



Suscetibilidade magnética e caracterização dos minerais óxidos de Fe e Ti do granito anorogênico Bannach, terreno granito-greenstone de Rio Maria, Pará

F. V. Guimarães^{1,2}, J.A.C. Almeida^{1,3} & R. Dall'Agnol^{1,4}

1 Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitóides (GPPG), Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará;

2 Bolsista de Iniciação Científica do CNP, (fabricia@ufpa.br);

3 Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (CPGG), Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, (ari@ufpa.br);

4 Departamentos de Petrologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, (robdal@ufpa.br).

Resumo O Granito Bannach é um batólito anorogênico paleoproterozóico intrusivo em unidades arqueanas pertencentes ao Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, porção leste do Cráton Amazônico. O estudo dos minerais opacos permitiu caracterizar as associações e as texturas dos minerais de óxidos de Fe e Ti e compreender o papel desses ao longo da evolução do magma Bannach. Os minerais opacos observados no Granito Bannach foram: magnetita (Mt), ilmenita (Ilm), hematita e ocasionalmente pirita e calcopirita. A Ilm é representada por cinco formas distintas: 1- como lamelas de exsolução nos cristais de Mt (Ilm do tipo Trellis ou treliça); 2 - como lamelas mais espessas e contínuas no interior da Mt (Ilm do tipo Sandwich); 3 - em cristais mais regulares associados a Mt, seja no interior dos mesmos (Ilm do tipo Composite interna), seja em contato externo com ela (Ilm do tipo Composite externa); 4 - manchas irregulares dentro dos cristais de Mt (Ilm do tipo Patch); 5 - como cristais isolados (Ilm do tipo individual). O maciço Bannach possui elevados valores de suscetibilidade magnética (SM), comparativamente a média de SM para granitos. Os valores mais elevados de Suscetibilidade Magnética (média de $13,20 \times 10^{-3}$) são observados nas fácies menos evoluídas e devem-se ao maior conteúdo modal e melhor preservação da magnetita nessas rochas, ao passo que os valores mais baixos de SM estão relacionados às rochas mais evoluídas do maciço devido ao caráter hololeucocrático dessas rochas.

Palavras-chave: Suscetibilidade magnética, Paleoproterozóico, anorogênico, granito Bannach, minerais opacos.

Abstract The Bannach Granite is paleoproterozoic anorogenic batholith which have intrusive relationship in archeans units, pertaining to the so called Rio Maria Granite-Greenstone Terrain on the eastern portion of Amazon Craton. The study of opaque minerals intent to characterize the relationship and the minerals textures of Fe and Ti oxides thus comprehend the Bannach Granite through those oxides. The observed opaque minerals on the Bannach Granite were: magnetite (Mt), ilmenite (Ilm), hematite and occasionally pitite and calcopirite. The Ilmenite (Ilm) is represented by five distinctive forms: within ex-solution lamellas on the Mt crystals (Trellis type); 2 - as sparse ex-solution lamellas inside Mt crystals (Ilm Sandwich type); 3 - with irregular crystals associated with Mt, inside - (Ilm internal Composite) and outside - (Ilm Internal Composite); 4 - Irregular spots inside Mt crystal (Ilm Patch type); 5 - as isolates crystals (Ilm Individual type). The different facies of the Bannach Massif are characterized by high values of the magnetic susceptibility (MS), comparably the average of MS for granites. There is good correlation between MS and magmatic differentiation of the facies forming the batholith. MS decrease in the sense the less evolved facies to the more evolved.

Keywords: Magnetic susceptibility, Paleoproterozoic, anorogenic, granite Bannach, opaque minerals.

INTRODUÇÃO O magmatismo anorogênico Proterozóico do Cráton Amazônico é um dos mais expressivos do mundo. O Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitóides (GPPG) da Universidade Federal do Pará tem desenvolvido diversos estudos sobre corpos anorogênicos de idade paleoproterozóica na região de Rio Maria, sudeste do estado do Pará. Uma das linhas de pesquisa do GPPG está relacionada ao estudo da suscetibilidade magnética e dos minerais opacos, e vem fornecendo importantes contribuições em trabalhos de cunho petrológicos, além de subsidiar na definição da tipologia e nas condições de

fugacidade de oxigênio ao longo da evolução dessas rochas (Dall'Agnol *et al.* 1997, Oliveira 2001). Este trabalho foi realizado objetivando relacionar o comportamento magnético com os processos magmáticos e pós-magmáticos atuantes ao longo da evolução do magma Bannach, bem como discutir as condições de fugacidade de oxigênio presentes nos diferentes estágios de cristalização do mesmo, utilizando-se para isso os dados de suscetibilidade magnética dos minerais óxidos de Fe e Ti, integrados com os de petrografia e geoquímica.

ASPECTOS GERAIS O Granito Bannach é um corpo alongado na direção SE-NW de idade paleoproterozóica, intrusivo em *greenstone belts* e granitóides de idade arqueana pertencentes ao Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria, sudeste do estado do Pará (Fig. 1). O batólito é constituído por três conjuntos de rochas monzograníticas: fácies portadoras de anfibólio + biotita ± clinopiroxênio de granulação grossa; fácies portadora de biotita com textura porfirítica; e fácies leucograníticas com termos grossos, médios e finos. As dificuldades de acesso à porção sul do corpo não permitiram uma amostragem detalhada, embora tenham possibilitado estender sem nenhuma dúvida os domínios do Granito Bannach para essa área. Em razão disso o presente estudo foi realizado nas porções central e norte do corpo.

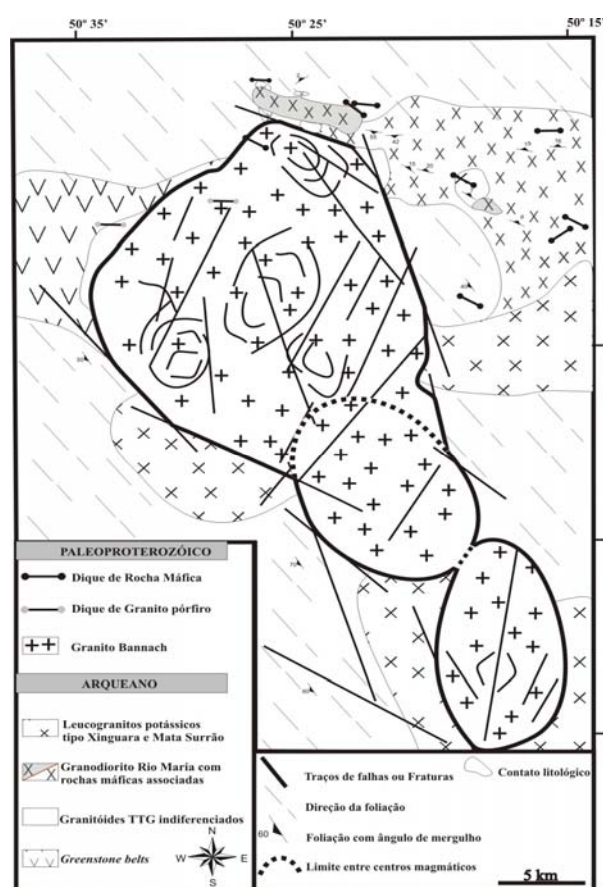


Figura 1. Mapa Geológico da região de ocorrência do Granito Bannach

SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA O maciço Bannach possui elevados valores de suscetibilidade magnética (SM) ($> 1,078 \times 10^{-3}$), comparativamente a média de SM para granitos. Os dados de SM foram avaliados com base em gráficos de probabilidade e em polígono e histograma de frequência (Figs. 2a, b, c), que permitiram identificar cinco populações (A, B, C, D e E), com diferentes características magnéticas, as

quais se correlacionam coerentemente com a evolução magmática do corpo (fácies portadoras de anfibólio + biotita ± clinopiroxênio → fácies portadora de biotita → fácies leucograníticas). De modo geral, as fácies mais ricas em anfibólio (fácies portadoras de anfibólio + biotita ± clinopiroxênio) concentram-se nas populações E, D e C de mais alta SM, sendo que os valores intermediários, correspondente à população B, são observados nas rochas onde a biotita predomina sobre o anfibólio (fácies portadora de biotita), ao passo que os menores valores de SM, correspondentes a população A, associam-se à fácies leucograníticas.

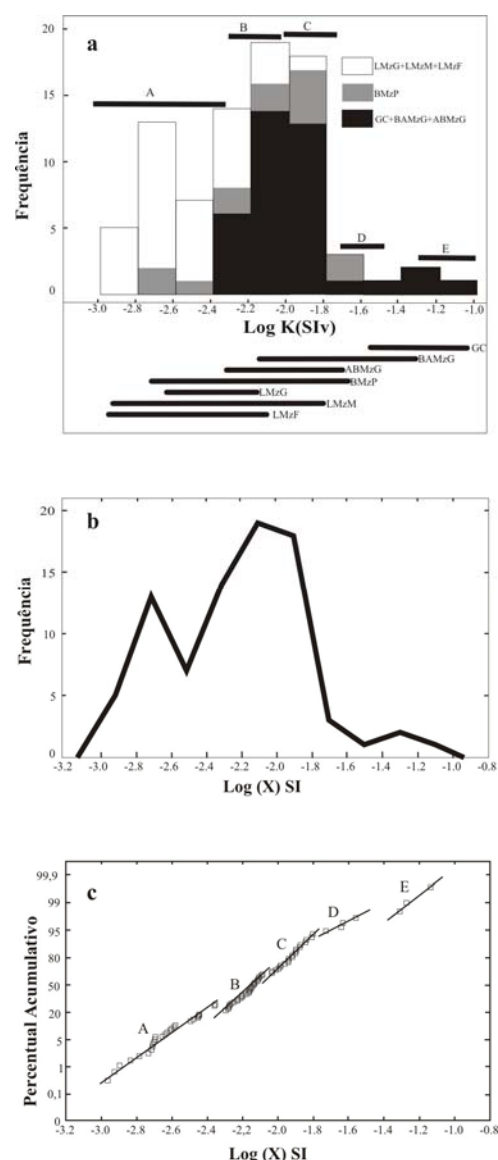


Figura 2. Gráficos referentes aos dados de SM: (a) Histograma de frequência mostrando a distribuição das principais associações de fácies do Granito Bannach. As barras indicam os intervalos de SM das cinco populações; (b) Polígono (c) Gráfico de probabilidade normal

O mapa de contorno de SM (Fig. 3a) permite visualizar vários domínios magnéticos no corpo Bannach, onde se nota que os valores mais elevados de SM estão relacionados às bordas do corpo (Populações E, D e C), ao passo que aqueles menores tendem a ocupar a porção central do mesmo. Um perfil NE-SW (Fig. 3b) revela o zoneamento simétrico em termos de SM do Granito Bannach, já que nas periferias do corpo os valores de SM são muito próximos diminuindo acentuadamente em direção ao centro do maciço. Isso é coerente com a distribuição faciológica do corpo, uma vez que os domínios de mais alta SM (borda do corpo) são espacialmente coincidentes com as fácies portadoras de anfibólio+biotita+clinopiroxênio e os de mais baixa SM com os leucogranitos. Portanto, há, de modo geral, uma forte tendência à diminuição dos valores de SM da borda para o centro do granito, refletindo as relações entre SM e a sua distribuição faciológica..

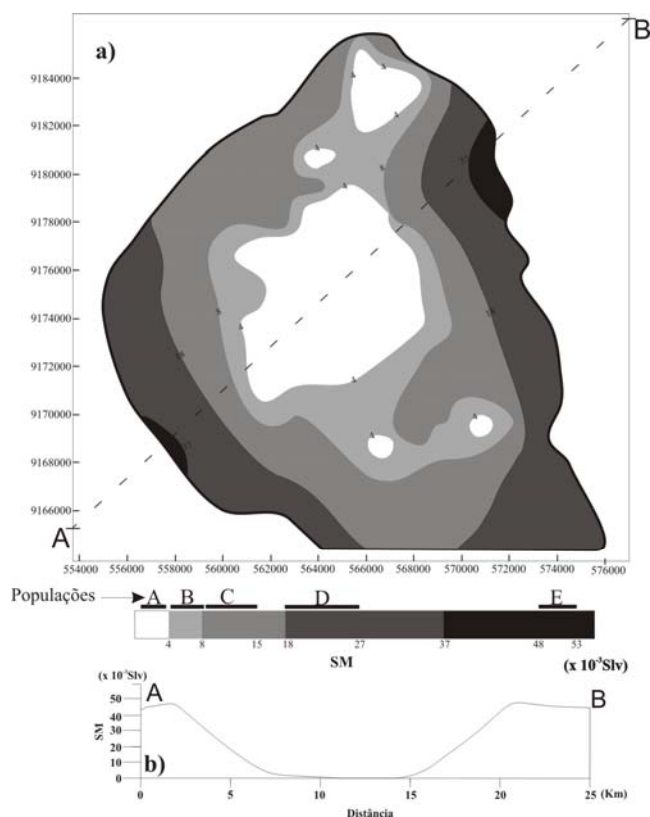


Figura 3. a) Mapa de contorno de suscetibilidade magnética (SM) do Granito Bannach. Notar que os maiores valores de SM encontram-se nas bordas do corpo, onde ocorrem as fácies menos evoluídas. Ao contrário, na porção central do batólito, na área de ocorrência dos leucogranitos, encontram-se os menores valores de SM; b) Perfil NE-SW (BA) gerado a partir do comportamento magnético das diversas fácies do Granito Bannach

As correlações positivas entre SM e Fe_2O_3 , FeO , MgO e TiO_2 , CaO e negativas entre SM e $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, K_2O e SiO_2 justificam as relações observadas entre SM e o conteúdo mineral das diversas fácies do corpo.

MINERAIS ÓXIDOS DE Fe E Ti As descrições apresentadas neste trabalho referem-se a sete variedades do Granito Bannach agrupadas em três grandes conjuntos petrográficos: a) fácies de granulação grossa portadoras de anfibólio + biotita ± clinopiroxênio, representadas por: biotita-anfibólio-monzogranito grosso (BAMzG) e anfibólio-biotita-monzogranito grosso (ABMzG); b) fácies portadora de biotita com textura porfirítica (BMzP) e c) fácies leucograníticas, com termos grossos (LMzG), médios (LMzM) e finos (LMzF).

O Granito Bannach apresenta conteúdos modais expressivos de minerais opacos, sendo representados por magnetita (Mt), Ilmenita (Ilm), hematita (Ht), geralmente na forma de martita, e ocasionalmente pirita (Py), calcopirita (Cpy). As diferentes fácies do corpo Bannach apresentam muitas analogias mineralógicas em termos dos minerais opacos, porém elas mostram variações marcantes nos seus conteúdos modais e, principalmente, nas feições texturais dos mesmos. Os conteúdos modais de opacos são mais elevados nos BAMzG (1,9%), diminuindo no sentido ABMzG (0,7%), LMzG (0,2%), LMzM (0,1%) e LMzF (<0,1%), sendo que nos BMzP os valores são elevados (1,4%), destoando da tendência dominante. Esses minerais geralmente estão associados aos ferromagnesianos ou, mais particularmente com titanita e apatita.

Magnetita A magnetita ocorre predominantemente como cristais hipidiomórficos e, mais raramente, xenomórficos associados aos minerais ferromagnesianos. Mostra contatos regulares com esses e associam-se com outros minerais óxidos (Ilm e Ht). Nas fácies portadoras de anfibólio + biotita ± clinopiroxênio e nos BMzP, os cristais de magnetita são mais abundantes e mostram-se com uma incipiente martitização nas suas bordas. O conteúdo modal de magnetita nos leucogranitos é bastante reduzido e seus cristais mostram-se mais oxidados em relação às fácies precedentes.

Análises qualitativas, por meio de EDS obtidos por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) demonstram que os cristais de magnetita possuem baixos teores de titânio, isso juntamente com sua associação com os diversos tipos texturais de ilmenita, sugere que a mesma foi derivada da titanomagnetita (Tmt) (solução sólida entre ulvoespínélio e magnetita) por meio do processo de oxi-exsolução.



Ilmenita A Ilmenita ocorre em todas as fácies do granito, porém é mais abundante nas fácies BAMzG e ABMzG, onde apresenta uma maior diversidade textural. Nos leucogranitos os cristais de ilmenita apresentam-se heterogêneos e fortemente transformados, sobretudo no centro dos cristais. A análise textural dos óxidos permitiu reconhecer cinco formas distintas de Ilm : 1- lamelas de exsolução nos cristais de Mt (Ilm do tipo *Trellis* ou treliça (Ilm T)); 2 - lamelas espessas e contínuas no interior da Mt (Ilm do tipo *Sandwich* (Ilm S)); 3 - cristais regulares associados a Mt, encontrados no interior das mesmas (Ilm do tipo *Composite* interna (Ilm Cint)) e em contato externo com ela (Ilm do tipo *Composite* externa (Ilm Cext)); 4 - manchas irregulares dentro dos cristais de Mt (Ilm do tipo *Patch* (Ilm P)), e 5 - cristais isolados (Ilm do tipo individual (Ilm I)).

Os aspectos de raio-x obtidos por meio de EDS demonstram que as composições da Ilm T e Ilm Cint são muito similares, isso juntamente com as evidências texturais sugerem contemporaneidade entre essas fases, cuja suas origens estão relacionadas aos processos de oxidação-exsolução da titanomagnetita primária. Essas mesmas evidências são válidas também para as ilmenitas do tipo S e P.

A Ilm I e Ilm Cext possuem composições semelhantes apresentando conteúdos de Mn e Ti inferior aos dos cristais do tipo T e Cint. É comum cristais de Ilm I xenomórfico com coroas de titanita, sugerindo substituição parcial dos mesmos. Essa relação é observada também no caso de cristais de Ilm Cex, o que reforça sua origem magmática.

Hematita Está presente em todas as fácies, porém com conteúdo modal variável, sempre substituindo a Mt (processo de martitização), comumente desenvolvendo-se ao longo dos planos {111} desse mineral. É freqüente nas fácies de leucogranitos (LMzG, LMzM e LMF), cristais de Mt inteiramente substituídos por hematita. Segundo (Haggerty, 1981) o processo de hematitização ocorre sobre cristais de Mt pobres em Ti. Isto é coerente com o observado, uma vez que o desenvolvimento da Ht ocorre ao longo dos planos de contato entre Mt e Ilm T, sugerindo que a Ht é posterior ao processo de exsolução-oxidação

que afetou a TMt original. O baixo teor de Ti na Mt das diferentes fácies do Granito Bannach foi comprovado por meio de análises de MEV, onde a Mt associada às lamelas de Ilm T apresentou sistematicamente baixo conteúdo de Ti. Com base nisto, e na T mínima de formação da Ilm T (Lindsley 1981, Spencer & Lindsley 1981), admite-se que a martita tenha se formado em T inferiores a 620°C e, portanto, também em condições *subsolidus*.

CONCLUSÃO O Granito Bannach apresenta valores relativamente elevados de SM ($> 1,078 \times 10^{-3}$) e das razões $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$, bem como de minerais opacos ($>0,1\%$) com a magnetita ocorrendo em todas as suas fácies. Esses fatores juntamente com a presença marcante da paragénese magnetita-titanita-quartzo, permitem classifica-lo como um granito da série magnetita (Ishihara 1981), formados em condições de fugacidade de oxigênio ($f\text{O}_2$) próximas daquelas dos tampões NNO e HITMQ (Wones 1989). Essas características que o Granito Bannach apresenta são similares aos outros corpos que compõem a Suíte Jamom (Redenção, Musa e Jamon) (Fig. 4), fortalecendo as afinidades existentes entre eles, tanto em termos de comportamento magnético, quanto de tipologia e geoquímica. Todos esses granitos são classificados como tipo A, correspondendo à variedade subalcalina, formada em condições oxidantes (Dall'Agnol *et al.* 2005).

Com o avanço da diferenciação magmática, crescimento do teor de H_2O no líquido e o aumento relativo de $f\text{O}_2$, em particular nas fácies mais leucocráticas, os valores de SM tendem ser mais baixos, haja vista o conteúdo mais reduzido de opacos e a transformação mais acentuada da magnetita para hematita, em função da maior intensidade das transformações pós-magmáticas. As associações dos minerais formados nesse estágio indicam que condições situadas acima do tampão HM devem ter sido atingidas, pelo menos localmente, para justificar a martitização da magnetita. Esse processo de oxidação teria sido favorecido nas fácies de leucogranitos, por derivarem de líquidos mais ricos em voláteis.

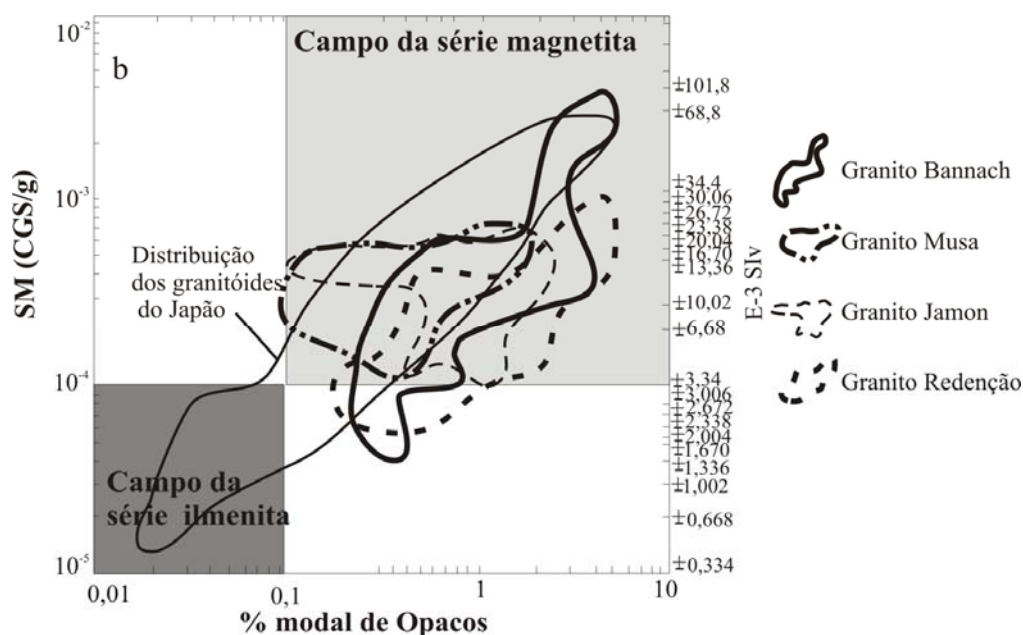


Figura 4. Relação entre o conteúdo modal de opacos e suscetibilidade magnética dos granitos Bannach, Jamon, Musa e Redenção, mostrando que esses granitos incidem no campo dos granitos a série a magnetita (Ishirara)

Agradecimentos Aos pesquisadores do Grupo de Pesquisa Petrologia de Granitóides (GPPG-CG-UFPA) pelo apoio nas diversas etapas deste trabalho. Ao CNPq pela

concessão da bolsa de iniciação científica do primeiro autor e ao Centro de Geociências (CG-UFPA) pelo suporte técnico.

Referências

- DALL'AGNOL R., PICHAVANT M., CHAMPENOIS M. 1997a. Iron-Titanium Oxide Minerals of the Jamon Granite, Eastern Amazonian Region, Brazil: Implications for the Oxygen Fugacity in Proterozoic, A-type Granites. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, **69** (3): 325-347.
- DALL'AGNOL R., TEIXEIRA N.P., RÄMÖ O.T., MOURA C.A.V., MACAMBIRA M.J.B., OLIVEIRA D.C.O. 2005. Petrogenesis of the Paleoproterozoic Rapakivi A-type granite of the Archean Carajás Metallogenic Province, Brazil. *Lithos*, **80**: 101-129.
- HAGGRTY S. E. 1981. Oxidation of opaque mineral oxides in basalts. In: RUMBLE III D. (ed.) *Oxide minerals*. 2nd ed. Washington, Miner. Soc. Am., p.1-99. (Short course notes).
- LINDSLEY D.H. 1981. Some experiments pertaining to the magnetite-ulvöspinel miscibility gap. *American Mineralogist*, **66**: 759-762.
- SPENCER K.J. & LINDSLEY D.H. 1981. A solution model for coexisting iron-titanium oxides. *Amer. Mineralogist*, **66**: 1189 – 1201.
- OLIVEIRA D.C. 2001. *Geologia, geoquímica e petrologia magnética do granito anorogênico Redenção, sudeste do estado do Pará*. Belém (PA). Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Dissertação de Mestrado, 206p.
- ISHIHARA S. 1981. The granitoid series and mineralization. In: Skinner, B. J. ed. *Economic Geology*, 75th anniversary Volume, p.458-484.
- WONES D.R. 1989. Significance of the assemblage titanite + magnetite + quartz in granitic rocks. *American mineralogist*, **74**: 744-749.