

Trondhjemitos da área de Nova Canadá: novas ocorrências de associações magmáticas tipo TTG no Domínio Carajás

Trondhjemites from Nova Canadá area: new occurrence of TTG-type magmatic associations in the Carajás Domain

Pablo José Leite-Santos¹, Davis Carvalho de Oliveira¹

¹Universidade Federal do Pará. Belém, Pará, Brasil

Resumo: Os estudos geológicos, petrográficos e litogeoquímicos realizados na região de Nova Canadá, porção sul do Domínio Carajás, permitiram a individualização de associações TTG a partir do que era considerado Complexo Xingu. São duas variedades de biotita-trondhjemitos, variavelmente deformados, onde as rochas da porção norte são mais enriquecidas em quartzo modal e em Na₂O. As rochas da porção sul apresentam muscovita, saussuritização do plagioclásio, textura equigranular média e discreta deformação. São mais enriquecidas em Fe₂O₃, MgO, TiO₂, CaO, Zr, Rb, e têm razão Rb/Sr mais elevada em relação aos trondhjemitos da porção norte; seus conteúdos de (Fe₂O₃ + MgO + TiO₂) também são mais elevados, como reflexo de seu conteúdo médio de biotita maior (> 3,0%). Os trondhjemitos de Nova Canadá mostram afinidade com os TTG arqueanos da série cálcio-alkalina de alto Al₂O₃, Na₂O e baixo K₂O. Exibem ainda padrões fracionados de ETR, com variações nos conteúdos de ETRP, além da ausência de anomalias negativas de Eu e Sr, e baixos conteúdos de Y e Yb. Os dois grupos de trondhjemitos distinguidos neste trabalho mostram ainda claras afinidades geoquímicas tanto com as associações trondhjemíticas do Domínio Rio Maria quanto com aquelas da região de Canaã dos Carajás.

Palavras-chave: TTG. Geoquímica. Arqueano. Domínio Carajás. Nova Canadá. Cráton Amazônico.

Abstract: Geological, petrographical and litogeochemical studies data obtained in the southern portion of Carajás Domain, ally to the petrographic and geochemical data allowed the individualization of TTG-type associations, previously correlated to the Xingu Complex. Were recognized two types of deformed biotite trondhjemite: those from the northern portion are more enriched in Na₂O and modal quartz, whereas the rocks from the southern area are characterized by the presence of muscovite, plagioclase saussuritization, medium equigranular texture and discrete deformation features. The trondhjemites of the southern portion are enriched in Fe₂O₃, MgO, TiO₂, CaO, Zr, Rb, and higher Rb/Sr ratio when compared to those of the northern part; they show higher (Fe₂O₃ + MgO + TiO₂) contents as well, due to their biotite contents (> 3.0%). Both types of trondhjemite show affinity with high-Al and Na₂O and low-K calc-alkaline TTG series. They exhibit fractionated REE patterns, with variations in the heavy REE contents and strong light REE enrichment, besides the absence of the negative Eu and Sr anomalies, and low contents of Yb and Y. The two groups of trondhjemites distinguished in this work also show geochemical affinities with trondhjemite associations of the Mesoproterozoic Rio Maria Domain and the Canaã dos Carajás area.

Keywords: TTG. Geochemistry. Archean. Carajás Domain. Nova Canadá. Amazonian Craton.

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

Autor para correspondência: Pablo José Leite-Santos. Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociência. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica. Rua Augusto Corrêa, 1 – Guamá. Belém, PA, Brasil. CEP 66075-110 (pablosleite@hotmail.com).

Recebido em 28/04/2014

Aprovado em 25/12/2014

Responsabilidade editorial: Fernando Jacques Althoff



INTRODUÇÃO

Estima-se que no mínimo 60% da crosta continental da Terra foram formados ainda no Arqueano por retrabalhamento de uma crosta oceânica primitiva, originando sequências tonalito-trondhjemito-granodiorito (TTG), as quais constituem em torno de 80% dos terrenos arqueanos ainda preservados (Taylor & McLennan, 1995; Rollinson, 2010). Tais rochas, segundo alguns autores (Barker, 1979; Polat, 2012), apresentam as seguintes características: caráter ácido a intermediário (geralmente $> 65\%$ SiO_2); altas razões $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ($> 1,5$), La_N/Yb_N normalizados a partir da composição do condrito, e Sr/Y ; baixos a moderados conteúdos de *large-ion lithophile elements* (LILE), Yb_N e Y ; anomalias negativas de Ti-Nb-Ta; e ausência de enriquecimento em K nos membros mais félsicos. Estas podem ainda ser divididas, de acordo com seu conteúdo de alumínio, em subgrupos de alta e baixa alumina (Barker & Arth, 1976).

Rochas granitoides com alto alumínio são caracterizadas por apresentarem teores de pelo menos 15% de Al_2O_3 , conteúdo de $\sim 70\%$ de SiO_2 e, ainda, pelos elevados conteúdos de Sr e Eu, forte fracionamento dos ETR (baixo conteúdo de ETRP) e altas razões Sr/Y . Essas características sugerem a presença de granada e anfibólio e ausência de plagioclásio como fases residuais ou fracionadas durante a gênese dessas rochas. Os TTG de alto alumínio são dominantes nos crátons arqueanos (Martin, 1994) e foram originados em condições de alta pressão (Champion & Smithies, 2003). Seguindo os mesmos critérios observados no subgrupo de alto alumínio, os TTG com baixo alumínio são caracterizados por baixos conteúdos de Sr e Eu, menor fracionamento de elementos ETRP e baixa razão Sr/Y . Essas feições sugerem não haver participação efetiva de granada no processo de formação desses magmas, sendo este controlado pela presença de plagioclásio como fase fracionada ou residual (Champion & Smithies, 2003).

A origem das sequências TTG é explicada em diversos modelos genéticos, listados por Martin (1993): (i) cristalização fracionada de um magma basáltico; (ii) fusão parcial direta do manto; (iii) fusão parcial de grauvacas maduras; (iv) fusão

parcial de eclogito ou granulito básico; (v) fusão parcial de anfibolito com granada. Há modelos ainda mais específicos, em petrologia experimental, titulados por esse mesmo autor, mas que não serão abordados neste tópico.

A área de Nova Canadá, porção NE do município de Água Azul do Norte (Figura 1B), está inserida no contexto geológico da porção sul do Domínio Carajás, ou antigo Subdomínio de Transição, este último, definido por Feio (2011), localizado entre este e o Domínio Rio Maria. Nesta região, os trabalhos de mapeamento geológico mostraram que o Complexo Xingu, de Silva *et al.* (1974), é formado por granitoides de naturezas distintas, marcados por variados graus de deformação/recristalização, gerados no Meso e Neoarqueano ($\sim 2,88\text{-}2,75$ Ga – Oliveira *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2010). A partir deste complexo, foram individualizados, na área, leucogranitos arqueanos com alto Ba/Sr e de alto-K, restos de uma crosta trondhjemítica, além de pequenos corpos de anfibólio-biotita-granito foliado (Leite-Santos & Oliveira, dados não publicados).

Os trondhjemitos arqueanos de Nova Canadá necessitam de estudos de detalhe que permitam sua melhor caracterização e conseqüente individualização, pois até então estas rochas eram indiscriminadamente incluídas no contexto geológico do Complexo Xingu. Além disso, é importante verificar se elas têm relação com os típicos TTG arqueanos ou se fazem parte de associações arqueanas distintas. Neste trabalho, serão abordados os estudos sobre a geologia, petrografia e geoquímica destes trondhjemitos, aliados a estudos geoquímicos comparativos com unidades afins e já estudadas em outras regiões da Província Carajás, com o intuito de definir a natureza e a origem dessas rochas e suas relações com outras adjacentes, contribuindo, dessa forma, para o melhor entendimento sobre sua posição no contexto evolutivo da referida província.

MATERIAIS E MÉTODOS

O mapeamento geológico foi realizado na escala 1:50.000, acompanhado de coleta sistemática de amostras para estudos petrográficos e geoquímicos. Adicionalmente, foi realizado

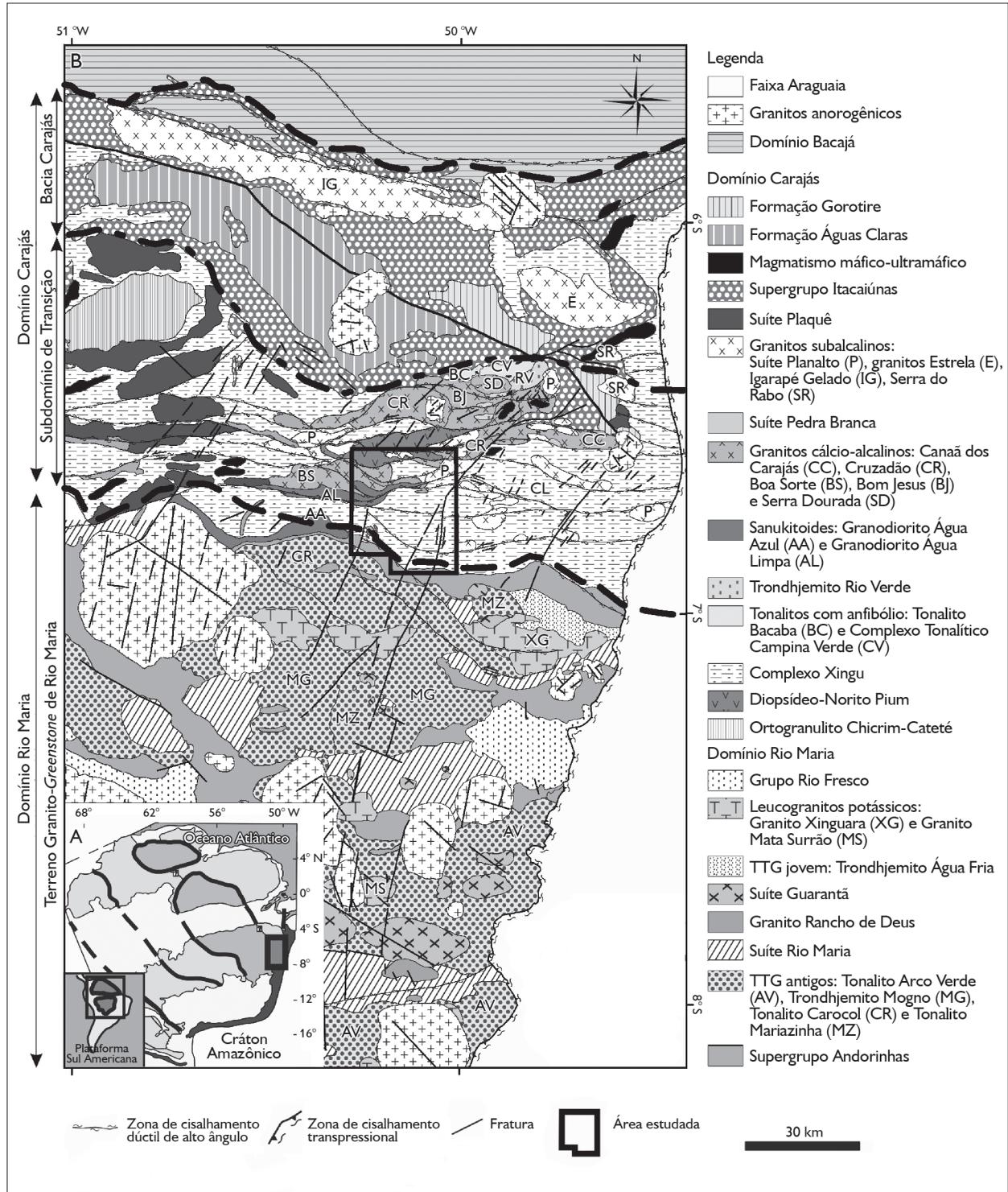


Figura 1. A) Localização da Província Carajás no Cráton Amazônico, modificado de Tassinari & Macambira (2004); B) mapa geológico da Província Carajás, modificado de Vasquez *et al.* (2008), Almeida *et al.* (2010), Feio *et al.* (2012), Gabriel & Oliveira (2013), Silva *et al.* (2014).

ainda exame analógico e digital de imagens de satélite (Landsat 7 e TM), mosaicos de radar (Shuttle Radar Topography Mission – SRTM) e dados aerogeofísicos, magnetométricos e gamaespectrométricos do Projeto Geofísico Brasil-Canadá (PGBC), obtidos a partir de linhas de voo espaçadas de 2 km e 150 m de altura, adquiridos entre 1974-1987. Os estudos realizados em microscópio petrográfico foram baseados em clássicos trabalhos reconhecidos na literatura para classificação de rochas, e envolveram: a) identificação e descrição sistemática dos minerais (Kerr, 1959; Deer *et al.*, 1992); b) estudo das texturas magmáticas, deformacionais e de alteração (Bard, 1980; MacKenzie *et al.*, 1982; Hibbard, 1995; Passchier & Trouw, 1996; Vernon, 2007); c) estimativa da ordem de cristalização dos minerais (Dall'Agnol, 1982; Hibbard, 1995; Oliveira, 2001); d) obtenção de composições modais (Chayes, 1956; Hutchison, 1974), com contador automático de pontos da marca Swift (≥ 2.000 pontos por amostra) e classificação das rochas conforme estabelecido pela International Union of Geological Sciences (IUGS) (Streckeisen, 1976; Le Maitre, 2002). A caracterização geoquímica foi feita com base nos procedimentos de Ragland (1989) e Rollinson (1993), avaliando os comportamentos dos elementos maiores, menores e traço em diagramas de variação clássicos propostos na literatura (Barker, 1979; Shand, 1950; Harker, 1965; O'Connor, 1965; Debon & Le Fort, 1983; Evensen *et al.*, 1978; Irvine & Baragar, 1971; Martin, 1994; De La Roche *et al.*, 1980; Cox *et al.*, 1979; Barker & Arth, 1976; Peccerillo & Taylor, 1976; Sylvester, 1989), e utilizando os campos de ocorrência de diversas associações magmáticas definidas em outras áreas da Província Carajás (Almeida *et al.*, 2011; Feio, 2011; Feio *et al.*, 2012), para estabelecer comparações e melhor caracterizar as unidades individualizadas, reconhecendo suas séries magmáticas, ambientes de formação e os processos que controlaram a evolução magmática destas rochas.

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

O Cráton Amazônico é subdividido em várias províncias geocronológicas (Tassinari & Macambira, 2004; Santos *et al.*,

2000; Figura 1A). Entre estas províncias, destaca-se a Província Carajás como a mais antiga (3,0-2,5 Ga), e detentora de grande potencial metalogenético, com destaque para mineralizações de ferro, ouro, manganês, níquel, cobre e estanho. Tassinari & Macambira (2004) incluíram a região de Carajás no contexto da Província Amazônia Central, enquanto Santos *et al.* (2000) consideraram que esta região é distinta em termos geológicos e geocronológicos desta última, e assumida como núcleo mais antigo e preservado do cráton. A Província Carajás (Figura 1B) pode ser dividida em dois domínios tectônicos principais, um mais antigo, denominado Domínio Rio Maria (3,0-2,86 Ga), e outro mais novo, denominado Domínio Carajás (2,76-2,55 Ga). O Domínio Carajás (Santos, 2003), onde se insere a área abordada nesta pesquisa, está localizado na porção norte da Província Carajás, e seus limites tectônicos setentrional e meridional são traçados, respectivamente, com os domínios Bacajá e Rio Maria. O limite entre os domínios Carajás e Rio Maria, discutido com base em dados geofísicos, coincidiria com uma descontinuidade regional aproximadamente EW ao norte de Sapucaia e a sul de Canaã dos Carajás. Diversos estudos sugerem a subdivisão da Província Carajás em outros dois blocos, denominados Bacia Carajás e Subdomínio de Transição (Dall'Agnol *et al.*, 1997, 2006; Feio *et al.*, 2012).

O magmatismo do Domínio Rio Maria é composto pelas associações *greenstone* do Supergrupo Andorinhas (Souza & Dall'Agnol, 1995; Souza *et al.*, 2001) e por uma diversidade de granitoides (Dall'Agnol *et al.*, 2006), similares àqueles descritos para clássicos terrenos arqueanos. Estes granitoides podem ser divididos em quatro grupos principais (Dall'Agnol *et al.*, 2006; Oliveira *et al.*, 2009; Almeida *et al.*, 2010, 2011): 1) Série TTG Antiga (2,98-2,93 Ga); 2) Suíte Sanukitoide Rio Maria e rochas associadas (2,87 Ga); 3) Série TTG Jovem (2,86 Ga); 4) leucogranitos potássicos de afinidade cálcio-alcálica (2,86 Ga). O estudo sobre os leucogranitos (Almeida *et al.*, 2010) permitiu o reconhecimento de leucogranodioritos-leucomonzogranitos com características geoquímicas ora similares aos granitoides TTG, ora semelhantes às rochas sanukitoides.

Este grupo de rochas foi incluso na Suíte Guarantã. Posteriormente, o terreno foi intrudido por plútons graníticos tipo A (1,88 Ga) e diques associados (Dall'Agnol *et al.*, 2005; Dall'Agnol & Oliveira, 2007).

O Domínio Carajás é caracterizado pelas associações metavulcanossedimentares neoarqueanas da Bacia Carajás e pelo embasamento mesoarqueano caracterizado por Ortogranulito Chicrim-Cateté (Vasquez *et al.*, 2008), Diopsídio-Norito Pium (Hirata *et al.*, 1982; Pidgeon *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2010), rochas mais antigas do Tonalito Bacaba (Moreto *et al.*, 2011), granitoides e gnaisses indiferenciados do Complexo Xingu (Machado *et al.*, 1991). No Neoarqueano, este domínio é caracterizado por intrusões da Suíte Intrusiva Cateté (Macambira & Vale, 1997), Suíte Pedra Branca (Sardinha *et al.*, 2004; Gomes & Dall'Agnol, 2007) e dos plútons das Suítes Plaquê e Planalto (Avelar *et al.*, 1999; Huhn *et al.*, 1999; Oliveira, 2003; Gomes, 2003; Sardinha *et al.*, 2004; Vasquez *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2010; Feio *et al.*, 2012). Posteriormente, este domínio foi afetado por intrusões paleoproterozoicas (1,88 Ga) de granitos tipo A, sendo que diques máficos-ultramáficos ocorrem associados a estas intrusões.

À exceção da área de Canaã dos Carajás (Feio *et al.*, 2012) e do entorno das minas do Sossego (Moreto *et al.*, 2011), há poucos dados publicados sobre o quadro geológico da porção sul do Domínio Carajás, e observa-se que, ao contrário do Domínio Rio Maria, rochas tonalíticas-trondhjemíticas, ou mesmo aquelas relacionadas à série TTG, são escassas em Carajás, enquanto intrusões graníticas são mais expressivas. Os dados discutidos neste trabalho indicam algumas discretas ocorrências de rochas trondhjemíticas arqueanas nos domínios dos leucogranitos. A síntese a seguir detalha o quadro geológico dos granitoides das regiões de Canaã dos Carajás e Água Azul do Norte.

ROCHAS TONALÍTICAS-TRONDHJEMÍTICAS DO DOMÍNIO CARAJÁS

A geologia do Domínio Carajás é marcada principalmente por volumosas intrusões graníticas, enquanto as rochas da série

TTG, ou associações tonalíticas-trondhjemíticas atípicas (por exemplo, os granitoides sódicos com alto Zr, Y e Ti; Gomes & Dall'Agnol, 2007), são menos frequentes. Os trabalhos anteriormente realizados na região de Canaã dos Carajás descrevem unidades tonalíticas-trondhjemíticas sem nenhuma relação com a clássica série TTG, como é o caso das rochas do Tonalito Bacaba, composto predominantemente por tonalitos que contém hornblenda e biotita em sua mineralogia, e que foram datados em 3.005 ± 8 Ma (Moreto *et al.*, 2011; Feio *et al.*, 2012); os últimos autores descrevem ainda as rochas do Complexo Tonalítico Campina Verde, caracterizado por duas associações litológicas distintas, formado por biotita \pm hornblenda-tonalitos a granodioritos com dioritos e monzogranitos subordinados, ambas deformadas com foliação orientada preferencialmente a E-W, e que estão em contato com rochas do Supergrupo Itacaiúnas e do Tonalito Bacaba. Geoquimicamente distintas dos típicos TTG arqueanos, as rochas desta unidade definem uma série cálcio-alcalina expandida, que foi datada em 2.872 ± 1 Ma e 2.850 ± 7 Ma; as rochas da Suíte Pedra Branca, caracterizadas por tonalitos e trondhjemitos fortemente deformados, mostrando bandamento magmático, estão intimamente associados às rochas da Suíte Planalto. Tratam-se de granitoides sódicos com ampla variação geoquímica, demonstrando afinidade preferencialmente com a série cálcio-alcalina, mas com algumas de suas rochas posicionando-se no campo da série toleítica e de baixo K_2O . Esta unidade foi datada em 2.765 ± 39 Ma (Sardinha *et al.*, 2004) e 2.750 ± 5 Ma (Feio *et al.*, 2012), e considerada distinta das típicas associações TTG, em função dos altos conteúdos de Zr e Y (Gomes & Dall'Agnol, 2007). Rochas afins dos clássicos TTG arqueanos também foram identificadas nesta região, como é o caso do Trondhjemito Rio Verde, caracterizado por rochas cálcio-alcalinas de médio a baixo-K, com bandamento composicional, datadas em 2.929 ± 3 Ma e 2.868 ± 4 Ma (Feio *et al.*, 2012).

Na porção sul do Domínio Carajás, rochas tonalíticas-trondhjemíticas intrudidas por corpos leucograníticos têm sido descritas próximo à cidade de Água Azul do Norte (Gabriel, 2012) e na área de Vila Nova Canadá

(Oliveira *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2010) nos domínios de leucogranitos. Na área de Vila Jussara, a sul da cidade de Canaã dos Carajás, diversos autores descrevem volumosas ocorrências de tonalitos-trondhjemitos fortemente recristalizados, contendo biotita e hornblenda como as principais fases máficas (Oliveira *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2010; Silva, 2013). Estudos geocronológicos preliminares sugerem idade média de $2.875 \pm 1,3$ Ma para estes litotipos (Santos *et al.*, 2010; Silva, 2013).

GEOLOGIA DA ÁREA DE NOVA CANADÁ

O mapeamento geológico em escala de detalhe (1:50.000) e os estudos petrográficos e geoquímicos realizados na área de Nova Canadá permitiram reconhecer diversas unidades, com aspectos geológicos, composicionais e texturais distintos; são elas: a) associações leucogranodioríticas-graníticas meso e neoarqueanas, denominadas de Leucogranodiorito Nova Canadá e Leucogranito Velha Canadá, respectivamente (Leite-Santos & Oliveira, dados não publicados); b) Granito Boa Sorte (Rodrigues & Oliveira, 2014) e Granodiorito porfírico de afinidade sanukitoide (Gabriel & Oliveira, 2013), ambos de idade mesoarqueana ($\sim 2,87$ Ga); c) Trondhjemito Colorado, com idade mesoarqueana (2,87 Ga, Silva *et al.*, 2014), que, mais especificamente nesta área de trabalho, ocorre como biotita-trondhjemitos indiferenciados com variados graus de deformação e significativas variações em seus aspectos texturais e grau de recristalização; d) hornblenda-biotita-granitos foliados tipo Planalto; e) rochas supracrustais correlacionadas ao *Greenstone Belt* Sapucaia; f) rochas máficas relacionadas ao Diopsídio-Norito Pium, de idade neoarqueana (2,74 Ga, Santos *et al.*, 2013), e diques de idade indefinida. Neste trabalho, serão abordados apenas os trondhjemitos indiferenciados que ocorrem nas porções central e oeste da área estudada (ver mapa geológico da Figura 2).

As informações de campo sugerem a existência de duas variedades de rochas trondhjemíticas (trondhjemitos indiferenciados, conforme a Figura 2), ambas ocorrendo como corpos estreitos, com formas alongadas segundo o *trend* E-W, com inflexões para NW-SE e NE-SW, que

são interpretados como restos de uma crosta encaixante. A primeira variedade, restrita à porção norte da área, é caracterizada por biotita-trondhjemitos (Figura 3), com evidências de injeções leucograníticas e feições que sugerem fusão *in situ* (migmatização? – Figura 4A). Em geral, este tipo ocorre como corpos lenticulares de pequenas dimensões (até 4 km), mostrando uma forte recristalização e o desenvolvimento de uma foliação tectônica de baixo ângulo, com orientação E-W e mergulho preferencial para sul. Em zonas onde a deformação foi mais intensa, observa-se o desenvolvimento de um bandamento composicional. As ocorrências de bandas de cisalhamento e de dobras de arrasto/intrafoliais revelam que estas rochas foram afetadas por mais de um evento deformacional (Figura 4A). É comum também a ocorrência de diques máficos seccionando esta unidade.

A segunda variedade de trondhjemitos (Figura 3) é caracterizada por rochas de textura equigranular média a fina (Figura 4B), de coloração cinza-escuro e deformação incipiente, com desenvolvimento de uma foliação tectônica E-W com mergulho de baixo ângulo para S. Trata-se de muscovita-biotita-trondhjemitos que ocorrem nos domínios do Leucogranodiorito Nova Canadá, na porção sul da área. Diferentemente da primeira variedade, as relações de contato com as demais unidades não são claras e ocorrem na forma de grandes blocos isolados, os quais, além de produzir corpos mais espessos, são desprovidos de bandamentos, dobras e injeções leucograníticas (Figura 4B).

As diferenças texturais/estruturais observadas entre as duas variedades são corroboradas pelos dados petrográficos e geoquímicos apresentados a seguir e, apesar destas diferenças, elas serão descritas em conjunto, uma vez que não divergem composicionalmente.

PETROGRAFIA

COMPOSIÇÕES MODAIS E CLASSIFICAÇÃO

Os trondhjemitos da área de Nova Canadá são caracterizados por rochas faneríticas com grau de anisotropia variável,



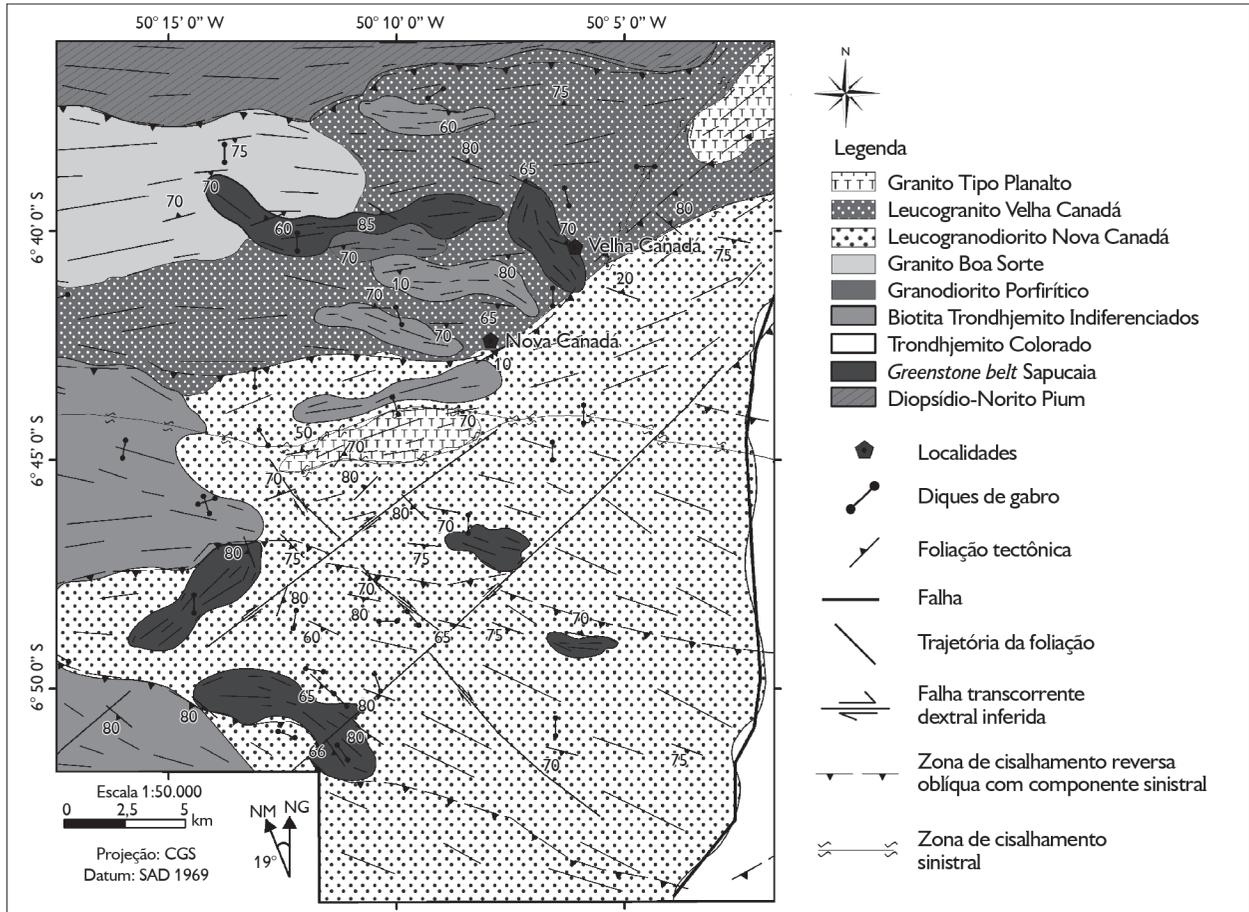


Figura 2. Mapa geológico da área de Nova Canadá no Domínio Carajás.

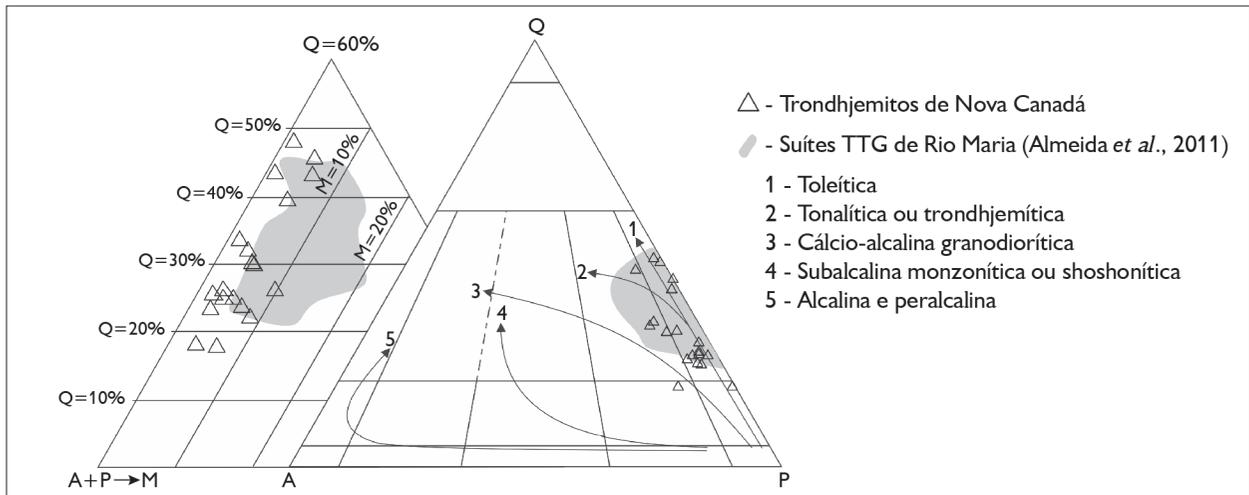


Figura 3. Diagramas modais Q-A-P e Q-(A+P)-M (Streckeisen, 1976) para as rochas trondhjemíticas de Nova Canadá. Os números de 1 a 5 representam *trends* evolutivos das séries granitoides (Lameyre & Bowden, 1982; Bowden *et al.*, 1984).

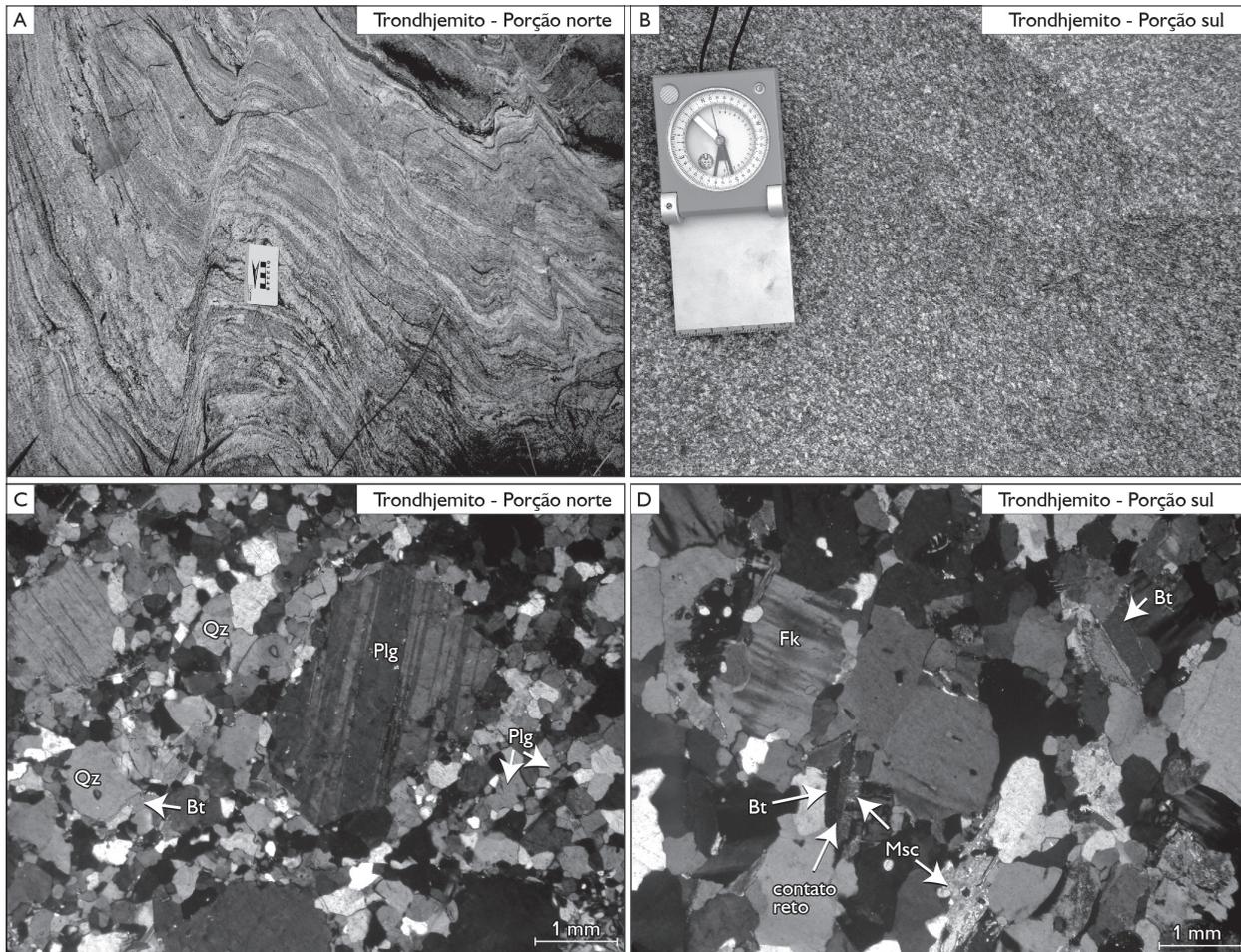


Figura 4. Aspectos texturais das rochas trondhjemíticas da área de Nova Canadá: A) afloramento dos trondhjemitos da porção norte mostrando o desenvolvimento de um bandamento composicional afetado por bandas de cisalhamento; B) bloco mostrando aspecto equigranular e moderadamente deformado dos trondhjemitos da porção sul da área de estudo; C) aspecto microscópico destes trondhjemitos mostrando o desenvolvimento de porfiroclastos de plagioclásio (Plg) imersos em uma matriz recrystalizada formada predominantemente por finos cristais de quartzo (Qz) e, por vezes, por biotita (Bt); D) porções mais preservadas e menos recrystalizadas das rochas do trondhjemito da parte sul da área, onde se observa a ocorrência de cristais de feldspato potássico (Fk) intersticiais ainda preservados, associados a finos cristais de muscovita (Msc) e plagioclásio saussuritizado.

evidenciado principalmente pelo alinhamento dos minerais máficos, e menos frequentemente pelo bandamento composicional e foliação milonítica. São rochas hololeucocráticas com valores médios de minerais máficos em torno de 5,4%, de textura equigranular média a fina e coloração cinza-esbranquiçada a cinza-escura. São compostas por quartzo (~33,0%), plagioclásio (54,3%), e algumas dessas rochas, principalmente aquelas descritas na porção sul da área, podem conter K-feldspato acima

de 2,0% (Tabela 1). A biotita é o único mineral varietal (~4,8%) representando a fase acessória primária, além de proporções acidentais de minerais opacos, titanita, allanita e muscovita, com teores muito baixos (< 0,6% - traço). As fases secundárias estão associadas à descalcificação do plagioclásio, originando uma paragênese formada por sericita + epidoto + muscovita + escapolita. Foram selecionadas dezenove amostras para análise modal, com contagem média de 1.800 pontos (Tabela 1).

Tabela 1. Composições modais dos trondhjemitos de Nova Canadá. Legendas: 0 = mineral não observado; A = K-feldspato; P = Plagioclásio; m = magmático; s = secundário; * = recalculado a 100%.

Unidade	Biotita-Trondhjemito																		
	Biotita-Trondhjemito - Porção Sul					Biotita-Trondhjemito - Porção Norte													
Amostra Minerais	PDE 15D	PDE 19	PDR 27DI	PDE 15E	PDR 25	PDR 24	PDR 23A	PDR 14	PDE 22	PDE 34	PDR 11	PDE 65	PDR 09	ADK 80	ADK 59	ADK 10	ADK 57	ADK 88	PDR 15
Quartzo	17,60	22,00	24,90	25,90	18,10	23,20	23,50	24,90	25,10	26,10	29,50	30,20	31,80	33,30	39,20	42,90	43,30	44,60	47,80
Plagioclásio	64,90	64,10	66,20	61,40	77,70	69,50	63,60	69,20	66,30	67,20	57,00	59,70	54,60	55,80	53,80	44,10	55,20	47,80	48,80
K-feldspato	10,80	4,50	3,40	2,10	0,50	4,20	6,00	1,80	5,00	3,20	7,20	5,20	9,90	8,80	1,50	6,20	0,20	0,60	1,70
Biotita	5,50	7,90	3,60	8,50	3,60	2,60	6,80	3,80	2,00	3,10	5,10	4,30	3,10	1,70	3,90	5,80	1,00	4,90	1,30
Anfibólio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Titanita	0,10	0	0,20	0,10	0	0	0	0	0,10	0	0	0	0	0	0,10	0,20	0	0,20	0
Opaco	0	0	0,20	0	0	0,20	0	0	0,10	0,10	0	0,50	0	0	0,60	0	0	0	0,10
Zircão	0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,30	0	0	0	0	0	0
Allanita	0	0,10	0,60	0,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0	0,10	0	0
Epidoto m	0,10	0,10	0,50	1,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Epidoto s	0	0	0,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,30	0,50	0	0	0
Muscovita m	0,80	0,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Muscovita s	0	0,50	0	0,40	0	0	0	0	1,30	0	0	0	0	0	0,40	0	0,20	0,80	0
Clinozoisita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,90	0	0	0	0	0	0	0	0
Apatita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0
Clorita	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,10	0	0	0	0
Escapolita	0	0	0	1,10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,30	0	0,60	0
A+P	75,70	68,60	69,60	63,50	78,20	73,70	69,60	71,00	71,30	70,40	64,20	64,90	64,50	64,60	55,30	50,30	55,40	48,40	50,50
Quartzo*	18,86	24,28	26,35	28,97	18,80	23,94	25,24	25,96	26,04	27,05	31,48	31,76	33,02	34,01	41,48	46,03	43,87	47,96	48,63
Plagioclásio*	69,56	70,75	70,05	68,68	80,69	71,72	68,31	72,16	68,78	69,64	60,83	62,78	56,70	57,00	56,93	47,32	55,93	51,40	49,64
K-feldspato*	11,58	4,97	3,60	2,35	0,52	4,33	6,44	1,88	5,19	3,32	7,68	5,47	10,28	8,99	1,59	6,65	0,20	0,65	1,73
Maficos	6,50	8,40	5,10	9,80	3,60	2,80	6,80	3,80	2,20	3,20	6,00	4,80	3,40	1,70	4,70	6,00	1,10	5,20	1,40
Total	2,000	1,800	2,000	1,800	1,600	1,800	2,000	1,800	2,000	1,800	1,700	2,000	2,000	1,800	2,000	1,287	2,000	1,800	1,800



Em geral, as análises plotam, em diagramas Q-A-P e Q-(A+P)-M (Streckeisen, 1976; Figura 3), no campo dos tonalitos, entretanto seus conteúdos modais de minerais máficos, sempre em torno de 5,4%, nos permitem classificar essas rochas como trondhjemitos, de acordo com os critérios de Le Maitre (2002).

Associações trondhjemíticas afins de TTG são pouco descritas no Domínio Carajás e, por essa razão, comparações baseadas em dados modais são mais facilmente estabelecidas com as rochas do Domínio Rio Maria (Figura 3), onde Almeida *et al.* (2011) fazem uma síntese sobre rochas da série TTG, que perfazem pelo menos 70% do embasamento daquele domínio. Os conteúdos modais de quartzo e feldspatos das unidades de Nova Canadá e do Domínio Rio Maria são muito próximos, salvo algumas amostras da primeira, que apresentam teores de quartzo inferiores a 20%. Os teores de minerais máficos das rochas de Nova Canadá são inferiores a 10%, o que implica classificá-las como trondhjemitos. Similarmente ao que foi definido para os TTG de Rio Maria, aqueles de Nova Canadá mostram comportamento análogo aos da série toleítica e tonalítica ou trondhjemítica de Lameyre & Bowden (1982) e Bowden *et al.* (1984) (Figura 3).

ASPECTOS TEXTURAIIS

O plagioclásio pode ocorrer como finos cristais subautomórficos, raramente oclares e com dimensões de ~1,3 mm, ou ainda como porfiroclastos com bordas recristalizadas, cujas dimensões atingem até 4,0 mm (Figura 4C). Esses cristais têm contornos e contatos irregulares entre si e com os demais minerais, por vezes curvos com quartzo. O maclamento dos cristais de plagioclásio é do tipo albita e albita-periclina, e estes estão fracamente descalcificados, com seus núcleos parcialmente substituídos por sericita ± muscovita. Inclusões de biotita, titanita, allanita e, mais raramente, quartzo podem ocorrer nas bordas mais sódicas destes cristais. Quando presente, o K-feldspato é intersticial (Figura 4D), e os aspectos texturais sugerem origem tardia, tendo sido concentrado nas etapas finais de cristalização; o quartzo é xenomórfico, geralmente encontra-se recristalizado

ou fitado segundo a foliação da rocha (*quartz ribbon*), com dimensões que variam entre 0,1-3,2 mm (Figuras 4C e 4D). Seus contornos e contatos são irregulares entre si e com os demais minerais. A extinção é moderadamente ondulante, e raramente estes podem estar fraturados ou ainda conter inclusões de biotita e minerais opacos. A biotita é subautomórfica a xenomórfica, com tamanhos entre 0,1-0,5 mm, e mantém contatos retos entre si e com epidoto. Inclusões de epidoto e minerais opacos também são comuns.

Entre os minerais acessórios primários, ocorrem cristais subautomórficos de minerais opacos, de tamanhos ~0,1-0,4 mm, que podem estar associados à titanita e ao epidoto, formando agregados máficos. A titanita ocorre com cristais subautomórficos, com dimensões entre 0,1-0,9 mm, que formam agregados, sendo que suas relações texturais com os minerais opacos sugerem origem tardi-magmática para a mesma. Os cristais de zircão são finos, automórficos e de dimensões entre 0,1-0,2 mm. Os cristais de epidoto são finos, subautomórficos, com dimensões entre 0,1-0,5 mm e geralmente ocorrem associados aos cristais de allanita, clinozoisita e minerais opacos. Podem conter inclusões de minerais opacos e borderar allanita, a qual é subautomórfica, com dimensões entre 0,2-0,6 mm, e geralmente está associada ao epidoto e às bordas mais sódicas dos cristais de plagioclásio. Restritamente aos trondhjemitos da porção sul da área, a muscovita ocorre como cristais intersticiais, o que pode sugerir a sua origem tardi-magmática (Figura 4D). Os acessórios secundários são representados por sericita, muscovita (0,4-1,3%), geralmente associados ao plagioclásio e interpretados como produto da transformação deste mineral; a clorita é produto da transformação das lamelas de biotita.

GEOQUÍMICA

Os dados geoquímicos dos trondhjemitos da área de Nova Canadá foram obtidos por meio de análise química em rocha total de 19 amostras, coletadas em afloramentos desprovidos de feições de migmatização (Tabela 2), sendo 15 análises executadas nas rochas da variedade que ocorre na porção norte da área de trabalho e quatro naquelas da porção sul.

Tabela 2. Composição química dos trondhjemitos da área de Nova Canadá. Legendas: Fe₂O₃ = Ferro total recalculado como Fe₂O₃; LOI = loss on ignition; A/CNK = razão molecular (Al/Ca + Na + K); La_N, Yb_N, Sm_N, Gd_N, Eu_N = valores de ETR normalizados (Evensen et al., 1978); Eu/Eu* = anomalia de Eu calculada como [Eu/Eu_N]. (Continua)

Unidade	Biotita-Trondhjemito															Média		
	Biotita-Trondhjemito - Porção Sul					Biotita-Trondhjemito - Porção Norte												
Amostra	PDE 19	PDE 15E	PDR 27DI	PDR 15D	PDE 25	PDR 11	PDR 23A	PDR 24	ADK 88	PDE 34	PDE 22	ADK 80	PDR 09	PDE 65	ADK 10	PDR 14	PDR 15	
SiO ₂	69,16	69,25	69,57	70,38	70,00	70,96	71,23	71,29	72,22	72,67	72,91	72,97	73,11	73,30	74,39	75,14	81,46	72,35
TiO ₂	0,39	0,38	0,29	0,26	0,18	0,18	0,16	0,14	0,21	0,15	0,07	0,08	0,09	0,16	0,34	0,08	0,05	0,19
Al ₂ O ₃	15,83	15,88	15,54	15,54	16,54	15,36	16,09	15,63	15,45	15,20	15,57	15,26	14,99	14,64	13,05	14,29	10,42	15,02
Fe ₂ O _{3t}	2,40	2,48	3,03	1,65	2,20	1,60	1,43	1,59	1,91	1,45	0,75	0,82	1,37	1,55	2,70	1,10	0,51	1,68
MnO	0,03	0,03	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,05	< 0,01	< 0,01	0,03
MgO	0,96	0,93	0,91	0,69	0,43	0,54	0,45	0,41	0,56	0,36	0,15	0,22	0,26	0,37	0,60	0,25	0,06	0,48
CaO	2,68	2,63	3,18	2,15	2,72	1,95	2,55	2,11	3,10	2,29	1,28	1,77	1,96	1,97	2,57	2,00	1,23	2,24
Na ₂ O	4,66	4,72	4,29	4,73	5,95	4,69	5,76	5,36	5,06	4,76	5,76	5,01	4,95	4,95	4,54	5,18	3,33	4,92
K ₂ O	2,60	2,75	2,10	3,27	1,17	3,38	1,42	2,30	1,04	2,39	2,69	3,33	2,61	2,36	0,89	1,47	2,16	2,23
P ₂ O ₅	0,14	0,13	0,10	0,09	0,09	0,07	0,06	0,06	0,07	0,05	0,03	< 0,01	0,04	0,05	0,07	0,02	0,01	0,07
LOI	0,90	0,50	0,70	1,00	0,50	0,90	0,60	0,80	0,20	0,40	0,60	0,30	0,20	0,40	0,60	0,20	0,50	0,55
Sum	99,72	99,73	99,80	99,77	99,78	99,61	99,77	99,67	99,84	99,77	99,80	99,77	99,62	99,81	99,82	99,74	99,72	99,75
Ba	1047,0	994,0	586,0	896,0	550,0	2224,0	703,0	1832,0	2610	1058,0	996,0	1171,0	2090,0	775,0	198,0	1069,0	1427,0	1051,59
Rb	114,50	102,80	74,70	151,30	25,30	65,40	31,80	46,20	32,60	54,20	77,60	59,40	48,10	63,70	42,30	35,50	43,10	62,85
Sr	648,00	607,00	327,30	534,00	863,20	646,70	838,50	612,00	523,20	569,90	455,70	546,30	624,60	360,60	442,90	677,80	507,70	575,61
Zr	131,30	126,90	118,10	105,50	106,30	102,40	80,30	71,20	109,90	74,60	45,00	68,80	93,50	96,60	271,80	82,30	75,40	103,52
Nb	7,50	3,50	5,20	3,40	2,30	1,80	2,10	1,80	2,80	2,10	2,80	1,70	2,60	2,90	6,80	0,90	0,70	2,99
Y	4,30	4,80	9,50	2,20	5,90	1,70	4,00	3,00	1,80	2,80	3,20	1,60	5,20	4,10	11,50	1,20	0,80	3,98
Ga	23,80	23,80	17,80	25,30	19,20	17,60	18,60	17,60	20,30	18,20	18,30	17,20	17,00	17,60	19,80	16,20	11,60	18,82
Sc	4,00	4,00	5,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	2,00	3,00	1,00	< 1	2,31
Th	9,20	9,30	5,40	8,50	0,30	3,00	0,60	1,80	1,70	2,90	2,60	4,00	5,20	5,40	2,10	4,60	2,20	4,05
U	3,60	2,10	1,80	2,80	0,40	0,30	0,20	0,30	0,40	0,40	1,50	0,40	0,50	0,60	2,10	0,40	0,20	1,06
V	39,00	39,00	32,00	24,00	17,00	16,00	11,00	24,00	24,00	11,00	< 8	16,00	12,00	11,00	18,00	< 8	< 8	21,00
La	29,70	33,90	23,50	20,70	15,50	14,80	10,70	8,90	12,00	11,70	5,70	17,70	15,40	22,10	12,70	15,20	10,50	16,51
Ce	56,90	58,10	44,30	37,40	25,80	24,80	13,30	16,00	18,60	21,90	11,80	24,20	27,90	39,20	20,60	27,00	17,90	28,57



(Conclusão)

Tabela 2.

Unidade	Biotita-Trondhjemito																		
	Biotita-Trondhjemito - Porção Sul									Biotita-Trondhjemito - Porção Norte									Média
	PDE 19	PDE 15E	PDR 27DI	PDR 15D	PDE 25	PDR 11	PDR 23A	PDR 24	ADK 88	PDE 34	PDE 22	ADK 80	PDR 09	PDE 65	ADK 10	PDR 14	PDR 15		
Amostra Elementos																			
Pr	6,25	6,78	4,81	4,00	3,21	2,62	1,80	1,87	1,97	2,21	1,23	3,46	2,93	4,04	2,68	2,80	1,91	3,21	
Nd	22,00	23,10	17,40	12,70	10,70	9,70	7,40	6,60	6,70	7,40	4,80	10,70	9,10	13,60	10,10	9,70	6,60	11,08	
Sm	3,29	3,51	2,67	2,03	2,22	1,18	1,12	1,32	0,91	1,17	1,08	1,86	1,52	1,93	1,86	1,19	0,73	1,74	
Eu	0,80	0,79	0,63	0,51	0,79	0,49	0,46	0,43	0,59	0,38	0,25	0,36	0,46	0,47	1,06	0,34	0,25	0,53	
Gd	1,90	2,03	2,06	1,28	1,82	0,72	1,05	0,88	0,65	0,85	0,96	1,06	1,15	1,25	1,67	0,77	0,44	1,21	
Tb	0,20	0,21	0,28	0,12	0,24	0,08	0,13	0,12	0,07	0,10	0,14	0,12	0,17	0,15	0,26	0,07	0,04	0,15	
Dy	0,84	1,00	1,62	0,62	1,18	0,37	0,60	0,56	0,32	0,50	0,65	0,46	0,89	0,79	1,45	0,26	0,18	0,72	
Ho	0,12	0,13	0,29	0,08	0,20	0,05	0,12	0,11	0,06	0,09	0,15	0,06	0,15	0,13	0,28	0,04	0,02	0,12	
Er	0,34	0,38	0,89	0,19	0,50	0,16	0,30	0,25	0,15	0,28	0,26	0,12	0,45	0,28	0,80	0,12	0,05	0,32	
Tm	0,05	0,05	0,14	0,04	0,06	0,02	0,05	0,04	0,03	0,04	0,05	0,03	0,07	0,05	0,13	0,02	0,01	0,05	
Yb	0,27	0,29	0,83	0,22	0,40	0,11	0,25	0,20	0,14	0,17	0,25	0,12	0,42	0,28	0,82	0,10	0,07	0,29	
Lu	0,04	0,05	0,15	0,03	0,06	0,02	0,05	0,05	0,03	0,03	0,04	0,02	0,07	0,04	0,13	0,02	0,02	0,05	
A/CNK	1,03	1,02	1,03	1,02	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,04	1,06	1,01	1,03	1,03	1,00	1,04	1,04	1,03	
K ₂ O/Na ₂ O	0,56	0,58	0,49	0,69	0,20	0,72	0,25	0,43	0,21	0,50	0,47	0,66	0,53	0,48	0,20	0,28	0,65	0,46	
Fe ₂ O ₃ +MgO+TiO ₂	3,75	3,79	4,23	2,60	2,81	2,32	2,04	2,14	2,68	1,96	0,97	1,12	1,72	2,08	3,64	1,43	0,62	2,35	
Sr/Y	150,70	126,46	34,45	242,73	146,31	380,41	209,63	204,00	290,67	203,54	142,41	341,44	120,12	87,95	38,51	564,83	634,63	230,52	
Rb/Sr	0,18	0,17	0,23	0,28	0,03	0,10	0,04	0,08	0,06	0,10	0,17	0,11	0,08	0,18	0,10	0,05	0,08	0,12	
Ba/Sr	1,62	1,64	1,79	1,68	0,64	3,44	0,84	2,99	0,50	1,86	2,19	2,14	3,35	2,15	0,45	1,58	2,81	1,86	
Sr/Ba	0,62	0,61	0,56	0,60	1,57	0,29	1,19	0,33	2,00	0,54	0,46	0,47	0,30	0,47	2,24	0,63	0,36	0,78	
Rb/Y	26,63	21,42	7,86	68,77	4,29	38,47	7,95	15,40	18,11	19,36	24,25	37,13	9,25	15,54	3,68	29,58	53,88	23,62	
(La/Yb) _N	74,25	78,90	19,11	63,51	26,16	90,82	28,89	30,04	57,86	46,45	15,39	99,56	24,75	53,28	10,45	102,60	101,25	54,31	
(Ce/Yb) _N	54,54	51,85	13,81	44,00	16,69	58,35	13,77	20,71	34,39	33,34	12,22	52,19	17,19	36,23	6,50	69,88	66,18	35,40	
(La/Sm) _N	5,68	6,08	5,54	6,42	4,40	7,90	6,01	4,25	8,30	6,30	3,32	5,99	6,38	7,21	4,30	8,04	9,06	6,19	
(Gd/Er) _N	4,54	4,34	1,88	5,47	2,96	3,66	2,84	2,86	3,52	2,47	3,00	7,18	2,08	3,63	1,70	5,21	7,15	3,79	
Eu/Eu*	0,90	0,83	0,79	0,90	1,17	1,51	1,28	1,15	2,24	1,11	0,74	0,72	1,02	0,87	1,80	1,02	1,25	1,14	



As rochas avaliadas são biotitas-trondhjemitos cálcio-alcálicos, que apresentam pequenas variações aceitáveis nos conteúdos de K_2O . Para melhor caracterização destas rochas foram realizadas comparações com os típicos TTG de Rio Maria (trondhjemitos Mogno e Água Fria e tonalitos Mariazinha, Caracol e Arco Verde – Almeida *et al.*, 2011) e com as rochas de afinidade TTG da área de Canaã dos Carajás (Feio *et al.*, 2012).

ELEMENTOS MAIORES E MENORES

Os resultados mostram que os conteúdos de sílica destas rochas variam no intervalo de 69,16 a 81,46%, sendo que os trondhjemitos da porção sul da área são mais empobrecidos em SiO_2 (69,16-70,38%) em relação àqueles do norte (70,0-81,46%). Os conteúdos de Al_2O_3 , na maioria das amostras, são, em geral, superiores a 15,0% (Tabela 2, Figura 5A), o que sugere que essas rochas sejam similares aos TTG com alta alumina de Barker (1979). Os conteúdos de Fe_2O_3 variam entre 0,51-3,03% (Figura 5B), com a maioria das amostras apresentando teores acima de 1,10%. Os teores de MgO são inferiores a 1,0% (Figura 5C), e aqueles de TiO_2 menores que 0,30%. O valor médio dos teores de CaO é igual a 2,24% (Tabela 2), e seu intervalo mostra conteúdos moderados a baixos (3,18-1,23%, Figura 5D). A variação nos conteúdos dos elementos ferromagnesianos é discreta, sendo o valor médio da somatória $Fe_2O_3 + MgO + TiO_2 = 2,35%$ (Tabela 2). Nota-se, a partir desses valores, que os trondhjemitos da porção sul da área são mais enriquecidos em elementos compatíveis [Fe_2O_3 (1,65-3,03%), MgO (0,69-0,96%), TiO_2 (0,26-0,39%), CaO (2,15-3,18%)], em relação àqueles fortemente deformados da porção norte [Fe_2O_3 (0,51-2,70%), MgO (0,06-0,60%), TiO_2 (0,05-0,34%), CaO (1,23-3,10%)]. Em geral, os trondhjemitos estudados mostram baixas razões K_2O/Na_2O , com média de 0,46, onde os teores médios de Na_2O (Figura 5E) variam entre 5,95-3,23%, e os de K_2O entre 3,38-0,89% (Figura 5F).

Nos diagramas de Harker da Figura 5, observa-se um acentuado empobrecimento nos teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO (Figuras 5A-5D) e TiO_2 , com o aumento no conteúdo de SiO_2 . A correlação da sílica com K_2O não é clara, havendo acentuada dispersão das amostras e aparente enriquecimento neste óxido, com o leve enriquecimento em SiO_2 . Além disso, os diagramas que utilizam Na_2O , Al_2O_3 e até mesmo K_2O sugerem a existência de dois *trends* paralelos para estas rochas.

ELEMENTOS-TRAÇO

Nas diversas séries magmáticas, a distribuição dos elementos-traço é amplamente controlada pelas fases minerais fracionadas durante a evolução magmática, sendo estes bons indicadores dos processos petrogenéticos (Hanson, 1989). O comportamento dos principais elementos-traço das associações trondhjemíticas de Nova Canadá mostra uma ampla distribuição no diagrama de Harker (Figuras 6 e 7). Em geral, estes granitoides possuem baixas concentrações de elementos compatíveis, como no caso dos elementos Ni (2,6-14,5 ppm), Cr (< 0,1 ppm) e V (< 8-39 ppm); relativamente baixos conteúdos de *high field strength elements* (HFSE) [Nb (0,9-7,5 ppm), Ta (0,2-2,0 ppm), Zr (45,0-271,8 ppm), Y (0,8-11,5 ppm), Hf (2,1-6,7 ppm)]; e variáveis conteúdos de LILE, com altos conteúdos de Ba (198-2224 ppm), relativamente altos de Sr (863,2-327,3 ppm, Figuras 6A-6D) e moderados a altos de Rb (151,3-25,3 ppm, Figura 7B). Os resultados mostram um empobrecimento acentuado nos teores de Rb e Zr com o aumento da sílica, e um mais discreto para Ba e Sr, devido ao maior grau de dispersão desses elementos (Figuras 6C e 6D). Já os conteúdos dos elementos Yb (0,83-0,07 ppm; Figura 7A) e Y (11,5-0,8 ppm; Figura 6B) não mostram variações significativas com o aumento da sílica. Em geral, o comportamento desses elementos também sugere a existência de dois grupos de rochas que mostram afinidades geoquímicas com granitoides da região de Canaã dos Carajás e Rio Maria.

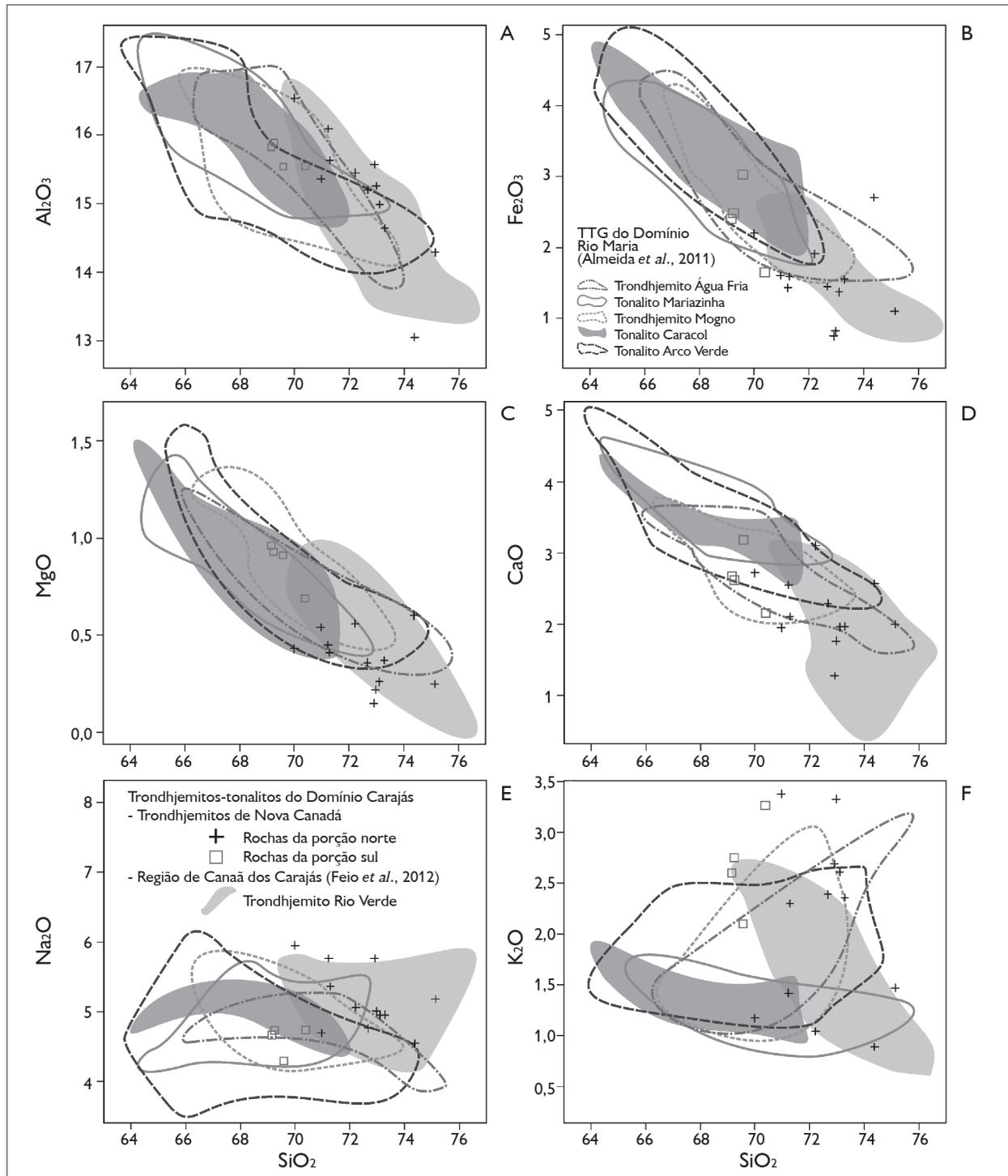


Figura 5. Diagramas de Harker para elementos maiores dos trondhjemitos da área de Nova Canadá. Os campos de ocorrência dos TTG de Rio Maria (Trondhjemito Mogno, Trondhjemito Água Fria, Tonalito Mariazinha, Tonalito Caracol e Tonalito Arco Verde – Almeida *et al.*, 2011) e os da área de Canaã dos Carajás (Feio *et al.*, 2012) foram utilizados para comparações. Todos os óxidos em % em peso.

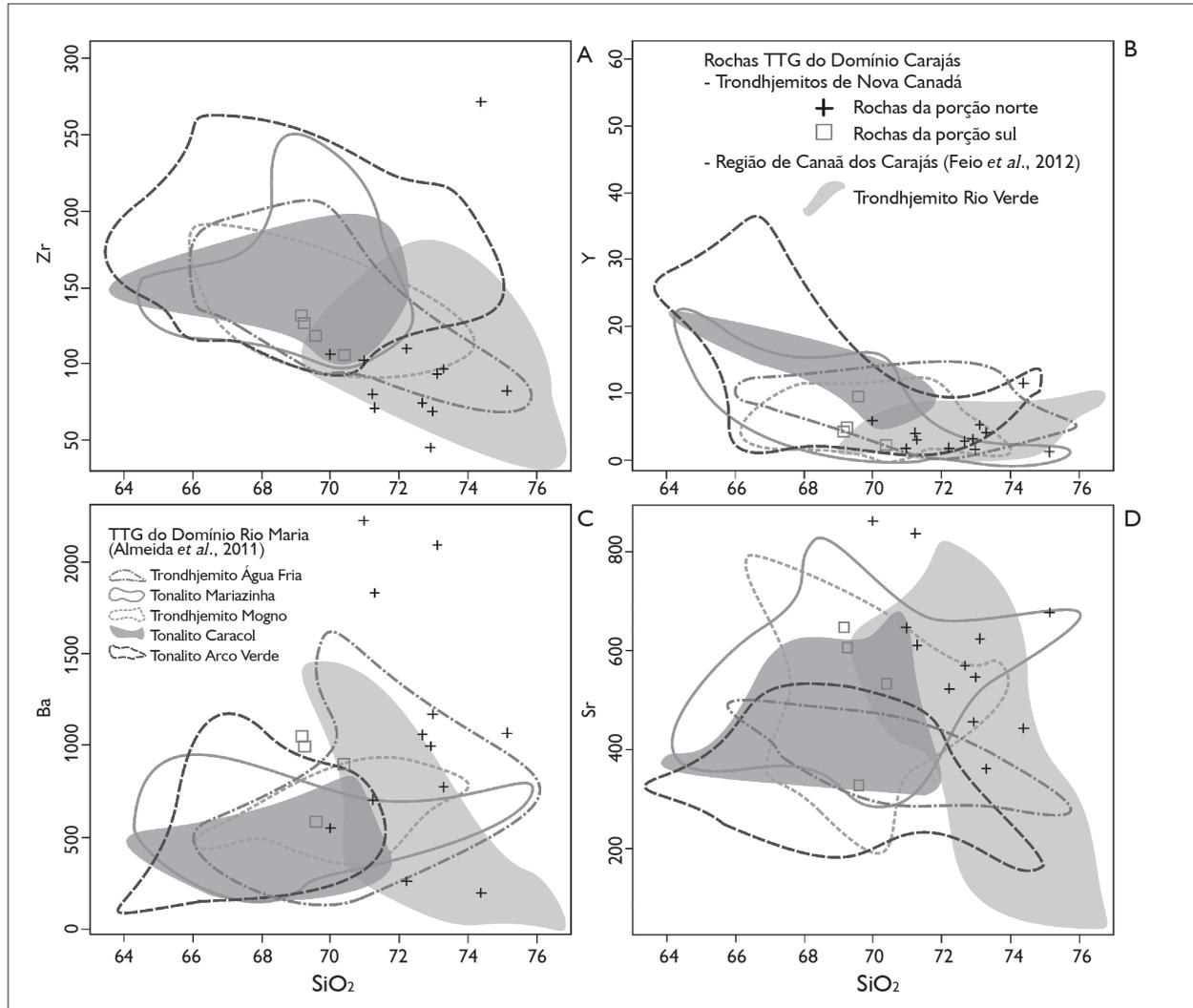


Figura 6. Diagramas de Harker para elementos-traço dos trondhjemitos de Nova Canadá. Os campos de ocorrência dos TTG de Rio Maria (Trondhjemito Mogno, Trondhjemito Água Fria, Tonalito Mariazinha, Tonalito Caracol e Tonalito Arco Verde – Almeida *et al.*, 2011) e os da área de Canaã dos Carajás (Feio *et al.*, 2012) foram utilizados para comparações. Elementos-traço em ppm; SiO₂ em % em peso.

Nos diagramas que relacionam as razões Rb/Sr e Sr/Ba com SiO₂ (Figuras 7C e 7D), observa-se que as quatro amostras (PDE-15D, 15E, 19 e PDR 27DI) pertencentes aos trondhjemitos da porção sul da área são claramente mais enriquecidas na razão Rb/Sr e evidenciam maior afinidade geoquímica com o TTG de Rio Maria, enquanto as rochas dos trondhjemitos bandados da porção norte da área são mais afins àquelas de Canaã do Carajás, onde algumas de suas amostras são mais enriquecidas na razão Sr/Ba.

ELEMENTOS TERRAS RARAS

Os resultados analíticos obtidos para os elementos terras raras (ETR) dos trondhjemitos de Nova Canadá foram normalizados de acordo com os valores do condrito de Evensen *et al.* (1978) (Figura 8). O padrão de ETR observado nas rochas estudadas mostra um enriquecimento em ETR leves (ETRL) em relação aos pesados (Figuras 8A e 8B), o que pode indicar um maior fracionamento dos ETR pesados (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) durante a formação e/ou

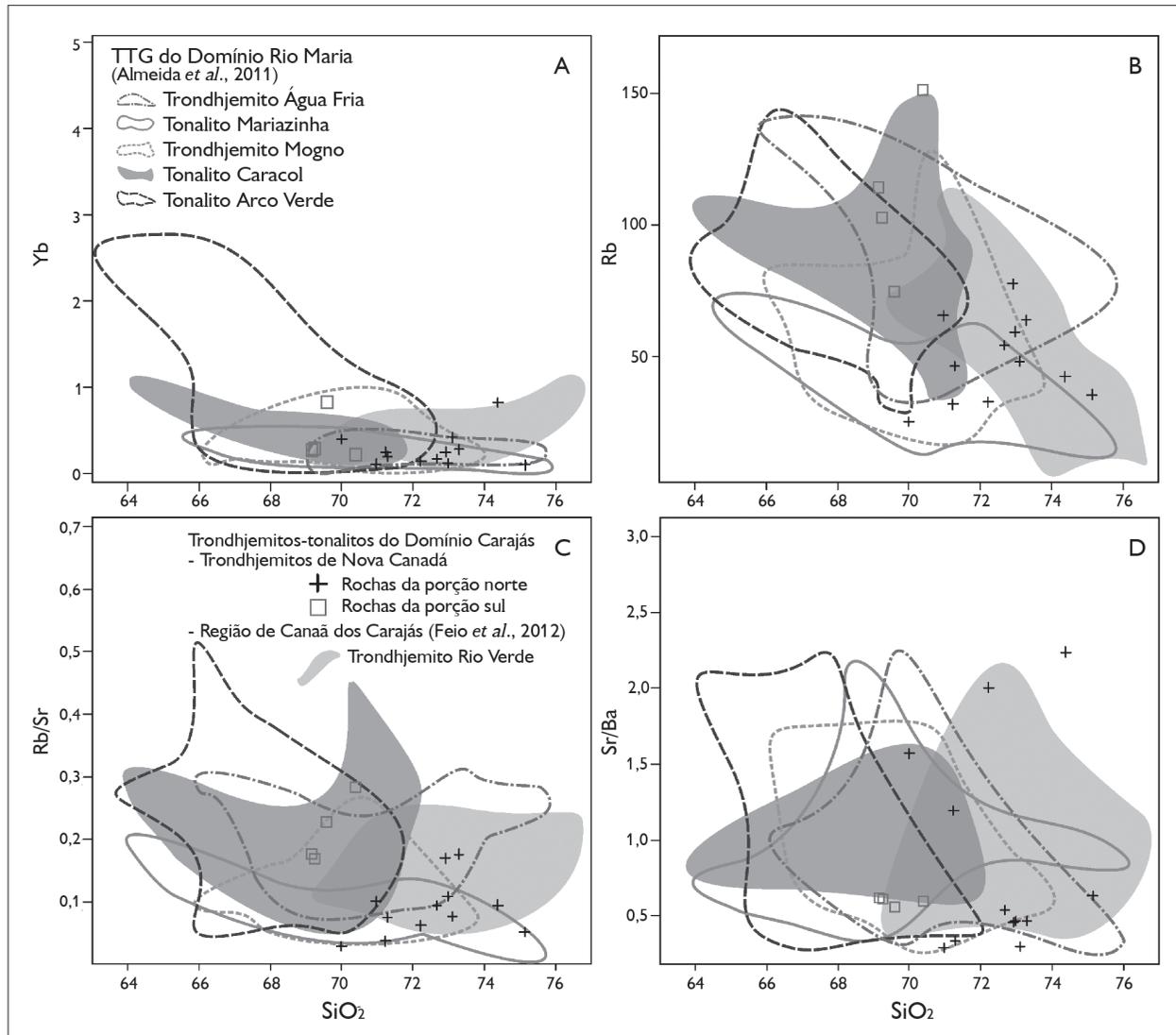


Figura 7. Diagramas de Harker para elementos-traço e razões entre estes *versus* SiO_2 para as rochas dos trondhjemitos de Nova Canadá, utilizando os campos de ocorrência dos TTG de Rio Maria (Trondhjemito Mogno, Trondhjemito Água Fria, Tonalito Mariazinha, Tonalito Caracol e Tonalito Arco Verde – Almeida *et al.*, 2011) e os de Canaã dos Carajás (Feio *et al.*, 2012) para comparações. Elementos-traço em ppm; SiO_2 em % em peso.

diferenciação dos seus magmas, similar ao que foi observado nos TTG de Canaã dos Carajás (Feio *et al.*, 2012 – Figura 8C) e Rio Maria (Almeida *et al.*, 2011 – Figuras 8D-8F). Em geral, não se observam diferenças significativas entre os padrões de ETR obtidos para estas amostras, porém são notáveis as variações nas razões La/Yb (Tabela 2), que se situa no intervalo de 102,6 a 10,4. Nota-se um padrão côncavo dos ETR pesados em algumas amostras dos trondhjemitos da

porção norte da área, chamando-se atenção para a ausência de anomalias negativas de Eu ($Eu/Eu^* = 0,72-2,24$). Tais aspectos são similares àqueles observados nas típicas associações TTG arqueanas (Martin, 1987; Condie, 2005).

CARACTERIZAÇÃO DA SÉRIE MAGMÁTICA

Para a caracterização da série magmática, as análises dos trondhjemitos de Nova Canadá foram testadas em diversos

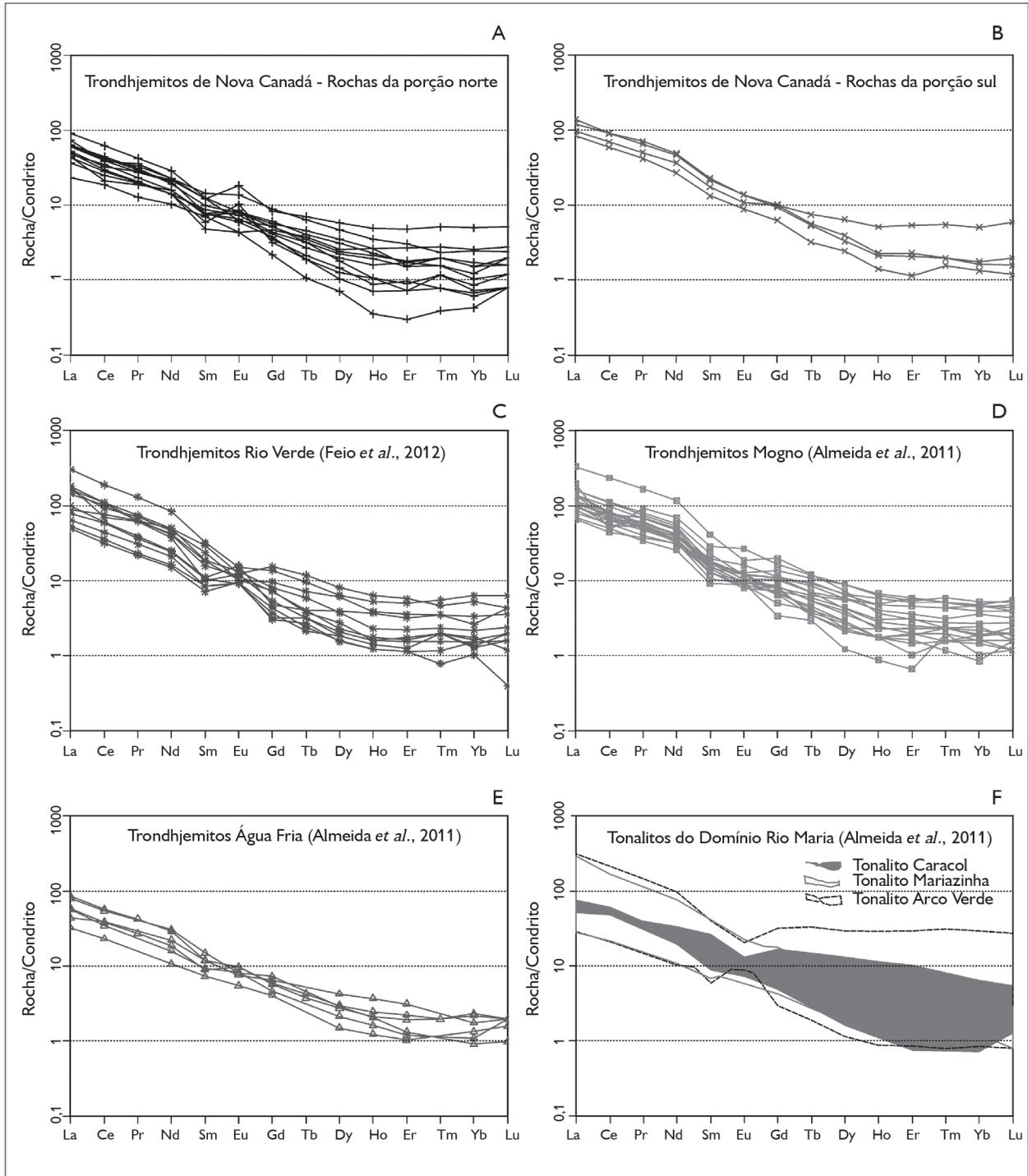


Figura 8. Padrões de ETR com valores normalizados pelo condrito de Evensen *et al.* (1978) para as Associações Tonalíticas-Trondhjemíticas da Província Carajás: A-B) Trondhjemitos de Nova Canadá, porções norte e sul, respectivamente; C) Trondhjemito Rio Verde (Feio *et al.*, 2012); D) Trondhjemito Mogno (Almeida *et al.*, 2011); E) Trondhjemito Água Fria (Almeida *et al.*, 2011); F) rochas tonalíticas do Domínio Rio Maria (Tonalito Caracol, Tonalito Arco Verde e Tonalito Mariazinha – Almeida *et al.*, 2011).

diagramas de classificação geoquímica (TAS, Cox *et al.*, 1979; Figura 9A; R1-R2, De La Roche *et al.*, 1980; Figura 9B), onde suas composições incidem preferencialmente no campo dos granodioritos e granitos. No diagrama P-Q, de Debon & Le Fort (1983) (Figura 9C), estas amostras se dividem entre o campo dos tonalitos e granodioritos. No diagrama normativo Ab-An-Or de O'Connor (1965) (Figura 9D), os trondhjemitos

de Nova Canadá plotam no campo das rochas trondhjemíticas e graníticas. O enriquecimento em Or (ortoclásio) de algumas amostras pode ser atribuído à presença de termos mais enriquecidos em potássio, como é discutido nas associações tipo TTG arqueanas (Jahn *et al.*, 1988; Martin *et al.*, 1983).

No diagrama baseado nos parâmetros de Shand (1950) (Figura 10A), observa-se que as rochas trondhjemíticas

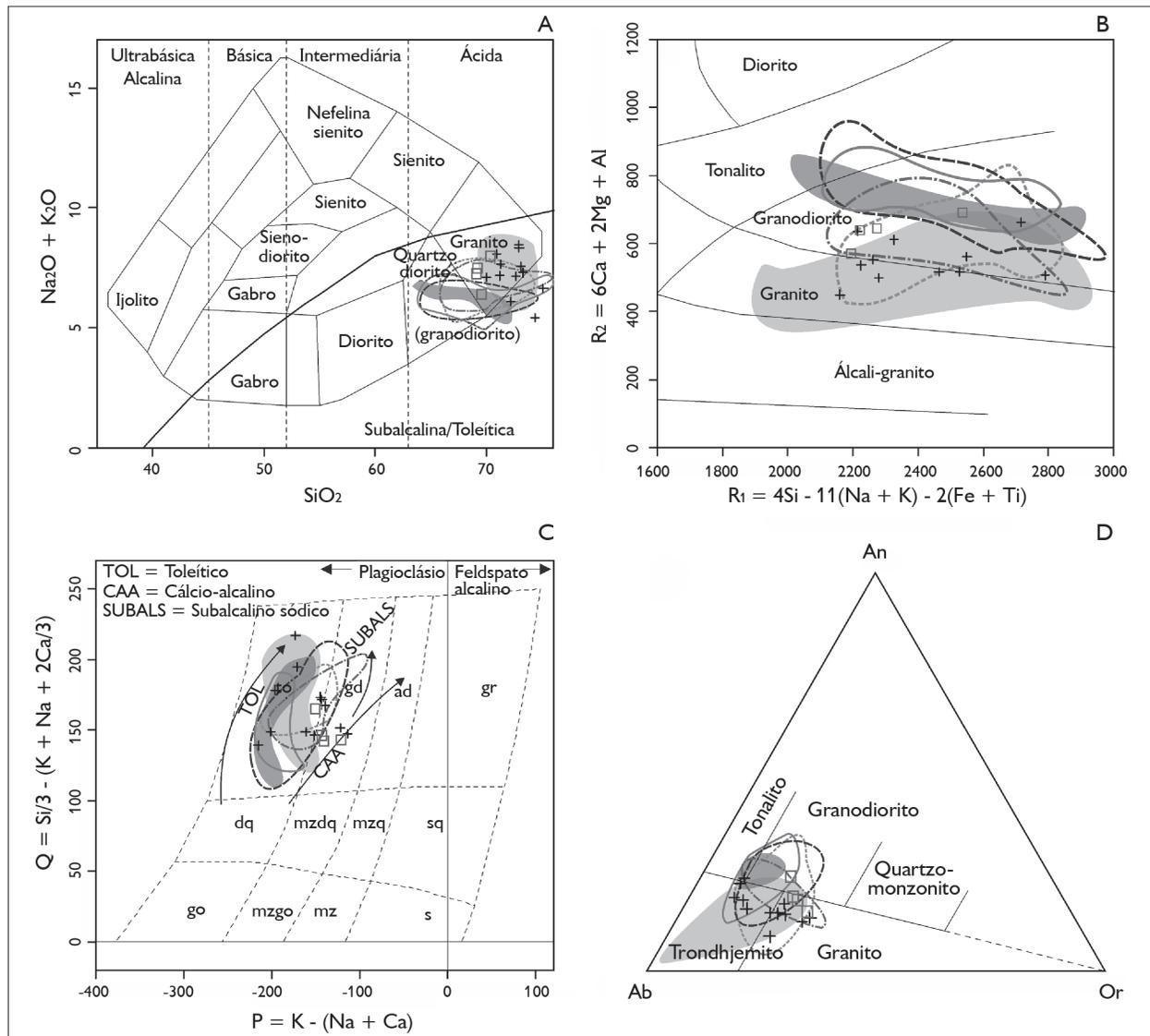


Figura 9. Caracterização geoquímica dos trondhjemitos de Nova Canadá: A) diagrama TAS (Cox *et al.*, 1979); B) diagrama R1-R2 (De La Roche *et al.*, 1980); C) diagrama P-Q (Debon & Le Fort, 1983); D) diagrama Ab-An-Or normativo (O'Connor, 1965; com campos de Barker, 1979). Em todas as figuras constam os campos de granitos afins no Domínio Rio Maria e da área de Canaã dos Carajás. Legendas como na Figura 7.



de Nova Canadá são fracamente peraluminosas ($A/CNK \sim 1,2$) o que é consistente com a presença de biotita \pm muscovita e a ausência de anfóbio na mineralogia delas. No diagrama K_2O versus SiO_2 (Peccerillo & Taylor, 1976; Figura 10B), as amostras posicionam-se preferencialmente no campo da série cálcio-alcálica, com algumas, porém, plotando nos campos das séries toleítica e cálcio-

alcálica de alto K. Um pequeno grupo mostra-se mais enriquecido em K, levando essas amostras ao campo das rochas cálcio-alcálicas alto-K.

No diagrama AFM (Irvine & Baragar, 1971; Figura 10C), todas as amostras analisadas se alinham ao *trend* das rochas cálcio-alcálicas, sendo, em geral, mais empobrecidas em álcalis. No diagrama K-Na-Ca (Barker & Arth, 1976; Figura 10D),

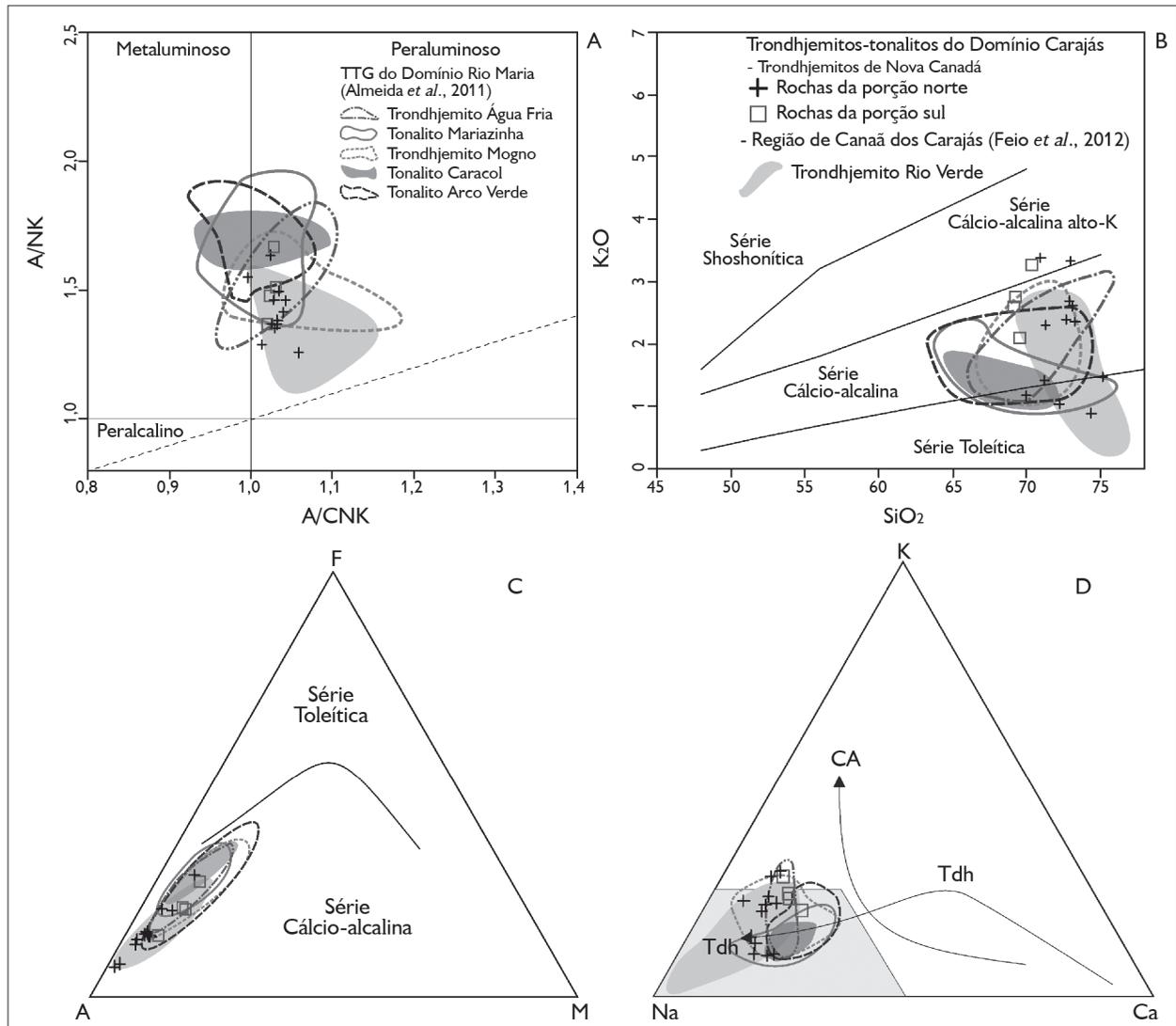


Figura 10. Caracterização geoquímica dos trondhjemitos de Nova Canadá: A) diagrama $[Al_2O_3]/(CaO + Na_2O + K_2O)_{mol}$ versus $[Al_2O_3]/(Na_2O + K_2O)_{mol}$ (Shand, 1950); B) diagrama K_2O versus SiO_2 (campos de Peccerillo & Taylor, 1976); C) diagrama AFM (A = $Na_2O + K_2O$; F = $FeO + 0,9 \times Fe_2O_3$; M = MgO) com campos de Irvine & Baragar (1971); D) diagrama K-Na-Ca; campo Tdh dos TTG típicos (Martin, 1994), Tdh = *trend* trondhjemítico de Barker & Arth (1976) e CA = *trend* cálcio-alcálico. Em todas as figuras constam os campos de granitos afins no Domínio Rio Maria e da área de Canaã dos Carajás.

estas rochas mostram afinidades com a série trondhjemítica, sendo posicionadas preferencialmente no campo das rochas sódicas, atribuído aos típicos TTG de Martin (1994), que apresentam altos teores de Na_2O (5,95-3,33%), moderados de CaO (3,18-1,23%) e conteúdos inferiores de K_2O (3,38-0,89%), o que resulta em geral em uma baixa razão $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ (< 5).

DISCUSSÕES

As características geoquímicas dos trondhjemitos de Nova Canadá mostram fortes similaridades com as unidades afins, tanto do Domínio Carajás quanto do Domínio Rio Maria, as quais são reportadas na literatura como pertencentes às típicas associações TTG (Almeida *et al.*, 2011; Feio *et al.*, 2012). Entretanto, o caráter levemente peraluminoso das rochas de Nova Canadá (Figura 10A) difere daquele meta a peraluminoso dos TTG de Rio Maria, e as aproxima das rochas da área de Canaã dos Carajás. Nos diversos diagramas utilizados para comparação, tanto para elementos maiores quanto para elementos-traço, nota-se uma forte superposição das amostras dos trondhjemitos de Nova Canadá com os campos definidos pelas rochas do Trondhjemito Rio Verde de Canaã dos Carajás, enquanto que, em relação às unidades TTG de Rio Maria, as rochas aqui avaliadas mostram maior afinidade com os trondhjemitos Mogno e Água Fria, em função do maior enriquecimento em K de suas amostras em relação às aquelas dos tonalitos Arco Verde, Caracol e Mariazinha, restringindo suas semelhanças com as variedades tonalíticas apenas aos seus membros mais enriquecidos em SiO_2 .

Em alguns dos diagramas discutidos anteriormente, é possível separar claramente os trondhjemitos da área de Nova Canadá em dois grupos. Aqueles da porção sul são mais enriquecidos em óxidos de elementos compatíveis (Fe_2O_3 , MgO , TiO_2 e CaO), além de Zr e Rb, em relação aos trondhjemitos da porção norte da área. Estes grupos podem ser divididos ainda naqueles com altas e baixas razões Rb/Sr e Sr/Ba, onde o trondhjemito da porção sul possui alta razão Rb/Sr e baixa razão Sr/Ba, enquanto aquele da parte norte da

área apresenta baixa razão Rb/Sr e variações de alta a baixa razão Sr/Ba. Nota-se, a partir do comportamento destes elementos, que os trondhjemitos da porção sul da área possuem maior afinidade geoquímica com os TTG de Rio Maria, enquanto aqueles da porção norte são mais afins aos de Canaã dos Carajás. A disposição dessas amostras em *trends* não colineares e, por vezes, paralelos entre si pode indicar que estas unidades ou não são comagmáticas, ou estas feições podem apenas ser reflexo de baixa representatividade amostral.

Os dois grupos de trondhjemitos distinguidos neste trabalho são caracterizados por apresentar médias a altas razões La/Yb e Sr/Y (Figuras 11A e 11B). O grupo de rochas com altas razões La/Yb e Sr/Y são similares aos do Trondhjemito Mogno (Figura 8D), enquanto que aquele com valores médios dessas razões possuem forte correlação com o Trondhjemito Água Fria (Figura 8E), ambos descritos no Domínio Rio Maria (Almeida *et al.*, 2011; Ronaib & Oliveira, 2013). Comportamento similar para estas razões também é observado nas rochas de Canaã dos Carajás (Figura 11). A ausência de rochas com baixas razões La/Yb (Figura 8F) e Sr/Y (Figura 11), que são frequentes nas variedades tonalíticas de Rio Maria, pode confirmar a ausência destes litotipos na região de Nova Canadá, que seria então formada essencialmente por rochas trondhjemíticas, como já discutido neste trabalho.

O comportamento distinto das razões La/Yb para os trondhjemitos de Nova Canadá pode estar relacionado com a profundidade e a pressão em que seus magmas foram gerados e/ou a ligeiras diferenças nas fontes dessas rochas (Moyen *et al.*, 2007; Halla *et al.*, 2009; Almeida *et al.*, 2011). As rochas com altas razões La/Yb e Sr/Y foram provavelmente formadas no campo de estabilidade da granada, em altas pressões (~ 15 kbar) a partir da fusão parcial de crosta oceânica em zonas de subducção, enquanto as amostras com conteúdos médios dessas razões foram, provavelmente, formadas em condições de pressão intermediária, próximo do limite do campo de estabilidade da granada com o plagioclásio (10-15 kbar). Aliado a isso, o padrão côncavo dos ETR pesados observado para as rochas do trondhjemito da parte norte da área estudada

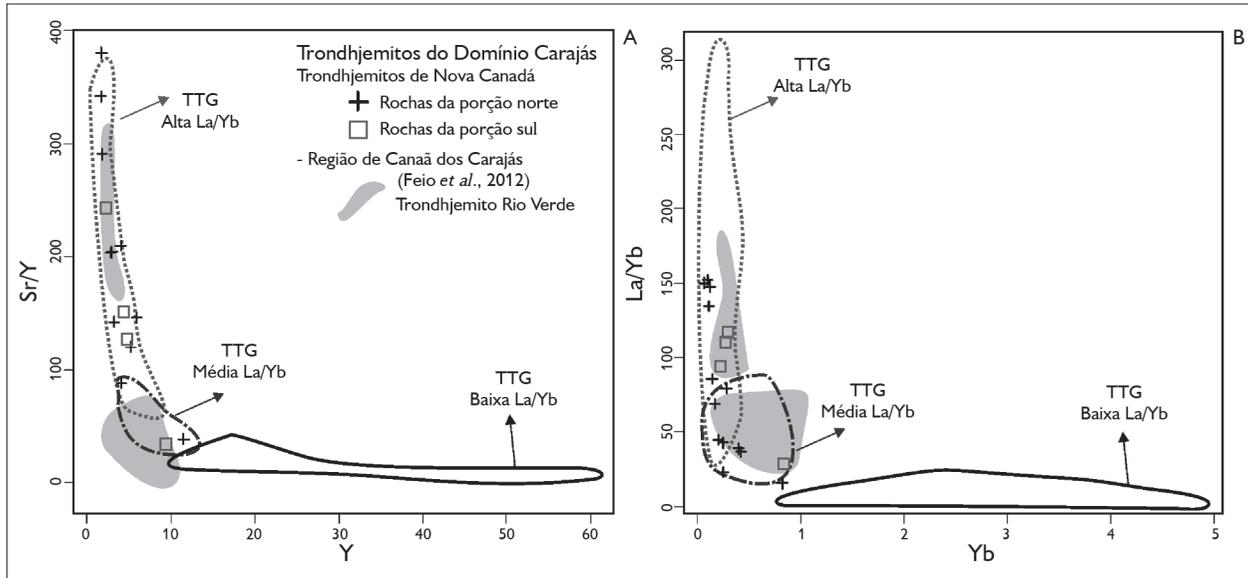


Figura 11. Diagramas utilizando razão Sr/Y versus Y e La/Yb versus Yb para as rochas dos trondhjemitos de Nova Canadá: A) Razão Sr/Y versus Y; B) La/Yb versus Yb. São realizadas comparações com os campos dos TTG de altas, médias e baixas razões La/Yb do Domínio Rio Maria (Almeida *et al.*, 2011), e o campo de ocorrência dos trondhjemitos de Canaã dos Carajás, no Subdomínio de Transição (Feio *et al.*, 2012).

(Figura 8A) indica que, para a geração das mesmas, o anfibólio pode ter sido uma importante fase fracionante e que a quase ausência de anomalias negativas de Eu ($Eu/Eu^* = 0,72-2,24$) sugere a retenção do plagioclásio na fonte.

CONCLUSÕES

Os dados de campo, petrográficos e geoquímicos, apresentados e discutidos neste trabalho, ajudaram a compor um novo quadro geológico para a área, com modificações significativas (Figura 2), a partir das seguintes conclusões:

- Além das volumosas unidades leucograníticas distinguidas em outro momento (Leite-Santos & Oliveira, dados não publicados), na região de Nova Canadá também foram individualizadas rochas sódicas de composição trondhjemítica, com menor expressão de volume, que, até então, eram inseridas no contexto dos granitoides indiferenciados do Complexo Xingu. Estes trondhjemitos, que mostram afinidades geoquímicas com as típicas associações TTG arqueanas, foram separados em duas unidades: uma que ocorre na porção norte da área estudada, a qual foi caracterizada como biotita-trondhjemito,

sob a forma de estreitas faixas orientadas na direção E-W, representada por rochas que apresentam uma estruturação marcante, com desenvolvimento de feições que indicam atuação de pelo menos dois eventos deformacionais em estágios sin- a pós-magmáticos, como bandamentos composicionais, dobras e indícios de migmatização (anatexia); e outra que ocorre na parte sul da área e distingue-se da anterior pela presença da muscovita, saussuritização do plagioclásio, textura equigranular média e discreta deformação, com o desenvolvimento de uma foliação tectônica E-W de baixo ângulo. A ocorrência restrita da primeira unidade, aliada à intensa deformação e provável anatexia (migmatitos) sofrida por estas rochas, pode indicar que tenha sido afetada por retrabalhamento crustal, ligado ou não à geração dos leucogranitos descritos na área;

- O comportamento geoquímico dos trondhjemitos estudados demonstrou que estes são afins às associações TTG com alto Al_2O_3 (Barker, 1979), Na_2O e baixo K_2O , compatíveis com os dos típicos granitoides arqueanos da série cálcio-alcalina trondhjemítica de baixo potássio (Lameyre & Bowden, 1982) ou cálcio-alcalina tonalítica-trondhjemítica

(Bowden *et al.*, 1984). Exibem ainda padrões fracionados de ETR, com variações nos conteúdos de ETRP, além da ausência de anomalias negativas de Eu e Sr, e baixos conteúdos de Y e Yb. Tais feições são tipicamente atribuídas a magmas gerados por fusão parcial de uma fonte máfica em diferentes profundidades, com aumento da influência da granada no resíduo e ausência de plagioclásio, tanto na fase residual como na fracionante, com o aumento da pressão (Martin *et al.*, 2005). Além disso, notam-se alguns contrastes composicionais importantes entre as duas variedades trondhjemíticas estudadas, uma vez que a da parte sul da área é mais enriquecida em Fe₂O₃, MgO, TiO₂, CaO, Zr, Rb e na razão Rb/Sr, em relação aos trondhjemitos da porção norte da área. A disposição dos *trends* evolutivos deste conjunto de rochas pode ser um indicador de que estas unidades não sejam comagmáticas, contudo, para confirmação desta hipótese, há necessidade de um número maior de análises químicas, tendo em vista o pequeno número de amostras analisadas da variedade que ocorre na porção sul da área;

- Os dois grupos de trondhjemitos distinguidos neste trabalho mostram claras afinidades geoquímicas, tanto com as associações trondhjemíticas do Domínio Rio Maria quanto com as da região de Canaã dos Carajás. Nota-se, porém, que a partir do comportamento das razões La/Yb e Sr/Y, aliado aos principais aspectos texturais e deformacionais dessas rochas, as associações das porções norte e sul da área são afins aos trondhjemitos Mogno (altas razões La/Yb e Sr/Y) e Água Fria (moderadas razões La/Yb e Sr/Y) de Rio Maria, respectivamente. Apesar do comportamento ambíguo atestado para as rochas de Canaã dos Carajás quando se utiliza tais razões, nota-se, nos demais diagramas geoquímicos, a nítida afinidade destas com as rochas trondhjemíticas da porção norte da área de Nova Canadá.

A ausência de rochas com baixas razões La/Yb (Figura 8F) e Sr/Y, que são frequentes nas variedades tonalíticas de Rio Maria, pode confirmar também a ausência destes litotipos na região de Nova Canadá, que teria então uma crosta formada essencialmente por rochas trondhjemíticas, como já discutido neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Aos pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitoides (GPPG) do Instituto de Geologia da Universidade Federal do Pará (IG-UFPA), pelo apoio nas diversas etapas deste trabalho; ao IG e ao PPGG (UFPA), pelo suporte técnico; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado ao primeiro autor; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por concessão de bolsas de produtividade em pesquisa (D. C. Oliveira - Processos n. 502074/2009-4 e 311610/2012-9); à Faculdade de Geologia do *campus* de Marabá da UFPA, pelo apoio às atividades de campo. Este trabalho é uma contribuição para o convênio entre a Companhia Vale do Rio Doce e a Fundação Amazônia Paraense de Amparo à Pesquisa (Vale/FAPESPA), edital 01/2010, Instrumento de Concessão e Aceitação de Apoio Financeiro (ICAAF) 053/2011, e ao Programa Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCT) de Geociências da Amazônia (GEOCIAM - CNPq/MCT/FAPESPA, Processo n. 573733/2008-2).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL, S. B. DIAS & F. J. ALTHOFF, 2010. Origin of the Archean leucogranodiorite-granite suites: evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. *Lithos* 120(3-4): 235-257.
- ALMEIDA, J. A. C., R. DALL'AGNOL, M. A. OLIVEIRA, M. B. MACAMBIRA, M. M. PIMENTEL, O. T. RÄMÖ, F. V. GUIMARÃES & A. A. S. LEITE, 2011. Zircon geochronology and origin of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: implications for the growth of the Archean crust of the Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research* 187(1-2): 201-221.
- AVELAR, V. G., J. M. LAFON, F. C. CORREIA JR. & E. M. B. MACAMBIRA, 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã – Província Mineral de Carajás: novos resultados geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências* 29(4): 453-460.
- BARD, J. P., 1980. *Microtextures of igneous and metamorphic rocks*: 1-246. D. Reidel Publishing Company, Tokyo.
- BARKER, F., 1979. Trondhjemites: definition, environment and hypotheses of origin. In: F. BARKER (Ed.): *Trondhjemites, dacites and related rocks*: 1-12. Amsterdam, Elsevier.

- BARKER, F. & J. G. ARTH, 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archaean bimodal trondhjemite-basalt suites. **Geology** 4(10): 596-600.
- BOWDEN, P., R. A. BATCHELOR, B. W. CHAPPELL, J. DIDIER & J. LAMEYRE, 1984. Petrological, geochemical and source criteria for the classification of granitic rocks: a discussion. **Physics of the Earth and Planetary Interiors** 35(1-3): 1-11.
- CHAMPION, D. C. & R. H. SMITHIES, 2003. Archaean granites. In: P. L. BLEVIN, B. W. CHAPPELL & M. JONES (Eds.): **Magma to mineralization: the Ishihara Symposium: 19-24**. Geoscience Australia, Canberra.
- CHAYES, F., 1956. **Petrographic modal analysis: an elementary statistical appraisal: 1-113**. John Wiley e Sons, New York.
- CONDIE, K. C., 2005. TTGs and adakites: are they both slab melts? **Lithos** 80(1-4): 33-44.
- COX, K. G., J. D. BELL & R. J. PANKHURST, 1979. **The interpretation of igneous rock: 1-450**. George Allen & Unwin, London/Boston.
- DALL'AGNOL, R., 1982. Maciço Jamon: evolução petrológica de um granito da Amazônia Oriental. **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 1(2): 139-161.
- DALL'AGNOL, R., O. T. RÄMÖ, M. S. MAGALHÃES & M. J. B. MACAMBIRA, 1997. Archean granitoids as magma sources for the anorogenic paleoproterozoic Jamon and Musa granites (Eastern Amazonian Craton): new constraints based on geochemical and Sm-Nd isotopic data. **Extended Abstracts of the South-American Symposium on Isotope Geology** 1: 96-97.
- 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.
- DALL'AGNOL, R., M. A. OLIVEIRA, J. A. C. ALMEIDA, F. J. ALTHOFF, A. A. S. LEITE, D. C. OLIVEIRA & C. E. M. BARROS, 2006. Archean and Paleoproterozoic granitoids of the Carajás Metallogenic Province, eastern Amazonian Craton. **Abstracts of Symposium on Magmatism, Crustal Evolution, and Metallogenesis of the Amazonian Craton** 1: 97-150.
- DALL'AGNOL, R. & D. C. OLIVEIRA, 2007. Oxidized, magnetite-series, rapakivi-type granites of Carajás, Brazil: implications for classification and petrogenesis of A-type granites. **Lithos** 93(3-4): 215-233.
- DEBON, F. & P. LE FORT, 1983. A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. **Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences** 73(3): 135-149.
- DEER, W. A., R. A. HOWIE & J. ZUSSMAN, 1992. **Rock-forming minerals: 2nd ed.**: 1-696. Longmans, London.
- DE LA ROCHE, H., J. LETERRIER, P. GRANDCLAUDE & M. MARCHAL, 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R_2O_3 -diagram and major-element analyses – its relationships with current nomenclature. **Chemical Geology** 29(1-4): 183-210.
- EVENSEN, N. M., P. T. HAMILTON & R. K. O'NIONS, 1978. Rare earth abundances in chondritic meteorites. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 42(8): 1199-1212.
- FEIO, G. R. L., 2011. **Magmatismo granitoide arqueano da área de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução crustal da Província Carajás: 1-190**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- FEIO, G. R. L., R. DALL'AGNOL, E. L. DANTAS, M. J. B. MACAMBIRA, J. O. S. SANTOS & F. J. ALTHOFF, 2012. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: implication for crustal evolution of the Carajás Province, Amazonian Craton, Brazil. **Precambrian Research** 227: 157-185.
- GABRIEL, E. O., 2012. **Geologia, geoquímica e petrologia magnética dos granitoides Arqueanos da porção nordeste de Água Azul do Norte – Província Carajás: 1-117**. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- GABRIEL, E. O. & D. C. OLIVEIRA, 2013. Petrologia magnética dos granodioritos Água Azul e Água Limpa, porção sul do Domínio Carajás - Pará. **Geologia USP: Série Científica** 13(4): 89-110.
- GOMES, A. C. B., 2003. **Geologia, petrografia e geoquímica dos granitoides de Canaã dos Carajás, SE do Estado do Pará: 1-160**. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Petrologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- GOMES, A. C. B. & R. DALL'AGNOL, 2007. Nova associação tonalítica-trondhjemitica na região de Canaã dos Carajás: TTGs com altos conteúdos de Ti, Zr e Y. **Revista Brasileira de Geociências** 37(1): 182-193.
- HALLA, J., J. VAN HUNEN, E. HEILIMO & P. HÖLTTÄ, 2009. Geochemical and numerical constraints on Neoproterozoic plate tectonics. **Precambrian Research** 174(1-2): 155-162.
- HANSON, G. N., 1989. An approach to trace element modeling using a simple igneous system as an example. In: B. R. LIPIN & G. A. MCKAY (Ed.): **Geochemistry and mineralogy of rare earth elements: 79-97**. Mineralogical Society of America (Reviews in Mineralogy, 21), Washington.
- HARKER, A., 1965. **The natural history of igneous rocks: 1-384**. Macmillan, New York.
- HIBBARD, M. J., 1995. **Petrography to petrogenesis: 1-587**. Prentice-Hall, New Jersey.
- HIRATA, W. K., J. C. RIGON, K. KADEKARU, A. A. C. CORDEIRO & E. M. MEIRELES, 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 1: 100-110.

- HUHN, S. B., M. J. B. MACAMBIRA & R. DALL'AGNOL, 1999. Geologia e geocronologia Pb/Pb do granito alcalino arqueano Planalto, Região da Serra do Rabo, Carajás – PA. **Anais do Simpósio de Geologia da Amazônia** 6(1): 463-466.
- HUTCHISON, C. S., 1974. **Laboratory handbook of petrographic techniques**: 1-527. John Wiley e Sons, London.
- 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.
- JAHN, B. M., B. AUVRAY, H. Q. SHEN, D. Y. LIU, Z. Q. ZHANG, Y. J. DONG, X. J. YE, Q. Z. ZHANG, J. CORNICHE & J. MACÉ, 1988. Archean crustal evolution in China: the Taishan complex, and evidence for juvenile crustal addition from long-term depleted mantle. **Precambrian Research** 38(4): 381-403.
- KERR, P., 1959. **Optical mineralogy**: 3rd ed.: 1-492. McGraw-Hill Book Co., New York.
- LAMEYRE, J. & P. BOWDEN, 1982. Plutonic rock type series: discrimination of various granitoid series and related rocks. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** 14(1-2): 169-186.
- LE MAITRE, R. W., 2002. **A classification of igneous rocks and glossary of terms**. 2nd ed.: 1-193. Cambridge University Press, London.
- MACAMBIRA, E. M. B. & A. G. VALE, 1997. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. São Felix do Xingu. Folha SB.22-Y-B. Estado do Pará: 1-384. DNPM/CPRM, Brasília.
- MACHADO, N., Z. G. LINDENMAYER, T. E. KROGH & D. LINDENMAYER, 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. **Precambrian Research** 49(3-4): 329-354.
- MACKENZIE, W. S., C. H. DONALDSON & C. GUILFORD, 1982. **Atlas of igneous rocks and textures**: 1-148. Longman, London.
- MARTIN, H., 1987. Petrogenesis of Archean trondhjemites, tonalites and granodiorites from eastern Finland: major and trace element geochemistry. **Journal of Petrology** 28(5): 921-953.
- MARTIN, H., 1993. The mechanisms of petrogenesis of Archean continental crust – comparison with modern processes. **Lithos** 30(3-4): 373-388.
- MARTIN, H., 1994. The Archean grey gneisses and the gneisses of continental crust. In: K. C. CONDIE (Ed.): **Developments in Precambrian Geology**: 11: 205-259. Amsterdam (Archean Crustal Evolution), Elsevier.
- MARTIN, H., C. CHAUVEL & B. M. JAHN, 1983. Major and trace element geochemistry and crustal evolution of Archean granodioritic rocks from eastern Finland. **Precambrian Research** 21(3-4): 159-180.
- MARTIN, H., R. H. SMITHIES, R. RAPP, J.-F. MOYEN & D. CHAMPION, 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution. **Lithos** 79(1-2): 1-24.
- MORETO, C. P. N., L. V. S. MONTEIRO, R. P. XAVIER, W. S. AMARAL, T. J. S. SANTOS, C. JULIANI & C. R. SOUZA FILHO, 2011. Mesoarchean (3.0 and 2.86 Ga) host rocks of the iron oxide-Cu-Au Bacaba deposit, Carajás Mineral Province: U-Pb geochronology and metallogenetic implications. **Mineralium Deposita** 46(7): 789-811.
- MOYEN, J.-F., G. STEVENS, A. F. M. KISTERS & R. W. BELCHER, 2007. TTG plutons of the Barberton granitoid-greenstone terrain, South Africa. In: M. J. VAN KRANENDONK, R. H. SMITHIES & V. BENNET (Eds.): **Earth's oldest rocks**: 607-668. Elsevier, Amsterdam.
- O'CONNOR, J. T., 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. **United States Geological Survey Professional Paper** 525B: 79-84.
- OLIVEIRA, D. C., 2001. **Geologia, geoquímica e petrologia magnética do Granito Paleoproterozóico Redenção, SE do Cráton Amazônico**: 1-207. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- OLIVEIRA, D. C., P. J. L. SANTOS, E. O. GABRIEL, D. S. RODRIGUES, A. C. FARESin, M. L. T. SILVA, S. D. SOUSA, R. V. SANTOS, A. C. SILVA, M. C. SOUZA, R. D. SANTOS & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Aspectos geológicos e geocronológicos das rochas magmáticas e metamórficas da região entre os municípios de Água Azul do Norte e Canaã dos Carajás – Província Mineral de Carajás. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- OLIVEIRA, M. A., 2003. **Caracterização petrográfica, estudo de suscetibilidade magnética e natureza dos minerais óxidos de Fe e Ti do Granito Planalto, Serra dos Carajás – PA**: 1-47. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- OLIVEIRA, M. A., R. DALL'AGNOL, F. J. ALTHOFF & A. S. LEITE, 2009. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrain, Amazonian Craton, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences** 27(2-3): 146-160.
- PASSCHIER, C. W. & R. A. J. TROUW, 1996. **Microtectonics**: 1-289. Springer-Verlag, Berlin.
- PECCERILLO, A. & S. R. TAYLOR, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. **Contributions to Mineralogy and Petrology** 58(1): 63-81.
- PIDGEON, R. T., M. J. B. MACAMBIRA & J. M. LAFON, 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulites facies metamorphism and the protolith of the enderbite. **Chemical Geology** 166(1-2): 159-171.
- POLAT, A., 2012. Growth of Archean continental crust in oceanic island arcs. **Geology** 40(4): 383-384.



- RAGLAND, P. C., 1989. **Basic analytical petrology**. Oxford University Press, New York.
- RODRIGUES, D. S. & D. C. OLIVEIRA, 2014. Geologia, geoquímica e geocronologia do Granito Mesoarqueano Boa Sorte, município de Água Azul do Norte, Pará – Província Carajás. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 9(3): 597-633.
- ROLLINSON, H., 1993. **Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation: 1-384**. Longman Scientific & Technical, London.
- ROLLINSON, H., 2010. Coupled evolution of Archaean continental crust and subcontinental lithospheric mantle. **Geology** 38: 1083-1086.
- RONAIB, C. & D. C. OLIVEIRA, 2013. Geologia, petrografia e geoquímica das associações TTGs e leucogranodioritos do extremo norte do Domínio Rio Maria, Província Carajás. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 8(3): 383-415.
- SANTOS, J. O. S., 2003. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil Central. In: L. A. BIZZI, C. SCHOBENHAUS, R. M. VIDOTTI & J. H. GONÇALVES (Eds.): **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: 169-226**. Serviço Geológico do Brasil, Brasília.
- 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 mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. **Gondwana Research** 3(4): 453-488.
- SANTOS, P. J. L., D. C. OLIVEIRA, M. A. GALARZA & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Geologia, petrografia e geocronologia das rochas granitoides do Complexo Xingu da região de Nova Canadá, Município de Água Azul do Norte - Província Mineral de Carajás. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- SANTOS, R. D., M. A. GALARZA & D. C. OLIVEIRA, 2013. Geologia, geoquímica e geocronologia do Diopsídio-Norito Pium, Província Carajás. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 8(3): 355-382.
- SARDINHA, A. S., R. DALL'AGNOL, A. C. B. GOMES, M. J. B. MACAMBIRA & M. A. GALARZA, 2004. Geocronologia Pb-Pb e U-Pb em zircão de granitoides arqueanos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 42: 1 CD-ROM.
- SHAND, S. J., 1950. **Eruptive rocks their genesis, composition, classification and their relation to ore deposit: 4th ed.: 1-488**. Thomas Murby, London.
- SILVA, A. C., 2013. **Geologia, petrografia e geoquímica dos granitoides arqueanos da área de Vila Jussara, Província Carajás**. Dissertação (Mestrado em Petrologia e Geoquímica) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- SILVA, A. C., D. C. OLIVEIRA & M. J. B. MACAMBIRA, 2010. Individualização e geocronologia de granitoides do Complexo Xingu, região de Vila Jussara, município de Água Azul do Norte – PA, Província Mineral de Carajás. **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia** 45: 1 CD-ROM.
- SILVA, A. C., R. DALL'AGNOL, F. V. GUIMARÃES & D. C. OLIVEIRA, 2014. Geologia, petrografia e geoquímica de associações tonalíticas e trondhjemiticas arqueanas de Vila Jussara, Província Carajás, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais** 9(1): 13-45.
- SILVA, G. C., M. I. C. LIMA, A. R. F. ANDRADE, R. S. ISSLER & G. GUIMARÃES, 1974. Geologia. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto Radam. **Folha SB.22 Araguaia e parte da folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra: 1/3-1/143**. DNPM (Levantamentos de Recursos Naturais, 4), Rio de Janeiro.
- SOUZA, Z. S. & R. DALL'AGNOL, 1995. Geochemistry of metavolcanic rocks in the Archean greenstone belt of Identidade, SE Pará, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 76: 217-233.
- 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 Archean greenstone belt of the Rio Maria region (Carajás Province, Brazil): implications for the Archean geodynamic evolution of the Amazonian Craton. **Precambrian Research** 109(3-4): 293-315.
- STRECKEISEN, A. L., 1976. To each plutonic rock its proper name. **Earth Science Review** 12: 1-33.
- SYLVESTER, P. J., 1989. Post-collisional alkaline granites. **Journal of Geology** 97(3): 261-280.
- 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 (Eds.): **Geologia do continente Sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida: 471-486**. BECA, São Paulo.
- TAYLOR, S. R. & S. M. MCLENNAN, 1995. The geochemical evolution of the continental crust. **Review of Geophysics** 33(2): 241-265.
- VASQUEZ, L. V., L. R. 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. Escala 1:1.000.000**. CPRM, Belém.
- VERNON, R. H., 2007. Problems in identifying restite in S-type granites of southeastern Australia, with speculations on sources of magma and enclaves. **The Canadian Mineralogist** 45(1): 147-178.

