

# Petrografia, geoquímica e geocronologia de diques máficos a félsicos da região de Água Azul do Norte, sudeste do Pará, Província Carajás

## Petrography, geochemistry and geochronology of mafic to felsic dikes of the Água Azul do Norte region, southeast of Pará, Carajás Province

Paulo Roberto Soares Rodrigues<sup>1</sup>, Claudio Nery Lamarão<sup>1</sup>, Hévila de Nazaré Silva da Costa<sup>1</sup>,  
Davis Carvalho de Oliveira<sup>1</sup>, Marco Antônio Galarza<sup>1</sup>, Aldemir de Melo Sotero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil

**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, riólitos e álcali-feldspato riólitos 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<sub>t</sub>, MgO e CaO. Os andesitos apresentam valores intermediários quando comparados aos diabásios e riólitos. Os diques de riólito e álcali-feldspato riólito são mais enriquecidos em SiO<sub>2</sub> e exibem correlação negativa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO<sub>t</sub>, MgO e CaO, e positiva de K<sub>2</sub>O em relação à sílica. Os diques de Água Azul do Norte mostram grande similaridade com aqueles de outras regiões do Domínio Rio Maria (DRM), implicando 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 SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> and the highest content of FeO<sub>t</sub>, MgO and CaO. The andesites have intermediate values when compared to diabases and rhyolites. The dikes of rhyolite and alkali-feldspar rhyolite are more enriched in SiO<sub>2</sub> and exhibit negative correlation of FeO<sub>t</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, CaO and positive correlation of K<sub>2</sub>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.

---

RODRIGUES, P. R. S., C. N. LAMARÃO, H. N. S. COSTA, D. C. OLIVEIRA, M. A. GALARZA & A. M. SOTERO, 2016. Petrografia, geoquímica e geocronologia de diques máficos a félsicos da região de Água Azul do Norte, sudeste do Pará, Província Carajás. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 10(3): 311-339.

Autor para correspondência: Claudio Nery Lamarão. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Av. Augusto Correa, 1 – Guamá. Belém, PA, Brasil. CEP 66075-110 (lamarão@ufpa.br).

Recebido em 20/07/2015

Aprovado em 21/03/2016

Responsabilidade editorial: Mário Augusto G. Jardim



## INTRODUÇÃO

A Província Carajás é marcada por grandes ocorrências de diques máficos a félsicos; trabalhos anteriores (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 Domínio Rio Maria (DRM), esses diques seccionam tanto os granitos anorogênicos paleoproterozoicos quanto suas encaixantes arqueanas.

Trabalhos recentes (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 (Costa, 2012; Rodrigues, 2013) classificaram esses diques como diabásios, andesitos, dacitos, riolitos e álcali-feldspato riolitos. 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.

Diversos trabalhos têm tentado esclarecer os processos de formação e evolução de granitoides arqueanos e granitos anorogênicos paleoproterozoicos do DRM. Entretanto, os diques – que constituem um mecanismo importante para o transporte de magmas 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 de estudos petrográficos complementares, geoquímicos e geocronológicos, necessários para melhorar o seu conhecimento geológico e permitir correlações com outros diques 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; Ferreira, 2009), ambas pertencentes ao DRM.

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo principal contribuir para a ampliação do conhecimento petrográfico, geoquímico e geocronológico dos diques da

região de Água Azul do Norte e suas correlações com os diques que afloram nas regiões de Bannach e Rio Maria, permitindo um melhor entendimento da natureza deste magmatismo no DRM.

## CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Amazônia Central (PAC), na qual está inserida a área de ocorrência dos diques de rochas 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 pela Província Maroni-Itacaiúnas (2,2-1,95 Ga) em dois grandes domínios: o Bloco Carajás (Tassinari & Macambira, 2004), a sul, e o Bloco Roraima, a norte. Inserida na PAC, ocorre a Província Carajás (PC), definida por Santos *et al.* (2000) como uma província independente.

O Terreno Granito-*Greenstone* de Rio Maria (TGGRM; Figura 1) ou Domínio Rio Maria (DRM; Vasquez *et al.*, 2008) situa-se no sudeste do Cráton Amazônico e faz parte da PAC. 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 revela a existência de cinco principais grupos de rochas arqueanas para esta região (Almeida *et al.*, 2008, 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 TTG 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) rochas granodioríticas com alto Cr, Ni e Mg (2,87 Ga), tipo sanukitoide, representadas pelo Granodiorito Rio Maria e rochas máficas e intermediárias associadas; 3) leucogranodioritos e leucomonzogranitos cálcico-alcálicos com alto Ba e Sr, representados pela Suíte Guarantã e similares (2,87 Ga); 4) TTG mais jovens, representados pelo Trondhjemitó Água Fria (2,86 Ga) aflorante na região de Xinguara e intrusivo no

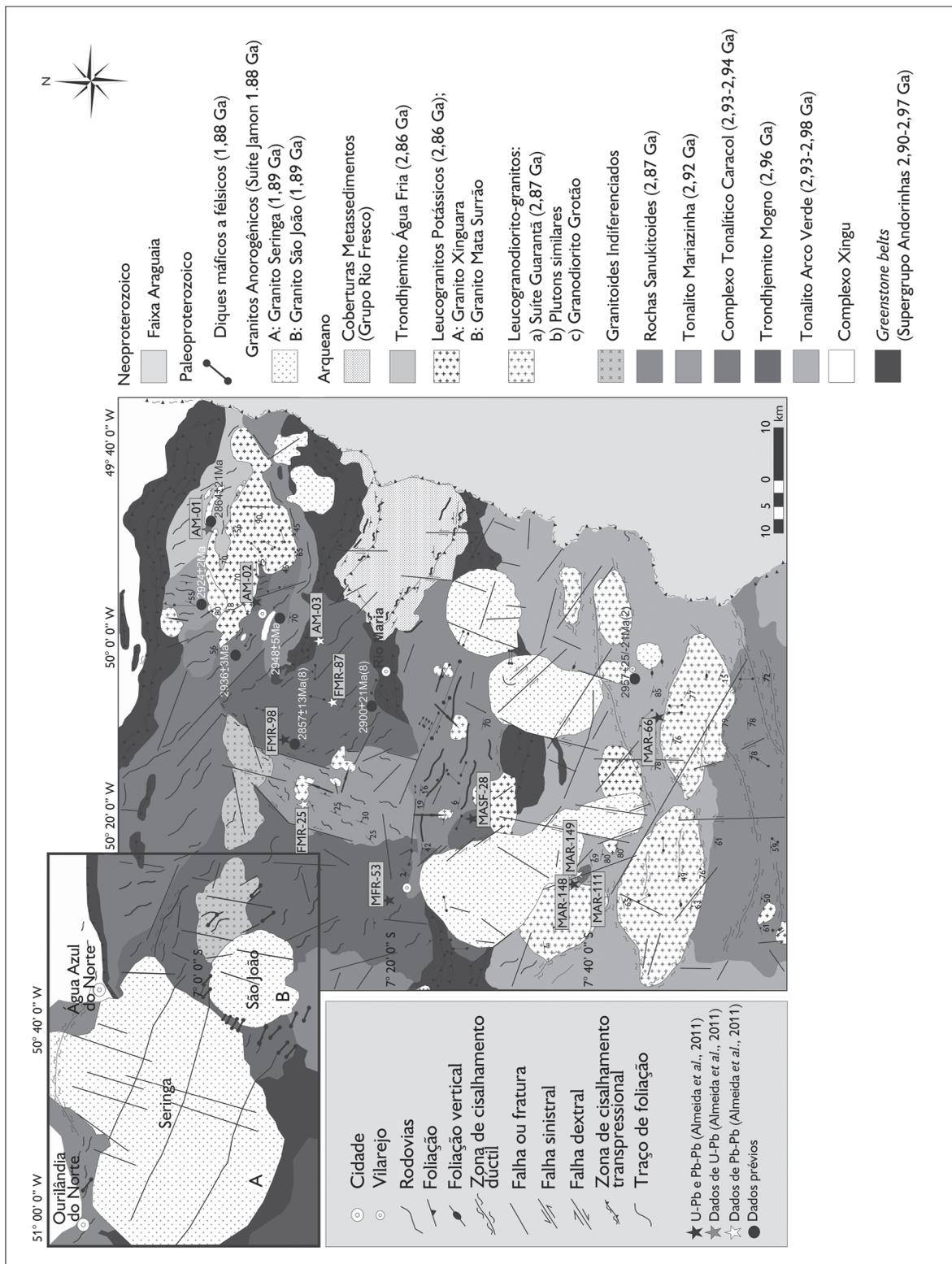


Figura 1. Mapa geológico do TGGRM com a ocorrência dos diques estudados e dados geocronológicos representativos das unidades arqueanas. Modificado de Almeida et al. (2011) e de Santos et al. (2013).

Complexo Tonalítico Caracol; 5) leucogranitos potássicos de afinidade cálcico-alkalina, representados pelos granitos Xinguara, Mata Surrão e correlatos, com idades entre 2,87-2,86 Ga. Metassedimentos do Grupo Rio Fresco de idade arqueana recobrem parte das unidades do DRM, as quais são cortadas por granitos anorogênicos paleoproterozoicos (Huhn *et al.*, 1988; Araújo *et al.*, 1994; Dall'Agnol *et al.*, 1997, 2005).

## GEOLOGIA DE ÁGUA AZUL DO NORTE

A região de Água Azul do Norte (Figura 2) compreende *greenstone belts*, granitoides arqueanos, os granitos paleoproterozoicos Seringa (1895 ± 1 Ma) e São João (1890 ± 2 Ma) e diques de composição máfica a félsica. Santos *et al.* (2013) agruparam as rochas arqueanas desta região em associações granodiórficas e trondhjêmicas. As rochas granodiórficas são formadas por: (1) anfibólio-biotita-granodioritos (ABGrd) fortemente saussuritizados, aflorantes às proximidades de Ourilândia do Norte; apresentam idade de cristalização de 2875 ± 2 Ma e teores elevados de Ni, Cr e Mg, assemelhando-se petrográfica, geoquímica

e geocronologicamente às rochas da Suíte Sanukitoide Rio Maria (Oliveira *et al.*, 2009); (2) biotita-granodioritos, texturalmente distintos dos ABGrd e isentos de anfibólio, saussuritização dos plagioclásios e epidoto magmático; datações Pb-Pb em zircão forneceram idade de cristalização de 2884 ± 3 Ma; (3) leucogranodioritos-granitos pouco deformados, com coloração esbranquiçada a rosada, contendo fenocristais de plagioclásio e álcali-feldspato, correlacionados às rochas da Suíte Garantã (Almeida *et al.*, 2013). As rochas trondhjêmicas são representadas por biotita-epidoto-trondhjêmicos, com bandamento composicional, foliação NE-SW dominante e saussuritização intensa dos plagioclásios; geoquimicamente, assemelham-se às rochas do Trondhjemito Mogno (Almeida *et al.*, 2011).

## ASPECTOS GEOLÓGICOS E GEOCRONOLOGIA DOS DIQUES MÁFICOS A FÉLSICOS

Os diques estudados de Água Azul do Norte compreendem corpos tabulares, subverticais, orientados na direção NW-SE, com extensão em torno de 500 m, podendo alcançar

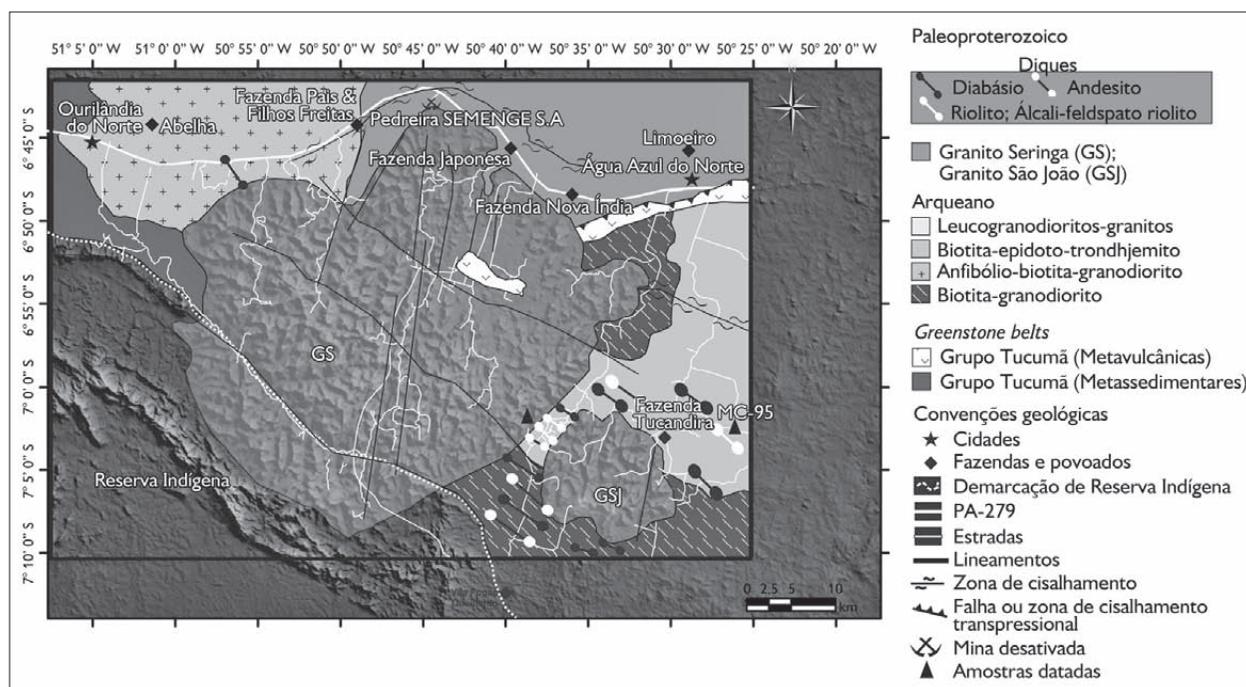


Figura 2. Mapa geológico da região de Água Azul do Norte com a ocorrência dos diques estudados. Modificado de Santos *et al.* (2013).

2 km e espessura de até 30 m. 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 trondhjêmicas arqueanas, entre serras que formam os granitos paleoproterozoicos Seringa e São João e a oeste do primeiro (Figuras 2 e 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. Costa (2012) obteve uma idade Pb-Pb em zircão de  $1887 \pm 2$  Ma para um dique de riolito, interpretada como idade de cristalização.

A Tabela 1 mostra as idades geocronológicas obtidas para os diques do DRM e suas respectivas metodologias.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A análise textural dos diques 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 1.500 pontos para cada lâmina polida, o que permitiu uma classificação das rochas estudadas nos diagramas Q-A-P (Streckeisen, 1976; Le Maitre, 2002) para rochas vulcânicas e plutônicas.

As análises de microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram realizadas no Laboratório de Microanálises do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (IG-UFGPA). 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 ( $Z =$  número 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 30 s, com 4.000 a 5.000 contagens/segundo para cada análise.

O estudo de MEV envolveu a obtenção de imagens de elétrons retroespalhados (ERE) e 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 =  $90 \mu\text{a}$ , voltagem de aceleração constante = 20 KV, distância de trabalho = 15 mm, tempo de análise = 30 s. Foram caracterizados minerais opacos, além de outras fases acessórias representativas de cada dique estudado.

A partir dos estudos petrográficos, foram selecionadas amostras representativas dos diques estudados para análises químicas em rocha total. A preparação envolveu trituração, pulverização, homogeneização e quarteamento na Oficina de Preparação de Amostras (OPA) do IG-UFGPA. 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 Inductively Coupled Plasma – Emission Spectrometry (ICP-ES) 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 Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry (ICP-MS).

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-UFGPA. 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 posições 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-UFGPA. 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).

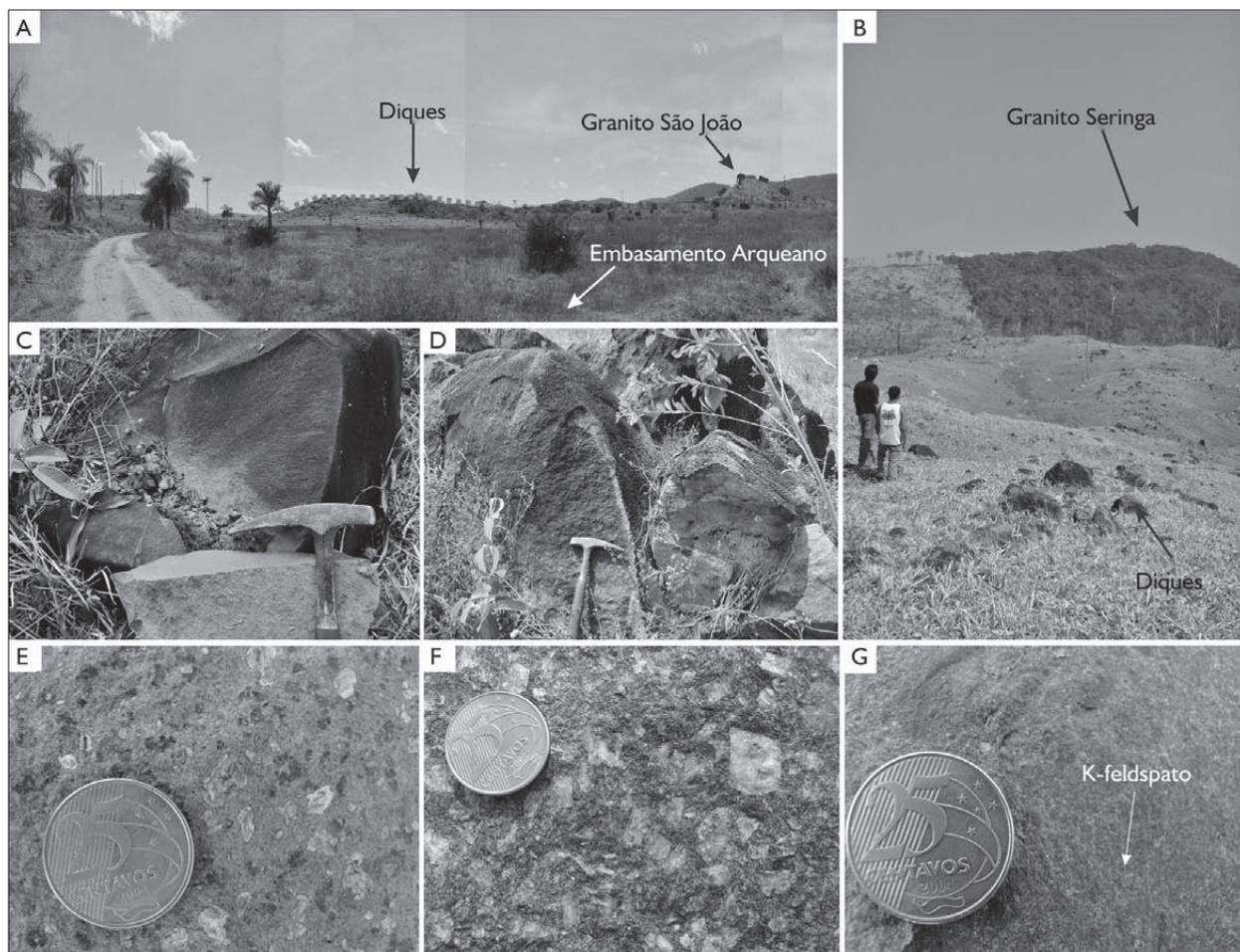


Figura 3. Aspectos de campo mostrando o modo de ocorrência dos diques de Água Azul do Norte: A) dique cortando o embasamento arqueano; ao fundo, granito paleoproterozoico São João; B) dique de riolito encaixado em rochas arqueanas; ao fundo, serra do granito paleoproterozoico Seringa; C) afloramento 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-alcálico riolito.

Tabela 1. Idades obtidas em diques de composição máfica e félsica no DRM. Legendas: (a) = Rb-Sr; (b) = Pb-Pb; (1) = Silva Jr. (1996); (2) = Rivalenti *et al.* (1998); (3) = Gastal *et al.* (1987); (4) = Oliveira *et al.* (2006); (5) = Dall'Agnol *et al.* (2002); (6) = Ferreira (2009); (7) = Costa (2012).

Rocha	Método	Material analisado	Idade (Ma)
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)



esbranquiçadas correspondentes a cristais de plagioclásio (Figura 5A). São rochas faneríticas e/ou porfíricas, de granulação fina a média, contendo fenocristais prismáticos de plagioclásio com até 1 cm de comprimento. A textura intergranular a subofítica (Figura 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 5C).

O clinopiroxênio ocorre na forma de cristais subédricos prismáticos, com 0,1 a 3 mm; possui coloração neutra a amarronzada, por vezes mostra-se moderadamente fraturado e transformado para anfibólio (Figura 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.

Tabela 2. Composições modais dos diques de Água Azul do Norte. Legendas: minerais acessórios = titanita, allanita, zircão e apatita; minerais secundários = epidoto, clorita, sericita, argilominerais; Abreviações: K-feldspato = feldspato potássico.

Rocha	Diabásio						Andesito				Riolito	Álcali-feldspato riolito	
	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	
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
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



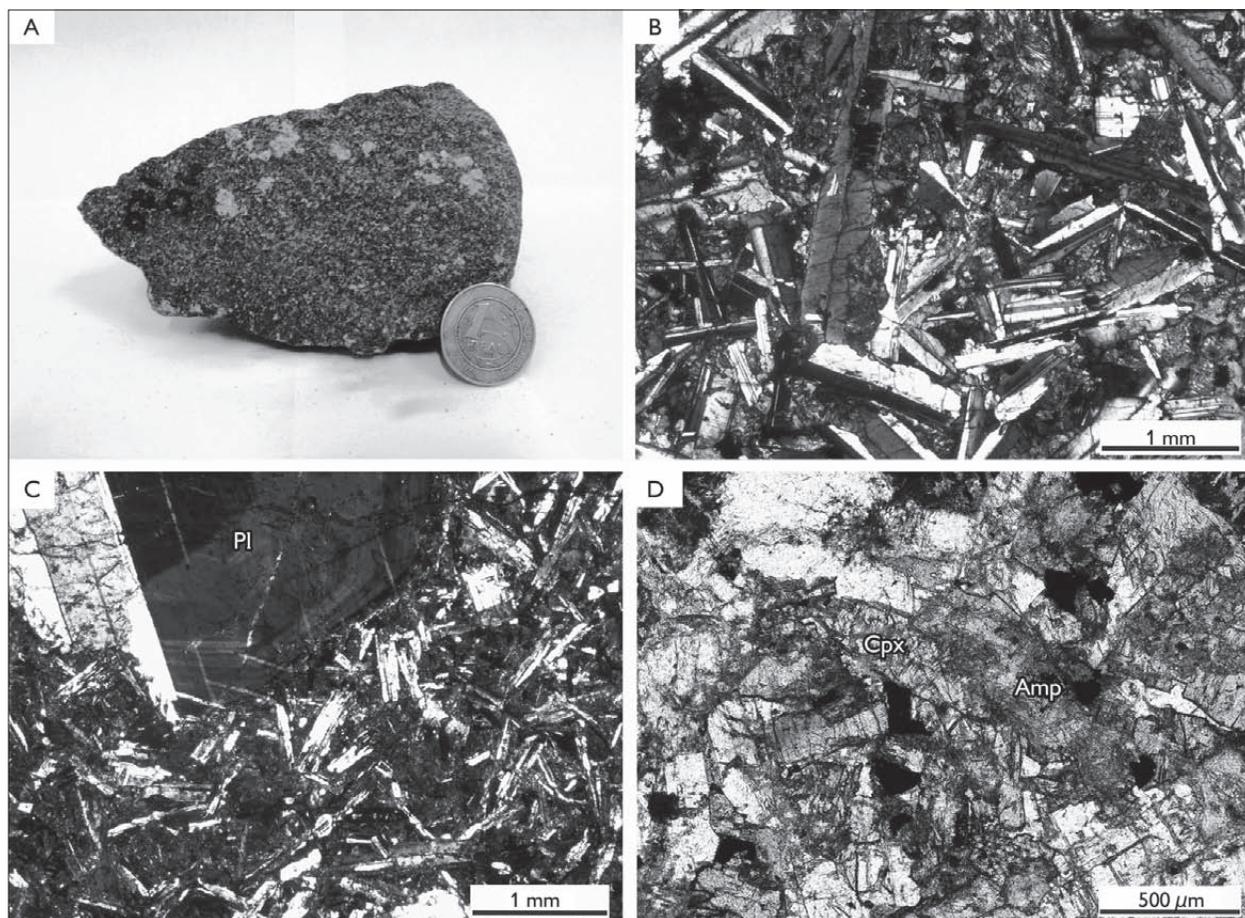


Figura 5. Aspectos petrográficos dos diques de diabásio de Água Azul do Norte: A) aspecto macroscópico de diabásio porfírico de granulação média; B) aspecto da textura intergranular (NC); C) Textura porfírica, com fenocristais de Plagioclásio (Pl), imersos em matriz intergranular (NC); D) Cristal de clinopiroxênio (Cpx) alterado para anfibólio (Amp) (NP). Legendas: NC = nicóis cruzados; NP = nicóis paralelos. Nomenclatura segundo Whitney & Evans (2010).

A biotita, geralmente proveniente da alteração do anfibólio, é rara a ausente neste litotipo. Quando presente, perfaz menos de 1% modal e apresenta-se alterada para clorita. O quartzo apresenta-se 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.

#### Andesito

São rochas de coloração cinza escura (Figura 6A), granulação fina e textura microcristalina, constituídas

essencialmente por plagioclásio, quartzo e, em menor proporção, álcali-feldspato; localmente, quartzo e álcali-feldspato aparecem como microfenocristais dispersos na matriz (Figuras 6B e 6C). Intercrescimentos granofíricos podem ser observados ao longo da matriz microcristalina. O anfibólio é o 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 9,2%) e ocorre como

microfenocristais dispersos em matriz de granulação fina (Figura 6C).

O álcali-feldspato é raro, porém forma microfenocristais fortemente alterados para argilominerais dispersos na matriz. Os cristais de anfíbólio são subédricos a anédricos, levemente corroídos e com contatos irregulares; mostram leve pleocroísmo verde claro a verde escuro (Figura 6D).

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

### Riolito

O dique de riolito é caracterizado por sua cor avermelhada, granulação variando de fina a grossa e texturas afanítica e porfírica; contudo, texturas esferulítica e granofírica (Figuras 7B e 7D) podem ser observadas com frequência. Fenocristais de quartzo, álcali-feldspato, plagioclásio e minerais opacos encontram-se dispersos em uma matriz afanítica. O riolito é composto essencialmente por álcali-feldspato, quartzo e plagioclásio, tendo como minerais varietais anfíbólio e biotita. Minerais opacos, zircão e apatita compõem a fase acessória. As principais fases secundárias são clorita, epidoto, sericita e argilominerais.

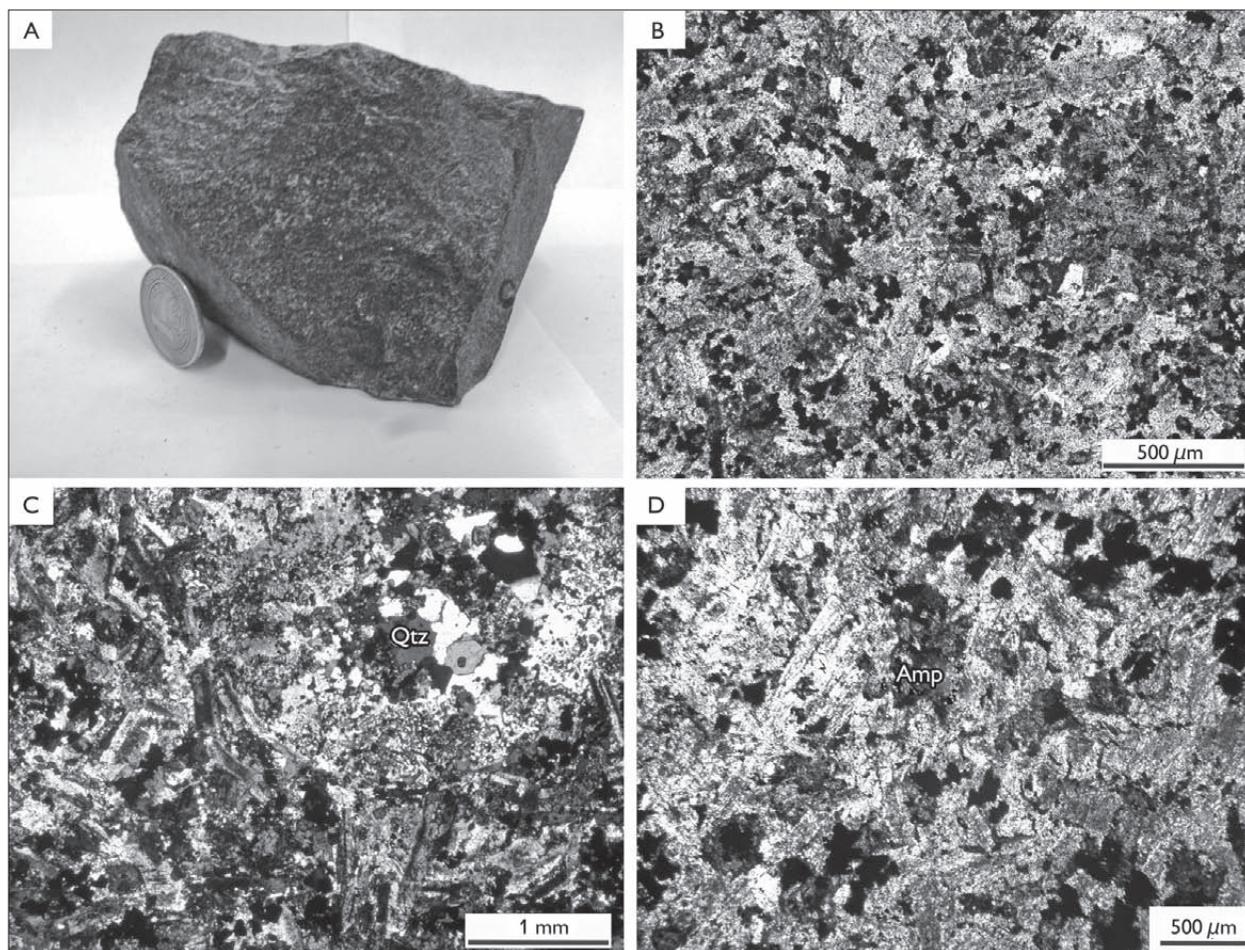


Figura 6. A) Aspecto macroscópico do andesito; B) textura microcristalina; C) cristais de quartzo (Qtz) entre cristais de plagioclásio; D) cristais anédricos de anfíbólio (Amp) entre cristais de plagioclásio e minerais opacos. Legendas: NP = nicóis paralelos; NC= nicóis cruzados. Nomenclatura segundo Whitney & Evans (2010).

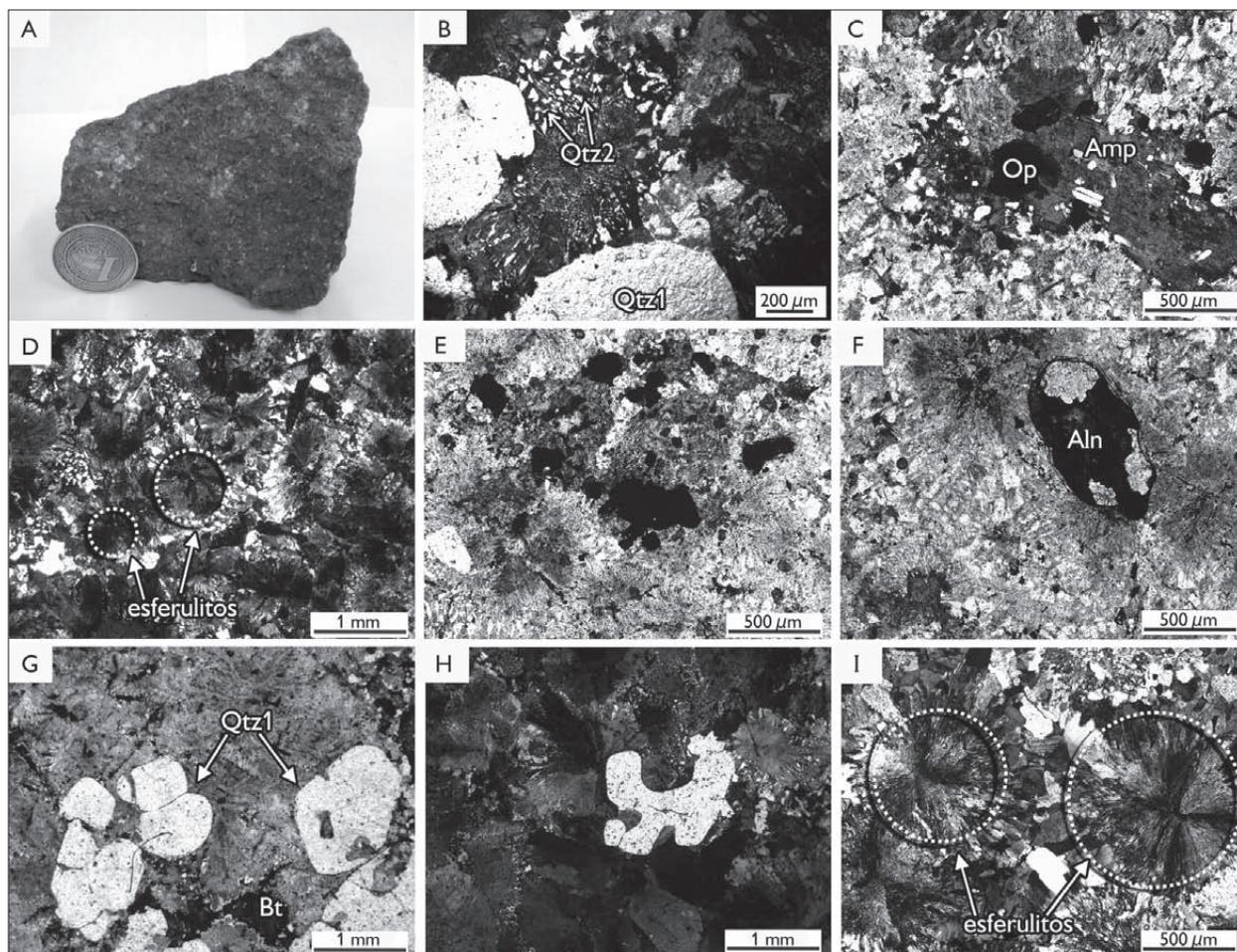


Figura 7. Aspectos macroscópicos e microscópicos dos diques de riolito (B-D) e feldspato-alcálico riolito (A, F-I) de Água Azul do Norte: A) aspecto macroscópico do feldspato-alcálico riolito porfirítico; B) cristais porfiríticos de Qtz1 e textura granofélica (Qtz2) no riolito (NC); C) cristal corroído de anfíbólio (Amp) em riolito (NP); D) textura esferulítica em matriz granofélica do riolito (NC); E) aspecto textural do feldspato-alcálico riolito (NP); F) cristal de allanita (Aln) (NP); G) fenocristais de Qtz1 e biotita cloritizada (Bt) (NP); H) Qtz1 do riolito com feições de reabsorção em matriz granofélica (NC); I) textura esferulítica característica do dique de feldspato-alcálico riolito (NC). Legendas: NP = nicóis paralelos; NC = nicóis cruzados. Abreviações segundo Whitney & Evans (2010).

O álcali-feldspato, 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 granofélicos 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 Qz1 constitui-se em fenocristais subédricos a euédricos, com dimensões entre 0,5 e 4 mm; o Qz2 ocorre como intercrescimentos granofélicos (Figura 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 anfibólio 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 7C).

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

Os minerais opacos são subédricos a anédricos, finos a médios e associados à biotita e ao anfibólio. Apatita pode ser encontrada como inclusão nesses dois últimos. O zircão é euédrico a subédrico, estando 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 anfibólio e biotita, enquanto sericita e argilominerais são oriundos da alteração dos feldspatos.

### Álcali-feldspato riolito

Os álcali-feldspato riolitos são caracterizados por sua cor avermelhada, granulação fina a média e textura porfírica. Fenocristais de quartzo, em média com 4 mm, e álcali-feldspato na forma de prismas alongados e irregulares, com até 1 cm e coloração rosada, encontram-se dispersos em matriz afanítica (Figura 7A). A textura predominante é a porfírica (Figura 7G), porém, de forma subordinada, mas não menos importante, ocorrem texturas granofírica e esferulítica (Figura 7I). Sua mineralogia é composta predominantemente por álcali-feldspato e quartzo. A biotita ocorre como único mineral varietal e os acessórios são representados principalmente por minerais opacos. Os minerais secundários são clorita, sericita e argilominerais.

O álcali-feldspato 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 7H).

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

Os minerais opacos são subédricos a anédricos, de granulação fina a média, e geralmente associados à biotita (Figura 7E). O zircão é euédrico a subédrico, sendo geralmente incluso em cristais de biotita ou disperso na matriz. A allanita é euédrica e ocorre dispersa na matriz (Figura 7F). As fases secundárias são clorita, como produto da alteração da biotita, sericita e argilominerais oriundos da alteração de minerais feldspáticos.

### FASES ACESSÓRIAS

As fases acessórias presentes nos diques estudados foram caracterizadas através de análises de MEV-EDS (Tabela 3).

As análises de MEV-EDS (Tabela 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-exolução, originando ilmenita (Figura 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 8B). A titanomagnetita foi identificada nos diabásios e andesito na forma de cristais subédricos a euédricos (Figura 8C). A titanita ( $\text{CaTiSiO}_5$ ) é anédrica e está presente em todos os litotipos, associada principalmente aos cristais de magnetita (Figura 8A).

A apatita  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$  ocorre em todos os diques, com exceção dos diabásios; é subédrica a euédrica e comumente associada à magnetita (Figura 8B).

Tabela 3. Principais fases acessórias presentes nos diques de Água Azul do Norte. Legendas: Py = pirita, Ccp = calcopirita, Brt = barita, Mag = magnetita, Ilm = ilmenita, Ap = apatita, Zrn = zircão, Ttn = titanita, Tmt = titanomagnetita, Aln = allanita.

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

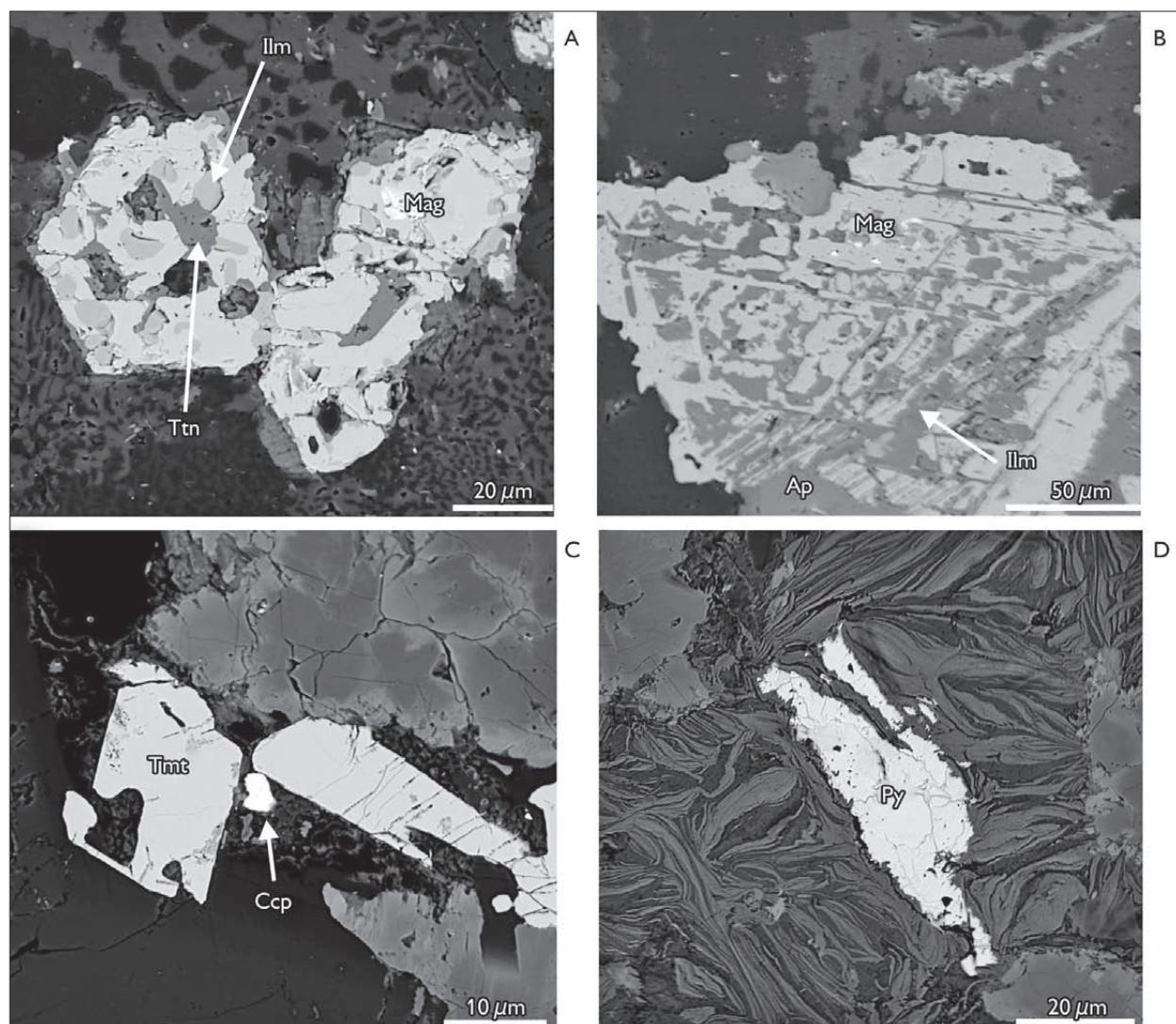


Figura 8. Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por MEV: A) cristais anédricos de magnetita contendo inclusões de titanita (Ttn), ilmenita (Ilm), provavelmente produto de oxi-exsolução, forma cristais individuais na magnetita (Mag); B) cristal de apatita (Ap) em contato com cristal de magnetita (Mag) com texturas de oxi-exsolução e substituição por ilmenita (Ilm) no feldspato-alcálico riolito; C) cristais de titanomagnetita (Tmt) e calcopirita (Ccp), comuns nos diabásios e andesitos; D) cristal anédrico e corroído de pirita diabásios (Py). Nomenclatura segundo Whitney & Evans (2010).

Apirita ( $\text{FeS}_2$ ) e a calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) ocorrem somente nos diabásios; seus cristais são anédricos e associados à titanomagnetita e aos minerais ferromagnesianos (Figuras 8D e 9C).

A allanita [ $\text{Ca}(\text{REE}, \text{Ca})\text{Al}_2(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})(\text{SiO}_4)(\text{Si}_2\text{O}_7)\text{O}(\text{OH})$ ] ocorre somente nos riolitos; seus cristais são subédricos, normalmente zonados (Figura 9A) e associados aos ferromagnesianos e apatita.

O zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ) é comum nos diques de álcali-felspato riolito e riolito; seus cristais são subédricos a euédricos, moderadamente fraturados (Figura 9B).

A barita ( $\text{BaSO}_4$ ) está presente como finos cristais anédricos no dique de riolito (Figura 9D); sua presença pode ter contribuído para os teores elevados de Ba encontrados nesse litotipo. Teores elevados de bário foram observados em outros diques félsicos do DRM.

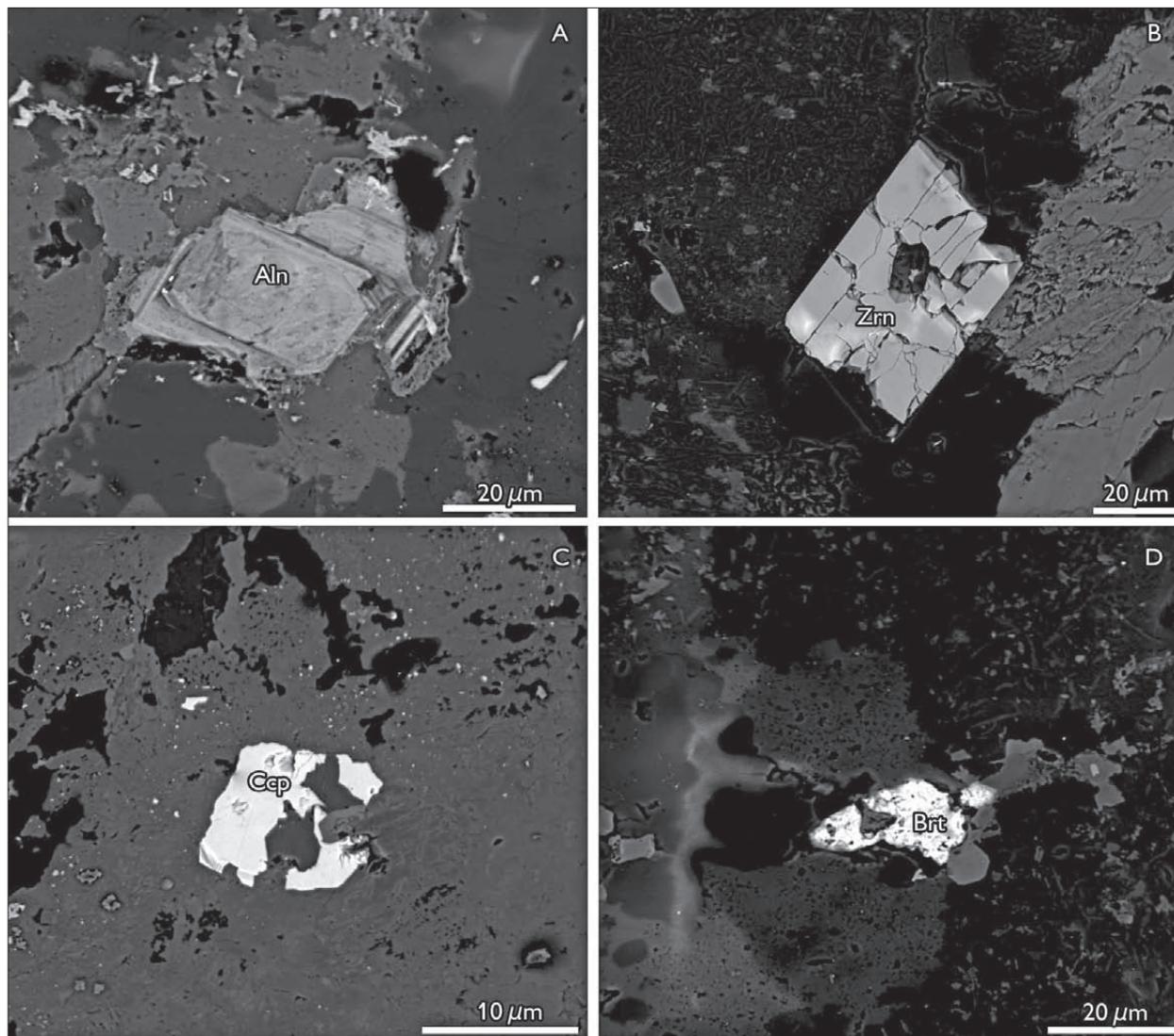


Figura 9. Imagens de elétrons retroespalhados obtidas por MEV: A) cristal de allanita (Aln) no riolito; B) cristal de zircão (Zrn) no riolito; C) cristal anédrico e corroído de calcopirita (Ccp) em diabásios; D) cristal de barita (Brt) identificado no riolito. Nomenclatura segundo Whitney & Evans (2010).

## GEOQUÍMICA

### 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 álcali-feldspato riolito. Os dados analíticos são apresentados na Tabela 4 e se encontram dispostos segundo o conteúdo crescente de  $\text{SiO}_2$ . 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 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) *versus*  $\text{SiO}_2$ . A caracterização geoquímica desses diques seguiu os procedimentos indicados em Rollinson (1993). Diques de outras regiões do DRM (Silva Jr. *et al.*, 1999; Ferreira, 2009) são plotados para comparação.

Com base no diagrama TAS (Figura 10A), foram individualizados os seguintes grupos litológicos, já previamente identificados na petrografia: diabásios, andesito, riolitos e álcali-feldspato riolito. No diagrama triangular AFM (Irvine &

Baragar, 1971), as amostras de diabásios e andesitos plotam no campo da série toleítica. O comportamento destoante de duas amostras de diabásios (PCJ-15 e PCJ-19) e uma de andesito (PCJ-18) reflete um relativo empobrecimento em FeO nessas rochas, deslocando-as para o campo cálcico-alcalino (Figura 10B). Este comportamento pode indicar que diabásios e andesito possivelmente não representam uma série magmática cálcico-alcalina típica.

Segundo o diagrama catiônico de Jensen (1976), fica evidente a maior afinidade dos andesito, riolito e álcali-feldspato riolitos com as rochas da série toleítica, ao mesmo tempo em que os diabásios não mostram um *trend* contínuo em uma única série (Figura 11A).

Quanto ao índice de saturação em alumina (Shand, 1950), os diques da região de Água Azul do Norte mostram assinatura predominantemente metaluminosa, com apenas uma amostra de álcali-feldspato riolito (MC-95b) apresentando razão  $A/CNK > 1$  e ocupando o campo fracamente peraluminoso (Figura 11B).

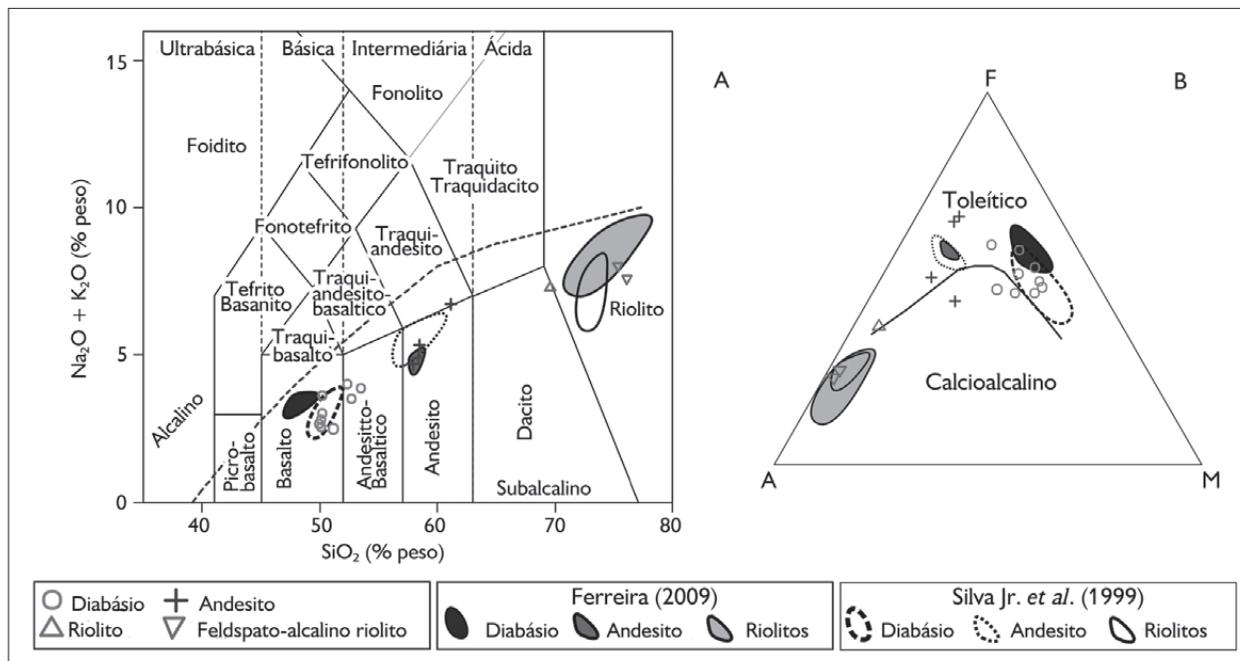


Figura 10. Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição das amostras dos diques estudados: A) diagrama TAS (Le Bas *et al.*, 1986; Le Maitre, 2002); B) diagrama AFM (A =  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ; F =  $\text{FeO}^*$ ; M =  $\text{MgO}$ ); limite entre os campos toleítico e cálcico-alcalino 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.

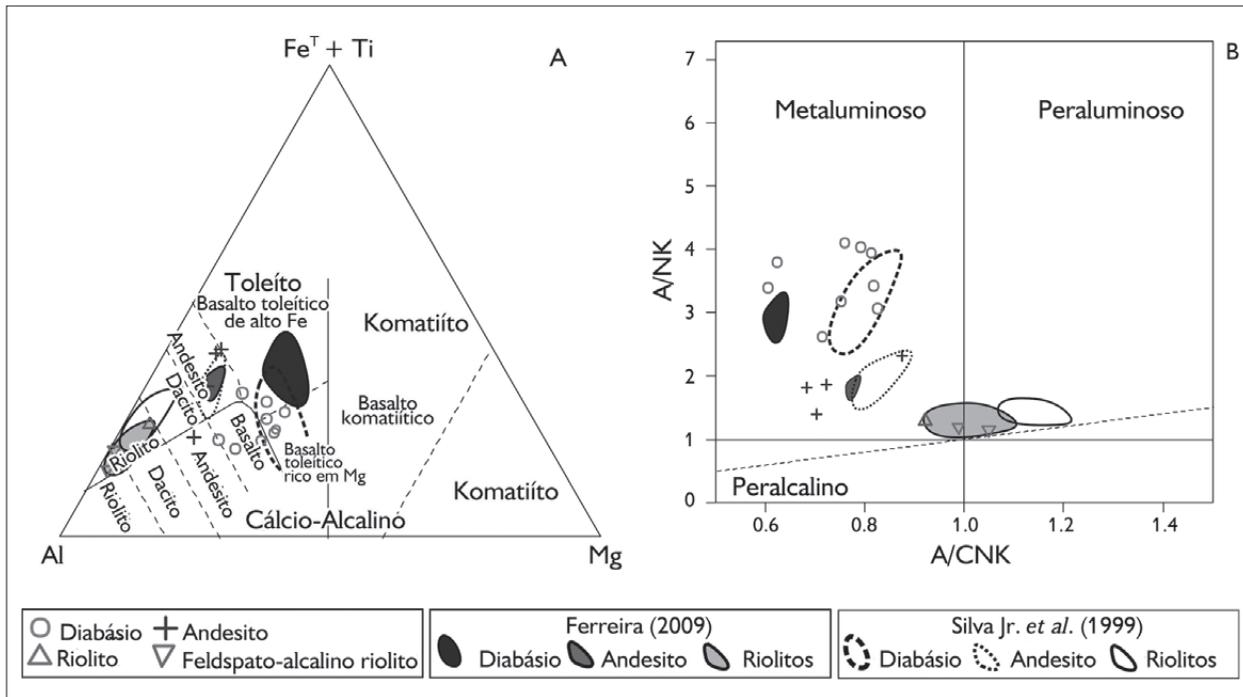


Figura 11. Diagramas geoquímicos mostrando a distribuição das amostras dos diques estudados: A) diagrama catiônico de Jensen (1976); B) diagrama  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$  versus  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$  mol (Shand, 1950). Diques de outras regiões do DRM mostrados para comparação. Ferreira (2009) = região de Bannach; Silva Jr. et al. (1999) = região de Rio Maria.

O conteúdo de  $SiO_2$  das amostras analisadas varia de 48,7 a 75,7%. Entretanto, essa variação é pequena entre cada tipo litológico e as amostras tendem a se agrupar. Nos diabásios e andesitos, o  $SiO_2$  varia de 48,68 a 52,55% e de 56,57 a 60,10%, respectivamente. No riolito e álcali-feldspato riolitos, varia de 69% a 75,5% (Tabela 4). As variações de  $SiO_2$ , bem como de outros elementos maiores e traços, podem ser melhor visualizadas nos diagramas de Harker (Figura 12).  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  e  $FeO_t$  mostram *trends* decrescente com o aumento de  $SiO_2$ , enquanto  $K_2O$  e  $Na_2O$  aumentam; o  $P_2O_5$  mostra comportamento mais irregular.

Os diabásios apresentam os menores conteúdos de  $SiO_2$  e os mais altos de  $FeO_t$ ,  $MgO$  e  $CaO$ , refletindo a composição mineralógica dessas rochas formadas predominantemente por plagioclásio e clinopiroxênio, além de minerais opacos (Tabela 3).

Os andesitos apresentam valores intermediários de  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $FeO_t$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$  e  $K_2O$

quando comparados aos diabásios e riolitos, e são mais enriquecidos em  $P_2O_5$ , com exceção de uma amostra.

Nos riolitos,  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $FeO_t$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  e  $P_2O_5$  exibem correlação negativa em relação a  $SiO_2$ , enquanto o  $K_2O$  apresenta correlação positiva. O  $Na_2O$  se mantém constante (Figura 12; Tabela 4).

### 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 4) em relação a  $SiO_2$  (Figura 13).

Rb, Ba, Zr, Nb e Y tendem a se enriquecer com o aumento da sílica no sentido diabásios – andesitos – riolito – álcali-feldspato riolitos, enquanto o Sr varia pouco e mostra *trend* sub-horizontal neste mesmo sentido. 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 maior dispersão nessas rochas, com teores de 44 a 118 ppm (Tabela 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 álcali-feldspato riolitos (210-1233 ppm).

O grupo dos riolitos apresenta baixa dispersão dos elementos-traço analisados, com exceção do Ba, que mostra comportamento destoante (210-1779 ppm); tal dispersão pode estar ligada à cristalização do feldspato potássico e da barita, presente nos riolitos.

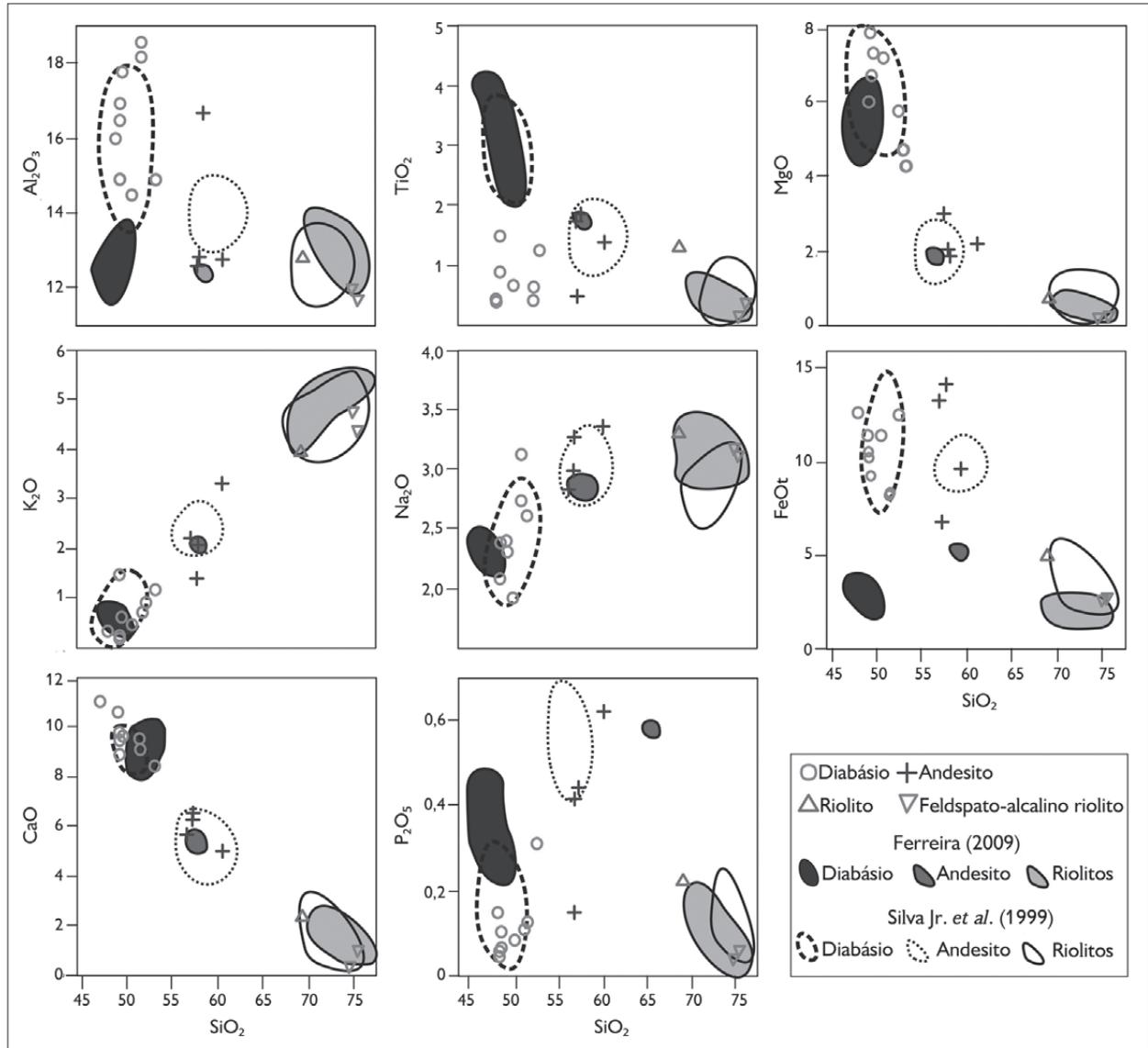


Figura 12. Diagramas de Harker mostrando o comportamento dos elementos maiores em relação a SiO<sub>2</sub> para os diques da região de Água Azul do Norte; valores em porcentagem de peso. Diques de outras regiões do DRM mostrados para comparação. Ferreira (2009) = região de Bannach; Silva Jr. et al. (1999) = região de Rio Maria.

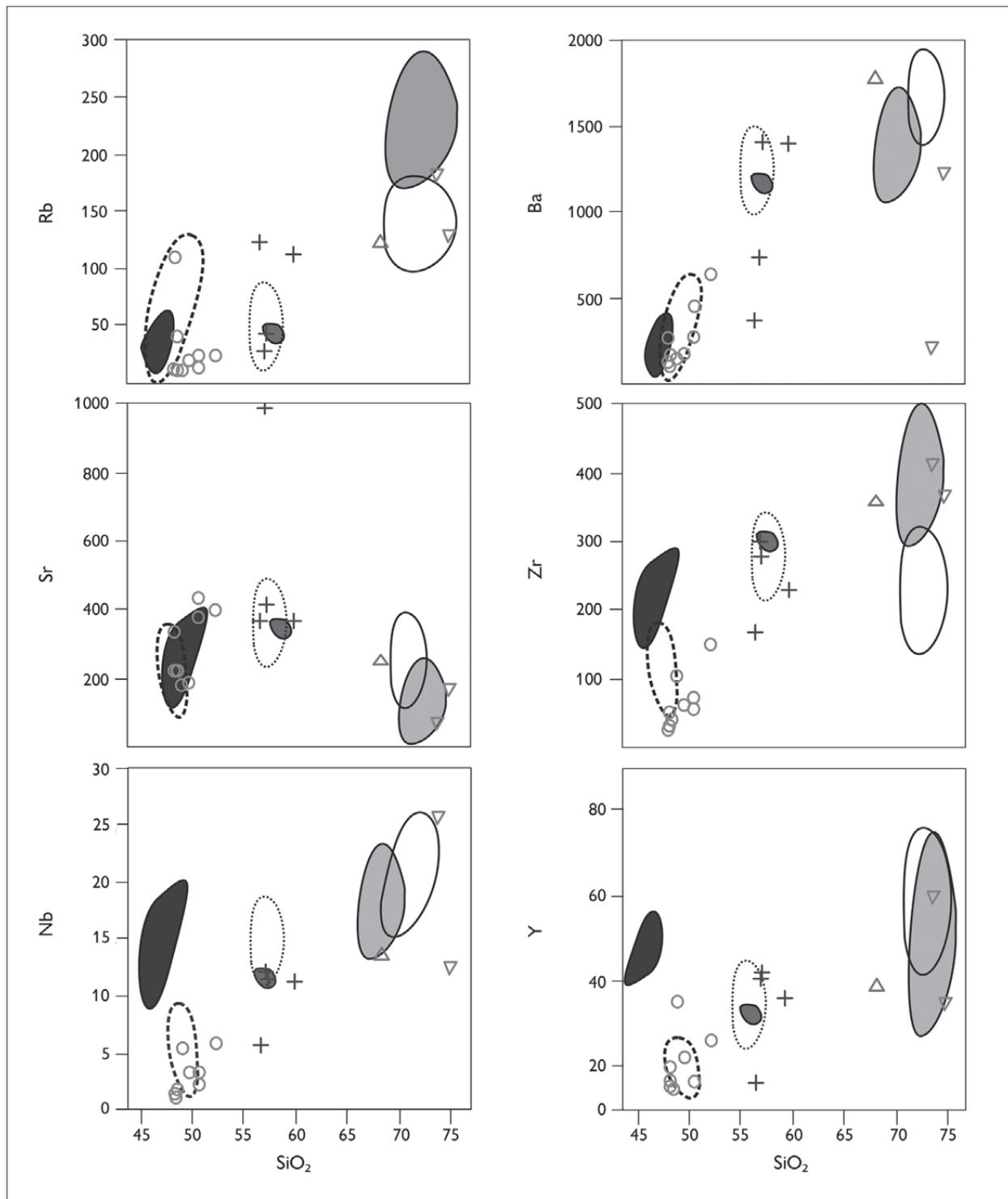


Figura 13. Diagramas de Harker para os diques da região de Água Azul do Norte mostrando o comportamento dos elementos-traço (ppm) em relação a SiO<sub>2</sub> (percentagem em peso). Legenda como na Figura 12.

Tabela 4. Composições químicas dos diques da região de Água Azul do Norte, Província Carajás. Legendas: razão molecular A/CNK =  $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$ ; A/NK =  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$ ; LOI = Loss on ignition (perda ao fogo);  $Fe_2O_3$  = ferro total calculado como ferro férrico; #mg = razão molecular Mg/(Mg+Fe);  $FeO_4$  =  $FeO+0,8995*Fe_2O_3$ ; razões  $Fe_2O_3/FeO = 0,2$ -basaltos; 0,35-andesitos; 0,5-riolitos, segundo Middlemost (1989).

Rochas	Diabásio										Andesito			Riolito	Álcali-feldspato 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> (% wt)	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



(Conclusão)

Tabela 4.

Rochas	Diabásio										Andesito				Riolito	Álcali-feldspato 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
	ETR (ppm)															
La	5	3	4	7	10	7	14	10	27	22	55	53	48	69	107	64
Ce	11	6	8	13	24	15	28	22	58	46	112	109	98	133	249	135
Pr	1	1	1	2	3	2	3	3	7	5	12	12	11	14	24	14
Nd	6	4	4	7	15	8	11	9	25	20	49	47	40	50	83	52
Sm	2	1	1	1	4	2	2	2	5	4	8	8	7	9	15	9
Eu	1	0	1	1	1	1	1	1	2	1	2	2	2	2	0	1
Gd	3	2	2	2	5	3	3	2	5	3	8	8	7	7	12	7
Tb	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	1
Dy	3	2	3	3	6	4	3	3	5	3	7	7	6	7	11	6
Ho	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	2	1	2	3	1
Er	2,2	1,8	2,1	1,8	4,4	2,3	1,8	1,9	3,2	1,6	4,7	4,5	4,0	4,3	6,7	3,8
Tm	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,4	0,3	0,2	0,5	0,3	0,7	0,6	0,6	0,7	1,1	0,6
Yb	2,2	1,6	2,0	1,6	3,4	2,4	2,0	1,8	2,8	1,8	4,3	4,2	3,7	3,8	6,2	3,5
Lu	0,4	0,3	0,4	0,3	0,6	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,7	0,7	0,6	0,6	1,1	0,6
ΣETR	40,1	24,0	29,4	39,4	80,8	47,3	70,1	56,5	140,7	108,6	267,3	261,0	230,7	304,4	520,4	298,3
(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
FeO <sub>t</sub>	11,4	10,0	10,3	9,20	12,70	11,50	8,20	8,30	12,50	6,70	14,10	13,40	9,30	4,90	2,60	2,80
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



Diagramas geoquímicos de variações e de razões entre elementos-traço e  $\text{SiO}_2$  são mostrados na Figura 14. O diagrama  $A/\text{CNK}$  versus  $\text{SiO}_2$  apresenta *trend* positivo, enquanto o diagrama  $\# \text{mg}$  versus  $\text{SiO}_2$  é negativo no sentido diabásios-andesitos-riolitos 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.

### Comportamento dos Elementos Terras Raras

A Tabela 4 apresenta os dados analíticos normalizados segundo Boynton (1984) e as principais razões dos elementos terras raras (ETR) de cada tipo litológico (Figura 15).

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

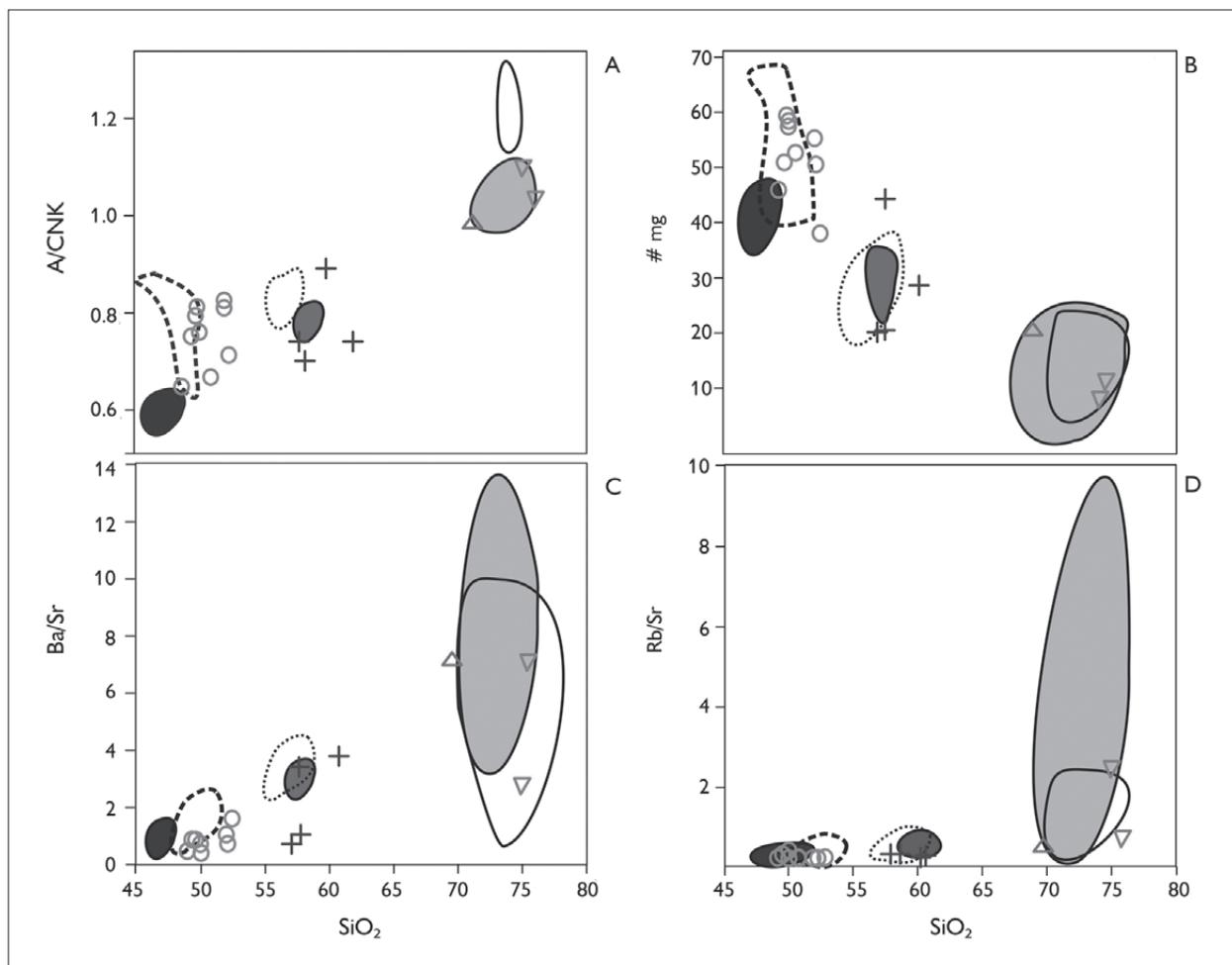


Figura 14. Diagramas geoquímicos de variações: A)  $A/\text{CNK}$  versus  $\text{SiO}_2$ ; B)  $\# \text{mg}$  versus  $\text{SiO}_2$  e razões de elementos-traço; C)  $\text{Ba}/\text{Sr}$  versus  $\text{SiO}_2$ ; D)  $\text{Rb}/\text{Sr}$  versus  $\text{SiO}_2$ . Legenda como na Figura 12.

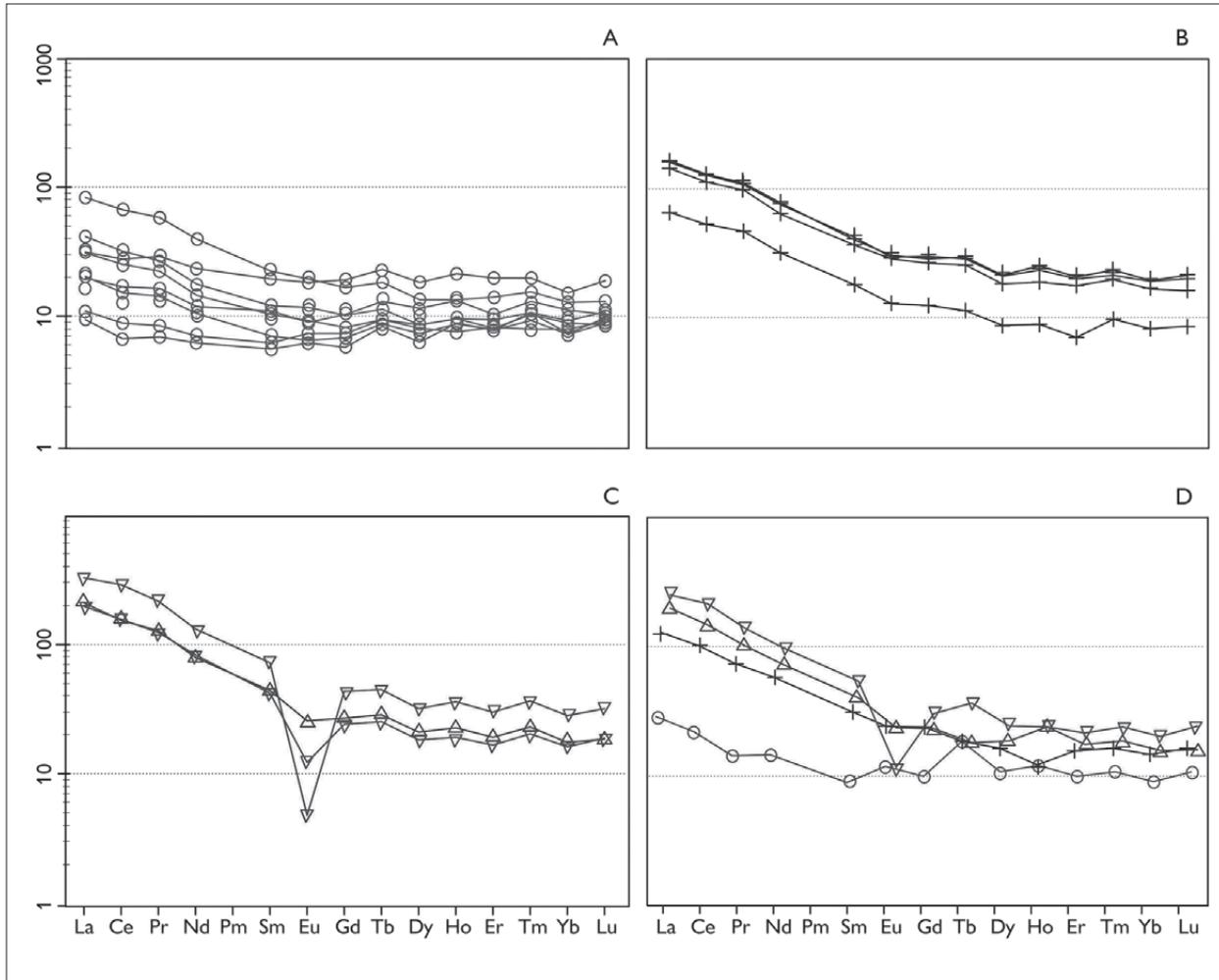


Figura 15. Padrões de ETR para os diques da região de Água Azul do Norte normalizados segundo Boynton (1984): A) diabásio; B) andesito; C) riolito e álcali-feldspato riolito; D) média dos litotipos deste estudo.

Os andesitos apresentam fracionamento dos ETR mais acentuado do 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 álcali-feldspato 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).

#### ESTUDO COMPARATIVO COM OUTROS DIQUES DO DRM

Os diques de Água Azul do Norte são comparados geoquimicamente com outros diques ocorrentes nas regiões de Rio Maria (Silva Jr. *et al.*, 1999) e Bannach (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 (Figura 10A). Os diagramas AFM (Irvine & Baragar, 1971) e catiônico (Jensen, 1976) confirmam o caráter tholeítico dos diques de Água Azul do Norte e aqueles das regiões de Rio Maria e Bannach (Figuras 10B e 11A).

A mesma similaridade é observada no diagrama de Shand (1950), que indica o grau de aluminosidade de rochas ígneas (Figura 11B); 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 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 (Figuras 14C e 14D), com exceção da maior variação de Ba nos andesitos e álcali-feldspato riolito de Água Azul do Norte. As razões Rb/Sr e Ba/Sr reforçam as semelhanças entre os diques do DRM. O diagrama envolvendo #mg *versus* SiO<sub>2</sub> (Figura 14B) apresenta uma forte correlação negativa e mantém os *gaps* composicionais entre os litotipos, enquanto o diagrama A/CNK *versus* SiO<sub>2</sub> (Figura 14A) exibe uma correlação positiva.

A Figura 16 compara os padrões de fracionamento médios de ETR dos diques do DRM. Os diabásios de Água Azul do Norte são mais empobrecidos em ETR ( $\Sigma\text{ETR} = 58,69$ ) do que os diabásios de Rio Maria ( $\Sigma\text{ETR} = 66,68$ ) e de Bannach ( $\Sigma\text{ETR} = 131,9$ ).

Entretanto, mostram padrão de fracionamento sub-horizontal similar ao dos diabásios de Bannach, com razão (La/Yb)<sub>N</sub> média de 2,89 contra 2,88. Os diabásios de Rio Maria mostram fracionamento mais acentuado dos ETR, com razão (La/Yb)<sub>N</sub> de 6,99. As anomalias de Eu para os diabásios de Água Azul do Norte são inexistentes (Eu/Eu\* = 1,0), e desprezíveis (Eu/Eu\* = 0,93) e fracas (Eu/Eu\* = 0,74) para os diabásios de Bannach e Rio Maria, respectivamente.

Os diques de andesito são mais fracionados do que os diabásios. Em Água Azul do Norte, a razão (La/Yb)<sub>N</sub> 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)<sub>N</sub> de 12,08 e 11,44, respectivamente. Os diques de riolito de Rio Maria mostram padrão mais fracionado, com razão (La/Yb)<sub>N</sub> de 21,99. As anomalias negativas de Eu são de 0,74 para o riolito e de 0,23 para os álcali-feldspato 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.

## GEOCRONOLOGIA

A amostra MC-95b é representativa do dique de álcali-feldspato riolito que secciona rochas arqueanas da Suíte Guarantã (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 <sup>204</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb inferiores a 0,0004 e uma idade média de 1874,7 ± 3,0 Ma, interpretada como idade de cristalização da rocha (Tabela 5).



Tabela 5. Resultados isotópicos obtidos pelo método de evaporação do Pb em monocristais de zircão do dique de álcali-feldspato riolito (MC-95b) de Água Azul do Norte. 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.

Zircão	Temperatura	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
		122/310	Idade média =						1874,7	3,0

## DISCUSSÃO

### 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, compostas essencialmente por plagioclásio, piroxênio e anfíbólio. A presença de magnetita e titanomagnetita como principais minerais acessórios reflete os altos teores de  $\text{FeO}_t$  nesses diques. Os andesitos, em geral, são porfíricos, compostos essencialmente por plagioclásio, anfíbólio, quartzo e raramente álcali-feldspato. Assim como nos diabásios, magnetita e titanomagnetita são os principais minerais acessórios; entretanto a presença de apatita nos andesitos é mais frequente. Riolito e álcali-feldspato riolito são rochas porfíricas, compostas essencialmente por álcali-feldspato, 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 álcali-feldspato 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 álcali-feldspato riolito poderiam ter evoluído por este processo; tais diques provavelmente têm sua origem associada aos granitos anorogênicos do DRM, onde os dados geocronológicos de ambos reforçam essa teoria. 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.

## GEOCRONOLOGIA 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.

## 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, FeO<sub>t</sub> e Ba. Riólitos e álcali-feldspato riólitos mostram boa correlação em quase todos os elementos e tendem a se superpor nos dígramas 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 do que os de Rio Maria, porém são mais empobrecidos em ETR do 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 álcali-feldspato 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 álcali-feldspato 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<sub>2</sub> > 2%) e com baixo Ti (TiO<sub>2</sub> < 2%). Os diques de baixo Ti, toleíticos e enriquecidos em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 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<sub>2</sub>; os diques de Água Azul do Norte possuem conteúdos de TiO<sub>2</sub> < 2% e são classificados como de baixo Ti, enquanto os das regiões de Rio Maria (Silva Jr. *et al.*, 1999) e Bannach (Ferreira, 2009) apresentam teores de TiO<sub>2</sub> superiores a 2% e se enquadram na categoria de alto Ti, segundo Rivalenti *et al.* (1998).

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; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (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 Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (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, Belém.

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. **Boletim de Resumos Expandidos do Simpósio de Geologia da Amazônia** 4: 299-301.

BOYNTON, W. V., 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P. HENDERSON (Ed.): **Rare earth element geochemistry**: 63-114. Elsevier (Developments in Geochemistry, v. 2), Amsterdam.

COSTA, H. N. S., 2012. **Petrografia e geocronologia de diques intermediários a félsicos da região de Água Azul do Norte, SE do cráton Amazônico**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.

DALL'AGNOL, R., H. T. COSTI & A. A. S. LEITE, 1997. Rapakivi granites from Brazil and adjacent countries. **Abstracts of International Symposium on Granites and Associated Mineralizations** 2: 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** 2: 13.

DALL'AGNOL, R., N. P. TEIXEIRA, O. T. RÄMÖ, 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(1-4): 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**: 1-55. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.

GASTAL, M. C. P., 1987. **Petrologia do Maciço Granítico Musa, Sudeste do Pará**: 1-316. Dissertação (Mestrado em Petrologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Belém.

GASTAL, M. C. P., M. J. B. MACAMBIRA, H. MEDEIROS & R. DALL'AGNOL, 1987. Idades e geoquímica isotópica Rb/Sr do Granito Musa e do Granodiorito Rio Maria, Amazônia Oriental. **Geochimica Brasiliensis** 1(2): 247-259.

GAUDETTE, H. E., J. M. LAFON, M. J. B. MACAMBIRA, C. A. V. MOURA & T. SCHELLER, 1998. Comparison of single filament Pb evaporation/ionization zircon ages with conventional U-Pb results: examples from the Precambrian of Brazil. **Journal of South American Earth Sciences** 11(4): 351-363.

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.
- JENSEN, L. S., 1976. **A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks**. Ontario Division of Mines (Miscellaneous Paper 66), Ontario.
- KOBER, B., 1986 Whole-grain evaporation for 207Pb/206Pb-age investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source. **Contributions to Mineralogy and Petrology** 93(4): 482-490.
- LEBAS, 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** 27(3): 745-750.
- 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.
- LE MAITRE, R. W. (Ed.), 2002. **Igneous rocks: a classification and glossary of terms**: 1-193. Cambridge University Press, London.
- 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 em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- MIDDLEMOST, E. A. K., 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks. **Chemical Geology** 77(1): 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 sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences** 27(2): 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** 43(4): 235-265.
- RODRIGUES, P. R. S., 2013. **Petrografia e geocronologia de Diques Máficos e Félsicos da região de Água Azul do Norte – Ourilândia do Norte, Província Carajás, SSE do Pará**. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- ROLLINSON, H. R. 1993. **Using geochemical data: evaluation, presentation, and interpretation**: 1-352. Longman, New York.
- 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**: 1-123. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- 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): 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. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 36(6): 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, 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. **American Mineralogist** 95: 185-187.



