito na forma de cristais subédricos a euédricos (Figura 2.8C). A titanita é anédrica e está presente em todos os litotipos associada principalmente aos cristais de magnetita (Figura 2.8A).



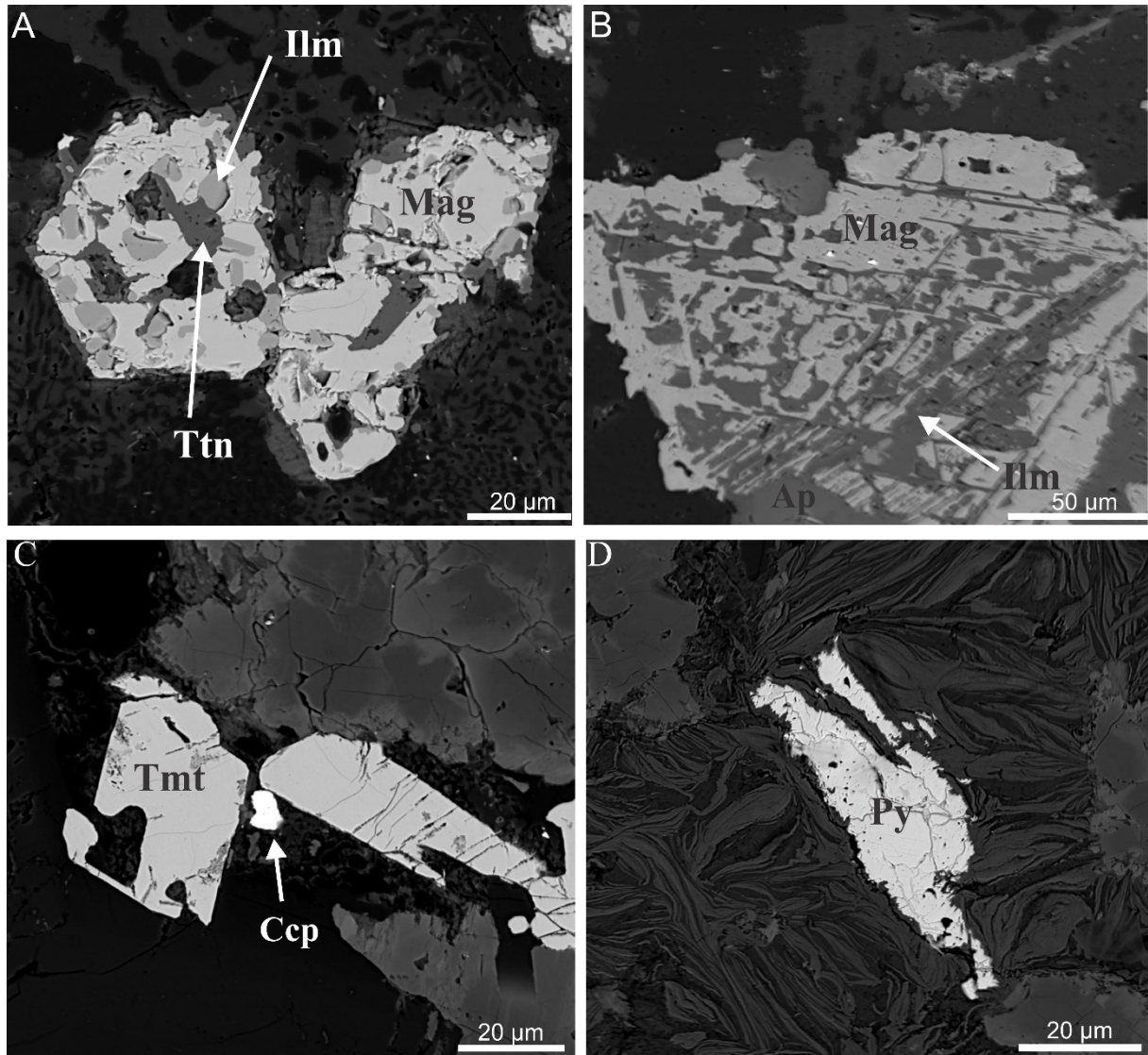


Figura 2.8 - Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por MEV. A - Cristais anédricos de magnetita contendo inclusões de titanita; ilmenita, provavelmente produto de oxi-exsolução, forma cristais individuais na magnetita; B - Cristal de magnetita com texturas de oxi-exsolução e substituição por Ilmenita no feldspato-alcálico riolito; C - Cristais de titanomagnetita e calcopirita, comuns nos diabásios e andesitos; D - Cristal anédrico e corroído de pirita diabásios. Nomenclatura segundo Whitney e Evans (2010).

A apatita ocorre em todos os diques com exceção dos diabásios; é subédrica a euédrica e comumente associada à magnetita (Figura 2.8B).

A pirita e a calcopirita ocorrem somente nos diabásios. Seus cristais são anédricos e associados à titanomagnetita e aos minerais ferromagnesianos (Figura 2.8 D e 2.9 C).

A allanita ocorre somente nos riolitos; seus cristais são subédricos, normalmente zonados (Figura 2.9A) e associados aos ferromagnesianos e apatita.

O Zircão é comum nos diques de álcali-feldspato riolito e riolito. Seus cristais são subédricos a euédricos e moderadamente fraturados (Figura 2.9B).

A Barita está presente como finos cristais anédricos no dique de riolito (Figura 2.9D); sua presença pode ter contribuído para os teores elevados de Ba encontrados nesse litotipo. Teores elevados de Ba foram observados em outros diques félsicos do DRM.

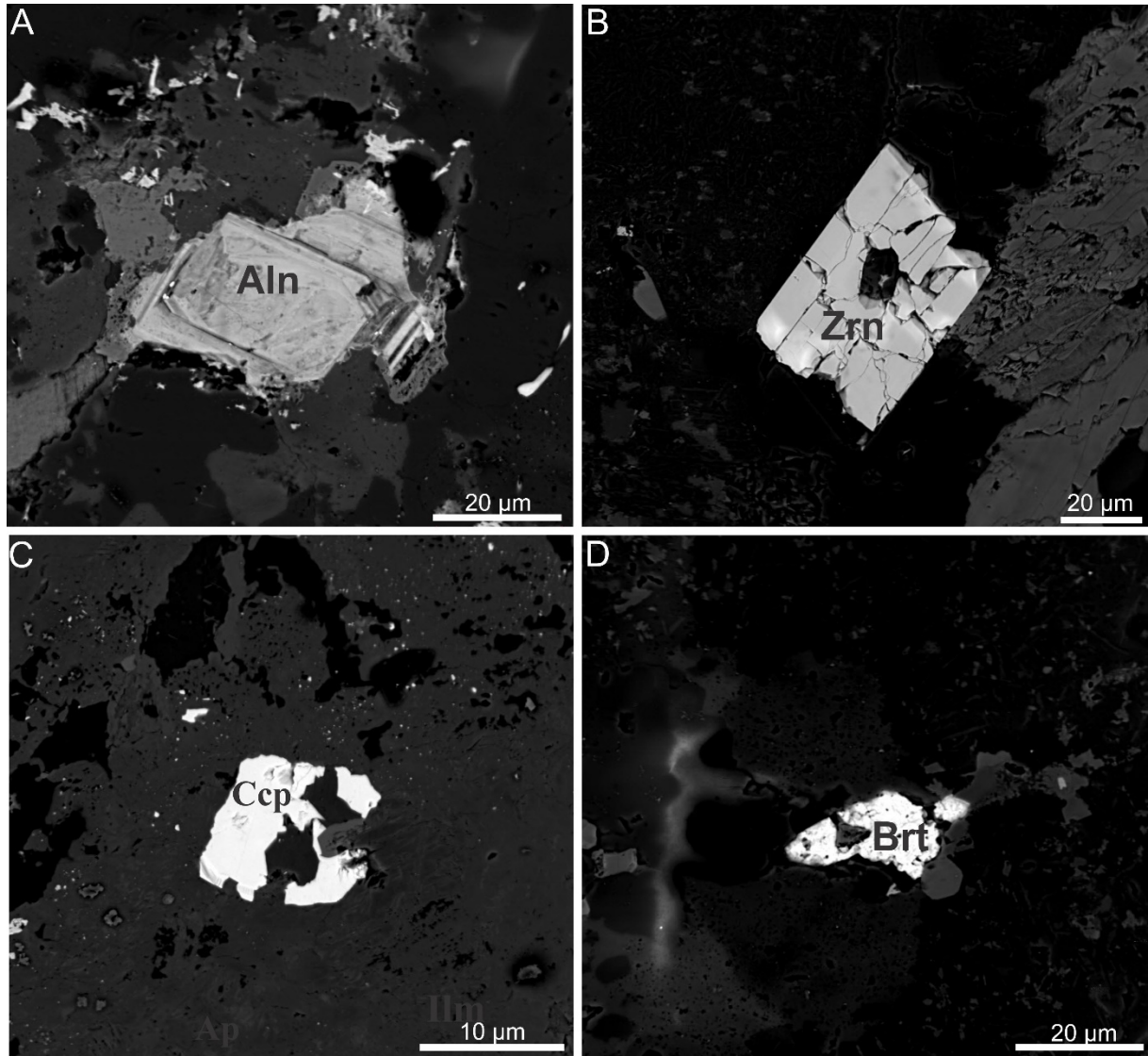


Figura 2.9 – Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por MEV. A - Cristal de allanita no riolito; B - Cristal de Zircão no riolito C - Cristal anédrico e corroído de calcopirita em diabásios; D - Cristal de barita identificado no riolito. Nomenclatura segundo Whitney e Evans (2010).

## GEOQUÍMICA

### PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS

As análises químicas foram realizadas no Laboratório ACME-Analytical Laboratories LTDA. Os elementos maiores e menores ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) foram analisados por ICP-ES (*Inductively Coupled Plasma – Emission Spectrometry*) e os elementos-traço (Rb, Sr, Ba, Ga, Y, Zr, Nb, U, Th, Cr, Ni, V), incluindo os

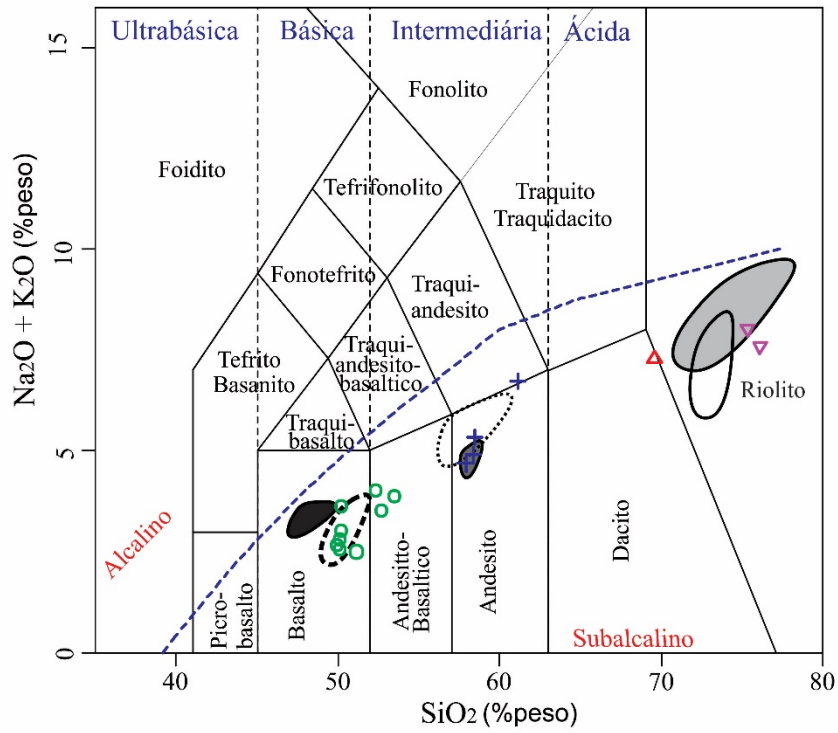
elementos terras raras (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy, Er, Yb e Lu), por ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry*), após fusão e dissolução. Medidas de perda ao fogo também foram realizadas no mesmo laboratório.

#### ELEMENTOS MAIORES E MENORES

O estudo geoquímico dos diques da região de Água Azul do Norte envolveu dezesseis amostras, sendo: nove amostras de diabásio, quatro de andesito, uma de riolito e duas de feldspato-alcálico riolito. Os dados analíticos são apresentados na Tabela 2.4 e se encontram dispostos segundo o conteúdo crescente de SiO<sub>2</sub>. A classificação e nomenclatura adotadas foram baseadas no diagrama de classificação de rochas vulcânicas TAS (Le Bas *et al.*, 1986; Le Maitre, 2002) que relaciona o total de álcalis (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) *versus* SiO<sub>2</sub>. A caracterização geoquímica desses diques seguiu os procedimentos indicados em Rolisson (1993). Diques de outras regiões do DRM (Silva Jr. *et al.*, 1999; Trabalho de Conclusão de Curso A. T. R. Ferreira, 2009) são plotados para comparação.

Com base no diagrama TAS (Figura 2.10A) foram individualizados os seguintes grupos litológicos, já previamente identificados na petrografia: basalto (ou diabásio), andesito e riolito. No diagrama triangular AFM (Irvine & Baragar, 1971), as amostras de diabásio e andesito plotam no campo da série toleítica. O comportamento destoante de duas amostras de diabásios (PCJ-15 e PCJ-19) e uma de andesitos (PCJ-18) refletem um relativo empobrecimento em FeO nessas rochas, deslocando-as para o campo calcialcalino (Figura 2.10B). Este comportamento pode indicar que os diabásios e andesitos possivelmente não representam uma série magmática calcialcalina típica.

A)



B)

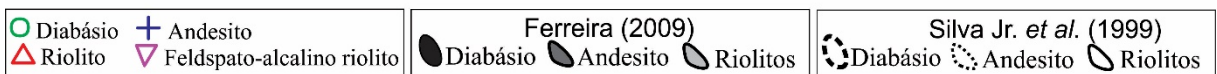
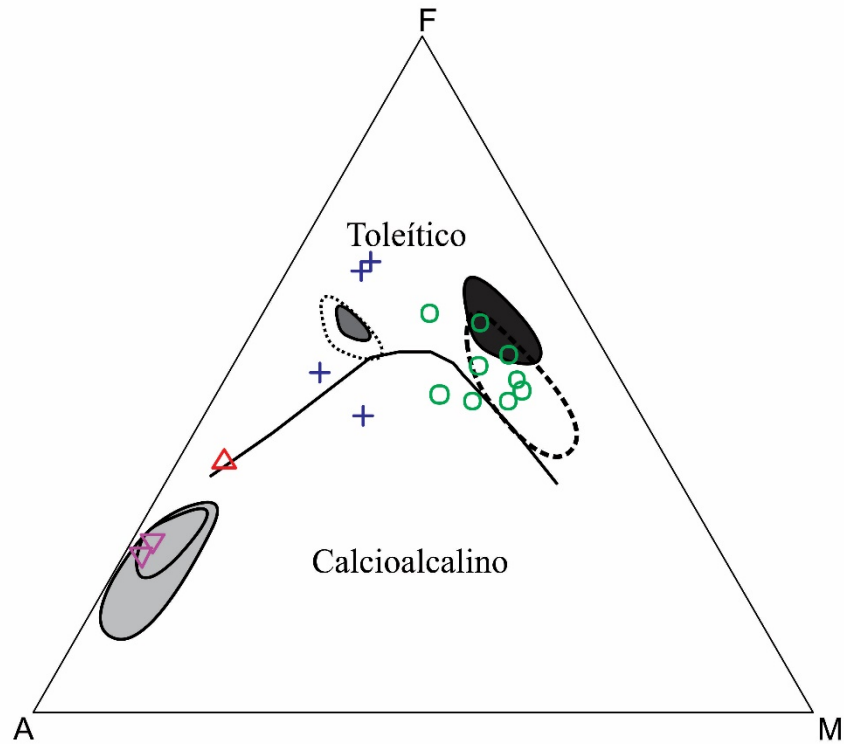


Figura 2.10 - Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição das amostras dos diques estudados. A- Diagrama TAS (Le Bas *et al.* 1986, Le Maitre 2002); B- Diagrama AFM (A=Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O; F=FeO\*; M=MgO); limite entre os campos toleítica e cálcico-alcálico segundo Irvine & Baragar (1971). Diques de outras regiões do DRM mostrados para comparação. Ferreira (2009) = região de Bannach; Silva Jr. *et al.* (1999) = região de Rio Maria.

Segundo o diagrama catiônico de Jensen (1976), fica evidente a maior afinidade dos andesitos, riolito e feldspato-alcálico riolitos com as rochas da série toleítica, ao mesmo tempo em que os diabásios não mostram um *trend* contínuo em uma única série (Figura 2.11A).

Quanto ao índice de saturação em alumina (Shand 1951), os diques da região de Água Azul do Norte mostram assinatura predominantemente metaluminosa, com apenas uma amostra de feldspato-alcálico riolito (MC-95b) apresentando razão  $A/CNK > 1$  e ocupando o campo fracamente peraluminoso (Figura 2.11B).

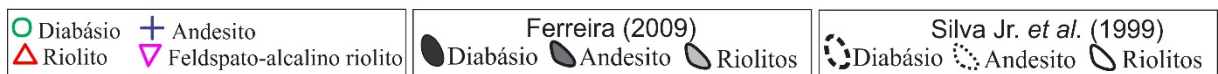
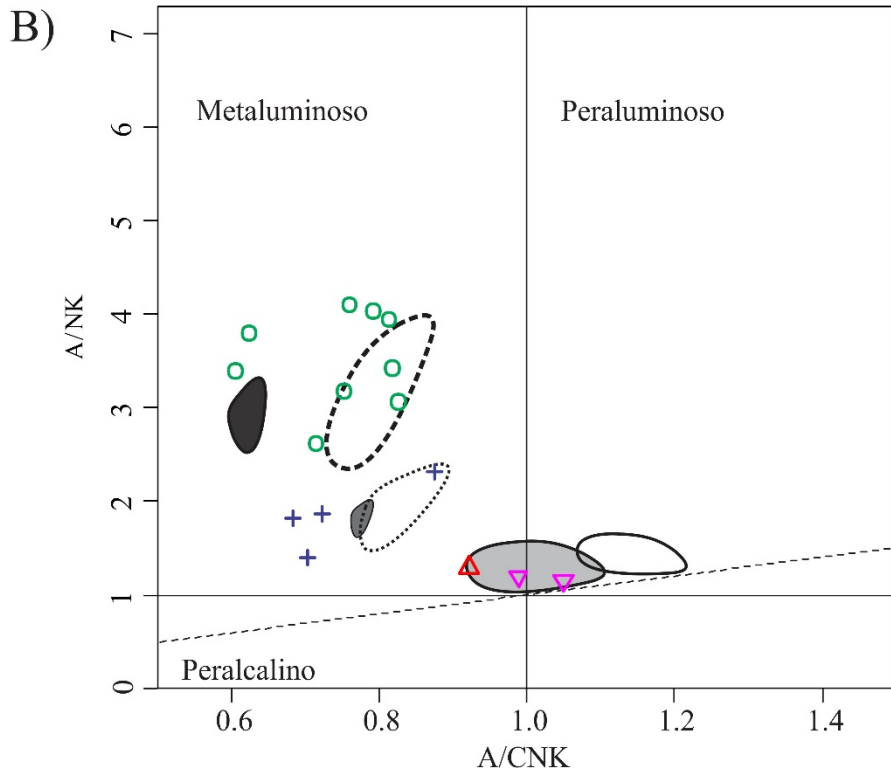
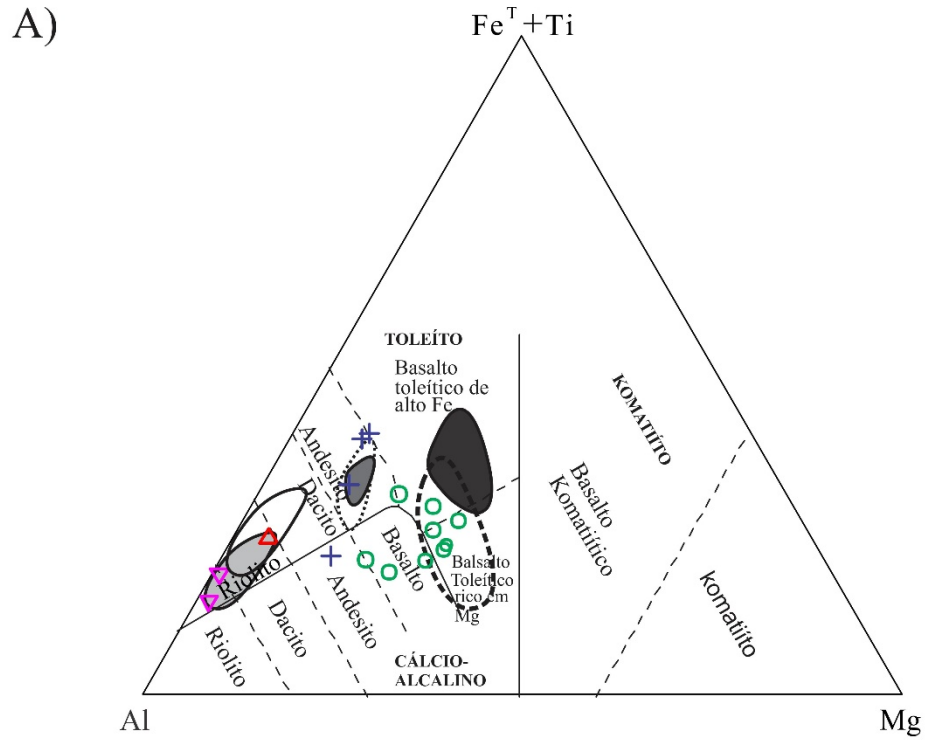


Figura 2.11 - Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição das amostras dos diques estudados. A-Diagrama catiônico de Jensen (1976); B- Diagrama  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  versus  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$  mol (Shand 1951). Diques de outras regiões do DRM mostrados para comparação. Ferreira (2009) = região de Bannach; Silva Jr. et al. (1999) = região de Rio Maria.

**Tabela 2.4 - Composições químicas dos diques da região de Água Azul do Norte, Província Carajás.**

Rochas Amostras	Diabásio									Andesito				Riolito	Feldspato-alcálico riolito	
	MC-58	MC-52b	MC-120	MC-118	MC-127	MC-101	MC-96	PCJ-15	PCJ-19	PCJ-12b	PCJ-11	PCJ-18	PCJ-34a	PCJ-24a	MC-95b	PCJ-34b
SiO <sub>2</sub>	48,68	49,03	49,21	49,28	49,32	50,2	51,26	51,42	52,55	56,57	57,16	57,62	60,10	69,11	75,13	75,16
TiO <sub>2</sub>	0,88	1,60	0,45	0,44	0,43	0,80	0,52	0,69	1,29	1,90	1,87	0,63	1,63	0,73	0,19	0,35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,86	14,68	16,47	17,76	17,02	14,3	18,07	18,59	14,72	12,32	12,59	16,86	12,65	12,83	11,74	11,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,61	13,91	11,46	10,27	11,21	12,7	9,17	9,08	13,79	15,39	14,69	7,50	10,21	5,50	2,91	3,07
MnO	0,18	0,22	0,17	0,15	0,16	0,2	0,13	0,12	0,16	0,16	0,17	0,09	0,09	0,09	0,04	0,03
MgO	6,69	5,88	7,76	7,28	7,80	7,1	5,72	4,68	4,27	2,01	1,87	3,01	2,06	0,70	0,13	0,20
CaO	8,86	10,85	9,75	9,57	9,50	10,6	9,28	9,09	8,28	6,20	5,85	6,57	4,93	2,35	0,37	1,01
Na <sub>2</sub> O	2,08	2,40	2,31	2,30	2,38	1,9	2,74	3,12	2,62	3,15	2,82	2,99	3,32	3,30	3,18	3,16
K <sub>2</sub> O	1,47	0,394	0,19	0,65	0,25	0,6	0,71	0,82	1,20	1,40	2,06	2,22	3,31	3,92	4,83	4,37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10	0,15	0,06	0,07	0,05	0,1	0,11	0,12	0,31	0,44	0,42	0,15	0,62	0,22	0,04	0,06
LOI	2,3	0,6	1,9	2,0	1,7	1,2	2,1	2,0	0,5	0,1	0,1	2,2	0,8	0,90	1,3	0,7
Total	99,7	99,7	99,7	99,8	99,8	99,7	99,8	99,7	99,7	99,6	99,6	99,8	99,7	99,7	99,9	99,7
Traços (ppm)																
Rb	111,0	11,0	10,0	41,0	11,0	18,0	13,0	24,0	24,0	43	124	28	113	122	183	129
Ba	258	104	114	158	134	164	451	272	631	1414	369	736	1402	1779	210	1233
Sr	331	222	220	222	178	182	431	376	392	409	367	993	370	249	74	174
Zr	50	25	29	39	102	60	71	56	149	280	168	300	230	358	415	369
Nb	1	1	1	2	5	3	3	2	6	12	6	12	11	14	26	13
Ni	75	115	103	111	66	118	44	82	48	<20	45	<20	<20	<20	<20	<20
Zn	49	16	26	41	61	34	60	42	36	91	59	59	29	93	31	43
Y	20	15	16	15	35	22	16	17	26	42	16	41	34	39	60	35



**Tabela 2.4 - Composições químicas dos diques da região de Água Azul do Norte, Província Carajás.**

	ETR (ppm)															
La	5,4	3,1	3,6	6,7	10,3	6,5	13,7	10,2	27,4	21,5	54,8	53,0	47,5	68,6	107,3	64,3
Ce	11,1	5,8	7,7	13,2	24,0	14,7	27,5	21,7	57,9	45,7	111,5	109,4	97,5	133,4	248,6	134,8
Pr	1,49	0,77	0,94	1,61	3,25	1,85	3,0	2,5	6,52	5,25	12,46	12,0	11,02	14,25	23,97	14,93
Nd	6,4	3,9	4,4	6,6	14,8	7,5	11,2	9,1	24,9	20,0	49,2	47,3	40,2	50,1	83,1	51,8
Sm	1,91	1,13	1,27	1,43	3,92	2,22	2,43	2,10	4,54	3,68	8,16	8,46	7,47	8,98	14,56	8,54
Eu	0,87	0,48	0,57	0,50	1,40	0,69	0,90	0,71	1,50	0,99	2,35	2,28	2,21	1,97	0,37	0,94
Gd	2,98	1,60	2,04	1,89	5,30	2,86	2,82	2,27	4,62	3,43	7,92	8,27	7,29	7,40	11,96	6,63
Tb	0,60	0,39	0,44	0,41	1,08	0,61	0,53	0,44	0,86	0,53	1,38	1,35	1,21	1,35	2,10	1,19
Dy	3,47	2,18	2,93	2,51	6,26	3,94	2,96	2,77	4,62	2,97	7,36	7,25	6,26	7,25	10,84	6,26
Ho	0,78	0,62	0,67	0,61	1,50	0,92	0,67	0,53	0,94	0,62	1,78	1,63	1,34	1,59	2,52	1,32
Er	2,15	1,77	2,11	1,77	4,44	2,32	1,82	1,85	3,18	1,59	4,67	4,53	3,97	4,32	6,69	3,77
Tm	0,35	0,32	0,32	0,28	0,59	0,39	0,31	0,24	0,46	0,29	0,70	0,64	0,59	0,69	1,10	0,61
Yb	2,22	1,61	2,03	1,60	3,36	2,4	1,95	1,75	2,81	1,80	4,30	4,24	3,65	3,83	6,22	3,53
Lu	0,36	0,33	0,37	0,30	0,64	0,35	0,29	0,31	0,44	0,29	0,72	0,64	0,68	0,63	1,09	0,55
ΣETR	40,08	24	29,39	39,41	80,84	47,25	70,08	56,47	115,79	108,64	267,3	260,99	230,89	304,36	520,42	299,17
(La/Yb) <sub>N</sub>	1,64	2,07	1,20	2,82	1,30	1,80	3,93	4,74	6,57	8,59	8,77	8,43	8,05	12,08	11,63	12,28
Eu/Eu*	1,11	0,94	1,08	0,93	1,09	0,84	0,99	1,05	1,00	0,89	0,92	0,83	0,85	0,74	0,09	0,38
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0,23	0,22	0,24	0,24	0,25	0,18	0,30	0,34	0,32	0,51	0,48	0,46	0,67	1,40	8,60	3,13
A/CNK	0,75	0,79	0,76	0,81	0,61	0,62	0,82	0,82	0,71	0,88	0,68	0,72	0,70	0,92	1,05	0,99
A/NK	4,50	6,40	6,60	6,00	5,30	5,80	4,70	5,30	3,90	3,20	2,70	2,60	1,90	1,80	1,50	1,50
FeOt	11,26	12,42	10,23	9,17	10,01	11,34	8,18	8,10	12,31	13,75	13,12	6,70	9,12	4,92	2,60	2,74
Rb/Sr	0,34	0,05	0,05	0,18	0,06	0,10	0,03	0,06	0,06	0,11	0,34	0,03	0,30	0,49	2,48	0,75
Ba/Sr	0,78	0,47	0,52	0,71	0,75	0,90	1,05	0,72	1,61	3,46	1,01	0,74	3,79	7,16	2,86	7,11
Nb/Y	0,05	0,07	0,06	0,13	0,14	0,14	0,19	0,12	0,23	0,28	0,35	0,30	0,33	0,35	0,43	0,36
#mg	51,09	51,07	57,29	58,41	52,27	52,54	55,52	50,17	37,77	34,68	19,07	28,57	28,40	20,14	8,13	11,43

Legenda: razão molecular A/CNK=Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ (CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O); A/NK= Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O); LOI= *Loss on ignition* (perda ao fogo); Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> = ferro total calculado como ferro férrico; #mg = razão molecular Mg/ (Mg+Fe); FeOt = FeO+0,8995\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; razões Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ FeO = 0,2-basaltos; 0,35-andesitos; 0,5-riolitos, segundo Middlemost, 1989.



O conteúdo de  $\text{SiO}_2$  das amostras analisadas varia de 48,68 a 75,16 %. Entretanto, essa variação é pequena entre cada tipo litológico e as amostras tendem a se agrupar. Nos diabásios e andesitos a  $\text{SiO}_2$  varia de 48,68 a 52,55% e de 56,57 a 60,10%, respectivamente. No riolito e feldspato-alcálico riolitos varia de 69,0% a 75,5% (Tabela 2.4). As variações de  $\text{SiO}_2$ , bem como outros elementos maiores e traços, podem ser melhor visualizadas nos diagramas de Harker (Figura 2.12).  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{FeO}_t$  mostram *trends* decrescentes com o aumento de  $\text{SiO}_2$ , enquanto  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$  aumentam. O  $\text{P}_2\text{O}_5$  mostra um “trend” mais irregular.

Os diabásios apresentam os menores conteúdos de  $\text{SiO}_2$  e os mais altos de  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ , refletindo a composição mineralógica dessas rochas formadas predominantemente por plagioclásio e clinopiroxênio, além de minerais opacos (Tabela 2.3).

Os andesitos apresentam valores intermediários de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  quando comparados aos diabásios e riolitos, e são mais enriquecidos em  $\text{P}_2\text{O}_5$ , com exceção de uma amostra (Figura 2.12).

Nos riolitos  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{P}_2\text{O}_5$  exibem correlação negativa em relação a  $\text{SiO}_2$ , enquanto o  $\text{K}_2\text{O}$  apresenta correlação positiva. O  $\text{Na}_2\text{O}$  se mantém constante (Figura 2.12; Tabela 2.4).

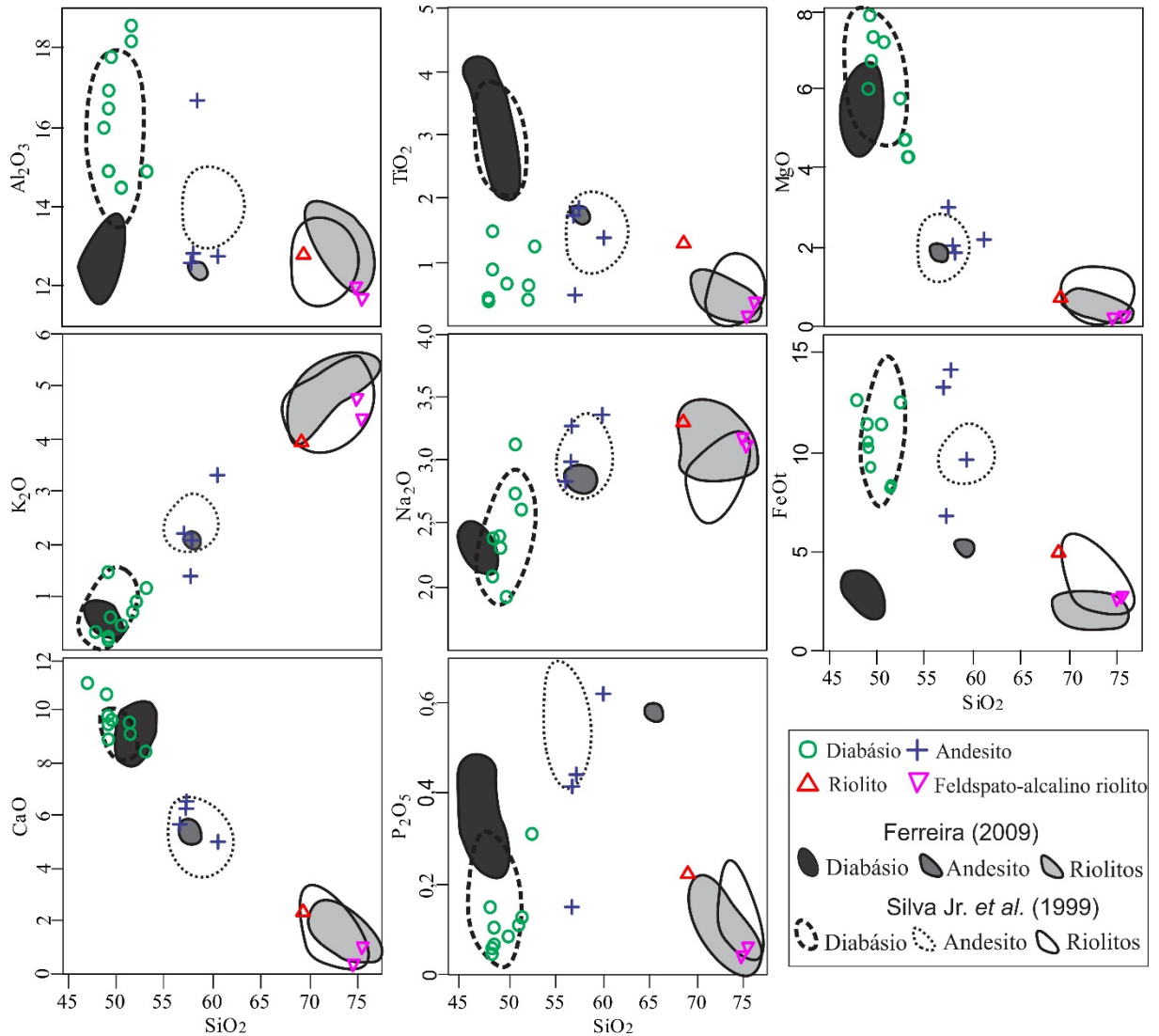


Figura 2.12 - Diagramas de Harker mostrando o comportamento dos elementos maiores em relação a  $\text{SiO}_2$  para os diques da região de Água Azul do Norte; valores em porcentagem de peso. Diques de outras regiões do DRM mostrados para comparação. Ferreira (2009) = região de Bannach; Silva Jr. *et al.* (1999) = região de Rio Maria.

## ELEMENTOS TRAÇO

Com o objetivo de melhor compreender os processos de diferenciação magmática que atuaram nos diferentes diques de Água Azul do Norte, foi realizado um estudo do comportamento dos elementos traço Rb, Ba, Sr, Nb, Zr e Y (Tabela 2.4) em relação à  $\text{SiO}_2$  (Figura 2.13).

Rb, Ba, Zr, Nb e Y tendem a se enriquecer com o aumento da sílica. Rb e Zn mostram que são fases do líquido e não fracionam enquanto o Sr varia pouco e mostra *trend* subhorizontal neste mesmo sentido, o que indicaria um fracionamento de plagioclásio a partir dos andesitos. Os diabásios mostram teores muito próximos nesses elementos, sugerindo comportamento comum às diferentes amostras, e tendem a se agrupar nos diagramas

geoquímicos. A exceção fica por conta do Ni, que mostra intervalo composicional nessas rochas, com teores de 44ppm a 118 ppm (Tabela 2.4).

Os andesitos mostram, de modo geral, conteúdos intermediários de elementos traço entre os diabásios e o riolito e uma grande variação nos teores de Ba (369-1414 ppm), similar a dos feldspato-alcálico riolitos (210-1233 ppm).

O grupo dos riolitos apresenta baixa dispersão dos elementos traços analisados, com exceção do Ba que mostra comportamento destoante (210-1779 ppm). Tal dispersão pode indicar o fracionamento da biotita. Os diques com alto teor de Ba, PCJ-24a (1779 ppm) e PCJ-34b (1233 ppm) indicam que a biotita não foi uma fase fracionante, não apresentam biotita no resíduo. Já o dique com baixo Ba, MC-95 (210ppm), mostra biotita no resíduo. O alto teor de Ba, pode também, ser resultado de um evento pós-magmático, por se tratar de um elemento móvel, nesses diques tem-se a presença de barita.

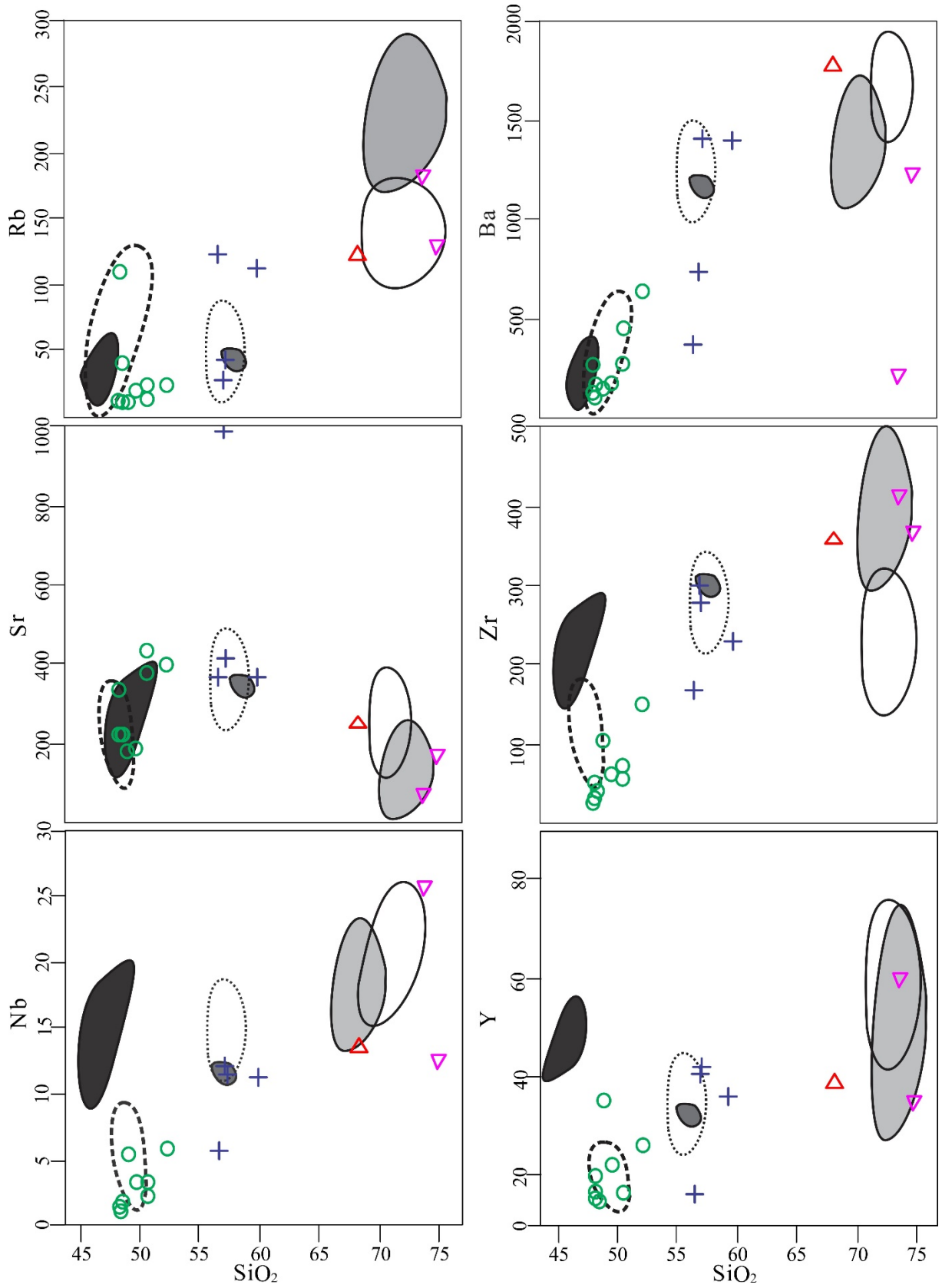


Figura 2.13 - Diagramas de Harker para os diques da região de Água Azul do Norte mostrando o comportamento dos elementos traços (ppm) em relação à SiO<sub>2</sub> (percentagem de peso). Legenda como na Figura 2.12.

Diagramas geoquímicos de variações e de razões entre elementos traços e  $\text{SiO}_2$  são mostrados na Figura 2.14. O diagrama  $A/\text{CNK}$  versus  $\text{SiO}_2$  apresenta *trend* positivo enquanto que o diagrama  $\# \text{mg}$  versus  $\text{SiO}_2$  é negativo com o aumento da sílica. Os diagramas  $\text{Rb}/\text{Sr}$  versus  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Ba}/\text{Sr}$  versus  $\text{SiO}_2$  mostram *trends* positivos. Como já observado em outros diagramas geoquímicos, a pequena variação de  $\text{SiO}_2$ , associada aos *gaps* composicionais separando os diferentes litotipos, sugere que os diques de Água Azul do Norte não evoluíram por processos de cristalização fracionada a partir de um mesmo magma parental.

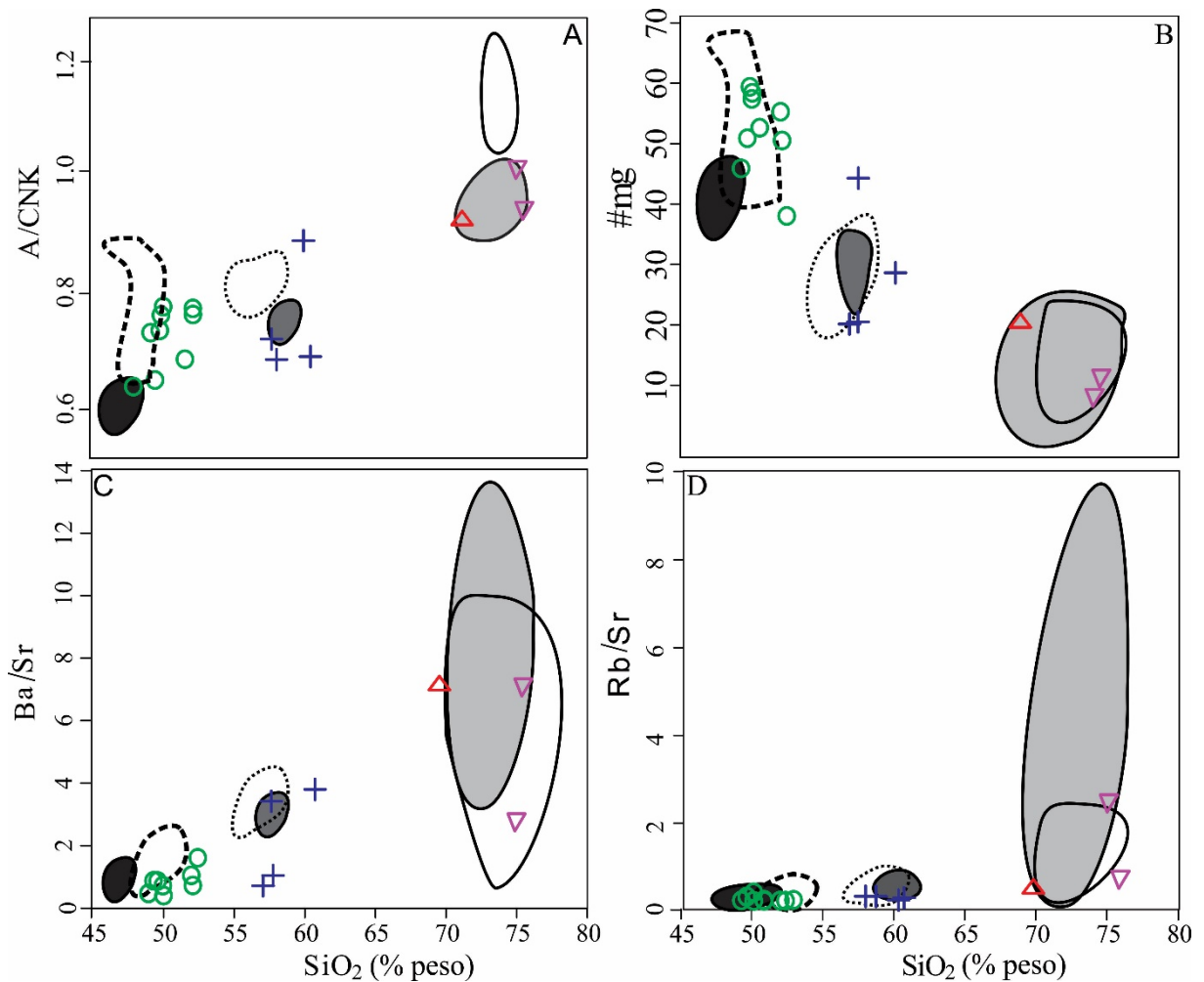


Figura 2.14 - Diagramas geoquímicos de variações A -  $A/\text{CNK}$  versus  $\text{SiO}_2$ ; B -  $\# \text{mg}$  versus  $\text{SiO}_2$ ; e razões de elementos traços. C -  $\text{Ba}/\text{Sr}$  versus  $\text{SiO}_2$ ; D -  $\text{Rb}/\text{Sr}$  versus  $\text{SiO}_2$ . Legenda como na Figura 2.12.

## ELEMENTOS TERRAS RARAS

A Tabela 2.4 apresenta os dados analíticos normalizados segundo Boynton (1984) e as principais razões dos elementos terras raras (ETR) de cada tipo litológico.

O grupo dos diabásios apresenta uma disposição subhorizontal dos ETR com leve fracionamento e enriquecimento dos ETR leves (ETRL) em relação aos ETR pesados (ETRP), razões  $(La/Yb)_N$  entre 1,20 e 6,57;  $(Gd/Yb)_N$  entre 0,80 e 1,32 e anomalias de európio pouco acentuadas e levemente negativas ( $Eu/Eu^*$  entre 0,84 e 1,11).

Os andesitos apresentam fracionamento dos ETR mais acentuado que nos diabásios e um maior enriquecimento dos ETRL em relação aos ETRP, com razões  $(La/Yb)_N$  entre 8,33 e 8,68;  $(Gd/Yb)_N$  entre 1,48 e 1,62 e fraca anomalia negativa de európio ( $Eu/Eu^*$ ) de 0,83 a 0,92.

O riolito apresenta razões  $(La/Yb)_N$  de 12,94,  $(Gd/Yb)_N$  de 1,55, indicando fracionamento moderado de ETR, e anomalia negativa de európio moderada ( $Eu/Eu^*=0,74$ ). Os feldspato-alcálico riolitos apresentam razões  $(La/Yb)_N$  entre 11,63 e 12,28 e  $(Gd/Yb)_N$  entre 1,52 e 1,55, portanto com um maior fracionamento dos ETR e enriquecimento dos ETRL em relação aos ETRP e anomalias negativas de európio fortemente pronunciadas ( $Eu/Eu^*$  entre 0,09 e 0,38).

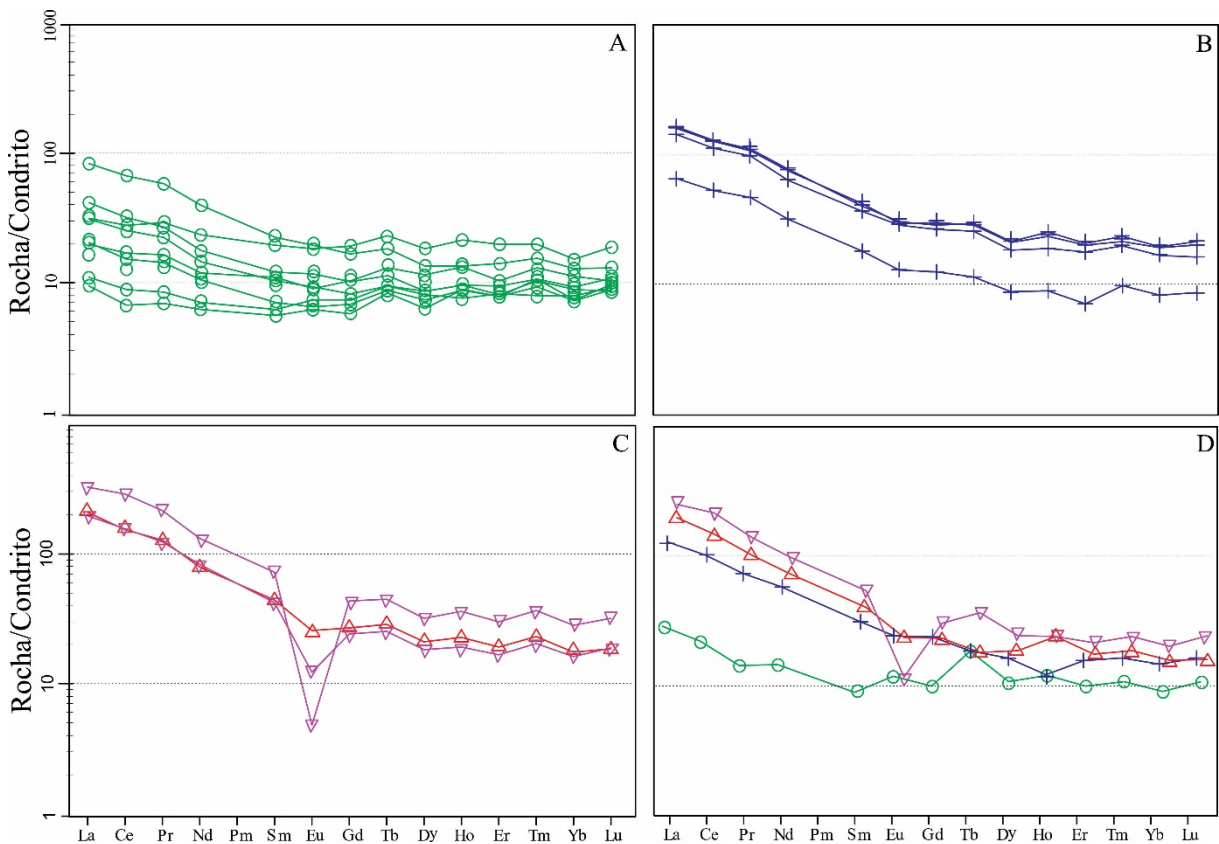


Figura 2.15 - Padrões de ETR para os diques da região de Água Azul do Norte normalizados segundo Boynton (1984). A- diabásio, B- andesito, C- riolito e feldspato-alcálico riolito, D- média dos litotipos deste estudo.

## ESTUDO COMPARATIVO COM OUTROS DIQUES DO DRM

Os diques de Água Azul do Norte foram comparados geoquimicamente com outros diques ocorrentes nas regiões de Rio Maria (Silva Jr. *et al.*, 1999) e Bannach (Trabalho de Conclusão de Curso de A. T. R. Ferreira, 2009), ambas pertencentes ao DRM.

No diagrama TAS (Le Bas *et al.*, 1986) predominam os mesmos litotipos distribuídos nos campos dos basaltos, andesitos basálticos, andesitos e riolitos (Fig. 2.10 A). Os diagramas AFM (Irvine & Baragar, 1971) e catiônico (Jensen, 1976) confirmam o caráter toleítico dos diques de Água Azul do Norte e aqueles das regiões de Rio Maria e Bannach (Fig. 2.10 B e 2.11A).

A mesma similaridade é observada no diagrama de Shand (1951) que indica o grau de aluminosidade de rochas ígneas (Fig. 2.11 B). Os diques do DRM são predominantemente metaluminosos a fracamente peraluminosos, com os diques de riolito da região de Rio Maria apresentando caráter mais peraluminoso.

Nos diagramas de Harker (Figura 2.12), os diques do DRM mostram valores similares de MgO, Ca<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O e tendem a se sobrepor. Apesar de não apresentar similaridade igual a dos óxidos anteriores, o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> mostra boa correspondência entre os diques do DRM, com exceção dos andesitos de Água Azul do Norte que mostram conteúdos mais variados. Por outro lado, os diabásios de Água Azul do Norte e Rio Maria são mais enriquecidos em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO<sub>t</sub> quando comparados aos diabásios da região de Bannach. Porém, os de Água Azul são os mais empobrecidos em TiO<sub>2</sub> (TiO<sub>2</sub> < 2%).

De modo geral, Rb, Ba e Sr mostram boa correlação entre os diques (Figura 2.13 C e D), com exceção da maior variação de Ba nos andesitos e feldspato-alcálico riolito de Água Azul do Norte. As razões Rb/Sr, Ba/Sr reforçam as semelhanças entre os diques do DRM. O diagrama envolvendo #mg *versus* SiO<sub>2</sub> (Figura 2.13B) apresenta uma forte correlação negativa e mantém os *gaps* composicionais entre os litotipos, enquanto o diagrama A/CNK *versus* SiO<sub>2</sub> (Figura 2.13A) exibe uma correlação positiva.

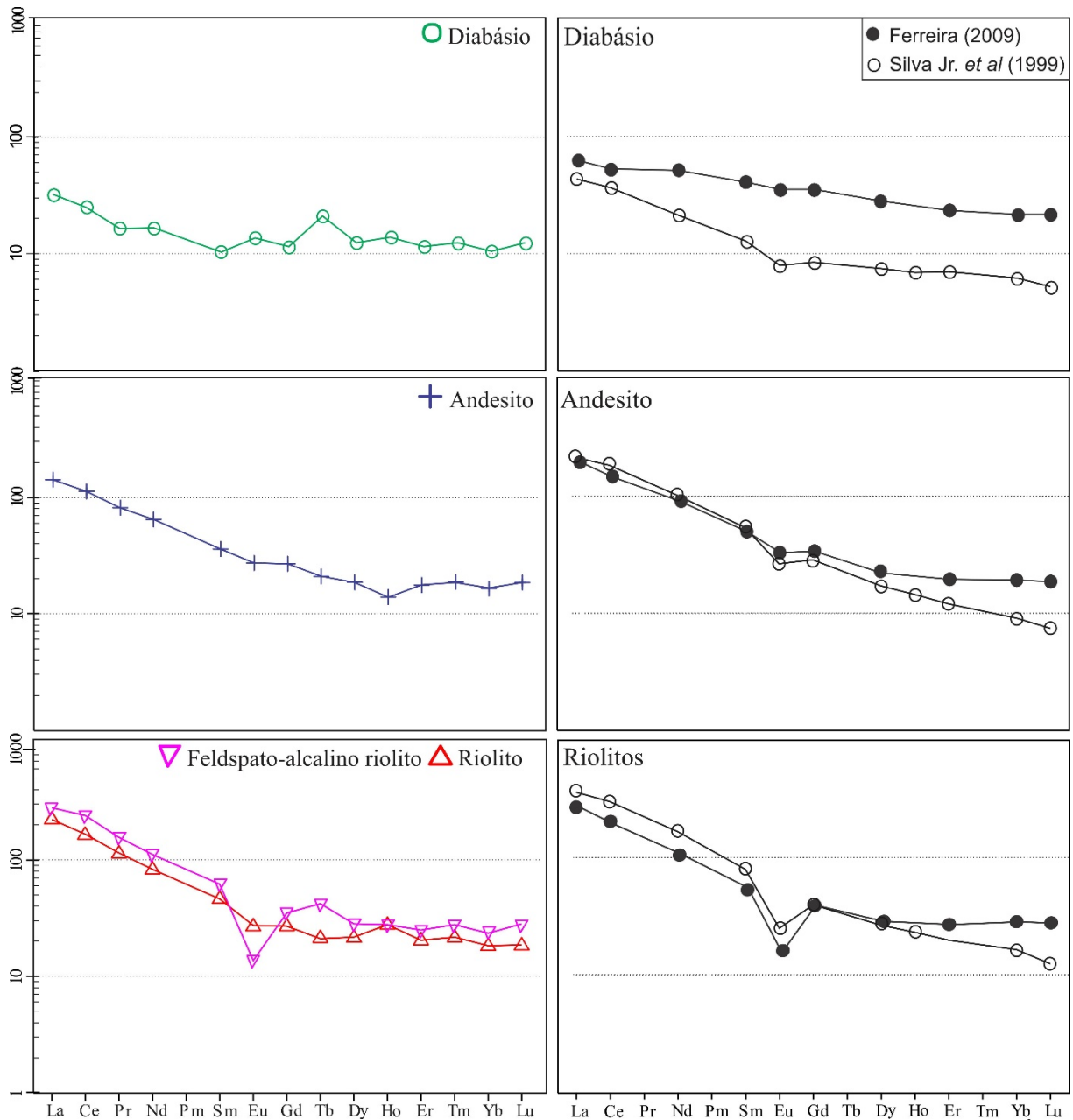


Figura 2.16 - Diagramas comparativos mostrando a média dos padrões de ETR dos diques da região de Água Azul do Norte (este estudo), Rio Maria (Silva Jr. *et al.*, 1999) e Bannach (Ferreira, 2009).

A Figura 2.16 compara os padrões de fracionamento para composições médias de ETR dos diques do DRM. Os diabásios de Água Azul do Norte são mais empobrecidos em ETR ( $\Sigma\text{ETR}=58,69$ ) que os diabásios de Rio Maria ( $\Sigma\text{ETR}=66,68$ ) e de Bannach ( $\Sigma\text{ETR}=131,9$ ). Entretanto, os dados de Água Azul do Norte mostram padrão de fracionamento subhorizontal similar ao dos diabásios de Bannach, com razão  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  média de 2,89 contra 2,88. Os diabásios de Rio Maria mostram fracionamento mais acentuado dos ETR, com razão  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  de 6,99. As anomalias de Eu para os diabásios de Água Azul do Norte são



inexistentes ( $Eu/Eu^*=1,0$ ) e pequenas ( $Eu/Eu^*=0,93-0,74$ ) para os diabásios de Bannach e Rio Maria.

Os diques de andesito são mais fracionados que os diabásios. Em Água Azul do Norte a razão  $(La/Yb)_N$  é de 8,46 e se aproxima daquela encontrada nos andesitos de Bannach (10,30), porém ambas são inferiores a dos andesitos de Rio Maria (23,54). As anomalias negativas de Eu são, neste mesmo sentido, de 0,87, 0,81 e 0,65.

Da mesma forma que nos andesitos, os padrões de fracionamento de ETR entre os diques de riolito de Água Azul do Norte e Bannach são muito próximos, com razões  $(La/Yb)_N$  de 12,08 e 11,44, respectivamente. Os diques de riolito de Rio Maria mostram padrão mais fracionado, com razão  $(La/Yb)_N$  de 21,99. As anomalias negativas de Eu são de 0,74 para o riolito e de 0,23 para os feldspato-alcálico riolitos de Água Azul do Norte. Os riolitos de Bannach mostram anomalia negativa de Eu de 0,36 e os de Rio Maria de 0,42.

## **GEOCROLOGIA**

### **PROCEDIMENTO ANALÍTICO**

A datação pelo método de evaporação-ionização de Pb em zircão (Kober, 1987; Gaudette *et al.*, 1998) foi realizada no Laboratório de Geologia Isotópica do IG da UFPA com auxílio de um espectrômetro de massa de ionização termal FINNIGAN MAT 262. Zircões de um feldspato-alcálico riolito (amostra MC-95b) situado ao sul da cidade de Água Azul do Norte foram selecionados para datação.

### **RESULTADOS**

A amostra MC-95b é representativa do dique de feldspato-alcálico riolito que secciona rochas arqueanas da Suíte Garantã (Santos *et al.*, 2013), encaixantes dos granitos anorôgenicos Seringa e São João. Para a análise geocronológica foram selecionados 20 cristais translúcidos moderadamente fraturados e sem evidências de metamitização. Desses, somente quatro (MC95/11, MC95/12, MC95/17 e MC95/19) emitiram chumbo suficiente para a análise isotópica, fornecendo razões  $^{204}Pb/^{206}Pb$  inferiores a 0,0004 e uma idade média de  $1874,7 \pm 3,0$  Ma, interpretada como idade de cristalização da rocha (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 - Resultados isotópicos obtidos pelo método de evaporação do Pb em monocristais de zircão do dique de feldspato-alcálico riolito (MC-95b) de Água Azul do Norte.

Zircão	Temp.	Razões	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2s	$(^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_c$	2s	$(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})_c$	2s	Idade	2s	
1403/4	#1450	0/6	0,001632	0,000014	0,16219	0,00186	0,08844	0,00027	1392,4	5,8	
	*1500	0/40	0,000311	0,000054	0,11816	0,00107	0,11111	0,00084	1817,9	13,7	
1403/11	#1450	0/6	0,001025	0,000020	0,16893	0,00161	0,10812	0,00056	1768,2	9,5	
	1500	32/32	0,000133	0,000024	0,15877	0,00058	0,11455	0,00048	1873,2	7,5	
1403/12	*1500	0/36	0,000144	0,000024	0,14630	0,00194	0,11357	0,00056	1857,6	8,8	
	1450	38/38	0,000159	0,000011	0,14915	0,00104	0,11456	0,00049	1873,3	7,7	
1403/13	#1450	0/8	0,003060	0,000010	0,23410	0,00272	0,09996	0,00036	1623,6	6,7	
	*1500	0/28	0,000195	0,000023	0,13750	0,00828	0,11428	0,00018	1868,9	2,9	
1403/17	*1450	0/34	0,000175	0,000045	0,13453	0,00903	0,11302	0,00034	1848,8	5,4	
	1500	32/32	0,000172	0,000002	0,13082	0,00034	0,11468	0,00043	1875,1	6,8	
1403/19	*1450	0/30	0,000175	0,000005	0,15684	0,00093	0,11360	0,00034	1858,1	5,4	
	1500	20/20	0,000139	0,000021	0,15854	0,00040	0,11470	0,00027	1875,5	4,3	
<b>122/310</b>									<b>Idade Média = 1874,7</b>		<b>3,0</b>

Legenda: (c) razão  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  corrigida do Pb comum; (\*) etapa de evaporação eliminada subjetivamente; (#) etapa de evaporação eliminada por apresentar razão  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  superior a 0,0004.

## DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

### ASPECTOS PETROGRÁFICOS E GEOQUÍMICOS

Em termos petrográficos os diques de Água Azul do Norte são formados por rochas máficas a félsicas, com uma larga variedade textural e composicional. Os diabásios são rochas faneríticas e/ou porfíricas, composta essencialmente por plagioclásio, piroxênio e anfibólio. A presença de magnetita e titanomagnetita como principais minerais acessórios reflete os altos teores de Fe nesses diques. Os andesitos em geral são porfíricos, compostos essencialmente por plagioclásio, anfibólio, quartzo e raramente feldspato-alcálico. Assim como nos diabásios, magnetita e titanomagnetita são os principais minerais acessórios. Entretanto, a presença de apatita nos andesitos é mais frequente. Riolito e feldspato-alcálico riolito são rochas porfíricas, compostas essencialmente por feldspato-alcálico, quartzo e plagioclásio, tendo magnetita e ilmenita como principais minerais acessórios. Texturas granofírica e esferulítica são comuns nesses diques. Os altos valores de Ba nos diques félsicos podem ser explicados pela presença de barita como mineral acessório.

Em termos geoquímicos os diques de Água Azul do Norte são essencialmente toleíticos e metaluminosos, com os feldspato-alcálicos riolitos mostrando comportamento levemente peraluminoso. A presença de lacunas composicionais entre os litotipos nos diagramas geoquímicos, associada à pequena variação de sílica, sugere que a cristalização fracionada a partir de um mesmo magma não foi o processo dominante na origem desses

diques. O magmatismo máfico, representado pelos diques de diabásio, não evoluiu para formar os de andesito. A análise dos diagramas geoquímicos mostra que somente os diques de riolito e feldspato-alcálico riolito poderiam ter evoluído por este processo. Tais diques provavelmente tiveram sua origem associada aos granitos anorogênicos do DRM, uma vez que os dados geocronológicos de ambos reforçam essa hipótese. A hipótese de mistura de magmas heterogêneos para a origem dos diques de Água Azul do Norte fica enfraquecida pela ausência de evidências petrográficas como a presença de enclaves, texturas de desequilíbrio e de resfriamento rápido.

### GEOCROLOGIA DOS DIQUES DO DRM

As idades geocronológicas dos diques félsicos do DRM obtidas por evaporação de Pb em zircão situam-se entre  $1874 \pm 2$  (este estudo) e  $1887 \pm 2$  Ma e são similares àquelas dos granitos anorogênicos Jamon ( $1885 \pm 32$  Ma) e Seringa ( $1893 \pm 15$  Ma), obtidas pela mesma metodologia, e Musa ( $1883 \pm 5$  Ma) obtida por U-Pb em zircão, todos pertencentes à Suíte Jamon (Dall’Agnol *et al.*, 2005). Tais idades confirmam o sincronismo entre esse magmatismo de aproximadamente 1,88 Ga do DRM. Diques máficos de Rio Maria (Silva Jr., 1996) e intermediários da Província Carajás (Rivalenti *et al.*, 1998) foram datados tentativamente por K-Ar e Rb-Sr em rocha total, respectivamente, fornecendo idades de  $1802 \pm 22$  Ma e  $1874 \pm 110$  Ma, indicando que tais rochas necessitam ser datadas por metodologias mais precisas para se chegar a idades confiáveis e com erros menores. Essa ausência de dados geocronológicos para os diques máficos indicam que sua origem pode estar relacionado a diferentes períodos. Marangoanha & Oliveira (2014) sugere que a geração dos diques máficos podem estar relacionados a pelo menos três episódios de distensão crustal já relatados na Província Carajás. O primeiro estaria ligado a formação de granitos tipo A e diques paleoproterozoicos do Domínio Rio Maria (1,88 Ga; Dall’Agnol *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2008). O segundo à amalgamação da Amazônia Oriental e África Ocidental (Gondwana) entre 540 e 520 Ma, e por fim à abertura do Oceano Atlântico há 200 Ma.

### SIMILARIDADES COM OUTROS DIQUES DO DRM

Os diques de Água Azul do Norte mostram grandes similaridades petrográficas, geoquímicas e geocronológicas com outras ocorrências já estudadas no DRM. Em todos os grupos, os conteúdos de MgO, CaO, K<sub>2</sub>O e Na<sub>2</sub>O mostram composições similares e tendem a se sobrepor Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO<sub>t</sub> são mais elevados nos diabásios de Água Azul do Norte e Rio Maria, porém os diabásios de Água Azul do Norte são mais empobrecidos em P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e TiO<sub>2</sub>. Esta similaridade também é observada para Rb, Ba e Sr e para as razões Rb/Sr e Ba/Sr. Os

andesitos do DRM mostram maior dispersão com relação aos conteúdos de  $P_2O_5$ , FeOt e Ba. Riólitos e feldspato-alcálico riólitos mostram boa correlação em quase todos os elementos e tendem a se superpor nos diagramas geoquímicos, com exceção dos conteúdos mais elevados de Rb e mais baixos de Zr dos riólitos das regiões de Bannach e Rio Maria, respectivamente.

Em termos de ETR, os diabásios de Água Azul do Norte são mais enriquecidos em ETRP que os de Rio Maria, porém são mais empobrecidos em ETR que os de Bannach. Os diques de andesito possuem comportamento bem semelhante no DRM, com maior fracionamento daqueles da região de Rio Maria. Riólito e feldspato-alcálico riólitos mostram padrões de fracionamento similares. Porém, assim como nos andesitos, o fracionamento dos ETR é maior nos diques de Rio Maria. As anomalias negativas de Eu são mais levemente acentuadas nos feldspato-alcálico riólitos de Água Azul do Norte.

Rivalenti *et al.* (1998) realizaram estudos geoquímicos em diques em uma ampla área da Província Carajás, a qual engloba atualmente os Domínios Carajás e Rio Maria (Vasquez *et al.*, 2008), identificando três grandes grupos: diabásios, andesitos e riólitos. Para os diques máficos foram distinguidos dois tipos: diques basálticos com alto Ti ( $TiO_2 > 2\%$ ) e com baixo Ti ( $TiO_2 < 2\%$ ). Os diques de baixo Ti, toleíticos e enriquecidos em  $Al_2O_3$ , teriam sua origem associada a fontes mantélicas metassomatizadas, com assinatura N-MORB, e fusão de eclogito (Rivalenti *et al.*, 1998). Neste sentido, os diques máficos da região de Água Azul do Norte se enquadrariam na categoria de baixo Ti, sugerindo uma origem comum ou semelhante à dos diques máficos da parte norte da Província Carajás.

Apesar das similaridades observadas entre os diques do DRM, é importante destacar a diferença existente com relação ao conteúdo de  $TiO_2$ , os diques de Água Azul do Norte possuem conteúdos de  $TiO_2 < 2\%$  e são classificados como de baixo Ti, enquanto os das regiões de Rio Maria (Silva Jr. *et al.*, 1999) e Bannach (Trabalho de Conclusão de Curso de A. T. R. Ferreira, 2009) apresentam teores de  $TiO_2$  superiores a 2% e se enquadram na categoria de alto Ti, segundo Rivalenti *et al.* (1998). Essas diferenças podem indicar que a geração dos diques máficos do DRM estariam ligados a diferentes períodos da Província Carajás.

Os dados geoquímicos dos diques do DRM, incluindo a ocorrência frequente de *gaps* composicionais entre os litotipos e a pequena variação de sílica entre cada grupo, afastam a possibilidade de os mesmos terem evoluído a partir de um mesmo magma por processo de cristalização fracionada.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Geociências (IG-UFPA) pelo suporte técnico e laboratorial, a Capes pela concessão de bolsa de mestrado ao primeiro autor, aos pesquisadores e alunos do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) pelo apoio nas diversas etapas deste trabalho. Este trabalho é uma contribuição para o INCT de Geociências da Amazônia (CNPq/MCT/FAPESPA – Processo nº 573733/2008-2) e ao convênio Vale/Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa (FAPESPA) edital 01/2010, ICAAF: 053/2011.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL & D. C. OLIVEIRA, 2006. Geologia, petrografia e geoquímica do granito anorogênico Bannach, Terreno granito-greenstone de Rio Maria, Pará. **Revista Brasileira de Geociências** 36(2): 282-295.

ALMEIDA, J. A. C., M. A. OLIVEIRA, R. DALL'AGNOL, F. J. ALTHOFF & R. M. K. BORGES, 2008. **Relatório de mapeamento geológico na escala 1:100.000 da Folha Marajoara (SB-22-Z-C-V)**: 1-147. Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL, M. A. OLIVEIRA, M. J. B. MACAMBIRA, M. M. PIMENTEL, O. T. RÄMÖ, F. V. GUIMARÃES & A. A. S. LEITE, 2011. Zircon geochronology, geochemistry and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for growth of Archean crust of the Carajás province, Brazil. **Precambrian Research** 187(1-2): 201-221.

ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL & A. A. S. LEITE, 2013. Geochemistry and zircon geochronology of the Archean granite suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane, Carajás Province, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences** 42: 103-126.

ALTHOFF, F. J., P. BARBEY & A. M. BOULLIER, 2000. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). **Precambrian Research** 104(3-4): 187-206.

ARAÚJO, O. J. B., E. M. B. MACAMBIRA, A. G. VALE, J. R. OLIVEIRA, 1994. Primeira integração das investigações Geológicas do Programa Grande Carajás na região SSE do Estado do Pará. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 4. Belém. **Boletim de Resumos Expandidos**. Belém: SBG, p. 299-301.

BOYNTON, W. V. (1984). Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: **Rare earth element geochemistry**. Henderson, P. (Editors), Elsevier., Amsterdam. 63-114.

DALL'AGNOL R., H. T. COSTI, A. A. S. LEITE, 1997. Rapakivi granites from Brazil and adjacent countries. In: intern. Symp. on gran. and associated mineralizations. Superintendência de geologia e recursos minerais-sgm, **2**. Salvador. **Extended Abstract and Program**. Salvador, 1997. p. 185.

DALL'AGNOL R.; D. C. OLIVEIRA, M.J.B. MACAMBIRA, C. N. LAMARÃO, 2002. Diques proterozoicos do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria: a descoberta de diques compostos e novos dados geocronológicos. **Boletim de resumos do Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados**. Belém-PA, p. 13.

DALL'AGNOL, R., N. P. TEIXEIRA, O. T. RĂMÖ, C. A. V. MOURA, M. J. B. MACAMBIRA & D. C. OLIVEIRA, 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic, rapakivi, A-type granites of the Archean Carajás metallogenic province, Brazil. **Lithos** 80: 101-129.

FEIO, G. R. L., R. DALL'AGNOL, E. L. DANTAS, M. J. B. MACAMBIRA, J. O. S. SANTOS, F. J. ALTHOFF & J. E. B. SOARES, 2013. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Research** 227: 157-185.

FERREIRA, A. T. R. 2009. **Petrografia, geoquímica e geocronologia dos diques da área de Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do Pará**. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, 2009. 55p.

GASTAL, M. C. P. 1987. **Petrologia do Maciço Granítico Musa, Sudeste do Pará**. 1987. 316 f. Dissertação (mestrado em petrologia e geoquímica) - Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Belém.

GAUDETTE, H. E., J. M. LAFON, M. J. B. MACAMBIRA, C. A. V. MOURA, T. SCHELLER, Comparison of single filament Pb evaporation/ionization zircon ages with conventional U-Pb results: examples from the Precambrian of Brazil. **J. South. Amer. Earth Sci**, v. 11: 351-363.1998.

- GUIMARÃES, F. V., R. DALL'AGNOL, J. A. C. ALMEIDA & M. A. OLIVEIRA, 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica do Trondhjemitó Mogno e Tonalito Mariazinha, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do Pará. **Revista Brasileira de Geociências** 40(2): 196-211.
- HUHN, S. R. B., A. B. S. SANTOS, A. F. AMARAL, E. J. LEDSHAM, J. L. GOUVEIA, L. B. P. MARTINS, R. M. G. MONTALVÃO & V. G. COSTA, 1988. O terreno granito-greenstone da região de Rio Maria – Sul do Pará. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 35(3): 1438-1453.
- IRVINE, T. N. & W. R. A. BARAGAR, 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. **Canadian Journal of Earth Sciences** 8(5): 523-548.
- KOBER, B., 1986 Whole-grain evaporation for  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -age investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source. **Contributions to Mineralogy and Petrology**. 93(4): 482-490.
- JENSEN, L.S. 1976. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. **Ont. Div. Mines, Misc. Pap.**, 66, 21p.
- LE BAS, M. J., R. W. LE MAITRE, A. STRECKEIZEN, B. ZANETTIN 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. **Journal of Petrology**. Oxford. 27, p.745-750. (Basaltic trachyandesites).
- LE MAITRE, R. W. (Ed.), 2002. **Igneous rocks: a classification and glossary of terms**: 1-193. Cambridge University Press, London.
- LEITE, A. A. S., R. DALL'AGNOL, M. J. B. MACAMBIRA & F. J. ALTHOFF, 2004. Geologia e geocronologia dos granitoides arqueanos da região de Xinguara-PA e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. **Revista Brasileira de Geociências** 34(4): 447-458.
- LIMA, P. H. A., C. N. LAMARÃO, M. J. P. SANTOS, 2014. Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do Granito Paleoproterozoico São João, sudeste do Cráton Amazônico, Província Carajás. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 9(1): 47-72.



- MARANGOANHA, B. & D. C. OLIVEIRA, 2014. Diabásios e anfibólitos da área de Nova Canadá: natureza e implicações tectônicas para a Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* 9(3): 565-596.
- MIDDLEMOST, E.A.K., 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. *Chem. Geol.*, 77: 19-26.
- OLIVEIRA, M. A., R. DALL'AGNOL & F. J. ALTHOFF, 2006. Petrografia e geoquímica do Granodiorito Rio Maria da região de Bannach e comparações com as demais ocorrências no terreno Granito-Greenstone de Rio Maria – Pará. *Revista Brasileira de Geociências* 36(2): 313-326.
- OLIVEIRA, M. A., R. DALL'AGNOL, F. J. ALTHOFF & A. A. S. LEITE, 2009. Mesoarchean sanukitoide rocks of the Rio Maria Granite- Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 27: 146-160.
- PIMENTEL, M. M. & N. MACHADO, 1994. Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. *Boletim de Resumos Expandidos do Congresso Brasileiro de Geologia* 38(2): 390-391.
- RIVALENTI G., M. MAZZUCHELLI, V. A. V. GIRARDI, G. CAVAZZINI, C. FINATTI, M. A. BARBIERI, W. TEIXEIRA, 1998. Petrogenesis of the Paleoproterozoic basaltic-andesite-rhyolite dyke association in the Carajás region, Amazonian craton. *Lithos* v. 43, p. 235-265.
- ROLLINSON, H. R. 1993. **Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, and Interpretation**. New York, Longman, 352 p.
- SANTOS, J. O. S., L. A. HARTMANN, H. E. GAUDETTE, D. I. GROVES, N. J. MCNAUGHTON & I. R. FLETCHER, 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon craton based on integration of field and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research* 3(4): 453-488.
- SANTOS, M. J. P., C. N. LAMARÃO, P. H. A. LIMA, M. A. GALARZA & J. C. L. MESQUITA, 2013. Granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte, Província Carajás, sudeste do estado do Pará: petrografia, geoquímica e geocronologia. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* 8(3): 325-354.

- SHAND, S. J., 1950. **Eruptive rocks, their genesis, composition, classification and their relation to ore-deposits**: 1-488. Thomas Murby, London.
- SILVA JR. R. O. 1996. **Geologia, petrografia e geoquímica dos diques da região de Rio Maria, SE Pará**. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, p. 123.
- SILVA JR. R. O., R. DALL'AGNOL, E. P. OLIVEIRA, 1999. Geologia, petrografia e geoquímica dos diques proterozoicos da região de Rio Maria, sudeste do Pará. **Geochimica Brasiliensis**.13 (2), p.163-181.
- SOUZA Z. S., H. MEDEIROS, F. J. ALTHOFF, R. DALL'AGNOL, 1990. Geologia do Terreno Granito-Greenstone Arqueano da região de Rio Maria, Sudeste do Pará. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 36. Natal, Anais. Natal. SBG. v 6, p. 2913-2928.
- SOUZA, Z. S., A. POTREL, J. M. LAFON, F. J. ALTHOFF, M. M. PIMENTEL, R. DALL'AGNOL & C. G. OLIVEIRA, 2001. Nd, Pb and Sr isotopes in the Identidade Belt, an Archaean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archaean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. **Precambrian Research** 109(3-4): 293-315.
- STRECKEISEN, A., 1976. To each plutonic rock its proper name. **Earth-Science Reviews** 12(1): 1-33.
- TASSINARI, C. C. G. & M. J. B. MACAMBIRA, 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: V. MANTESSO NETO, A. BARTORELLI, C. D. R. CARNEIRO & B. B. BRITO-NEVES (Orgs.): **Geologia do continente Sul-Americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida: 471-486. BECA, São Paulo.
- VASQUEZ, M. L., L. T. ROSA-COSTA, C. G. SILVA, P. F. RICCI, J. O. BARBOSA, E. L. KLEIN, E. S. LOPES, E. B. MACAMBIRA, C. L. CHAVES, J. M. CARVALHO, J. G. OLIVEIRA, G. C. ANJOS & H. R. SILVA, 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. In: M. L. VASQUEZ & L. T. ROSA-COSTA (Orgs.): **Escala 1:1.000.000**: 118-121. CPRM, Belém.

WHITNEY, D. L.; B. W. EVANS, Abbreviations for names of rock-forming minerals.  
**American Mineralogist**, v. 95, p. 185-187, 2010.

---

---

### CAPÍTULO 3

---

---

#### 7 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos estudos petrográficos foram identificados na região de Água Azul do Norte quatro tipos de diques com composição variando de máfica a félsica: diabásios, andesitos, riolito e feldspato-alcálico riolitos.

Os diabásios são rochas de granulação fina a média, localmente porfiríticas, com coloração cinza escura a levemente esverdeada, contendo fenocristais prismáticos de plagioclásio e texturas intergranular e subofítica. São compostos essencialmente por plagioclásio, anfibólio e clinopiroxênio. Minerais opacos, titanita e apatita são as fases acessórias, enquanto biotita, clorita, epidoto, sericita e argilominerais as secundárias. No diagrama de classificação para rochas gabroides (Le Maitre 2002), os diabásios plotam no campo dos gabro-norito-gabronorito, piroxênio-hornblenda gabro/gabronorito/norito e hornblenda gabro. As análises litoquímicas dos diabásios e a classificação nos diagramas TAS e AFM indicaram tratar-se de basaltos e andesitos basálticos toleíticos. Nos diagramas de Harker o grupo dos diabásios apresenta os menores conteúdos de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$  e os mais elevados de  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$ , mostram padrão subhorizontal dos ETR, um enriquecimento dos ETRL em relação aos ETRP e anomalias de Eu levemente positivas a pouco negativas ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  entre 0,84 e 1,11).

Os andesitos são rochas de coloração cinza escura, granulação fina e textura microcristalina a localmente porfirítica, contendo fenocristais de quartzo dispersos na matriz afanítica. Em geral, são compostos por plagioclásio, quartzo e, em menor proporção, feldspato-alcálico; anfibólio e rara biotita são os minerais máficos presentes. Os dados geoquímicos indicaram que também são rochas de natureza toleítica, com conteúdo de sílica entre 56,57 a 60,1%. Apresentam valores intermediários de  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}_t$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  quando comparados aos diabásios e riolitos; possuem fracionamento dos ETR mais acentuado e maior enriquecimento em ETRL que os diabásios e pequena anomalia negativa de európio ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  entre 0,83 a 0,92).

Os diques de riolito e feldspato-alcálico riolito são caracterizados por sua coloração avermelhada e granulação fina a grossa. Em geral, são rochas porfiríticas com texturas esferulítica e granofírica marcantes, compostos essencialmente por feldspato-alcálico, quartzo e plagioclásio, tendo anfibólio e biotita como fases máficas; minerais opacos, zircão e apatita são os acessórios e clorita, epidoto, sericita e argilominerais os secundários. Os diques de riolito e feldspato-alcálico riolito apresentam caráter metaluminoso a fracamente

peraluminoso e os mais elevados e variados conteúdos de  $\text{SiO}_2$ . Em diagramas de Harker,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$  exibem correlação negativa, enquanto  $\text{K}_2\text{O}$  apresenta correlação positiva com a sílica. O dique de riolito apresenta fracionamento moderado de ETR e anomalia negativa de európio moderada ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*=0,74$ ). Os diques de feldspato-alcálico riolíticos mostram maior fracionamento de ETR com razões  $(\text{La}/\text{Yb})_n$  entre 11,63 e 12,28 e as mais pronunciadas anomalias negativas de Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  entre 0,09 e 0,38).

A evolução dos diques de Água Azul do Norte não aponta para a existência de uma série magmática contínua. As lacunas composicionais entre os grupos de diques, além da pequena variação de sílica entre cada tipo, sugerem que eles não evoluíram por cristalização fracionada.

Os estudos petrográficos e geoquímicos comparativos mostraram grande similaridade entre os diques de Água Azul do Norte e os de outras ocorrências do DRM. Os dados geocronológicos obtidos em diques félsicos confirmam que eles são do final do paleoproterozóico e sincrônicos ao magmatismo granítico anorogênico que ocorreu na Amazônia Oriental por volta de 1,88 Ga. Tais diques podem ter evoluído a partir do mesmo magma que deu origem a esses granitos. Já a geração dos diques máficos podem estar relacionados a outros episódios de distensão crustal na Província Carajás.

## REFERÊNCIAS

- Almeida J.A.C. 2005. *Geologia, petrografia e geoquímica do Granito Anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará*. MS Dissertation, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 170 p.
- Almeida J.A.C., Dall’Agnol R., Oliveira D.C. 2006. Geologia petrografia e geoquímica do Granito anorogênico Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Pará. *Rev.Bras. Geoc.* **36**, p. 282-295.
- Almeida J.A.C., Dall’agnol R., Oliveira M.A., Macambira M.J.B., Pimentel M.M., Rämö O.T., Guimarães F.V., Leite A.A.S. 2011. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, **120**: 211-221.
- Almeida J.A.C., Oliveira M.A., Dall’agnol R., Althoff F.J., Borges R.M.K. 2008. Relatório de mapeamento geológico na escala 1:100.000 da Folha Marajoara (sb-22-z-c v). Programa GeoBrasil, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 147p.
- Althoff F. J., Barbey P., Boullier A.M. 2000. 2.8-3.0 Ga Plutonism and deformation in the SE Amazonian Craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*. 104, p. 187- 206.
- Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. 1991. Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil, Serra dos Carajás, folha SB-22- Z-A, Estado do Pará. Texto explicativo: 1-164. DNPM/CPRM, Brasília.
- Araújo O.J.B., Macambira E.M.B. Vale A.G., Oliveira J.R. 1994. Primeira integração das investigações Geológicas do Programa Grande Carajás na região SSE do Estado do Pará. *In: 4º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, Boletim de resumos expandidos*, p. 299-301.
- Cordani U.G., Tassinari C.C.G., Teixeira W., Basei M.A.S., Kawashita K. 1979. Evolução tectônica da Amazônia com base nos dados geocronológicos. *In: Congresso Geológico Chileno, 2, Arica (Chile). Actas*, p. 137-148.
- Costa H.N.S. 2012. *Petrografia e geocronologia de diques máficos a félsicos da região Sudoeste de Água Azul do Norte, Província Carajás, PA*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

- Costa J.B.S., Araújo, O. J. B., Santos A., Jorge João X.S., Macambira M.J.B., Lafon J. M. 1995. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 7 p. 199-235.
- Dall'Agnol R., Costi H. T., Leite A. A. S. 1997. Rapakivi granites from Brazil and adjacent countries. In: intern. Symp. on gran. and associated mineralizations. Superintendência de geologia e recursos minerais-smg, 2. Salvador. *Extended Abstract and Program*. Salvador, 1997. p. 185.
- Dall'Agnol R., Oliveira D.C., Guimarães F.V., Gabriel E.O., Feio G.R.L., Lamarão C.N., Althoff F.J., Santos P.A., Teixeira M.F.B., Silva A.C., Rodrigues D.S., Santos M.J.P., Silva C.R.P., Santos R.D., Santos P.J.L. 2013. Geologia do Subdomínio de Transição do Domínio Carajás – implicações para a evolução arqueana da Província Carajás – Pará. *Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia 13*: 1 CD-ROM.
- Dall'Agnol R.; Oliveira, D.C., Macambira M.J.B., Lamarão C.N. 2002. Diques proterozoicos do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria: a descoberta de diques compostos e novos dados geocronológicos. In: Simpósio sobre vulcanismo e ambientes associados, 2. 2002, Belém. *Boletim de resumos*. Belém-PA, p. 13.
- Dall'Agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C., Althoff F.J., Leite A.A.S., Oliveira D.C., Barros C.E.M. 2006. Archean and paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, Eastern Amazonian Craton. In: Dall'Agnol R., Rosa-Costa L.T., Klein E.L. (eds.). *Abstracts volume and field trips guide*. Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton. Belém, p.99-150.
- Dall'agnol R., Ramö O.T., Magalhães M. S., Macambira M.J.B. 1999. *Petrology of the anorogenic, oxidized Jamon and Musa granites, Amazonian Craton: implications for the genesis of Proterozoic, A-type Granites. Lithos*, 46: 431-462. 18
- Dall'Agnol R., Teixeira N.P., Ramo O.T., Moura C.A.V. Macambira M.J.B., Oliveira D.C. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic rapakivi A-Type granites of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, 80 p. 101-129.
- Docegeo. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. *Anais*, Belém: SBG, p.11–54.

- Feio G.R.L. 2011. *Magmatismo granitoide arqueano da área de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução crustal da Província Carajás*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Feio G.R.L., Dall’Agnol R., Dantas E.L., Macambira M.B., Gomes A.C.B., Sardinha A.S., Oliveira D.C., Santos R.D. & Santos P.A. 2012. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? *Lithos*, **151**: 57-73.
- Ferreira A.T.R. 2009. *Petrografia, geoquímica e geocronologia dos diques da área de Bannach, Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, SE do Pará*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Gastal M.C.P. 1987. *Petrologia do Maciço Granítico Musa, Sudeste do Pará*. 1987. MS Dissertation, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. Belém, 316 p.
- Gaudette H.E., Lafon J.M., Macambira M.J.B., Moura C.A.V., Scheller T. 1998. Comparison of single filament Pb evaporation/ionization zircon ages with conventional U-Pb results: examples from the Precambrian of Brazil. *J. South. Amer. Earth Sci*, **11**: 351-363.
- Guimarães F.V. 2009. *Geologia, petrografia e geoquímica do trondhjemitóide mogno e rochas arqueanas associadas, terreno Granito-Greenstone de Rio Maria - SE do Pará*. 2009. MS Dissertation, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 102 p.
- Guimarães F.G.V., Dall’agnol R., Oliveira M.A., Almeida J.A.C. 2010. Caracterização geológica, petrográfica e geoquímica do Trondhjemitóide Mogno e Tonalito Mariázinha, Terreno Granito-Greenstone mesoproterozoico de Rio Maria, SE do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, **40** (2): 196-211
- Henderson P. 1984. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam, Elsevier, 510 p.
- Huhn S.R.B., Santos A.B.S., Amaral A.F., Lendshan E.J., Gouvêa J.L., Martins L.P. B., Montalvão R. M. G., Costa V. G. 1988. Terreno "granito greenstone" da região de Rio Maria Sul do Pará. In: 35 ° Congresso Brasileiro de Geologia, *Anais*. Recife, SBG. 1988. **3**, p. 1438-1452.



- Kober, B., 1986 Whole-grain evaporation for  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -age investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 93(4): 482-490.
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A. & Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*. Oxford. **27**:.745-750. (Basaltic trachy-andesite).
- Le Maitre R. W. 2002. *A classification of igneous rocks and glossary of terms*. 2nd ed. London, 193 p.
- Leite A.A.S. *Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Leite A.A.S., Dall’Agnol R., Macambira M.J.B., Althoff F.J. 2004. Geologia e geocronologia dos granitoides arqueanos da região de Xinguara e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, Cráton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(4): 447-458.
- Lima, P. H. A., C. N. Lamarão & M. J. P. Santos, 2014. Petrografia, geoquímica e suscetibilidade magnética do Granito Paleoproterozoico São João, sudeste do Cráton Amazônico, Província Carajás. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, 9(1): 47-72.
- Mesquita J.C.L. 2010. *Geologia, petrografia e geocronologia das rochas encaixantes do granito paleoproterozoico São João, sudeste do Cráton Amazônico, Província Carajás*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Oliveira D.C. 2006. *Modelos de evolução e colocação dos granitos Paleoproterozoicos da suíte Jamon, SE do cráton Amazônico*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Oliveira M.A. 2005. *Geologia, petrografia e geoquímica do Granodiorito Sanukitóide Arqueano Rio Maria e rochas máficas associadas, leste de Bannach-Pa*. MS Dissertation, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 151 p.

- Oliveira M.A., Dall’Agnol, R., Althoff F.J., Leite A.A.S. 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **27**: 146-160.
- Rivalenti G., Mazzuchelli M., Girardi V. A. V., Cavazzini G., Finatti C., Barbieri M. A., Teixeira W. 1998. Petrogenesis of the Paleoproterozoic basaltic andesite-rhyolite dyke association in the Carajás region, Amazonian craton. *Lithos*, **43**: 235-265.
- Rodrigues P. R. S. 2013. *Petrografia e geocronologia de diques máficos a félsicos da região Sudoeste de Água Azul do Norte, Província Carajás, PA*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- Rolando A.P., Macambira M.J.B. 2002. Geocronologia dos granitoides arqueanos da região da Serra do Inajá, novas evidências sobre a formação da crosta continental no sudeste do Cráton Amazônico, SSE Pará. In: 41º Congresso Brasileiro de Geologia, Anais do Congresso Brasileiro de Geologia. SBG, João Pessoa, p. 525.
- Rolando A.P., Macambira M.J.B. 2003. *Archean crust formation in Inajá range area, SSE of Amazonian Craton, Brazil, based on zircon ages and Nd isotopes*. In: South American Symposium on Isotope Geology, Expanded Abstracts. Salvador.: CD-ROM.
- Rollinson H.R. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, and Interpretation*. New York, Longman, 352 p.
- Santos A., Pena Filho J.I.C. 2000b. Xinguara: folha SB.22- Z-C. Estado do Pará, escala 1:250.000. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). Brasília: CPRM, (CD-ROM).
- Santos J.S.O., Hartmann L.A., Faria M.S., Riker S.R., Souza M.M., Almeida M.E., Mcnaughton N.J. 2006. A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. Resumos Expandidos, Belém. In: *Simpósio de geologia da Amazônia*, 9. SBG, Belém (CD-ROM).
- Santos M.J.P., Lamarão C.N., Lima P.H.A., Galarza M.A. & Mesquita J.C.L. 2013. Granitoides arqueanos da região de Água Azul do Norte, Província Carajás, sudeste do estado do Pará: petrografia, geoquímica e geocronologia. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* 8(3): 325-354.

- Silva JR. R. O. 1996. *Geologia, petrografia e geoquímica dos diques da região de Rio Maria, SE Pará*. MS Dissertation, Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 123 p.
- Silva JR. R. O., Dall'Agnol R., Oliveira E. P. 1999. Geologia, petrografia e geoquímica dos diques proterozoicos da região de Rio Maria, sudeste do Pará. *Geochimica Brasiliensis*, 13 (2): 163-181.
- Souza Z.S., Dall'Agnol R., Althoff F.J., Leite A.A.S., Barros C.E.M. 1996. Carajás Mineral Province: geological, geochronological and tectonic contrast on the Archean evolution of the Rio Maria Granito-Greenstone Terrain and the Carajás Block. In: *Symposium on Archean Terranes of South America Platform, Brasília*. Extended abstracts. Brasília: SBG, p. 31-32.
- Souza Z. S., Medeiros H., Althoff F.J., Dall'Agnol, R. 1990. *Geologia do Terreno Granito-Greenstone Arqueano da região de Rio Maria, Sudeste do Pará*. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 36. Natal, Anais. SBG. v 6, p. 2913-2928.
- Streckeisen, A.L. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth Science Review*, 12: 1-33.
- Tassinari C.C.G. 1996. *O mapa geocronológico do cráton amazônico no Brasil: revisão dos dados isotópicos*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Tassinari C.C.G., Bettencourt J.S., Geraldés M.C., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. The Amazonian Craton. In: Cordani U.G., Milani E.J., T. Filho A.; Campos D.A. (eds.) *Tectonic evolution of South America*. 31<sup>o</sup> International Geological Congress, Rio de Janeiro, p. 41-95.
- Tassinari C.C.G. & Macambira M.J.B. 1999. *Geochronological Provinces of the Amazonian craton. Episodes*, 22: 174-182.
- Tassinari C. C. G., Macambira M. J. B. 2004. *Evolução tectônica do Cráton Amazônico*. In: Mantesso-Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B. de (Org.). *Geologia do continente sul americano: evolução da obra de f.f.m. de almeida*. Beca, São Paulo, p. 471-486.
- 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 Carajás province, SSE Pará, Brazil: Pb-Pb geochronology and Nd isotope geochemistry. *Precambrian Research*. 119: 257-275.

Teixeira W., Tassinari C.C.G., Cordani U.G., Kawashita K. 1989. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: Tectonic implications. *Precambrian Research*, **42**: 213-227.

Vasquez M. L., Rosa-Costa L. T., Silva C. M. G., Ricci P. S. F., Barbosa J. P. O., Klein E. L., Lopes E. C. S, Macambira E. M. B., Chaves C. L., Carvalho J. M. A. Oliveira J. G. F., Anjos G. C., Silva H. R. 2008. *Unidades Litoestratigráficas* in: *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará*. Belém.

## **ANEXO**

**ANEXO - COORDENADAS DOS PONTOS ESTUDADOS.**

<b>PONTOS</b>	<b>LITOTIPO</b>	<b>LONGITUDE</b>	<b>LATITUDE</b>	<b>ALTITUDE</b>	<b>DIREÇÃO</b>
PC-12B	Andesito	5059851	702429	357m	
MC-52B	Diabásio	5064698	710759	367m	
PCJ-11	Andesito	5065073	713388	352m	
PCJ-15	Diabásio	5061796	716699	343m	125Az
PCJ-18	Andesito	5058008	702175	344m	
PCJ-19	Andesito	5058315	702619	372m	
PC-24A	Riolito	5059271	701610	338m	
PCJ-34A	Andesito	5063742	705433	410m	
PCJ-34B	Feldspato-alcálico riolito	5063742	705433	410m	
MC-58	Diabásio	5045952	694391	330m	120Az
MC-95B	Feldspato-alcálico riolito	5042916	708241	379m	100Az
MC-96	Diabásio	5045317	703977	344m	88Az
MC-101	Diabásio	5046904	709355	371m	190Az
MC-118	Diabásio	5064673	710833	398m	127Az
MC-120	Diabásio	5065146	713912	357m	
MC-127	Diabásio	5061872	717622	325m	124Az