

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ARTHUR LEMOS GIOVANNINI

CONTRIBUIÇÃO À GEOLOGIA E GEOQUÍMICA DO CARBONATITO E DA JAZIDA  
(Nb, ETR) DE SEIS LAGOS (AMAZONAS)

Porto Alegre

2013

ARTHUR LEMOS GIOVANNINI

CONTRIBUIÇÃO À GEOLOGIA E GEOQUÍMICA DO CARBONATITO E DA JAZIDA  
(Nb, ETR) DE SEIS LAGOS (AMAZONAS)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geoquímica.

Orientador: Artur Cezar Bastos Neto

Co-orientador: Vítor Paulo Pereira

Porto Alegre

2013

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro do Projeto “Caracterização das mineralizações de nióbio, ETR e fosfato do Distrito Carbonatítico de Seis Lagos, norte do Estado do Amazonas, Brasil”, que possibilitou a execução desta dissertação. Também agradeço ao Serviço Geológico Nacional (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais; CPRM), pelo fornecimento das amostras e ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Petrobrás pela bolsa de estudos.

Agradeço também, aos meus orientadores Artur Cezar Bastos Neto e Vitor Paulo Pereira, além dos companheiros de bolsa Tamara Manfredi, Marco Rossoni, Pedro Bastos e Maurício Bidone.

## RESUMO

O estudo da geologia e geoquímica do carbonatito Seis Lagos e da jazida de Nb e ETR associada foi realizado a partir de testemunhos de dois furos de sondagem efetuados pela CPRM nos anos 70. Um dos furos, locado numa parte mais central do morro dos Seis Lagos, perfurou a crosta laterítica mineralizada, interpretada como formada a partir do carbonatito alterado. O outro furo, locado fora da estrutura mineralizada, perfurou a encaixante gnáissica e cortou, a 230 m de profundidade, um dique de carbonatito originalmente descrito neste trabalho. As técnicas utilizadas foram microscopia ótica, microscopia eletrônica, difratometria de raios X e análises químicas de rocha total por ICP. As características químicas e mineralógicas do carbonatito caracterizam-no como um siderita carbonatito. O Nb ocorre na forma mineralógica de chumbopirocloro; os ETR ocorrem principalmente na monazita e subordinadamente na barita e na gorceixita. O carbonatito apresenta concentrações anômalas de Nb, ETRL (especialmente pelo Ce), Ba, Sr e Pb. A crosta laterítica foi subdividida em 7 tipos texturais/composicionais, do topo para a base: crosta pisolítica, crosta fragmentada, crosta mosqueada, crosta roxa com oólitos, crosta manganesífera, crosta roxa e crosta marrom. Em todas as crostas, a hematita é o mineral mais abundante, seguido pela goethita; na crosta manganesífera (até 32% de MnO), o principal mineral de Mn é a hollandita; os ETR ocorrem na forma de florencita (secundária) e o Nb na forma de Nb-rutilo e Nb-brookita (ambos relictos). A Nb-brookita ocorre na forma de oólitos com estrutura do tipo anéis de Liesegang, sua origem pode ser ligada ao estágio hidrotermal. A crosta manganesífera exerceu um forte efeito (scavenger) sobre a distribuição vertical de alguns elementos, notadamente pelo Co, Ba, Ce e ETRP que, lixiviados de crostas superiores, foram enriquecidos na crosta manganesífera. A remobilização dos ETR durante a lateritização foi bem menor nas crostas mais inferiores. Nestas, o  $Ce^{4+}$  foi fortemente estabilizado e enriquecido em até 10 vezes. Além deste, somente o La foi apenas localmente um pouco enriquecido. O enriquecimento do Nb na laterita em relação ao carbonatito foi da ordem de 10 vezes, eventualmente atingindo 100 vezes. As modificações nas concentrações de Nb ao longo do perfil laterítico são associadas a variações nas composições do protólito e aos processos de abatimento da laterita. Um processo de bauxitização posterior parece ter afetado a parte superior do perfil laterítico; parte da florencita aí existente pode ser ligada a esta fase.

## ABSTRACT

The geology and geochemistry of the Seis Lagos carbonatite and the Nb and REE bearing associated ore deposit were studied using cores of two drill holes performed by CPRM in the 70's. One of the drills, allocated in a central part of the Seis Lagos hill, cut a weathered and mineralized lateritic crust that was interpreted as formed by the carbonatite alteration. The other core, allocated outside the mineralized structure, cut the gneissic host rock and a carbonatite dyke, at 230m depth. This carbonatite is first described in this report. The techniques used in this work were the optic microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction and ICP bulk rock chemical analyses. The chemical and mineralogical carbonatite data classify it as a siderite carbonatite. Th and Nb occur as plumbopyrochlore; REE as monazite and, subordinately, in barite and gorceixite. Anomalous concentrations of Nb, LREE (especially Ce), Ba, Sr and Pb were found in the carbonatite. The lateritic crust were subdivided in 7 textural/compositional types, from top to bottom: pisolitic crust, fragmented crust, mottled crust, purple crust with oolits, manganesitic crust, purple crust and brown crust. In all of the crusts, the hematite is the main mineral, followed by goethite; at the manganesitic crust (up to 32% of MnO), the main Mn mineral is hollandite; the REE occurs as florencite (secondary) and the Nb crystallize as Nb-rutile and Nb-brookite (both relict). The Nb-brookite occurs at the form of oolits with Liesegang rings structures, and its genesis may be connected to a hydrothermal stage. The manganesitic crust produced a strong effect (scavenger) over the vertical distribution of some elements, especially the Co, Ba, Ce and HREE that were leached from upper crusts and enriched in the manganesitic crust. The remobilization of REE during the lateritization process was less effective in the lower crusts. In these, the Ce<sup>4+</sup> was strongly stabilized and enriched up to 10 times. In addition to this, only the La was locally slightly enriched. The enrichment of Nb in laterite, in relation to the carbonatite, was on average 10 times, eventually up to 100 times. The change in the Nb concentrations along the laterite profile was associated to the changes in the protolith composition and laterite collapse process. A posterior bauxitic process seems to have affected the upper lateritic profile, and part of the florencite can be connected to this stage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura I.1.1 Imagem de satélite do morro dos Seis Lagos com a localização dos furos de sonda efetuados pela CPRM em 1975. ....	14
Figura I.2 Mapa de localização e acesso ao morro dos Seis Lagos. BR-307 (vermelho), trajeto de barco pelo igarapé Mirim (Azul).....	15
Figura II.1 Imagem microscópica do carbonatito.(A) Siderita e barita a luza natural (B) Siderita e barita em luz polarizada (C) Imagem eletrônica de uma siderita corroída e de uma barita.....	27
Figura II.2 Imagem eletrônica da barita com EDS. ....	27
Figura II.3 Imagem eletrônica da gorceixita com EDS.....	28
Figura II.4(A e B) Imagem eletrônica da monazita com EDS .....	29
Figura II.5 Imagem eletrônica do chubopirocloro com EDS.....	29
Figura II.6 Resultado da análise de raio X da amostra SG-02-AM-53C do carbonatito de Seis Lagos.....	30
Figura II.7 Classificação do carbonatito de Seis Lagos, modificada de Le Maitre 1989, ano, onde também estão plotados os carbonatitos de outras localidades. ....	32
Figura II.8 Gráfico dos teores de elementos maiores normalizados pela média de ferrocarbonatitos mundo. ....	35
Figura II.9 Gráfico dos teores de elementos traço normalizados pela média de ferrocarbonatitos mundo. ....	35
Figura II.10 Diagrama de ETR no carbonatito Normalizados por C1 ((Sun & McDonough 1989). ....	37
Figura II.11 Gráfico dos teores de elementos terras raras normalizados pela média de ferrocarbonatitos mundo. ....	38
Figura III.1 Distribuição dos tipos de crosta laterítica e respectivas amostras estudadas ao longo do furo sondagem SG-01-AM .....	40
Figura III.2 Crosta laterítica ferruginosa do tipo crosta pisolítica. ....	41
Figura III.3 Difratoograma de raios X de amostra da crosta pisolítica.....	43
Figura III.4 Fotomicrografias da crosta pisolítica. (A): pisólitos de goethita em meio a uma massa de goethita com aspecto fibroso. (B): cavidade preenchida por goethita com aspecto fibroso. ....	44
Figura III.5 Fotomicrografia de cristal de Nb-rutilo da crosta pisolítica. ....	45

Figura III.6 Padrão de distribuição dos elementos maiores em duas amostras da crosta pisolítica normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM01 (vermelho) SG-01-AM02 (azul). .....	46
Figura III.7 Padrão de distribuição dos elementos traço em duas amostras da crosta pisolítica normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM01 (vermelho) SG-01-AM02 (azul). .....	47
Figura III.8 Padrão de distribuição dos elementos terras raras em duas amostras da crosta pisolítica, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM01 (vermelho) SG-01-AM02 (azul). .....	48
Figura III.9 Aspecto macroscópico da crosta fragmentada. ....	49
Figura III.10 Difratoograma de raios X de amostra da crosta fragmentada (SG-01-AM-04). ..	51
Figura III.11 Fotomicrografias da crosta fragmentada. (A) Nódulos de hematita. (B) Goethita fibrosa preenchendo espaços vazios. (C) Cristal zonado de Nb-rutilo da porção argilosa da crosta. ....	52
Figura III.12 Imagem MEV e análise por EDS de Nb-rutilo da crosta fragmentada. ....	53
Figura III.13 Padrão de distribuição dos elementos maiores da crosta fragmentada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-03 (vermelho), SG-01-AM-04 (azul) e SG-01-AM-08 (verde). ....	55
Figura III.14 Padrão de distribuição dos elementos traço da crosta fragmentada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-03 (vermelho), SG-01-AM-04 (azul) e SG-01-AM-08 (verde). ....	56
Figura III.15 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta fragmentada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-03 (vermelho), SG-01-AM-04 (azul) e SG-01-AM-08 (verde). ....	57
Figura III.16 Aparência macroscópica da crosta mosqueada. ....	58
Figura III.17 Difratoograma de raios X de amostra da crosta mosqueada. ....	61
Figura III.18 Fotomicrografias da crosta mosqueada. (A) Goethita com textura botrioidal. (B) Parte argilosa da crosta com numerosos cristais de Nb- rutilo. ....	62
Figura III.19 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta mosqueada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-05 (vermelho), SG-01-AM-06 (azul) e SG-01-AM-07 (verde). ....	63
Figura III.20 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta mosqueada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-05 (vermelho), SG-01-AM-06 (azul) e SG-01-AM-07 (verde). ....	64

Figura III.21 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta mosqueada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-05 (vermelho), SG-01-AM-06 (azul) e SG-01-AM-07 (verde).....	65
Figura III.22 Aspecto macroscópico da crosta roxa (explicação no texto).....	66
Figura III.23 Difratoograma de raios X de amostra da crosta roxa. ....	67
Figura III.24 Difratoograma de raios X da crosta roxa.....	69
Figura III.25 Oólitos de Nb-bookita com anéis de Liesegang da crosta roxa . (A) Anéis crescidos a partir de dois núcleos distintos, com subsequente crescimento conjunto. (B) Oólito quebrado, apresentando sobrecrecimento de anéis de Liesegang. ....	70
Figura III.26 (A) Imagem MEV de oólito com anéis de Liesegang. (B) Imagem MEV do detalhe marcado na imagem A, com perfil composicional para Ti (vermelho), Fe (azul) e Nb (verde). ....	71
Figura III.27 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-09 (azul), SG-01-AM-10 (vermelho), SG-01-AM-11 (verde) e SG-01-AM-12 (roxo). ....	73
Figura III.28 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-09 (azul), SG-01-AM-10 (vermelho), SG-01-AM-11 (verde) e SG-01-AM-12 (roxo). ....	74
Figura III.29 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-09 (azul), SG-01-AM-10 (vermelho), SG-01-AM-11 (verde) e SG-01-AM-12 (roxo). ....	75
Figura III.30 Aspecto macroscópico da crosta manganesífera. (A) Crosta com aspecto bandado. (B) Crosta brechada. ....	77
Figura III.31 Difratoograma de raios X da crosta manganesífera, amostra SG-01-AM-14. ....	78
Figura III.32 . Difratoograma de raios X da crosta manganesífera, amostra SG-01-AM-15.....	79
Figura III.33 Aspecto microscópico da crosta manganesífera. (A) Goethita fraturada e fraturas preenchidas por hollandita. (B) Cristal de Nb-rutilo. ....	80
Figura III.34 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta manganesífera normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-13 (azul) SG-01-AM-14 (vermelho), SG-01-AM-15 (verde), SG-01-AM-16 (roxo) e SG-01-AM-17 (azul claro).....	82
Figura III.35 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta manganesífera, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-13 (azul) SG-01-AM-14 (vermelho), SG-01-AM-15 (verde), SG-01-AM-16 (roxo) e SG-01-AM-17 (azul claro).....	83

Figura III.36 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta manganésifera, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-13 (azul) SG-01-AM-14 (vermelho), SG-01-AM-15 (verde), SG-01-AM-16 (roxo) e SG-01-AM-17 (azul claro).....	84
Figura III.37 Aspecto macroscópico da crosta roxa. ....	85
Figura III.38 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-20 (vermelho) e SG-01-AM-22 (verde) .....	87
Figura III.39 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta roxa, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-20 (vermelho) e SG-01-AM-22 (verde) .....	88
Figura III.40 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta roxa, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-20 (vermelho) e SG-01-AM-22 (verde). ....	89
Figura III.41 Aspecto macroscópico da crosta marrom. ....	90
Figura III.42 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-24 (azul) SG-01-AM-27 (vermelho), SG-01-AM-30 (verde), SG-01-AM-33 (roxo) e SG-01-AM-35 (azul claro). ....	92
Figura III.43 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-24 (azul) SG-01-AM-27 (vermelho), SG-01-AM-30 (verde), SG-01-AM-33 (roxo) e SG-01-AM-35 (azul claro). ....	93
Figura III.44 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-24 (azul) SG-01-AM-27 (vermelho), SG-01-AM-30 (verde), SG-01-AM-33 (roxo) e SG-01-AM-35 (azul claro). ....	94
Figura III.45 Distribuição vertical do teor de $Fe_2O_3$ .....	97
Figura III.46 Distribuição vertical do teor de MnO.....	99
Figura III.47 Distribuição vertical dos teores de ETRL (menos o Ce), Ce, e ETRP+Y.....	101
Figura III.48 Distribuição vertical do teor de Al. ....	103
Figura III.49 Distribuição vertical dos teores de $TiO_2$ , Nb e W.....	105
Figura III.50 Distribuição vertical da razão Ti/Nb .....	108
Figura III.51 Distribuição vertical dos teores de $P_2O_5$ , ETR total e Th.....	110
Figura III.52 Distribuição vertical dos teores de ETRL (menos o Ce), Ce, e ETRP+Y.....	112
Figura IV.1 Diagrama comparando teores de ETR em carbonatitos do mundo. Seis Lagos (roxo); Bayan Obo (azul); Araxa (verde) e Iron Hill (vermelho).....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 Resultado das análises por ICP-MS dos elementos maiores (peso %) do siderita carbonatito de Seis Lagos.....	31
Tabela II.2 Resultado das análises por ICP-MS dos elementos menores e traços (ppm) do siderita carbonatito de Seis Lagos. ....	33
Tabela II.3 Resultado das análises por ICP-MS dos elementos terras raras (ppm) do siderita carbonatito de Seis Lagos.....	36
Tabela III.1 Composição da crosta pisolítica (elementos maiores). ....	46
Tabela III.2 Composição da crosta pisolítica (elementos traço). ....	47
Tabela III.3 Composição da crosta pisolítica (elementos terras raras). ....	48
Tabela III.4 Composição da crosta fragmentada (elementos maiores). ....	55
Tabela III.5 Composição da crosta fragmentada (elementos traço). ....	56
Tabela III.6 Composição da crosta fragmentada (elementos terras raras). ....	57
Tabela III.7 Composição da crosta mosqueada (elementos maiores). ....	63
Tabela III.8 Composição da crosta mosqueada (elementos traço). ....	64
Tabela III.9 Composição da crosta mosqueada (elementos terras raras). ....	65
Tabela III.10 Composição química em elementos maiores da crosta roxa com oólitos. ....	73
Tabela III.11 Composição química em elementos traço (ppm) da crosta roxa com oólitos. ...	74
Tabela III.12 Composição química em elementos terras raras (ppm) da crosta roxa com oólitos. ....	75
Tabela III.13 Composição química em elementos maiores da crosta manganésífera. ....	82
Tabela III.14 Composição química em elementos traço (ppm) da crosta manganésífera. ....	83
Tabela III.15 Composição química em elementos terras raras (ppm) da manganésífera. ....	84
Tabela III.16 Composição química em elementos maiores da crosta roxa. ....	87
Tabela III.17 . Composição química em elementos traço (ppm) da crosta roxa. ....	88
Tabela III.18 Composição química em elementos terras raras (ppm) da crosta roxa. ....	89
Tabela III.19 Composição química em elementos maiores da crosta roxa. ....	92
Tabela III.20 Composição química em elementos traço (ppm) da crosta marrom. ....	93
Tabela III.21 Composição química em elementos terras raras (ppm) da crosta marrom. ....	94

## LISTA DE QUADROS

Quadro IV.1 Conteúdo de ETR na laterita de Mount Weld (Retirado de LOTTERMOSER 1990) .....	116
--	-----

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO .....	IV
ABSTRACT .....	V
LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	X
LISTA DE QUADROS .....	XI
I. INTRODUÇÃO .....	14
I.1 Localização da área .....	14
I.2 Breve histórico e síntese do conhecimento sobre Seis Lagos.....	16
I.3 Objetivos.....	19
I.4 Metodologia .....	20
I.5 Informações adicionais sobre aplicações, reservas e produção de Nb e ETR no Brasil e no mundo: a importância da jazida de Seis Lagos .....	21
II. ESTUDO DO CARBONATITO .....	23
II.1 Carbonatitos.....	23
II.2 Carbonatito de Seis Lagos .....	25
II.3 Mineralogia.....	26
II.4 Composição química de rocha total .....	31
III. ESTUDO DA CROSTA LATERÍTICA .....	39
III.1 Crosta Pisolítica.....	41
III.1.1 Mineralogia .....	41
III.1.2 Composição química da crosta pisolítica .....	45
III.2 Crosta Fragmentada .....	49
III.2.1 Mineralogia da crosta fragmentada .....	49
III.2.2 Composição química .....	54

III.3 Crosta Mosqueada. ....	58
III.3.1 Mineralogia.....	59
III.3.2 Composição Química.....	59
III.4 Crosta Roxa com Oólitos.....	66
III.4.1 Mineralogia.....	66
III.4.2 Composição Química.....	72
III.5 Crosta Manganésífera. ....	76
III.5.1 Mineralogia.....	76
III.5.2 Composição Química.....	81
III.6 Crosta Roxa.....	85
III. 6.1 Composição Química.....	86
III. 7 Crosta Marrom.....	90
III. 7. 1 Composição Química.....	91
III.8 Variação vertical do perfil laterítico.....	95
IV. DISCUSSÃO.....	114
V. CONCLUSÃO.....	123
VI. REFERÊNCIAS.....	125

## I. INTRODUÇÃO

### I.1 Localização da área

A jazida de Seis Lagos, associada Complexo Carbonatítico de Seis Lagos ou Distrito de Seis Lagos, cujo nome deriva do morro dos Seis Lagos (Fig. I.1), localiza-se no município de São Gabriel da Cachoeira, no Estado do Amazonas (Fig. I.2). A área pertence à folha NA.19-Z-D-V. O acesso à cidade de São Gabriel da Cachoeira pode ser feito por via aérea ou fluvial. De lá, segue-se por 65 km pela estrada BR-307, que liga São Gabriel a Cucuí, chegando-se à ponte sobre o igarapé Ia-Mirim. A partir desse ponto, segue-se 8 km por via fluvial até o sopé do morro dos Seis Lagos.



Figura I.1.1 Imagem de satélite do morro dos Seis Lagos com a localização dos furos de sonda efetuados pela CPRM em 1975.



## I.2 Breve histórico e síntese do conhecimento sobre Seis Lagos

O morro dos Seis Lagos foi descoberto no final dos anos 60 por geólogos do projeto RADAM-BRASIL, que tiveram sua atenção voltada para três estruturas circulares (Fig. I.2) com anomalias radiométricas de até 15.000 cps. As estruturas foram interpretadas como 3 chaminés vulcânicas e o conjunto foi denominado Distrito de Seis Lagos.

As chaminés estão encaixadas em um augen gnaisse monzogranítico ( fácies Tarsira) do Complexo Cauaburi (Lima & Pires J.L. 1985), datado de 1.8 Ga por SHRIMP (Santos et al. 2006). Os principais *trends* estruturais regionais têm orientação NW-SW e NE-SW, e, subordinadamente, direção N-S. No mapa geológico do Estado do Amazonas, elaborado pela CPRM (1976, Pinheiro et al), o Distrito de Seis lagos consta como Complexo Carbonatítico de Seis Lagos, correlacionado ao período Juro-Cretáceo, com uma idade de cerca de 160 Ma. Entretanto, esta idade foi inferida, pois não existe nenhuma datação isotópica do carbonatito ou da laterita associada.

A CPRM, que detém os direitos minerários da área, realizou, numa primeira fase, levantamentos geofísicos e geoquímicos e 4 sondagens rotativas (Fig. I.1) cujos resultados constam em Projeto Seis Lagos (Viegas Filho & Bonow, 1976). O Furo 1 cortou 255m de laterita mineralizada e foi interrompido ainda dentro deste material, sem atingir o saprólito ou a rocha sã. O Furo 2, cortou 34m de laterita não mineralizada e, em seguida, perfurou a rocha encaixante, sendo interrompido poucos metros após penetrar material descrito como rocha com carbonatos (berforsito ?), a 230m de profundidade, que, entretanto, não despertou maior interesse, posto que nenhuma lâmina petrográfica foi preparada, tão pouco foram realizadas análises químicas. O Furo 3 cortou 9m de laterita mineralizada, 40m de crosta argilosa e em seguida, perfurou o gnaisse, sendo interrompido a 110m de profundidade. O Furo 4, o mais profundo, foi locado na margem de um dos lagos existentes sobre o morro, onde ocorre a bacia Esperança. O furo atravessou 70 m de sedimentos finos, 170 m de argila carbonosa e 230 m de brecha carbonática. Esta brecha carbonática foi interpretada como carbonatito alterado por Issler (1980) e Bonow & Issler (1980). Posteriormente, 4 furos de sonda, com profundidades da ordem de 60 m, todos interrompidos dentro da crosta laterítica, permitiram que Justo & Souza (1984, 1986) calculassem reservas de 2.898 bilhões de toneladas de minério com teor de 2.81% de Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (valor 14 vezes maior do que a reserva

mundial então conhecida). Os dados geoquímicos apresentados consistem apenas das concentrações médias de Nb e Ce.

Corrêa (1995) e Corrêa & Costa (1997) realizaram os primeiros estudos científicos sobre Seis Lagos. Por motivos não esclarecidos, estes pesquisadores não tiveram, aparentemente, acesso aos testemunhos das sondagens. Para realizar o estudo, dispuzeram de um grande número de amostras superficiais coletadas nos perfis de geoquímica de solo realizados pela CPRM. Entretanto, dos furos de sonda, receberam apenas as alíquotas das amostras analisadas pela CPRM e somente dos Furos 1, 2 e 4 da primeira fase de sondagem. Mesmo sem poderem identificar, caracterizar e interpretar as texturas do minério, os referidos autores produziram importantes dados mineralógicos e geoquímicos (incluindo isótopos de O e C, especialmente da brecha carbonática do furo 4). Identificaram e analisaram diversos minerais presentes no perfil laterítico do morro de Seis Lagos, caracterizando este como constituído essencialmente por minerais de ferro (hematita, goetita) com alguns acessórios importantes, como, hollandita, romanechita, pirolusita, lithioforita, florencita, cerianita, gibbsita, ilmeneo-rutilo, brookita niobífera e rutilo niobífero, além de monazita, zircão e quartzo. Estes últimos foram considerados indicativos de que o substrato do morro dos Seis Lagos seria constituído por carbonatito. Os dados químicos da laterita foram comparados com dados químicos de carbonatitos de outras localidades e considerados típicos de alteração deste tipo de rocha. Um dos enfoques do trabalho foi a formação/evolução da bacia Esperança e as relações entre a sedimentação e os processos de alteração e erosão ocorridos na sua margem. Baseados principalmente nos dados isotópicos que teriam uma variabilidade muito grande para um carbonatito, os autores concluíram que a brecha carbonática da base do Furo 4 também seria sedimento lacustre e não carbonatito alterado. Os trabalhos de Correia (1995) e Correia e Costa (1997) foram os últimos realizados sobre Seis Lagos.

Em dezembro de 2010, o grupo de pesquisa UFRGS-CNPq Mineralogia e Geoquímica de Depósitos Mineraiis iniciou investigações sobre Seis Lagos, no quadro do doutorado do geólogo da CPRM Mateus Marcili Santos Silva. Entretanto, muito pouco pode ser feito, devido ao falecimento do doutorando, ocorrido em junho de 2011. O projeto foi reiniciado em março de 2012, no quadro desta dissertação e de um trabalho de conclusão de graduação em geologia (Rossoni 2012). Coube a este último realizar um estudo de sensoriamento remoto sobre o cotrole da intrusão de Seis Lagos e a este mestrando realizar o estudo do depósito,

desta feita contando com os testemunhos de sondagem que a CPRM havia liberado para o doutoramento do seu geólogo Mateus Silva.

### **I.3 Objetivos**

O objetivo geral deste trabalho é contribuir para o aperfeiçoamento do modelo genético do depósito de Seis Lagos. A breve revisão do conhecimento sobre Seis Lagos acima apresentada deixa absolutamente claro que a consecução deste objetivo maior passa obrigatoriamente por 3 objetivos específicos:

1. Estudar a rocha da base do furo 2 pra averiguar se trata-se ou não carbonatito e, em caso positivo (como foi aqui comprovado), caracterizar a suas composições química e mineralógica.
2. Estudar o minério, desta feita a partir de testemunhos de sondagem, focando, principalmente, na identificação dos diferentes tipos de texturas, suas relações com a composição química e suas variações verticais. Estudos mineralógicos também serão realizados, mas, deve ficar claro, que não se pretende, de forma alguma, realizar numa dissertação de mestrado um estudo mineralógico exaustivo em material tão complexo e de difícil manipulação como a laterita.
3. Finalmente, uma vez conhecida a rocha original e mais bem conhecido o minério formado a partir desta rocha, efetuar uma comparação entre os dois, buscando informações para o entendimento dos processos que atuaram na formação da laterita mineralizada.

## I.4 Metodologia

As amostras para este trabalho foram cedidas pela Companhia Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e são oriundas de 2 furos de sondagem realizados no ano de 1975. O furo 1 (SG-01-AM) que cortou 255 m de laterita mineralizada, tendo sido interrompido ainda dentro deste material. E o furo 2 (SG-02-AM) que localiza-se na borda do complexo, mas é muito importante pois foi o único furo a cortar o carbonatito. A localização desses 2 furos pode ser observada na figura I.1.

Os estudos petrográficos foram realizados com microscópio petrográfico Leica DMLP. As análises por difratometria de raios X (DRX) foram realizadas em rocha total e, adicionalmente, em concentrados obtidos com a utilização de diiodometano ( $d=3,325$ ) e com separador isodinâmico Frantz. Foram realizadas no Instituto de Geociências da UFRGS em difratometro SIEMENS D-5000, utilizando radiação Cu-K $\alpha$  e filtro de Ni, no intervalo entre 2 e 80° 2 $\theta$ , com velocidade de 2°2 $\theta$  por segundo. Para o tratamento dos dados dos difratogramas foi utilizado o programa *Match 1.01* (desenvolvido pela *Crystal Impact*).

As análises químicas de elementos maiores, menores e em traço, por ICP-MS em rocha total, foram efetuadas no Laboratório ACME Analytical Laboratories Ltda. Foram feitas correlações estatísticas dos elementos químicos através dos resultados obtidos por ICP, utilizando o programa Excel 2010, do Microsoft Office 2010, primeiramente entre todas as amostras e posteriormente dentro de cada uma das subdivisões macroscópicas e químicas previamente identificadas.

As análises por MEV (EDS e perfis de elementos químicos) foram executadas no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS, com a utilização de um equipamento marca JEOL-JSM5800, com voltagem de 20 Kv.

## **I.5 Informações adicionais sobre aplicações, reservas e produção de Nb e ETR no Brasil e no mundo: a importância da jazida de Seis Lagos**

### Nióbio

O Nb é um dos principais constituintes dos aços inoxidáveis, sendo também utilizado em ligas de metais não ferrosos e em soldas elétricas, além de várias outras aplicações.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (Sumário Mineral, 2010), as reservas medidas de nióbio ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) em 2010 totalizam 842.460.000 t de minério, com teor médio de 0,71%, ou 5.987.259 t de nióbio contido. Elas estão concentradas nos Estados de Minas Gerais (64,32%), Amazonas (34,04%) e Goiás (1,62%). Considerando-se o total de reservas medida, indicada e inferida, o Brasil tem 4.220.339.000 t de minério. Desse total, 3.493.328.000 t (82,77%) estão no Estado do Amazonas (principalmente em Seis Lagos, mas também ocorrem reservas de minério com baixo teor em Pitinga). Em Minas Gerais somam-se 649.060.000 t (15,37 %) e, em Goiás, 77.951.000 t (1,84%).

O Brasil mantém a liderança na oferta de nióbio no cenário mundial, atingindo uma participação de 98% da produção mundial de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  contido no minério, que totalizou 60.692 t, no ano de 2008.

### Elementos Terras Raras

Na crosta terrestre, os ETR são relativamente abundantes, porém a demanda pelo bem mineral é imensa devido ao grande número de aplicações em variados tipos de indústrias e processos, sendo utilizados em diferentes setores como os de metalurgia, petróleo, química e cerâmica. Pelo fato de serem indispensáveis para a produção de energia limpa, como no caso do carro elétrico, e para os processos avançados de filtragem de água, têm sido denominados de “green elements”, pois reduzem a dependência em combustíveis fósseis, que produzem modificações no clima global. Dentre outras aplicações destaca-se a produção de armas, que as tornam importantes para as indústrias bélicas, sendo, por isso, de interesse estratégico de muitas nações.

Estes elementos estão concentrados em reservas localizadas principalmente na China, Índia, Malásia, EUA, Rússia, Kirziquistão e Sri Lanka, donde se deve destacar a China, pois produz cerca de 97% dos ETRs consumidos no planeta. Porém, devido ao crescimento industrial deste país, as projeções indicam que, em 2012, este passaria a consumir

toda a produção, especialmente de elementos como o neodímio, disprosio, térbio e ítrio, deixando o mundo dependente da descoberta de novas reservas e maior exploração das já existentes (Stone, 2009 e Service, 2010). Além disso, a China possui mais da metade das reservas de ETR do mundo e, recentemente, proibiu a exportação de európio, térbio e disprosio, que são os ETR mais escassos. Este fato tem provocado “uma corrida” pela descoberta de novas jazidas de ETR e nos estudos dos processos tecnológicos que envolvam esses elementos.

Não é possível afirmar com segurança as reservas mundiais de ETR, pois, em muitos casos, estes dados não são conhecidos ou informados, conforme pode ser verificado em Castor e Hedrick, 2006.

Das 10 maiores minas de ETR em atividade, 5 delas têm o minério associado a carbonatito. Essa rocha se tornou, portanto, o principal alvo da corrida por novas reservas de ETR. Alguns carbonatitos brasileiros contêm quantidades importantes de  $TR_2O_3$ , podendo ser destacado o de Araxá, com 4,4% na rocha (Issa Filho, Lima e Souza 1984) e 13,5% no minério de gorceixita e goyazita (Mariano 1989a). Em Catalão I, estimam-se reservas de aproximadamente 2 Mt., com aproximadamente 12% destes óxidos, que também estão concentrados em minério fosfático laterítico (gorceixita, florencita e especialmente monazita). De forma geral, todos maciços alcalinos da Província do Alto Paranaíba, incluindo Araxá, Salitre I e II, Serra Negra, Tapira e outros, contêm elevados teores de  $TR_2O_3$ , principalmente concentrados nos perfis lateríticos. Segundo Loureiro *et al.* 1989, também são descritas significativas concentrações de ETR nos complexos alcalino-carbonatíticos de Mato Preto, no Paraná (monazita, rabdofanita, florencita e niocalita); na Barra do Rio Ibirapuã, entre o Paraná e São Paulo (bastnaesita, synchysita e ancylita). Segundo Costa *et al.* (1991), o complexo de Maicuru, no Pará, contém até 17% de  $TR_2O_3$  associado também a fosfatos lateríticos. Porém, deve-se destacar que muitos destes minérios não foram caracterizados suficientemente para que possam ser explorados ou os estudos realizados apontam para dificuldades tecnológicas na separação dos óxidos de ETR.

No contexto mundial, as reservas brasileiras representam menos de 1% do total. Diante do acima exposto, ficam evidentes a importância estratégica dos ETR e a necessidade de mais estudos sobre estes elementos em carbonatitos brasileiros. Este trabalho representa uma importante contribuição neste sentido, pois Seis Lagos é um dos carbonatitos com maior potencial para estes elementos.

## II. ESTUDO DO CARBONATITO

### II.1 Carbonatitos

Os carbonatitos são relativamente raros e perfazem menos de 1% das rochas da crosta terrestre e estão comumente associados às rochas alcalinas. Na literatura existe registro da ocorrência de carbonatitos desde o Pré-cambriano até o Recente, estando associados a ambientes tectônicos compressivos, distensivos e intraplacas. Existem carbonatitos vulcânicos e plutônicos, cujas gêneses têm gerado amplas discussões no meio acadêmico. Na década de sessenta foram realizados vários experimentos de síntese de carbonatitos para explicar a origem destes magmas, pois anteriormente se pensava que poderiam ser oriundos de calcários remobilizados, xenólitos de mármore ou precipitados de soluções hidrotermais. A mineralogia dos carbonatitos é extremamente variada (mais de 280 minerais; Hogarth, 1989) e estas rochas podem conter muitos minerais economicamente importantes.

Carbonatitos são rochas que contém mais de 50% de carbonatos (Woolley & Kempe, 1989). O nome do carbonatito depende do mineral carbonático predominante: sövito ou alvikito (calcita), berforsito (dolomita), ferrocarbonatito (siderita ou ankerita) natrocarbonatito (carbonatos de sódio).

A maioria dos carbonatitos ocorre em ambiente de intraplacas continentais, embora alguns ocorram em margens continentais e outros associados com orogênese ou *rifts*. Nestes ambientes, os carbonatitos são comumente associados a falhas maiores ou formando lineamentos, cujas origens ainda não são conhecidas, pois não há nenhum controle estrutural aparente. A progressão de idades ao longo destes lineamentos é rara, ao contrário do que poderia se esperar se fossem gerados por *hot spot* (Winter, 2001).

Relativamente à gênese, os carbonatitos são rochas ígneas formadas a partir da fusão do manto, sendo que existem diferentes teorias para explicar a origem destas rochas: fusão parcial direta do manto (lherzolito hidro-carbonatado), cristalização fracionada e imiscibilidade de líquidos a partir de um magma parental. A maioria dos pesquisadores (Gittins, 1989; Willie, 1990; Bell e Simonetti, 1996; Winter, 2001) acredita que os carbonatitos podem ser gerados por todos estes processos.

Os carbonatitos podem conter um grande número de minerais (Hogarth, 1989), destacando-se aqueles com maior importância econômica: pirocloro (Nb), barita (Ba), anatásio e rutilo (Ti), zircão (Zr), magnetita (Fe), apatita (P e ETR), monazita e minerais da série bastnaesita-synchysita (ETR) e vermiculita. Além destes, destacam-se os carbonatos para a indústria do cimento e alguns complexos podem formar depósitos de calcopirita, uraninita e fluorita. Segundo Biondi (2003), geralmente esses minerais são primários, sendo que as primeiras emissões de magma carbonático contêm apatita, anatásio e magnetita (sövitos e beforsitos), enquanto as fases intermediárias contêm Nb (sovítica e beforsítica) e a fase tardia contém ETR (ferrocarbonatítica).

As composições médias dos elementos maiores, menores, traços e terras raras dos cálcio, magnésio e ferrocarbonatitos podem ser vista em Woolley e Kempe (1989).

## II.2 Carbonatito de Seis Lagos

Com o estudo do perfil laterítico do furo de sondagem SG-02-AM foi verificada a existência de um dique de carbonatito cortando as rochas encaixantes a 230 metros de profundidade. Em relatório da CPRM este carbonatito foi descrito como sendo um provável beforsito, porém nas análises realizadas com este trabalho verificamos se tratar de um ferrocarbonatito, sendo a siderita o principal mineral carbonático.

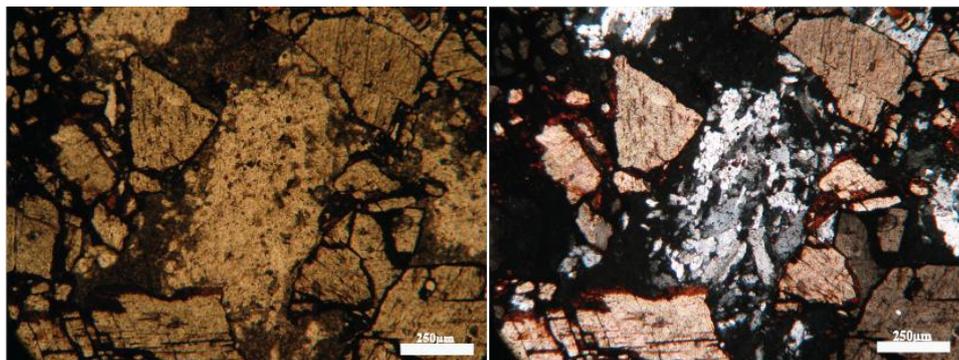
O carbonatito de Seis Lagos possui cor cinza e está levemente alterado, provavelmente uma alteração hidrotermal.

Na descrição deste furo de sondagem também foram encontrados alguns diques de rochas alcalinas cortando as rochas encaixantes granito/gnáissicas, que estão muito alteradas.

### II.3 Mineralogia

Nas análises por microscopia ótica, eletrônica de varredura e difração de raios X, do carbonatito de Seis Lagos, foi verificada a presença de siderita, barita, gorceixita, fosfato de ETR (interpretado como sendo monazita) e mineral rico em Nb e Pb (interpretado como sendo pirocloro).

A siderita (Figura II.1A e II.1B) é o principal carbonato formador do carbonatito, e representa 71,8% do mesmo (siderita carbonatito, segundo Mitchell, 2005). Nas análises por microscopia é possível verificar que seus grãos são euédricos e possuem cor amarronada, sendo que alguns cristais estão quebrados e apresentam ferruginização nas bordas e nas fraturas. Seus cristais possuem em média 700 micras e apresentam clivagem romboédrica típica dos carbonatos. Também é possível verificar feições de corrosão em alguns grãos deste mineral, que são destacadas nas imagens de elétrons retroespalhados (Figura II.1C), indicando a ação de processos tardios. As análises químicas ao MEV (EDS) possibilitaram verificar, para a maioria dos grãos, somente a presença de Fe como cátion, porém, em algumas partes de alguns grãos foi verificada a presença de Mg, indicando a possibilidade de ser ankerita, o que necessita estudos futuros.



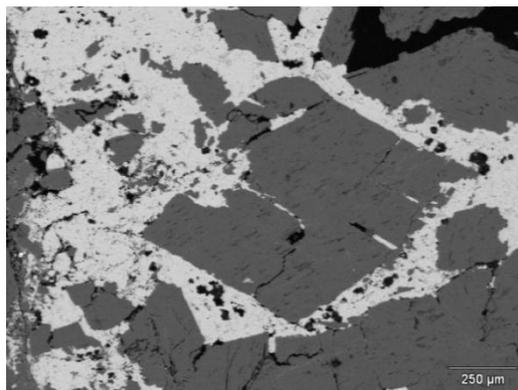


Figura II.1 Imagem microscópica do carbonatito.(A) Siderita e barita a luz natural (B) Siderita e barita em luz polarizada (C) Imagem eletrônica de uma siderita corroída e de uma barita.

A barita (Figuras II.1A e II.1B) é o mineral secundário mais abundante do carbonatito, cerca de 15,8% da rocha. Este mineral encontra-se nos interstícios dos grãos de carbonato e, quando observada no microscópio ótico em luz natural, apresenta cor semelhante à dos carbonatos, porém em luz polarizada verifica-se que são grãos policristalinos. Em análises por microscopia eletrônica de varredura por EDS (Figura II.2) foi possível verificar que é composta por aproximadamente 75,45% de bário, 23,16% de enxofre, 0,71% de Sr, 0,4% de Rb e 0,28% de Nd. As análises por microscopia permitem verificar que a barita é responsável pela corrosão dos grãos de siderita (Figura II.1C).

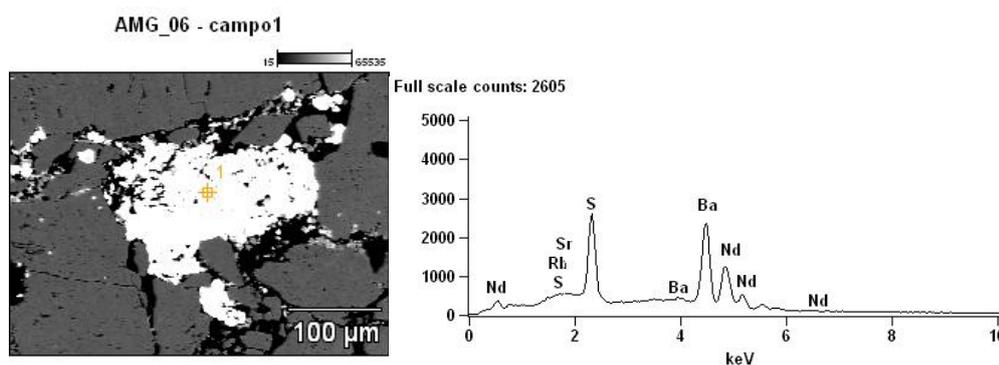


Figura II.2 Imagem eletrônica da barita com EDS.

A gorceixita ( $BaAl_3(PO_4)(PO_3OH)(OH)_6$ ) é um fosfato de bário e alumínio (Figuras II.3), comumente formada a partir de alteração de fosfatos primários nos carbonatitos. Em Seis Lagos é verificada em agregados poliminerálicos juntamente com a monazita e o pirocloro. Em análises ao MEV (Figura II.3) foi possível verificar que forma cristais

euédricos com tamanho de  $\cong 5$  micras composta por aproximadamente 48,36% de Ba, 25,46% de Al, 23,4% de P e 2,78% de Nd. As análises por raios X e o refinamento de estruturas possibilitaram verificar que a gorceixita compõe aproximadamente 7,5% da rocha.

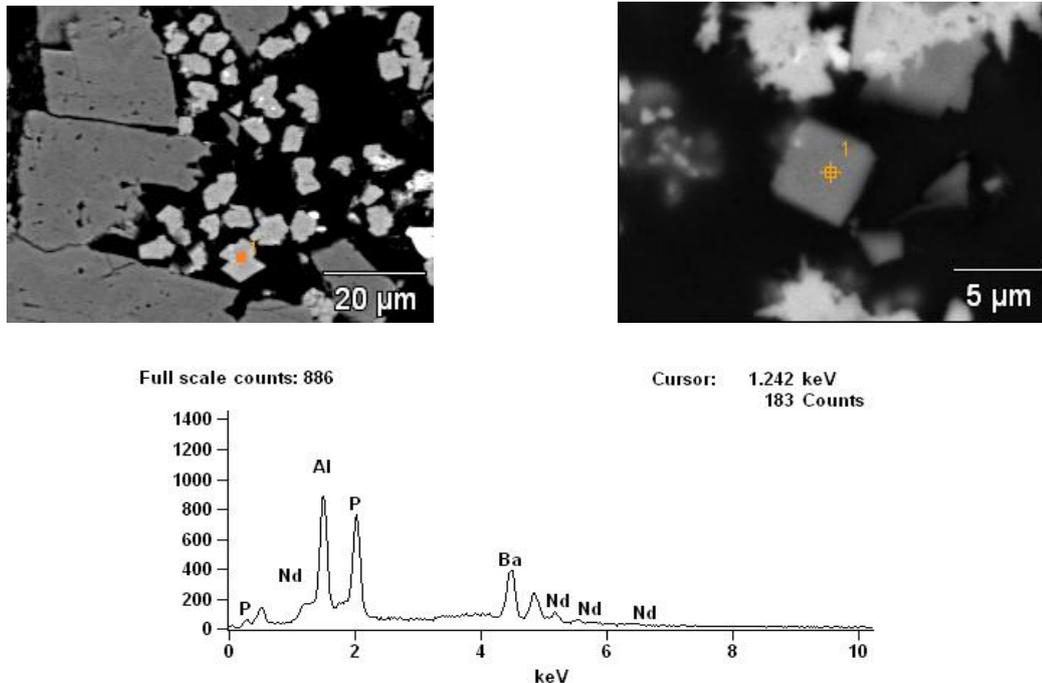


Figura II.3 Imagem eletrônica da gorceixita com EDS.

A monazita  $(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$ , assim como a gorceixita, foi verificada apenas nas análises por raios X e microscopia eletrônica. Segundo as análises ao MEV a monazita é composta por aproximadamente 23,28% de P, 5,51% de Ca, 5,14% de Ba e 66,1% de ETRT (2,77% de La, 20,33% de Ce, 3,97% de Pr, 36,74% de Nd e 2,29% de Gd). Esse mineral apresenta hábito fibrorradiado e seus grãos têm aproximadamente 5 micras (Figura II.4A e II.4B). A quantificação com as análises por raios X possibilitaram verificar que esse mineral compõe aproximadamente 4% da rocha.

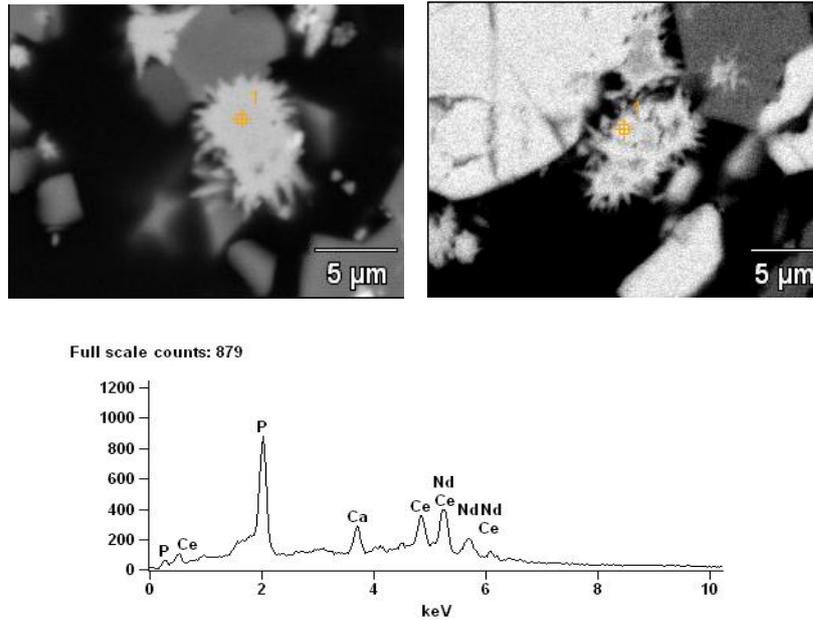


Figura II.4(A e B) Imagem eletrônica da monazita com EDS

O pirocloro foi identificado apenas no microscópio eletrônico de varredura e na difração de raio X, e apresenta uma composição compatível com a de chumbo pirocloro (Fig II.5). Nas análises ao MEV foi verificado que o pirocloro é composto por 52,27% de Pb, 34,97% de Nb, 7,12% de Ti, 3,55% de Si, 1,13% de Ca e 0,95% de Fe.

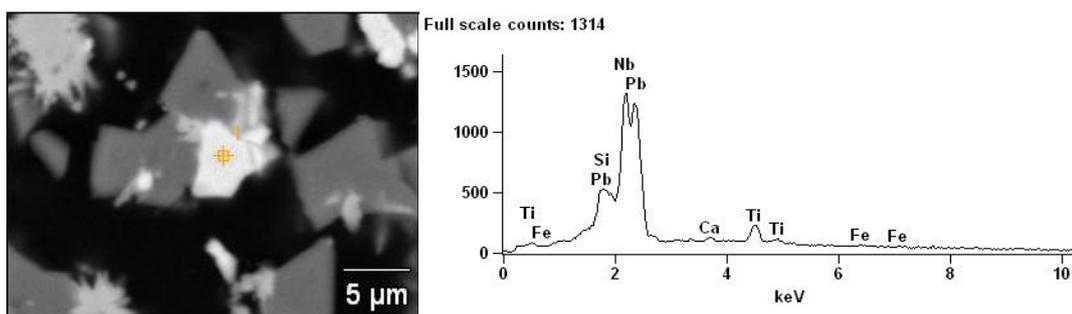


Figura II.5 Imagem eletrônica do chubopirocloro com EDS.

Um difratograma de raios X representativo do siderita carbonatito de Seis Lagos é apresentado na figura II.6, onde é possível verificar a presença dos principais minerais.

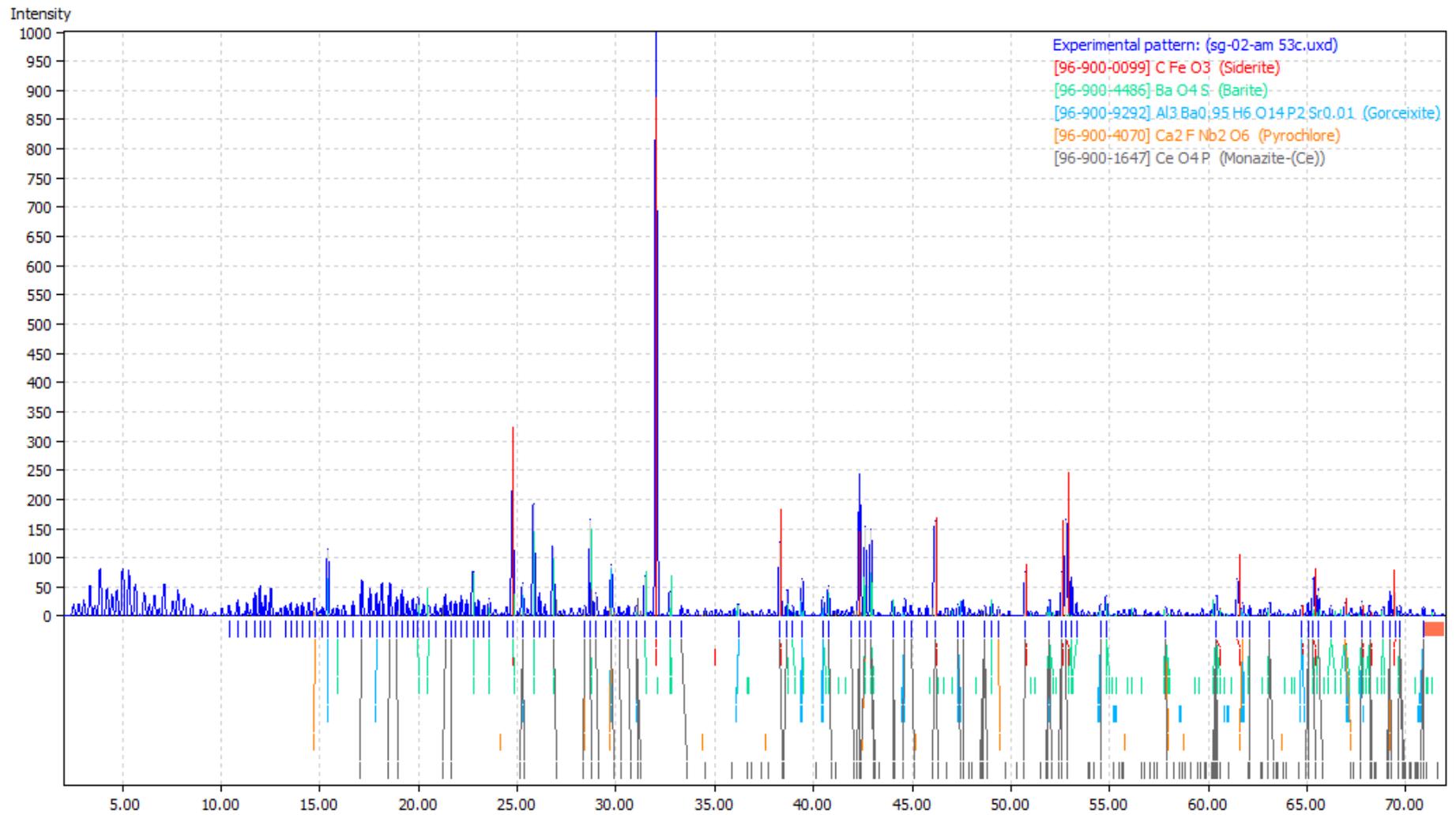


Figura II.6 Resultado da análise de raio X da amostra SG-02-AM-53C do carbonatito de Seis Lagos.

## II.4 Composição química de rocha total

Para análise do siderita carbonatito de Seis Lagos foram selecionadas cinco amostras, cujos resultados são apresentados nas tabelas II.1, II.2, II.3. A amostra SG-02-AM 54C apresenta valores de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> muito mais altos que as demais e menores teores dos demais elementos. Considerando que esta amostra está no contato do carbonatito com o granito encaixante, não deve ser representativa do carbonatito.

Com base nos resultados das análises químicas é possível verificar que o carbonatito caracteriza-se por apresentar teores relativamente altos de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (50%), LOI (24%), MnO (7%), Ba (>5%), Sr (1.000ppm), e Nb (2.000ppm) e valores baixos de SiO<sub>2</sub> (0,36%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,15%), CaO (0,24%) e Na<sub>2</sub>O (<0,01%).

Através da correlação estatística dos elementos maiores, foi possível separá-los em três grupos: (i) com Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO e LOI correlacionados positivamente ( $\cong 0,9$ ), que estão relacionados a siderita, (ii) formado por fosfatos e que possui correlações positivas com o Ba, Sr e ETR, (iii) com SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> correlacionados positivamente e que correlacionam negativamente com os elementos do primeiro grupo.

Tabela II.1 Resultado das análises por ICP-MS dos elementos maiores (peso %) do siderita carbonatito de Seis Lagos.

	SG-02-AM53A	SG-02-AM54A	SG-02-AM54B	SG-02-AM53C	SG-02-AM54C
SiO <sub>2</sub>	1,58	0,32	0,36	0,38	16,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,08	0,92	1,34	1,34	15,06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53,99	55,93	48,64	51,27	32,62
MgO	3,02	2,75	3,20	3,20	2,09
CaO	0,23	0,14	0,21	0,30	0,23
Na <sub>2</sub> O	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01
K <sub>2</sub> O	0,11	0,03	0,05	0,05	0,07
TiO <sub>2</sub>	0,22	0,17	0,17	0,16	0,46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,82	0,81	1,56	2,01	0,83
MnO	7,35	11,69	5,10	6,73	4,86
PF	24,9	22,8	25,2	24,6	20,9

Com base na composição química, o carbonatito de Seis Lagos pode ser classificado como ferrocarbonatito (Fig. II.7). Observa-se o extremo enriquecimento em  $\text{FeO}_T + \text{MnO}$  em relação aos teores de CaO e MgO, quando comparados aos ferrocarbonatitos de outras localidades.

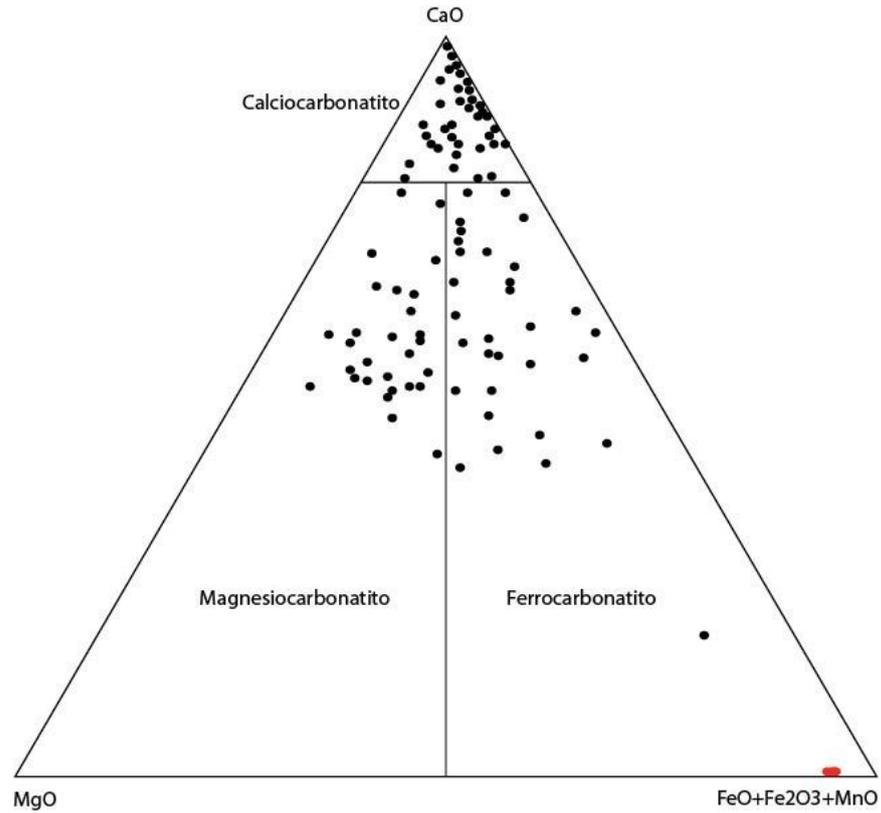


Figura II.7 Classificação do carbonatito de Seis Lagos, modificada de Le Maitre 1989, ano, onde também estão plotados os carbonatitos de outras localidades.

As análises dos elementos menores e traços do siderita carbonatito de Seis Lagos podem ser verificadas na tabela II.2.

Tabela II.2 Resultado das análises por ICP-MS dos elementos menores e traços (ppm) do siderita carbonatito de Seis Lagos.

	SG-02-AM53A	SG-02-AM54A	SG-02-AM54B	SG-02-AM53C	SG-02-AM54C
Cs	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Rb	2,9	0,6	0,8	1,2	1,0
Ba	42371	28673	>50000	>50000	44280
Sr	305,0	475,3	1028,3	982,2	644,5
Pb	532,8	394,2	873,3	1084,8	322,1
Th	998,6	538,1	954,1	1736,6	524,2
U	1,0	0,6	1,6	2,3	0,8
Zr	1073,1	102,0	145,1	142,9	67,2
Hf	16,3	2,4	3,6	3,3	2,3
Ta	0,2	0,2	1,0	0,2	0,4
Y	773,8	196,2	696,0	1292,2	303,4
Nb	928,3	1102,8	1532,7	2291,6	754,7
Sc	142	131	113	183	118
Cr	0,007	0,003	0,010	0,009	0,004
Ni	<20	<20	<20	<20	<20
Co	29,2	41,9	18,5	25,7	25,5
V	237	192	325	243	350
W	12,0	8,1	11,2	8,6	7,1
Ga	20,2	19,9	44,2	42,5	65,2
Zn	1874	1682	1242	1268	2593
Cu	3,8	3,6	1,4	1,8	5,5

Ao observar o diagrama apresentado na figura II.8 é possível verificar que o carbonatito de Seis Lagos possui uma anomalia positiva de Nb, Pb e ETR, com exceção do La, cuja anomalia positiva é menor do que a do Ce. Também é possível verificar anomalias positivas menos significantes de Ba e Sr. A alta anomalia positiva de Nb e Pb deve estar relacionada ao fato do carbonatito conter chumbo pirocloro, enquanto que os teores altos de ETR provavelmente estão relacionados a presença de monazita. A correlação estatística entre diferentes elementos possibilitou verificar que o La possui um comportamento diferente dos demais ETR, sendo o único a ter correlação positiva apenas com o CaO, enquanto os demais possuem correlações altas com P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Nb, Th, Pb, U e Y, além do CaO. Isso provavelmente deve significar que a monazita e o chumbo pirocloro pertencem à mesma paragênese.

O menor enriquecimento relativo de La deve ser mais bem investigado em trabalhos futuros, pois normalmente é o elemento mais rico nestas rochas. A existência de altos teores de elemento alcalinos como Ba, Sr, Rb e K é comum em muitos carbonatitos e certamente está vinculada a fonte mantélica destas rochas, assim como do Nb, Pb e ETR.

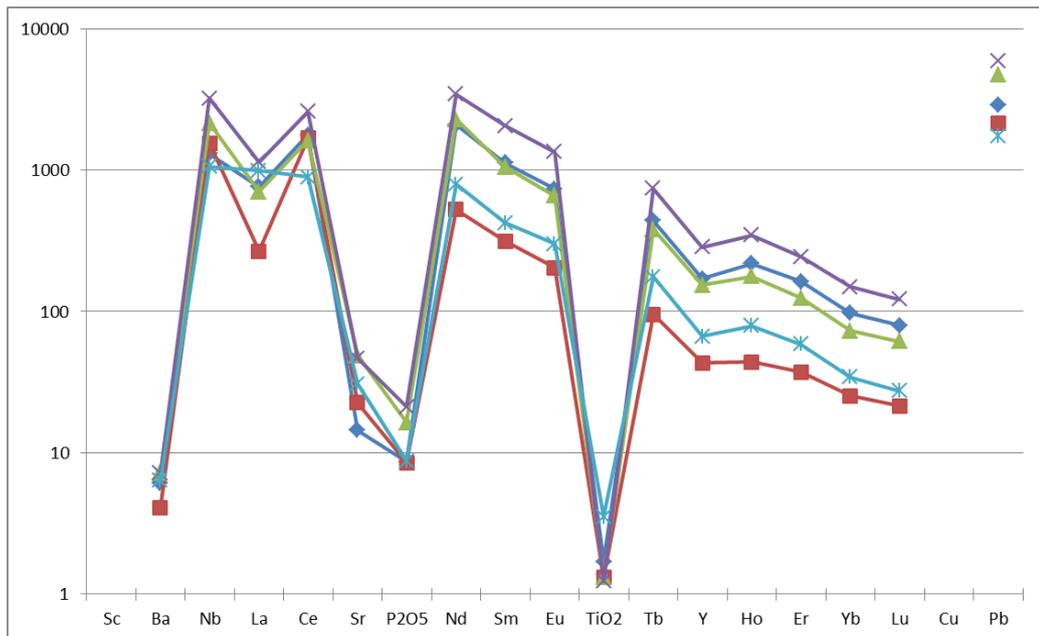


Figura II.8 Diagrama de elementos menores e traço do carbonatito Seis Lagos, normalizado pelo PM (Sun & McDonough 1989).

Os teores do ferrocronatito de Seis Lagos foram comparados com os de outras localidades normalizando os resultados das análises pelos teores médios dos elementos dos ferrocronatitos apresentados por Woolley e Kempe (1989). Os resultados obtidos para os elementos maiores são apresentados na Fig. II.9, os traços na Fig. II.10 e os terras raras na Fig II.11.

Em relação aos elementos maiores, o ferrocronatito de Seis Lagos mostra-se enriquecido em Fe e Mn, possui teores de Al, Mg, Ti e P próximos ao da média e é relativamente empobrecido em Si, Ca, Na e K. Isso explica-se pelo fato de que o carbonatito de Seis Lagos possui siderita como carbonato principal, por isso um aumento nos teores de ferro, e possui teores muito baixos de Ca, inferiores aos da média dos ferrocronatitos.

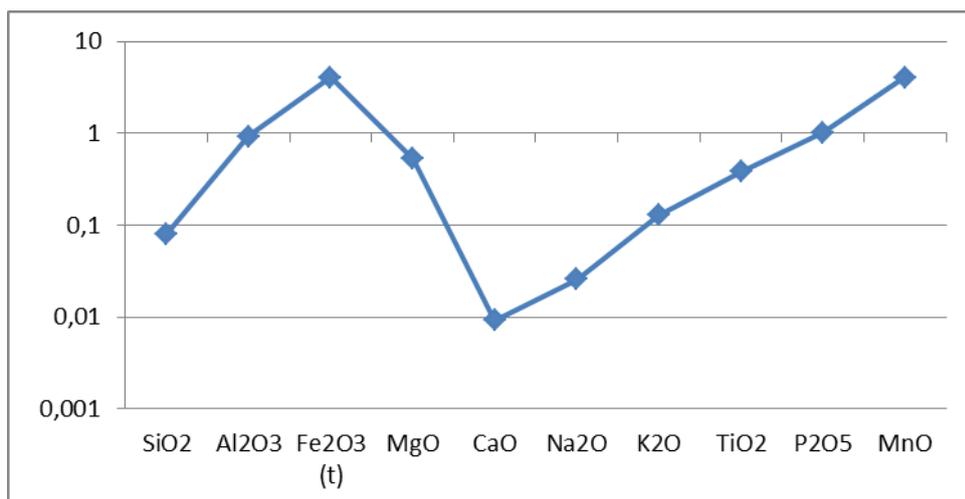


Figura II.8 Gráfico dos teores de elementos maiores normalizados pela média de ferrocarnatitos mundo.

Em relação aos elementos traço, o carbonatito possui teores mais elevados de Pb, Th, Y, Nb, Sc, Ga e Zn, teores relativamente médios de Ba, Zr, Co, Cr e V, e teores mais baixos de Cs, Sr, U, Ta, Cr, W e Cu. Os teores de Nb, Pb elevados devem estar relacionados a presença de chumbo pirocloro na rocha, já os de Sc e Y provavelmente estão relacionados aos ETR concentrados na monazita. As causas do enriquecimento ou empobrecimento relativo dos demais elementos deve ser mais bem investigada em trabalhos futuros.

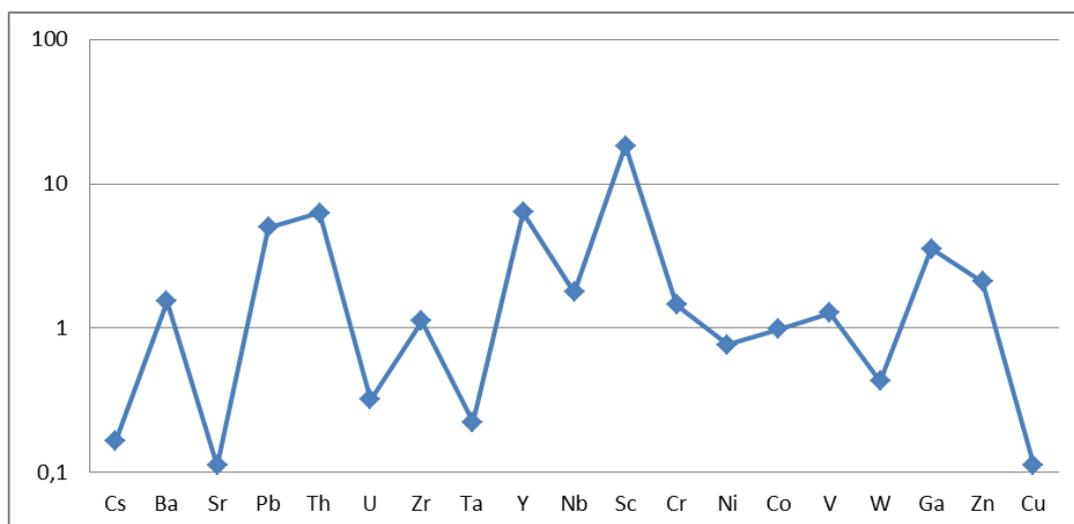


Figura II.9 Gráfico dos teores de elementos traço normalizados pela média de ferrocarnatitos mundo.

Os resultados das análises dos ETR do ferrocronatito de Seis Lagos são apresentados a seguir (Tabela II.3).

Tabela II.3 Resultado das análises por ICP-MS dos elementos terras raras (ppm) do siderita carbonatito de Seis Lagos.

	SG-02-AM53A	SG-02-AM54A	SG-02-AM54B	SG-02-AM53C	SG-02-AM54C
La	522,4	183,5	483,8	783,4	678,4
Ce	3139,2	2986,5	2875,2	4604,8	1584,4
Pr	526,78	134,12	627,73	884,59	239,11
Nd	2813,6	709,8	3093,5	4662,4	1071,9
Sm	498,91	139,51	467,91	913,55	188,45
Eu	123,41	34,18	110,68	225,44	50,35
Gd	318,40	79,45	277,00	524,80	135,50
Tb	47,47	10,32	41,21	79,99	19,01
Dy	224,16	46,01	186,36	362,69	81,97
Ho	35,64	7,21	29,04	56,90	12,94
Er	78,24	17,80	59,77	117,23	28,07
Tm	8,92	2,20	7,07	14,26	3,22
Yb	48,17	12,44	35,98	73,58	16,90
Lu	5,90	1,58	4,54	8,99	2,03

Os ETR do carbonatito de Seis Lagos, quando normalizados pelo condrito, possuem uma distribuição similar a de outros carbonatitos, onde se verifica o enriquecimento relativo dos ETRL em relação aos ETRP (Fig. II.12).

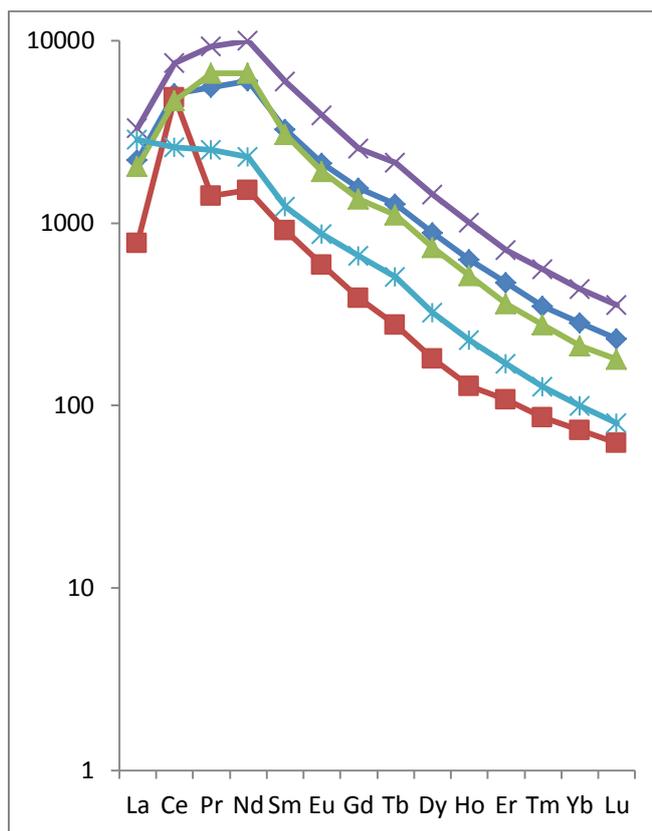


Figura II.10 Diagrama de ETR no carbonatito Normalizados por C1 ((Sun & McDonough 1989).

Os ETR de Seis Lagos, quando normalizados pela média dos ferrocronatitos (Bell, 1989), possui padrão anormal, sendo possível verificar altos teores de ETRP em relação aos ETRL, especialmente de Nd. Conforme dito anteriormente, os teores relativamente baixos de La deverão ser mais bem investigados futuramente. e apresenta uma razão La/Lu de 87. Além disso, observa-se que o enriquecimento em ETRP é muito importante do ponto de vista econômico, tendo em vista que os ETR do ferrocronatito de Seis Lagos tem, em média, valores 6 vezes maiores qua a média dos ferrocronatitos de outras localidades e que os ETRP têm valor de mercado muito maior do que os ETRL.

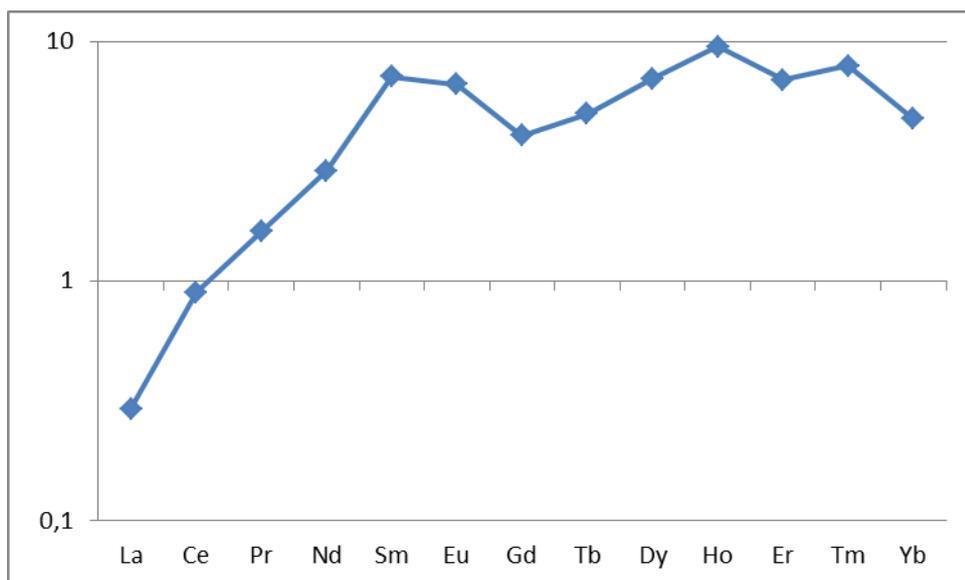


Figura II.11 Gráfico dos teores de elementos terras raras normalizados pela média de ferrocarnatitos mundo.

A relação  $Eu/Eu^*$  no carbonatito de Seis Lagos é muito próxima de 1 (em média 0,994), indicando que esse carbonatito tem conteúdo de ETR similar ao da rocha fonte e que provavelmente foi pouco diferenciado. Certamente isso merece outras investigações comparando os teores de outros elementos e estudos isotópicos.

### III. ESTUDO DA CROSTA LATERÍTICA

A crosta laterítica ferruginosa ocorre em praticamente todo o morro de Seis Lagos, de Seis Lagos. A maior parte dela se formou a partir do carbonatito, originando o minério de Nb e ETR; parte dela se formou a partir da alteração do gnaiss encaixante e foi perfurada pelo furo SG-02-AM; e parte se formou provavelmente a partir de alteração de rocha alcalina, tendo sido perfurada pelo furo SG-03-AM. Neste capítulo será descrita a crosta formada pela alteração do carbonatito. A crosta ferruginosa formada a partir da alteração de carbonatito ocupa a maior parte do morro de Seis Lagos. Sua delimitação aproximada foi efetuada pela CPRM através da coleta e análise de amostras superficiais em diversos perfis atravessando todo o morro.

Estudo da crosta foi efetuado a partir do furo SG-01-AM (Fig. I.1), o qual possui 255 metros de profundidade, mas sua recuperação foi de 100 metros. Este furo foi interrompido ainda dentro da crosta laterítica. Nenhum outro furo efetuado em Seis Lagos atravessou toda a crosta laterítica e atingiu o seu substrato. Cabe lembrar que o furo SG-04-AM, com 400 m de profundidade, não foi locado em área de ocorrência da crosta ferruginosa. Neste estudo, a crosta laterítica foi subdividida em 7 tipos, com base nas suas características texturais e mineralógicas (Fig. III.1):

- Crosta Pisolítica
- Crosta Fragmentada
- Crosta Mosqueada
- Crosta Roxa c/ oólitos
- Crosta Manganesífera
- Crosta Roxa
- Crosta Marrom

Para cada tipo de crosta, serão apresentados, sucessivamente, os resultados das análises por difratometria de raios X, as observações petrográficas e os resultados das análises químicas, separando-se maiores, elementos em traço e elementos terras raras.

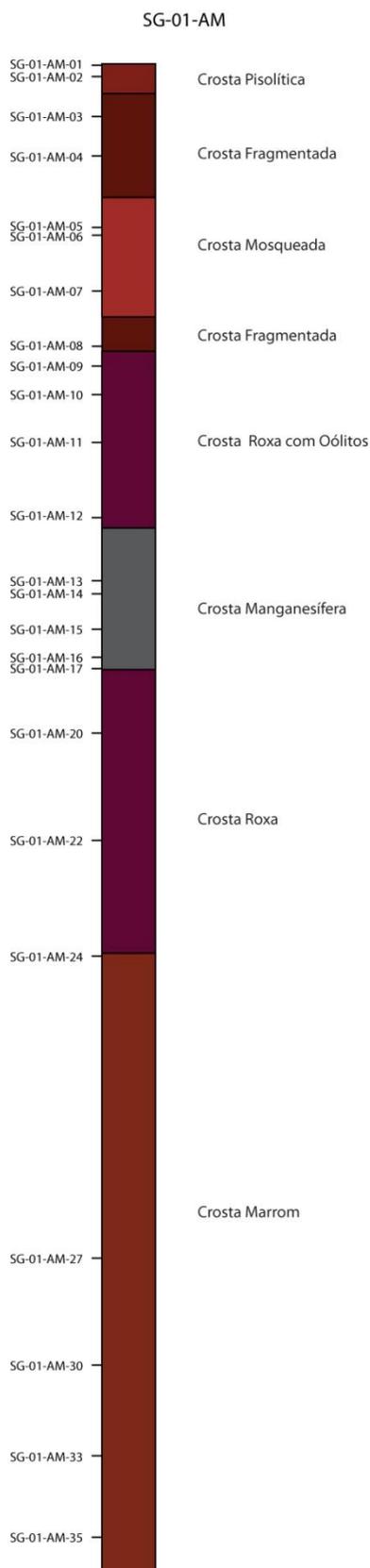


Figura III.1 Distribuição dos tipos de crosta laterítica e respectivas amostras estudadas ao longo do furo sondagem SG-01-AM

### III.1 Crosta Pisolítica

A crosta pisolítica compreende as amostras SG-01-AM-01 e SG-01-AM-02, chega até 2,20 metros de profundidade. É formada principalmente por bandas de ferro e bandas de argila ocre (Fig. III.2). As bandas de ferro são constituídas principalmente por óxido de ferro maciço. As bandas de argilas são amareladas e encontram-se agrupadas. As amostras possuem densidade alta e cor predominantemente cinza.

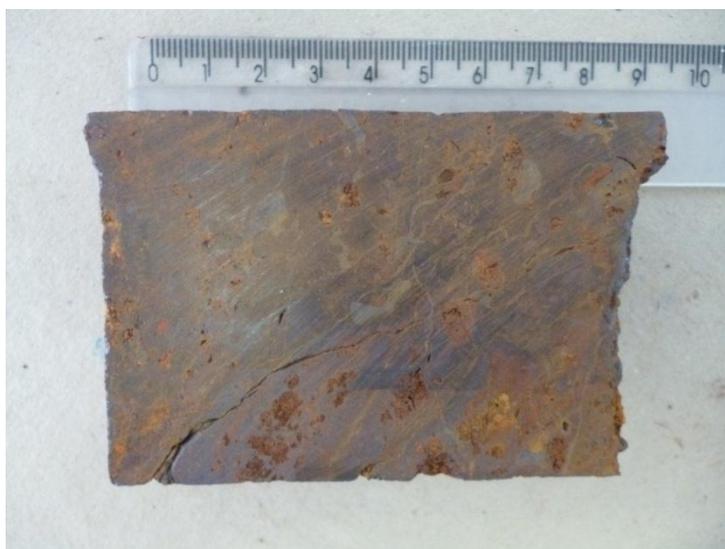


Figura III.2 Crosta laterítica ferruginosa do tipo crosta pisolítica.

#### III.1.1 Mineralogia

Através de difratometria de raios-X (Fig. III.3), foram identificados apenas dois minerais e a composição modal é 73% de goethita e 23% de hematita. O Nb-rutilo, observado em lâmina petrográfica, não foi identificado através das análises de raios-X.

A goethita é o mineral formador dos pisólitos (Fig. III.4). Estes são fibrorradiados e têm um tamanho médio de 500  $\mu\text{m}$ . A goethita é também o mineral fibroso que preenche os espaços vazios da crosta (Fig. III.4 e 5).

A hematita ocorre bem formada, de coloração vermelha e apresenta franjas de goethita em suas bordas, possui um tamanho médio de 1 mm.

O Nb-rutilo (Fig. III.5) ocorre na porção argilosa da crosta pisolítica. Os cristais são esverdeados, com um tamanho médio de 125  $\mu\text{m}$ , são zonados e fraturados.

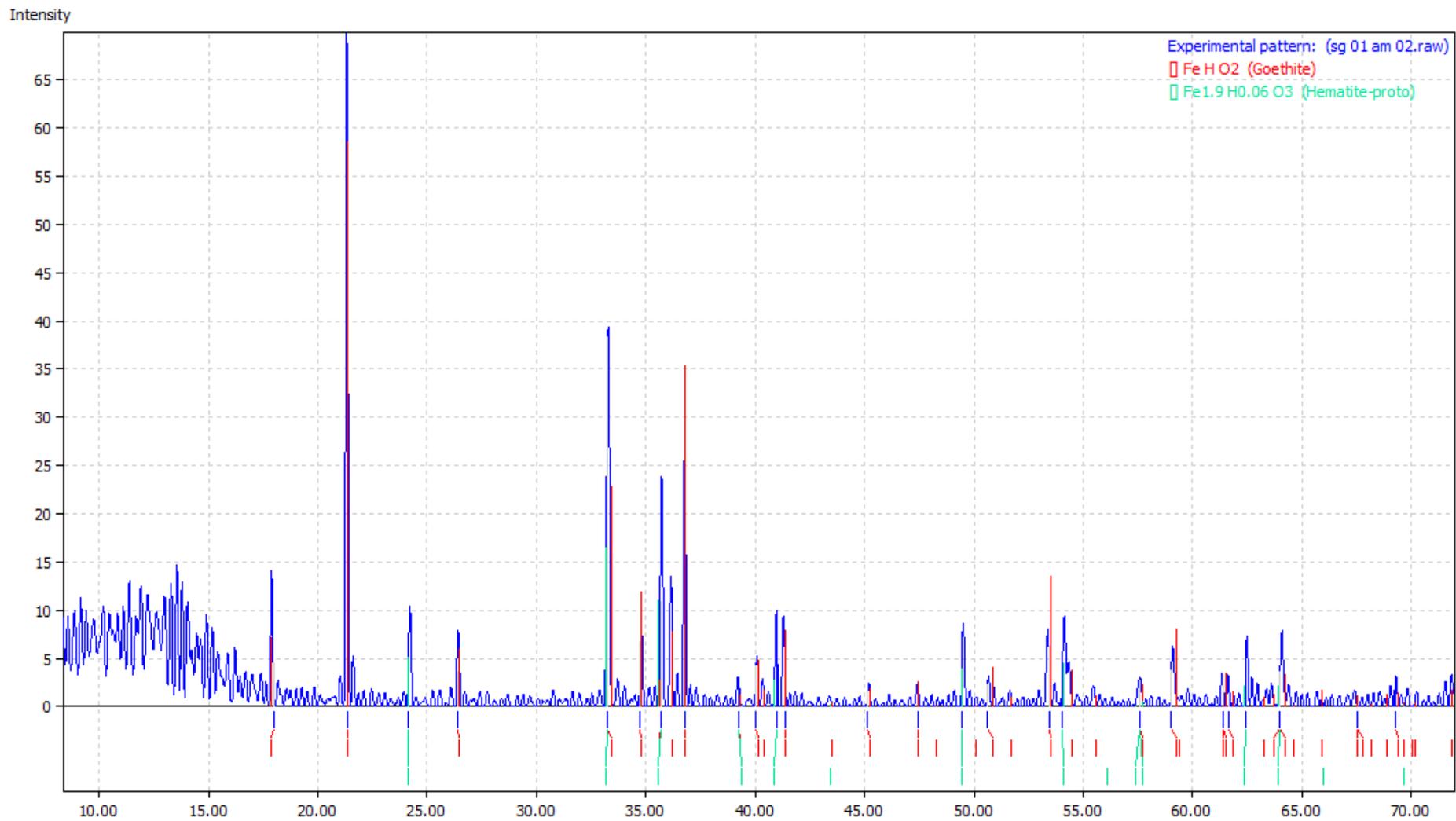


Figura III.3 Difratoograma de raios X de amostra da crosta pisolítica.

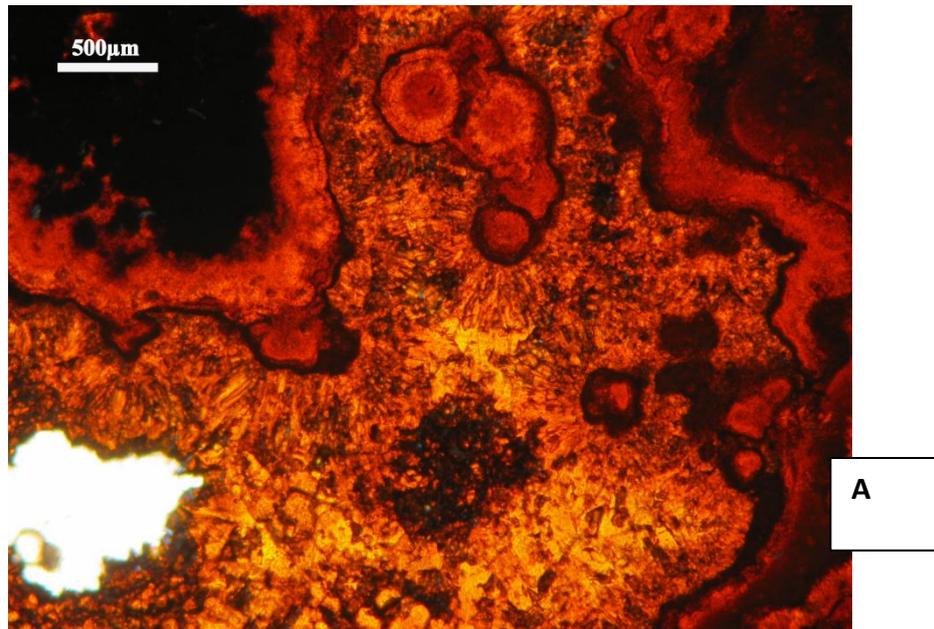


Figura III.4 Fotomicrografias da crosta pisolítica. (A): pisólitos de goethita em meio a uma massa de goethita com aspecto fibroso. (B): cavidade preenchida por goethita com aspecto fibroso.

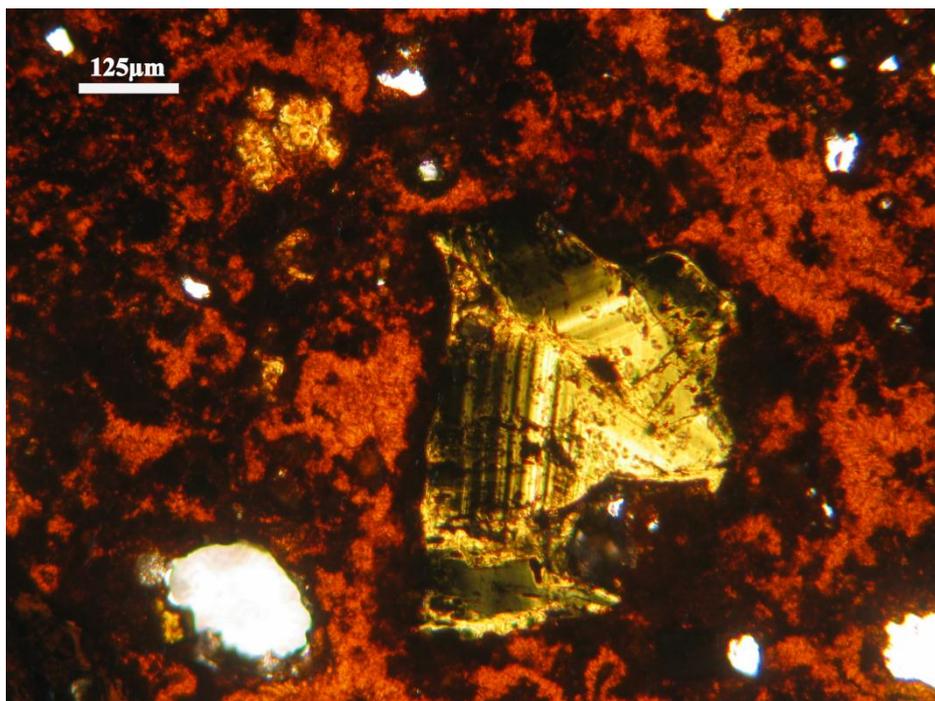


Figura III.5 Fotomicrografia de cristal de Nb-rutilo da crosta pisolítica.

### *III.1.2 Composição química da crosta pisolítica*

#### Elementos Maiores

A composição da crosta pisolítica em elementos maiores é apresentado na tabela III.1. A crosta é caracterizada por altos teores de Fe e Ti. A composição química da crosta pisolítica foi normalizada a partir do carbonatito não alterado (Fig. III.6), para avaliar as modificações de composição do material original associadas aos processos de alteração. Constata-se o grande enriquecimento em  $TiO_2$ , enriquecimentos moderados em Si, Al, Fe e Na. Ocorreu um grande empobrecimento em magnésio e manganês.

#### Elementos traço

Em relação aos elementos traço, a tabela III.2 mostra que a crosta pisolítica possui altos teores de nióbio, tório e wolfrâmio. Para a melhor visualização, também foi feita a normalização pelos elementos traço do carbonatito (Fig. III.7). Nota-se na figura que o enriquecimento de Nb e W, passa da ordem de 10 vezes, um enriquecimento em HFSE (Th, Zr e Hf) e um empobrecimento nos elementos LILLE e Y (Ba, Sr, Pb).

## Elementos Terras Raras.

A crosta pisolítica apresenta teores relativamente altos de ETR (Tab. III.3). Porém, quando comparada ao carbonatito, observa-se uma grande perda de elementos terras raras em sua composição, principalmente nos elementos terras raras pesadas (Fig. III.8).

Tabela III.1 Composição da crosta pisolítica (elementos maiores).

	SG-01-AM01	SG-01-AM02
SiO <sub>2</sub>	0,47	0,64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,12	1,78
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	73,9	81,35
MgO	0,01	<0.01
CaO	<0.01	<0.01
Na <sub>2</sub> O	0,04	<0.01
K <sub>2</sub> O	0,02	0,02
TiO <sub>2</sub>	7,57	3,46
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,01	0,87
MnO	0,03	0,07
LOI	10,9	9,3

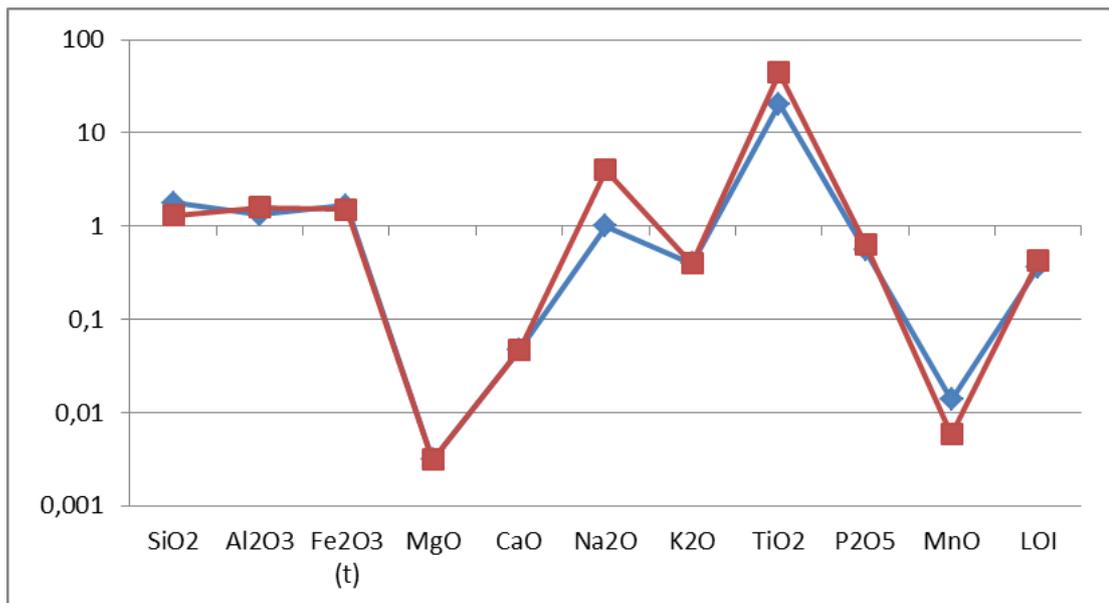


Figura III.6 Padrão de distribuição dos elementos maiores em duas amostras da crosta pisolítica normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM01 (vermelho) SG-01-AM02 (azul).

Tabela III.2 Composição da crosta pisolítica (elementos traço).

	SG-01-AM01	SG-01-AM02
Cs	<0.1	<0.1
Rb	0,5	0,9
Ba	424	367
Sr	46,9	66,2
Pb	155,4	200,9
Th	2688,3	2989,7
U	0,8	0,5
Zr	507,9	188,1
Hf	12,5	5,5
Ta	1,4	0,5
Y	29,2	71,2
Nb	21457,2	10419,3
Sc	180	241
Cr	0,003	0,003
Ni	<20	<20
Co	2,7	7,8
V	337	183
W	302	203,5
Ga	10,5	5,2
Zn	136	328
Cu	5,4	5,7

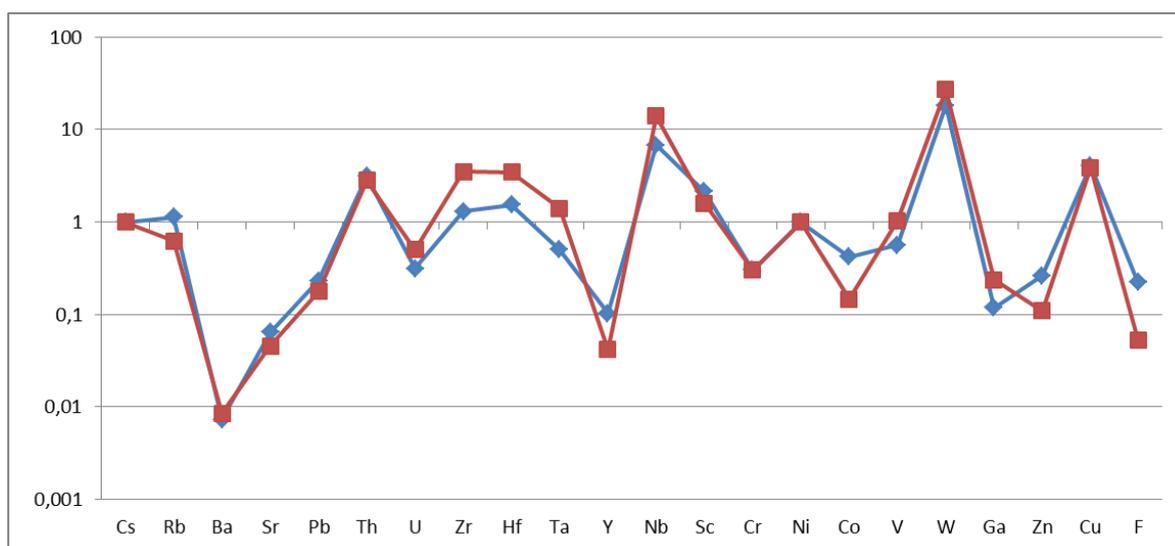


Figura III.7 Padrão de distribuição dos elementos traço em duas amostras da crosta pisolítica normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM01 (vermelho) SG-01-AM02 (azul).

Tabela III.3 Composição da crosta pisolítica (elementos terras raras).

	SG-01-AM-01	SG-01-AM-02
La	406,5	474,4
Ce	1238,1	1695,1
Pr	85,04	78,65
Nd	234,9	202,7
Sm	29,76	32,86
Eu	6,46	9,70
Gd	11,13	39,45
Tb	1,43	4,23
Dy	7,61	17,09
Ho	0,96	2,85
Er	2,47	5,95
Tm	0,35	0,75
Yb	2,46	4,26
Lu	0,30	0,59

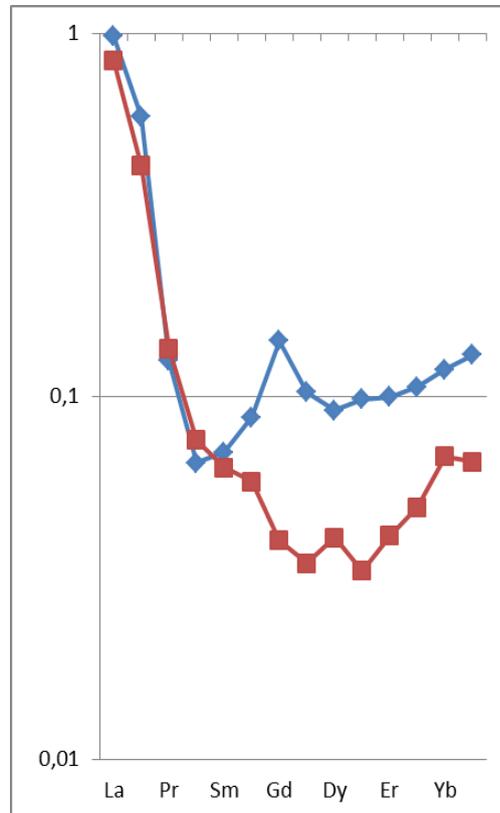


Figura III.8 Padrão de distribuição dos elementos terras raras em duas amostras da crosta pisolítica, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM01 (vermelho) SG-01-AM02 (azul).

### III.2 Crosta Fragmentada

A crosta fragmentada (amostras SG-01-AM-03, SG-01-AM-04 e SG-01-AM-08) ocorre em 2 intervalos do furo: de 2,20 m a aproximadamente 9,00 m e de 17,00 m a 19,75 m de profundidade. Ela tem cor marrom avermelhada e é composta por nódulos ferrosos dentro de uma matriz ocre argilosa (Fig. III.9).



Figura III.9 Aspecto macroscópico da crosta fragmentada.

#### *III.2.1 Mineralogia da crosta fragmentada*

Através de difratometria de raios X (Fig. III.10), foram identificados os minerais hematita, goethita, rutilo (Nb-rutilo) e florencita. A composição modal obtida através da difratometria é: hematita (54,6%), goethita (20%), florencita (Ce) (18,1%) e rutilo (7,4%). Ressalta-se que a florencita não foi subsequentemente observada em lâmina petrográfica.

A hematita apresenta-se na forma de nódulos bem definidos (Fig. III.11.A), com dimensão média de 1 cm. Franjas goethíticas ocorrem frequentemente nas bordas dos nódulos.

A goethita é fibrorradiada e ocorre como franja na borda dos grãos de hematita ou preenchendo espaços vazios (Fig. III.11.B).

O Nb-rutilo ocorre na porção argilosa da amostra. Os cristais são esverdeados, zonados (Fig. III.11.C), com um tamanho médio de 125  $\mu\text{m}$ , e muitos deles estão fraturados. Foram analisados ao MEV (Fig. III.12) mostrando uma composição de titânio (77%), nióbio (13%) e ferro (10%).

Mineral identificado apenas através das análises de raios X.

Segundo a interpretação do raio X, o principal mineral da rocha é a Hematita (54,6%), seguida da Goethita (20%), Florencita (Ce) (18,1%) e o Nb-rutilo (7,4%).

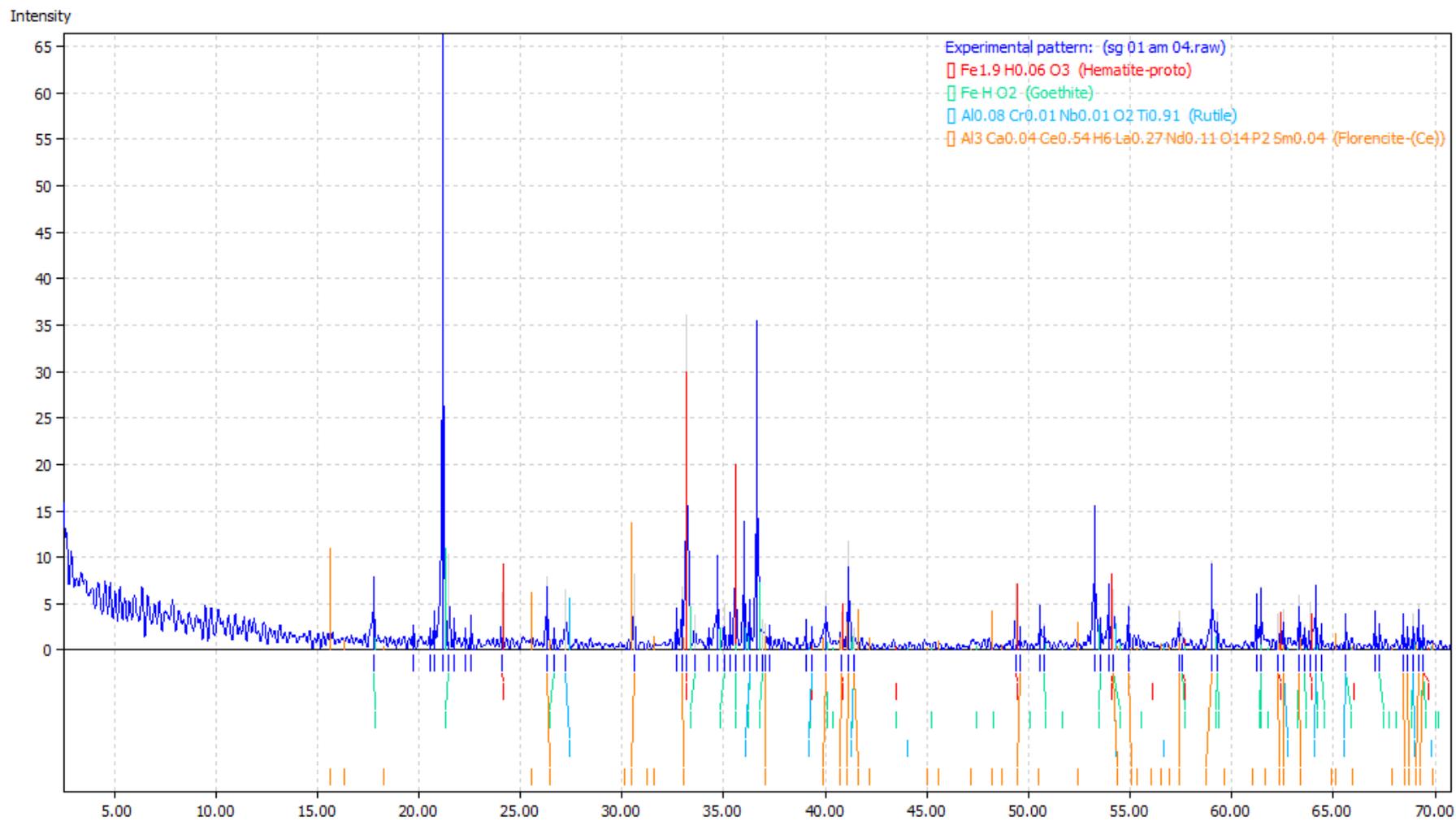


Figura III.10 Difratoograma de raios X de amostra da crosta fragmentada (SG-01-AM-04).

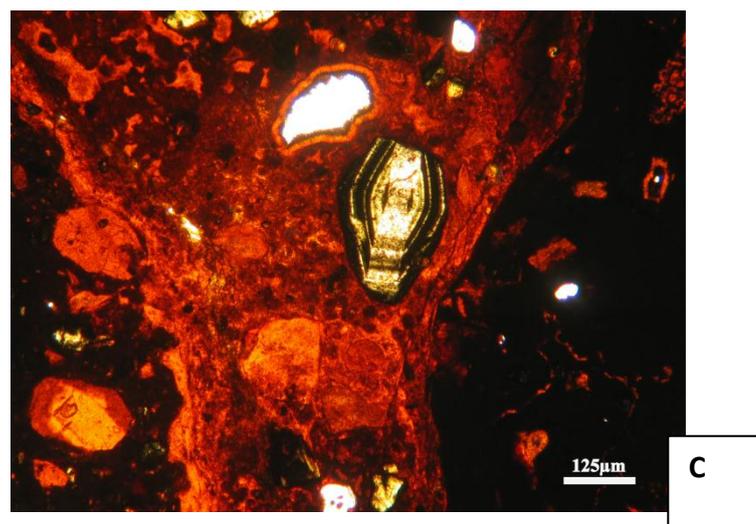
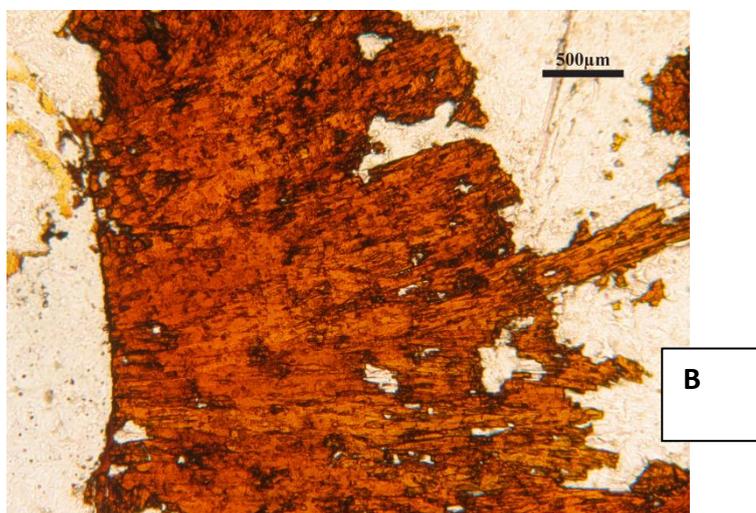
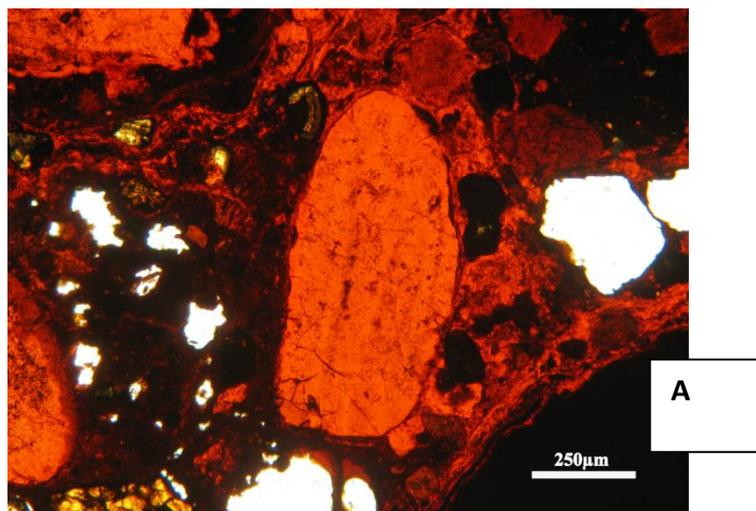


Figura III.11 Fotomicrografias da crosta fragmentada. (A) Nódulos de hematita. (B) Goethita fibrosa preenchendo espaços vazios. (C) Cristal zonado de Nb-rutilo da porção argilosa da crosta.

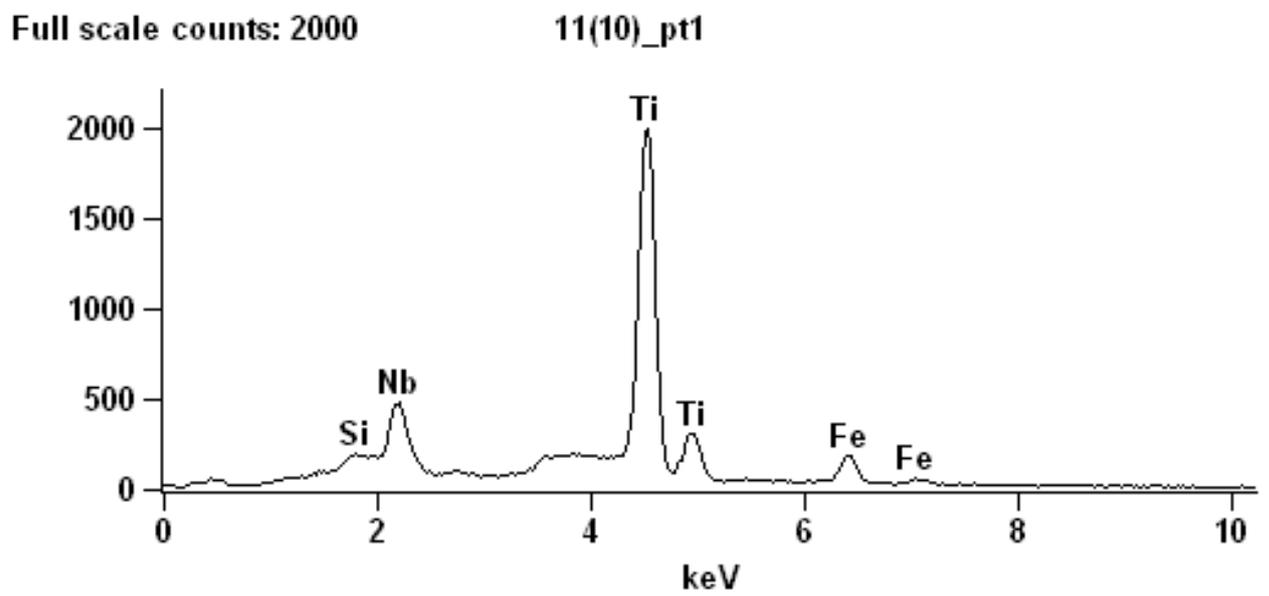
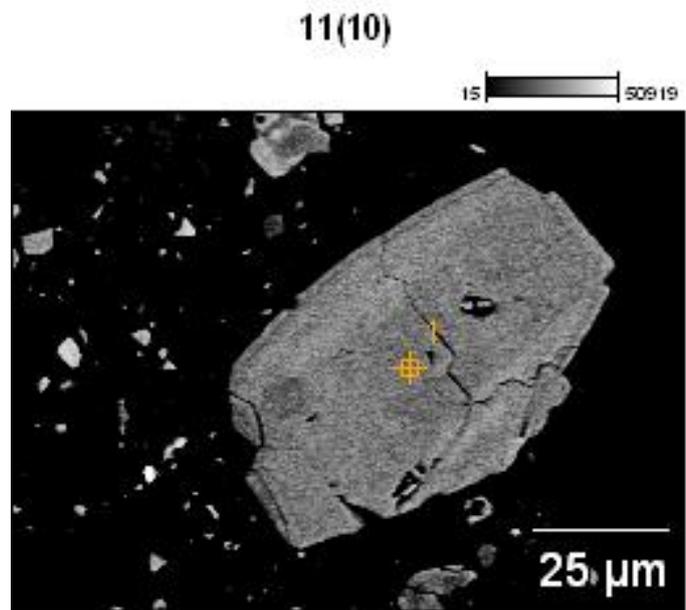


Figura III.12 Imagem MEV e análise por EDS de Nb-rutilo da crosta fragmentada.

### *III.2.2 Composição química*

#### Elementos Maiores

A tabela III.4 apresenta a composição da crosta fragmentada em elementos maiores. Observa-se os altos teores de Fe e Ti. As amostras da crosta fragmentada também foram normalizadas pelo carbonatito não alterado (Fig III.13). Assim como na crosta pisolítica, o titânio é o elemento mais enriquecido.

#### Elementos traço.

Os resultados dos elementos traços da crosta fragmentada (Tab III.5) são similares aos da crosta pisolítica. Porém, após a normalização em relação ao carbonatito (Fig. III.14), percebe-se que os enriquecimentos em Nb, Th e W não são tão acentuados como na última.

#### Elementos Terras Raras.

A crosta fragmentada apresenta teores relativamente altos de elementos terras raras (Tab. III.6), principalmente os leves. Comparativamente ao carbonatito (Fig. III. 15), chegando a apresentar um enriquecimento de La nas amostras SG-01-AM-04 e SG-01-AM-08 se a compararmos com o carbonatito. Nota-se também uma anomalia positiva relativa de Gd na amostra SG-01-AM-04 (Fig. III. 15).

Tabela III.4 Composição da crosta fragmentada (elementos maiores).

	SG-01-AM03	SG-01-AM04	SG-01-AM08
SiO <sub>2</sub>	0,78	0,61	0,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,82	1,86	1,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	79,2	80,31	83,11
MgO	0	<0.01	0,00
CaO	0,02	<0.01	0,01
Na <sub>2</sub> O	0,01	<0.01	0,00
K <sub>2</sub> O	0	0	0,00
TiO <sub>2</sub>	3,25	3,39	3,10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,74	1,12	1,08
MnO	0,07	0,03	0,29
LOI	10,5	10,9	8,4

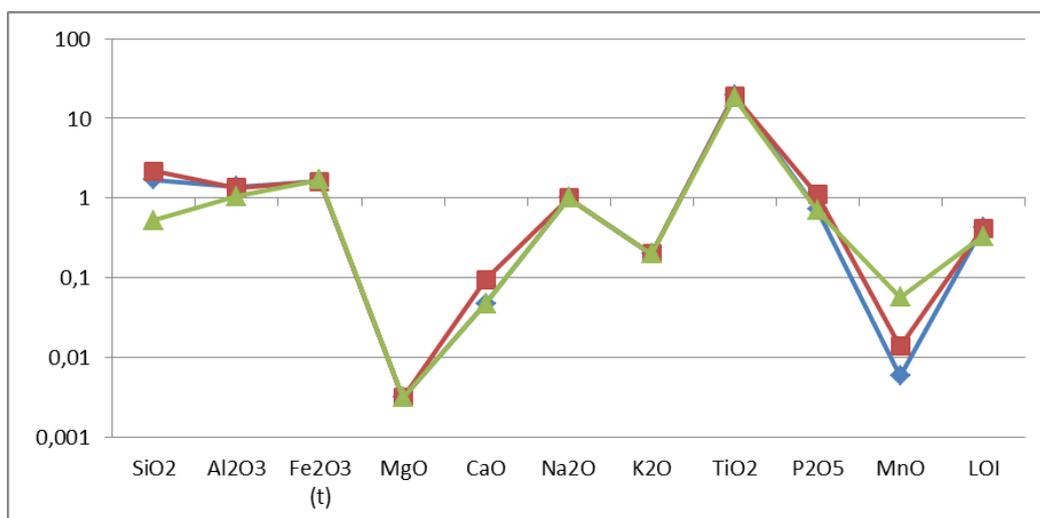


Figura III.13 Padrão de distribuição dos elementos maiores da crosta fragmentada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-03 (vermelho), SG-01-AM-04 (azul) e SG-01-AM-08 (verde).

Tabela III.5 Composição da crosta fragmentada (elementos traço).

	SG-01-AM03	SG-01-AM04	SG-01-AM08
Cs	<0.1	<0.1	<0.1
Rb	0,5	<0.1	<0.1
Ba	448	216	556
Sr	101,4	50,0	134,2
Pb	139,6	145,5	240,1
Th	2224,5	1602,5	2542,5
U	0,8	0,5	0,4
Zr	204,5	221,5	73,1
Hf	5,4	6,0	1,4
Ta	0,7	0,5	0,6
Y	74,3	29,4	108,9
Nb	10744,5	7843,5	8084,1
Sc	194	117	289
Cr	0,004	0,004	0,004
Ni	<20	<20	<20
Co	8,2	2,3	19,2
V	201	231	147
W	208,8	189,6	189,0
Ga	6,4	7,6	2,8
Zn	287	139	871
Cu	7,2	4,3	8,2

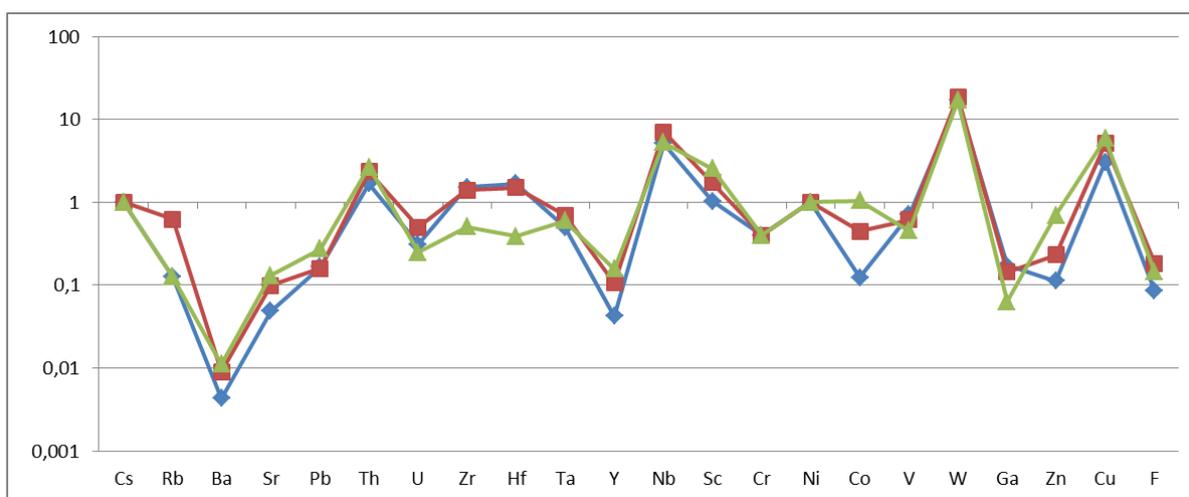


Figura III.14 Padrão de distribuição dos elementos traço da crosta fragmentada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-03 (vermelho), SG-01-AM-04 (azul) e SG-01-AM-08 (verde).

Tabela III.6 Composição da crosta fragmentada (elementos terras raras).

	SG-01-AM-03	SG-01-AM-04	SG-01-AM-08
La	730,0	485,2	846,2
Ce	2304,7	1054,3	2382,4
Pr	134,89	81,66	161,59
Nd	373,3	223,4	343,1
Sm	52,05	28,57	46,18
Eu	13,05	6,22	13,14
Gd	30,39	22,03	36,45
Tb	4,18	1,97	5,03
Dy	16,16	6,70	21,86
Ho	2,59	1,09	3,14
Er	5,96	2,38	7,81
Tm	0,73	0,33	0,92
Yb	4,37	1,91	4,81
Lu	0,51	0,28	0,69

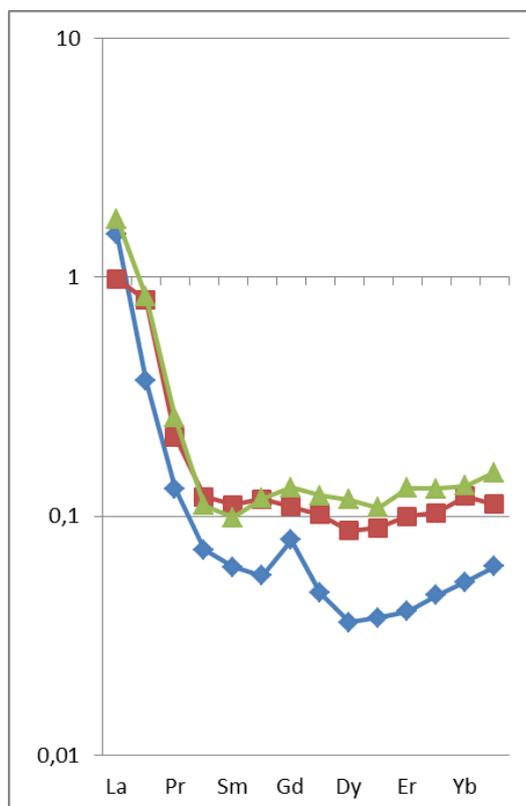


Figura III.15 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta fragmentada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-03 (vermelho), SG-01-AM-04 (azul) e SG-01-AM-08 (verde).

### III.3 Crosta Mosqueada.

A crosta mosqueada ocorre no intervalo de 9,00 m a aproximadamente 17,00 m de profundidade. É representada pelas amostras SG-01-AM-05, SG-01-AM-06 e SG-01-AM-07. Caracteriza-se por apresentar bandas verticalizadas com goethita e argila esverdeada. A verticalização deve-se provavelmente ao colapso interno da crosta laterítica, inerente ao seu processo de formação e também ao comportamento cárstico do substrato carbonatático.



Figura III.16 Aparência macroscópica da crosta mosqueada.

### ***III.3.1 Mineralogia***

Por difratometria de raios X (Fig. III.17), foram identificados hematita, goethita, rutilo e florencita.

A hematita ocorre na forma de nódulos com dimensões em geral da ordem de 2 cm.

A goethita ocorre na forma de agregados botrioidais (Fig. III.18.A, por vezes fibrorradiados).

O Nb-rutilo ocorre nas bandas argilosas, como fragmentos de cristais esverdeados zonados, muito pequenos 75 µm e muito abundantes (Fig. III.18B).

### ***III.3.2 Composição Química***

Elementos Maiores.

A crosta mosqueada apresenta altos teores de Fe e Ti (Tab. III.7). Na amostra SG-01-AM-06 observa-se que o teor de Fe é bem inferior ao das demais. Porém, a concentração de TiO<sub>2</sub> chega quase a 15%. A partir da normalização (Fig. III.19), nota-se um enriquecimento quase de 100 vezes do teor de TiO<sub>2</sub> na amostra SG-01-AM-06. Mas os demais elementos seguem o mesmo trend químico das amostras anteriores, um leve enriquecimento em SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Na<sub>2</sub>O, e empobrecimento de MgO e MnO.

Elementos traço.

A crosta mosqueada apresenta teores altos de Nb, Th e W (Tab. III.8) novamente, a amostra SG-01-AM-06 apresenta teores mais elevados de quase todos os elementos traço, e um teor de 3,68% de Nb total na rocha. As demais são similares aos das crostas mais superficiais (Fig. III.20).

## Elementos Terras Raras.

A crosta mosqueada também apresenta teores relativamente altos de terras raras (Tab. III.9), principalmente a amostra AG-01-AM-06, que possui mais de 1% de óxidos de ETRs, diferentemente das anteriores. Em relação ao carbonatito (Fig. III.21), essas amostras estão bastante enriquecidas nos terras raras leves, principalmente o La e o Ce (principalmente na amostra SG-01-AM-06), também pode-se observar a mesma anomalia de Gd que ocorre na crosta fragmentada nas amostras SG-01-AM-05 e SG-01-AM-07.

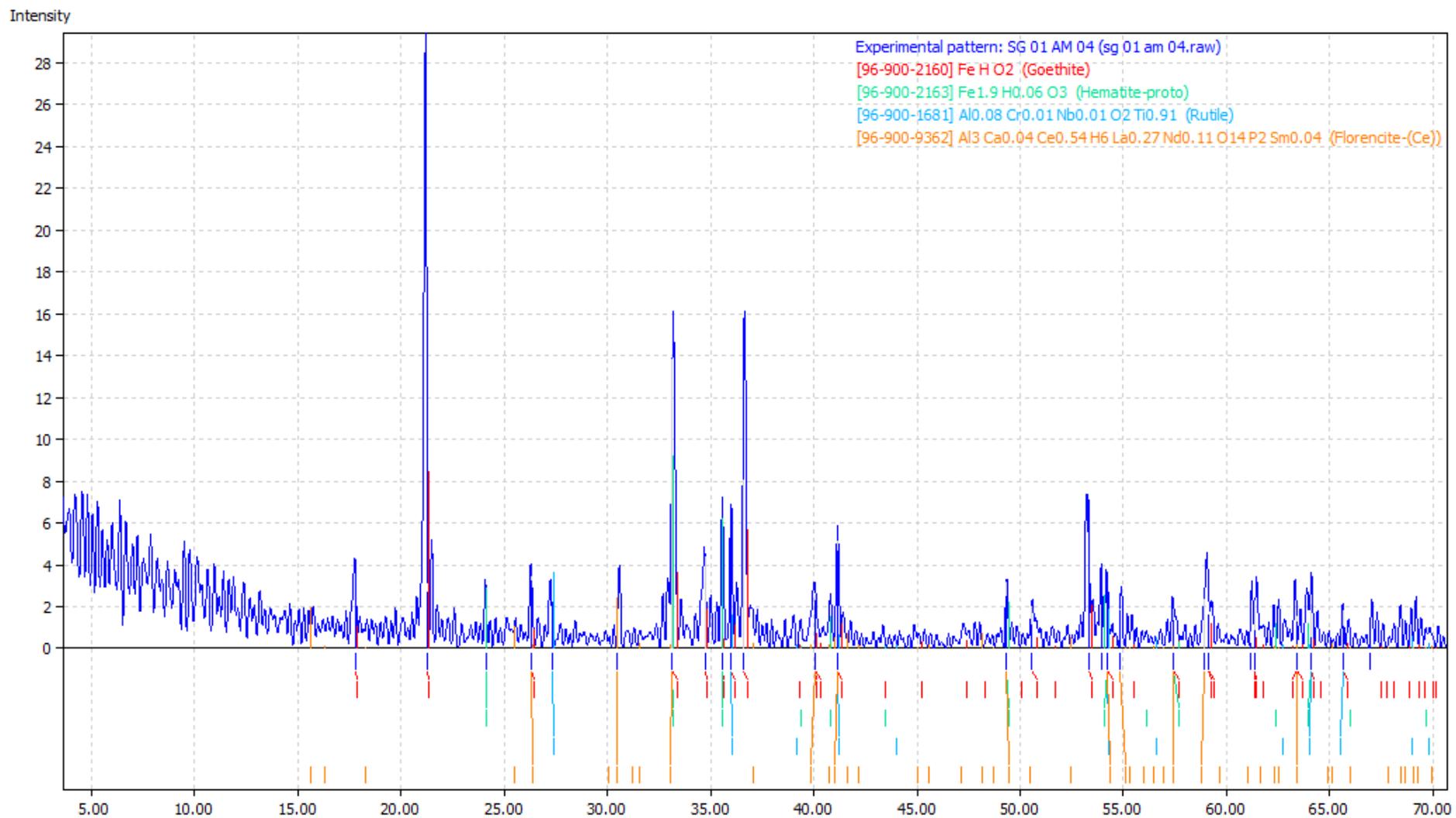


Figura III.17 Difratoograma de raios X de amostra da crosta mosqueada.

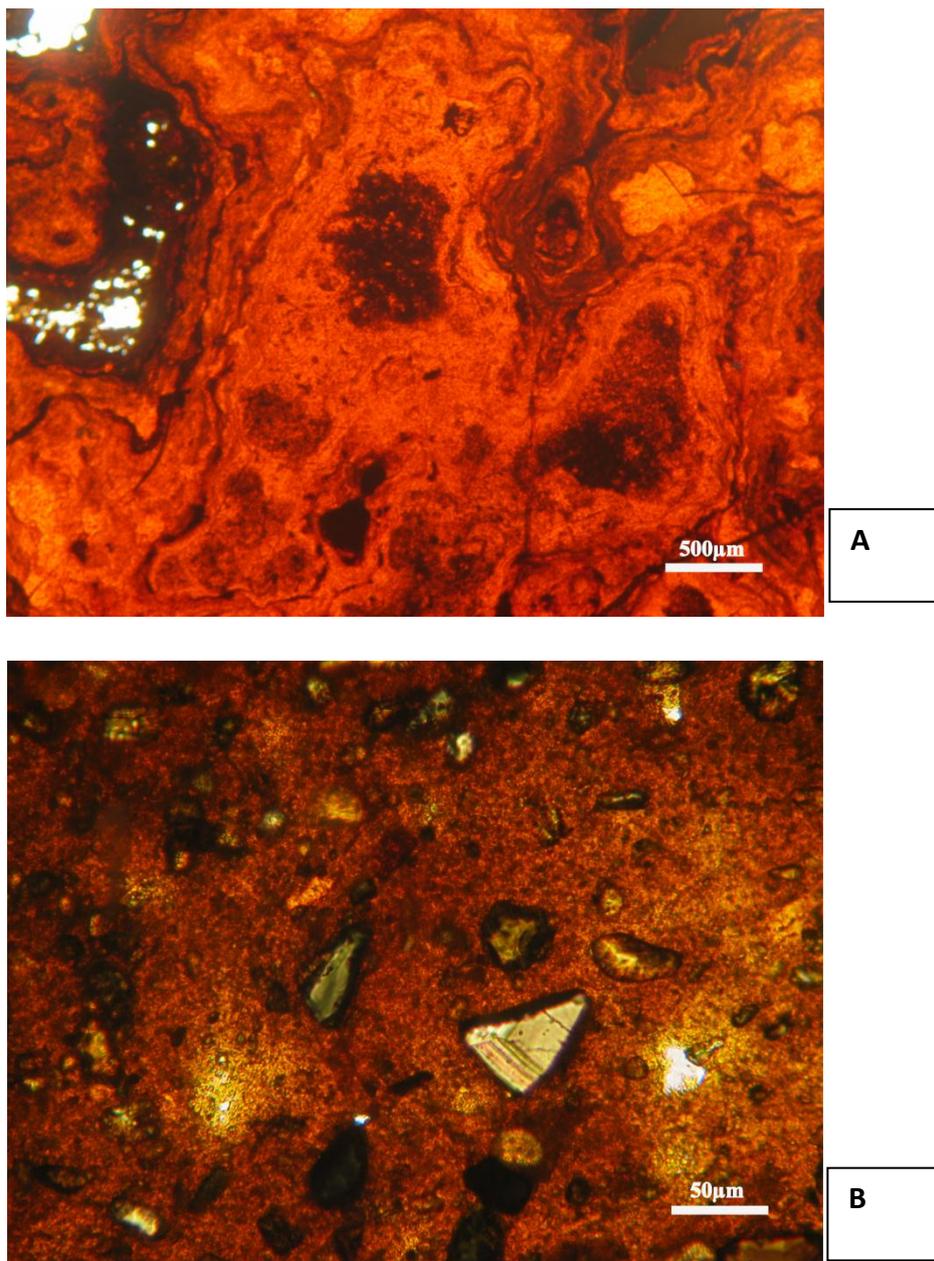


Figura III.18 Fotomicrografias da crosta mosqueada. (A) Goethita com textura botrioidal. (B) Parte argilosa da crosta com numerosos cristais de Nb- rutilo.

Tabela III.7 Composição da crosta mosqueada (elementos maiores).

	SG-01-AM05	SG-01-AM06	SG-01-AM07
SiO <sub>2</sub>	0,36	0,45	0,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,37	3,60	1,56
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	79,28	60,18	83,22
MgO	<0.01	0,02	<0.01
CaO	<0.01	0,02	<0.01
Na <sub>2</sub> O	<0.01	0,03	<0.01
K <sub>2</sub> O	0,02	0,02	0,00
TiO <sub>2</sub>	2,33	14,68	2,88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1,53	2,50	1,14
MnO	0,02	0,01	0,26
LOI	12,1	10,5	8,4

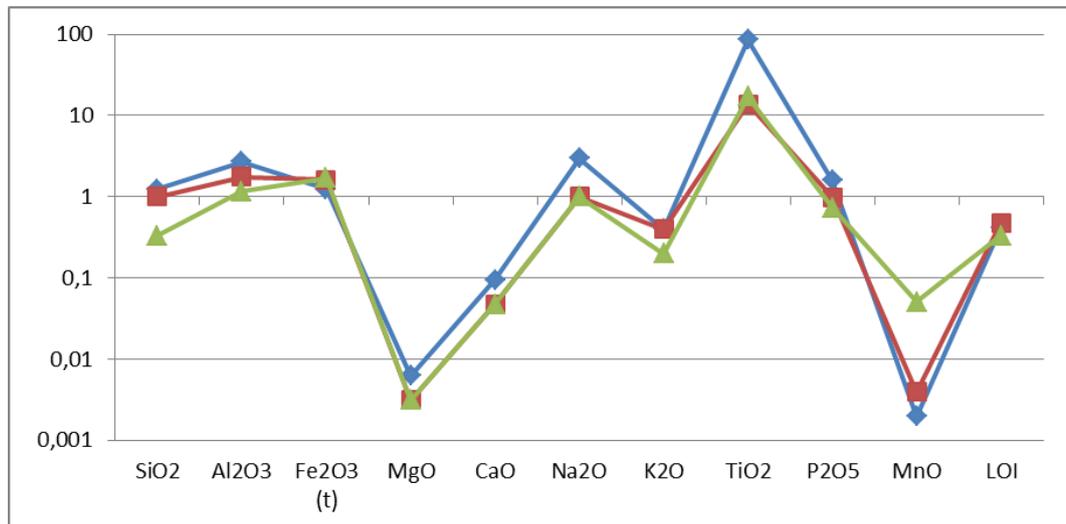


Figura III.19 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta mosqueada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-05 (vermelho), SG-01-AM-06 (azul) e SG-01-AM-07 (verde).

Tabela III.8 Composição da crosta mosqueada (elementos traço).

	SG-01-AM05	SG-01-AM06	SG-01-AM07
Cs	<0.1	<0.1	<0.1
Rb	1,1	0,3	<0.1
Ba	315	1587	868
Sr	83,1	381,6	237,9
Pb	113,8	285,4	231,8
Th	1943,0	4067,4	2856,8
U	0,8	2,1	0,3
Zr	147,1	775,8	75,3
Hf	3,7	19,7	2,0
Ta	0,5	3,3	0,2
Y	28,5	70,8	105,2
Nb	8194,3	36874,2	7772,3
Sc	146	200	261
Cr	0,004	0,007	0,003
Ni	<20	<20	<20
Co	2,9	<0.2	21,4
V	291	663	118
W	168,4	793,4	172,4
Ga	6,6	25,2	2,4
Zn	118	58	896
Cu	4,6	3,5	7,3

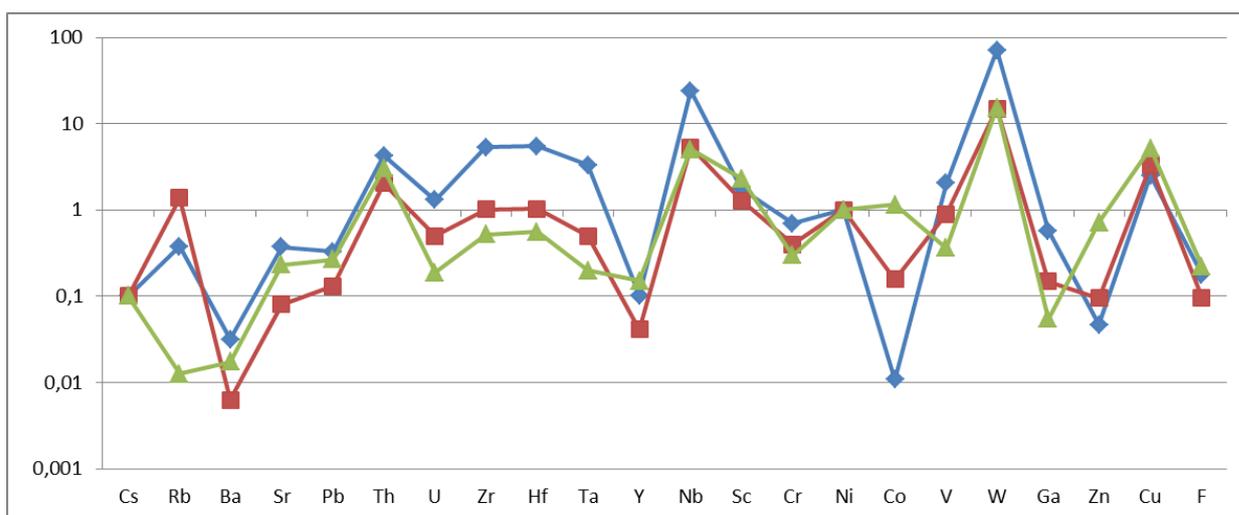


Figura III.20 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta mosqueada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-05 (vermelho), SG-01-AM-06 (azul) e SG-01-AM-07 (verde).

Tabela III.9 Composição da crosta mosqueada (elementos terras raras).

	SG-01-AM-05	SG-01-AM-06	SG-01-AM-07
La	667,4	3171,2	807,1
Ce	1536,4	6286,6	2637,6
Pr	118,07	574,14	123,85
Nd	323,3	1639,6	298,3
Sm	41,23	184,83	47,89
Eu	9,33	38,88	14,87
Gd	30,76	70,45	60,24
Tb	2,55	7,09	5,82
Dy	8,98	24,42	20,87
Ho	1,30	2,39	3,62
Er	3,24	4,88	7,68
Tm	0,36	0,83	0,92
Yb	2,14	5,16	5,50
Lu	0,25	0,60	0,62

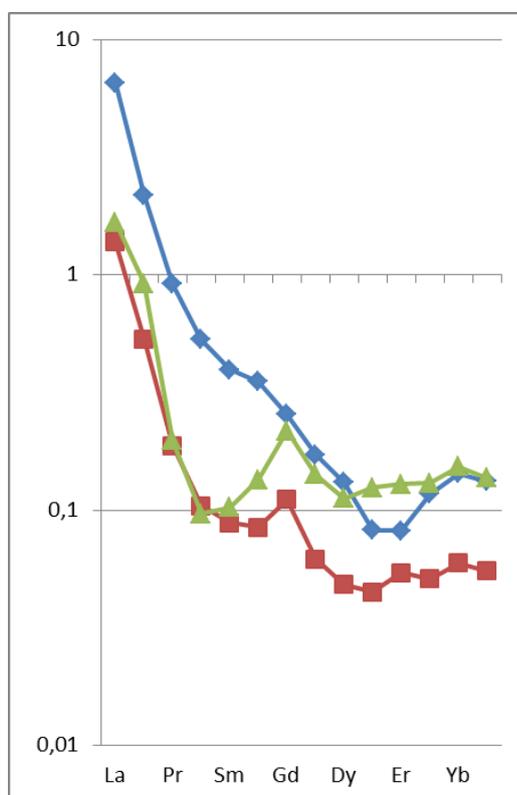


Figura III.21 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta mosqueada, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-05 (vermelho), SG-01-AM-06 (azul) e SG-01-AM-07 (verde).

### **III.4 Crosta Roxa com Oólitos**

A crosta roxa ocorre no intervalo de 19,75 m até 31,00 m. Ela é tipicamente de cor roxa e com espaços vazios de formas e dimensões muito irregulares (Fig. II.22). Ela é menos coesa do que os demais tipos de crosta e apresenta alguns níveis mais maciços de composição goethítica. Os níveis argilosos são raros.



Figura III.22 Aspecto macroscópico da crosta roxa (explicação no texto).

#### ***III.4.1 Mineralogia***

Na análise por difratometria de raios X de amostra total (Fig. III.23) foram identificados hematita, goethita e brookita.

A hematita ocorre na forma de nódulos com dimensões mais frequentemente da ordem de 2 cm. A goethita ocorre na forma de agregados botrioidais, por vezes fibrorradiados.

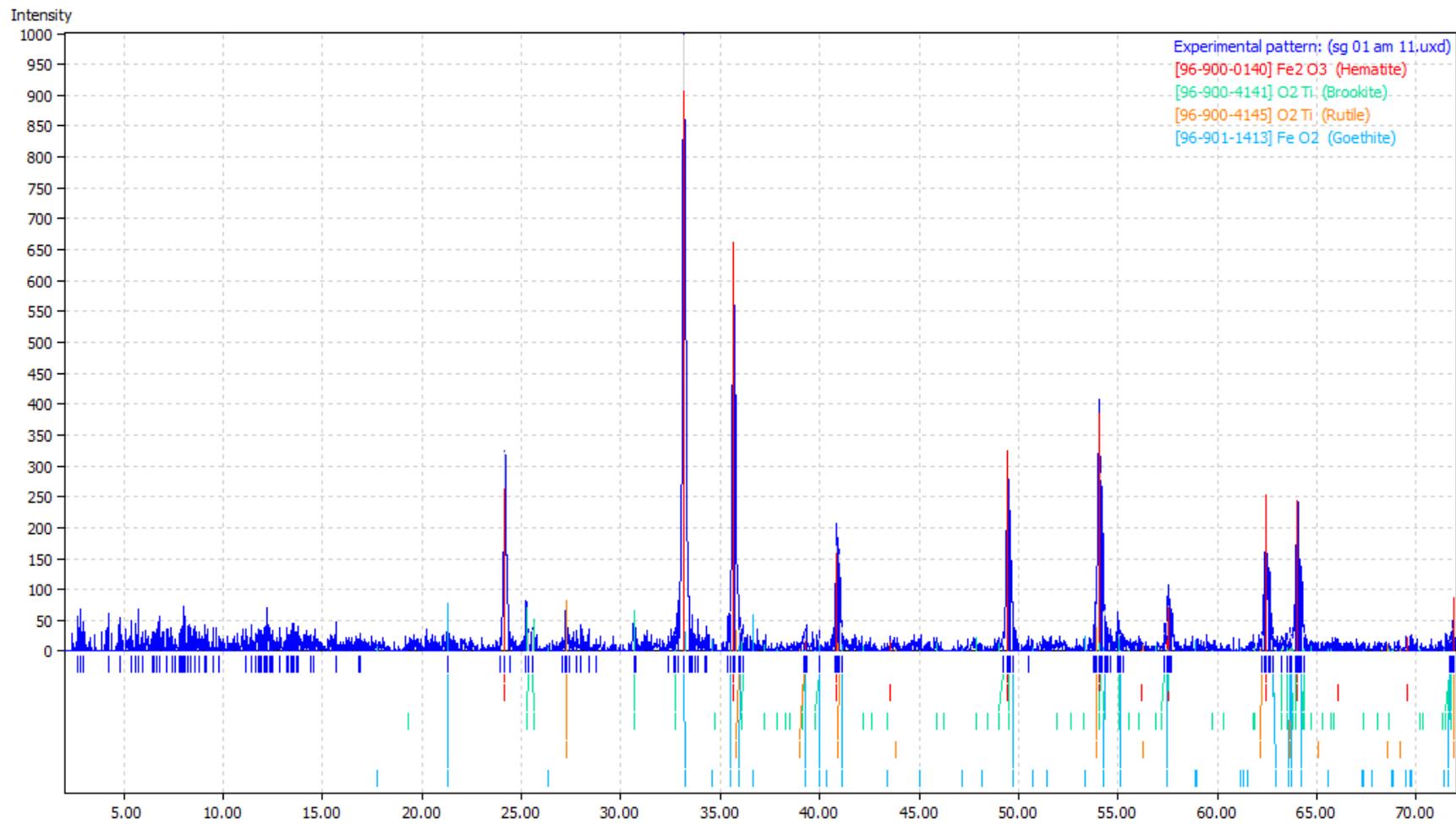


Figura III.23 Difratoograma de raios X de amostra da crosta roxa.

A grande particularidade desta crosta é a ocorrência de Nb-brookita formando oólitos, que ocorrem no intervalo entre 20m e 35m do furo SG-01-AM, onde foram encontrados os maiores teores de Nb na laterita. Esse intervalo corresponde às amostras SG-01-AM-10, SG-01-AM-11 e SG-01-AM-12. Afim de melhor caracterizar o mineral aos raios X, foi preparado um concentrado utilizando-se separador isomagnético Frantz e utilizada a fração menos magnética para catação manual do oólito. Os resultados (Fig. II.24) confirmaram tratar-se de NB-brookita.

Em lâmina petrográfica, observa-se que os oólitos são fibrorradiados e, ao mesmo tempo, formados por finas bandas concêntricas do tipo anéis de Liesegang. Os oólitos têm diâmetros variando de 100  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$ . Alguns oólitos são perfeitos (Fig. III.25.A), aparentemente sem nenhuma interferência no crescimento. Também ocorrem pares de anéis com crescimento inicial a partir de 2 núcleos distintos e que, não se tocarem, passaram a crescer conjuntamente (Fig. III.25.B). Mas, em sua grande maioria, os oólitos estão fragmentados (Fig. III.25.C) o que deve ser relacionado a colapso da crosta. Alguns fragmentos apresentam sobrecrecimento de outras bandas (Fig. III.25.C).

As cores das bandas refletem variações composicionais. Através do microscópio eletrônico de varredura foi constatado que os oólitos possuem uma composição média de 75% de titânio, 15% de nióbio e 10% de ferro. No microscópio petroográfico, sob luz natural, (foto) as bandas mais escuras representam bandas mais enriquecidas em Nb em relação às mais claras. Através do microscópio eletrônico de varredura nota-se que com o aumento do zoom as bandas são compostas por diversas outras bandas menores (Fig. III.26).

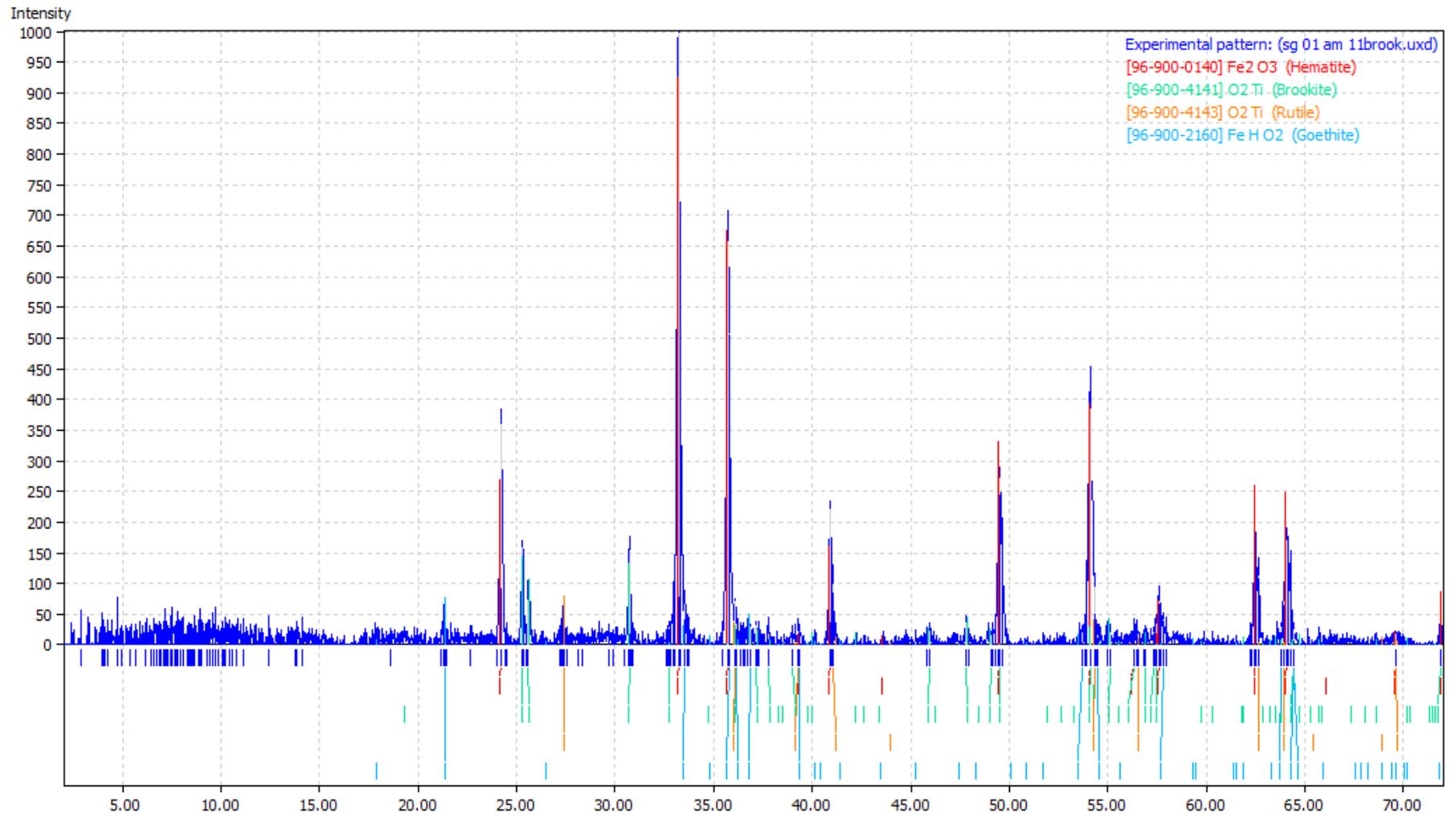
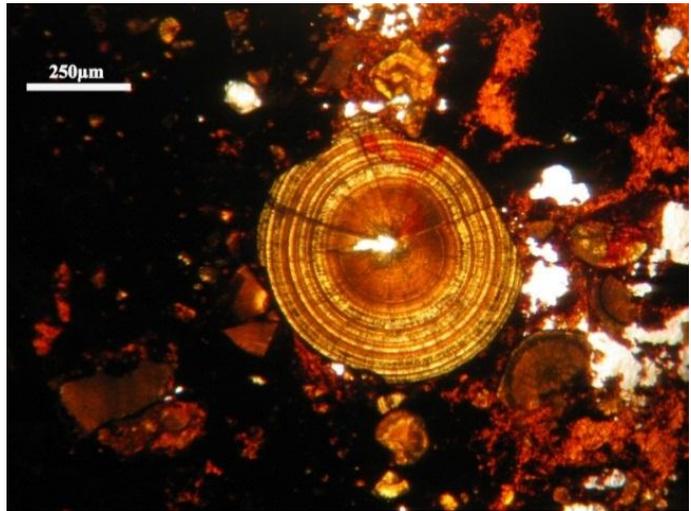
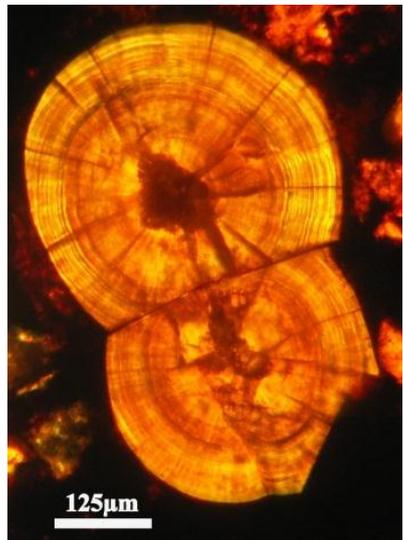


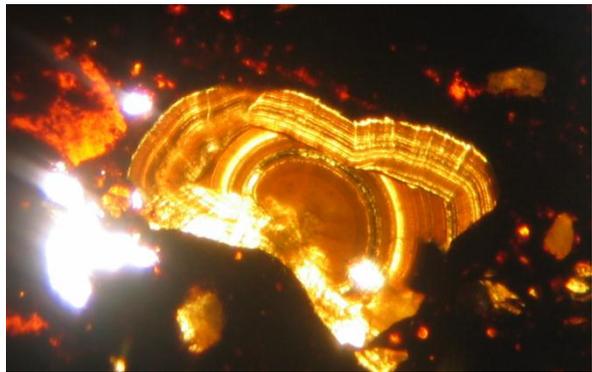
Figura III.24 Difratoograma de raios X da crosta roxa.



A

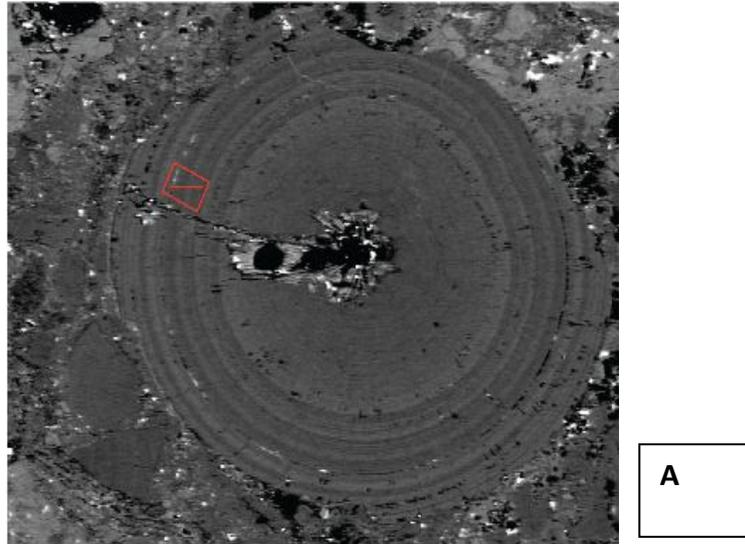


B

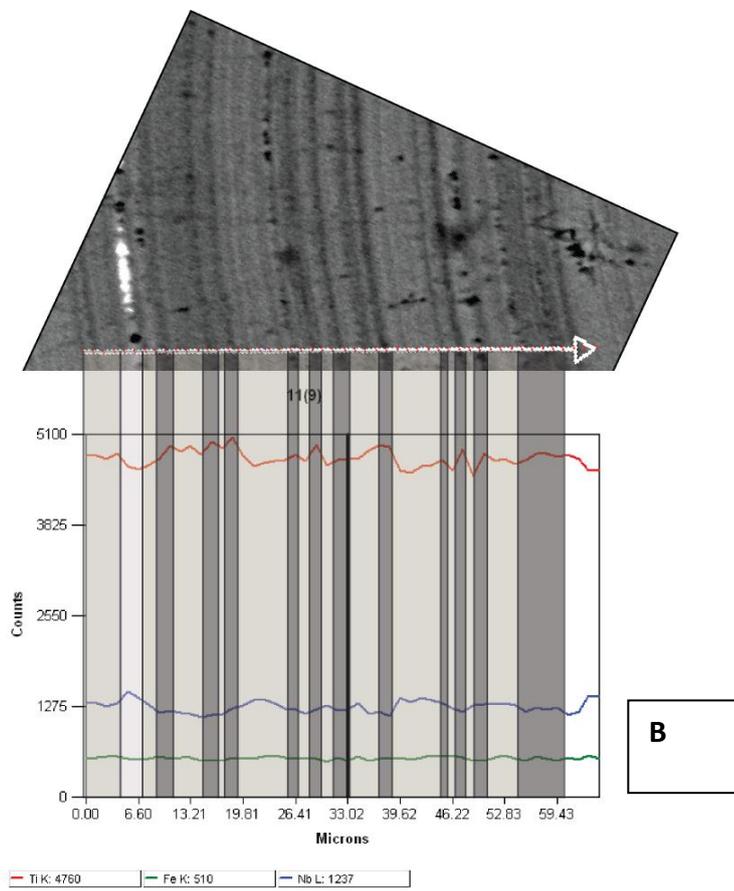


C

Figura III.25 Oólitos de Nb-bookita com anéis de Liesegang da crosta roxa . (A) Anéis crescidos a partir de dois núcleos distintos, com subsequente crescimento conjunto. (B) Oólito quebrado, apresentando sobrecrecimento de anéis de Liesegang.



**A**



**B**

Figura III.26 (A) Imagem MEV de óólito com anéis de Liesegang. (B) Imagem MEV do detalhe marcado na imagem A, com perfil composicional para Ti (vermelho), Fe (azul) e Nb (verde).

### *III.4.2 Composição Química*

#### Elementos Maiores

Como nas amostras anteriores, os elementos maiores mais abundantes na crosta são o Fe e o Ti (Tab. III.10). Na relação com o carbonatito (Fig. III.27), são esses únicos dois elementos que apresentaram enriquecimentos.

#### Elementos Traço

A crosta roxa com oólito apresenta concentrações significativamente altas de Nb e Th (Tab. III.11). Comparativamente ao carbonatito (Fig. III.28), observa-se importantes enriquecimentos nestes dois elementos e no W.

#### Elementos Terras Raras

O Ce é o único elemento do grupo das terras raras que ocorre com concentrações significativas (Tab. III.12) e o único enriquecido em relação ao carbonatito (Fig. III.29).

Tabela III.10 Composição química em elementos maiores da crosta roxa com oólitos.

	SG-01-AM09	SG-01-AM10	SG-01-AM11	SG-01-AM12
SiO <sub>2</sub>	0,07	0,20	0,21	0,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,70	0,86	0,43	0,60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	91,40	83,40	84,46	83,08
MgO	0,01	<0.01	0,02	<0.01
CaO	<0.01	<0.01	0,01	<0.01
Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	0,01	<0.01
K <sub>2</sub> O	0,00	0,00	0,02	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,44	6,14	7,23	6,14
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,43	0,47	0,16	0,28
MnO	0,42	0,24	0,21	0,20
LOI	5,3	6,0	4,0	5,9

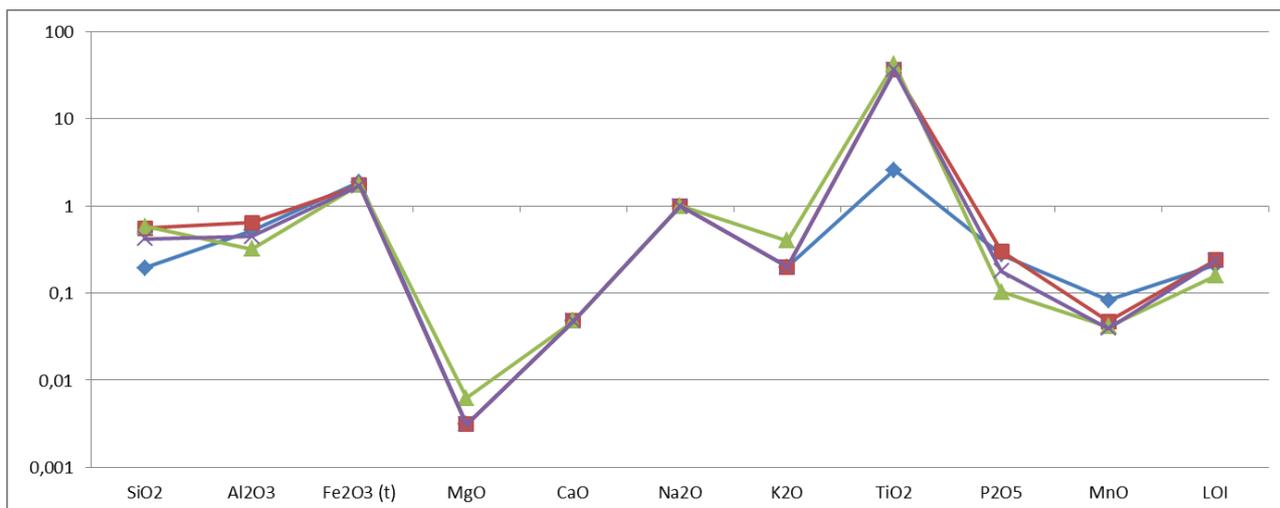


Figura III.27 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-09 (azul), SG-01-AM-10 (vermelho), SG-01-AM-11 (verde) e SG-01-AM-12 (roxo).

Tabela III.11 Composição química em elementos traço (ppm) da crosta roxa com oólitos.

	SG-01-AM09	SG-01-AM10	SG-01-AM11	SG-01-AM12
Cs	<0.1	<0.1	0,3	0,2
Rb	<0.1	<0.1	1,6	0,3
Ba	145	783	738	688
Sr	18,5	90,5	41,1	55,0
Pb	201,2	306,6	278,7	269,0
Th	2645,3	2723,9	1956,2	2327,6
U	0,2	0,1	0,2	0,2
Zr	40,8	54,7	49,7	70,2
Hf	1,0	1,4	3,2	3,3
Ta	<0.1	0,1	0,3	0,3
Y	53,8	220,1	64,1	96,2
Nb	2514,5	9969,8	13217,1	13803,4
Sc	332	368	350	320
Cr	0,003	<0.002	0,002	<0.002
Ni	<20	27	<20	<20
Co	19,4	27,7	14,9	22,2
V	86	162	191	171
W	52,3	326,5	380,2	345,2
Ga	1,8	3,9	4,6	5,1
Zn	845	1560	2287	2284
Cu	3,8	4,3	2,6	5,5

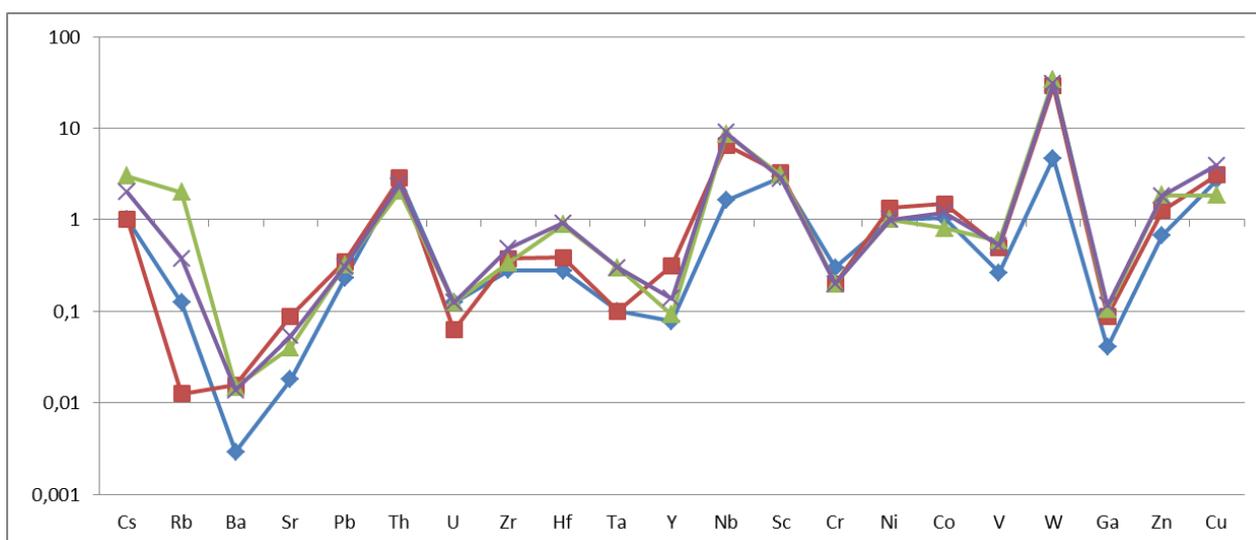


Figura III.28 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-09 (azul), SG-01-AM-10 (vermelho), SG-01-AM-11 (verde) e SG-01-AM-12 (roxo).

Tabela III.12 Composição química em elementos terras raras (ppm) da crosta roxa com oólitos.

	SG-01-AM-09	SG-01-AM-10	SG-01-AM-11	SG-01-AM-12
La	148,7	415,7	319,2	514,5
Ce	1534,3	1857,8	2365,0	4521,3
Pr	28,70	68,26	75,90	122,10
Nd	79,6	166,9	117,7	183,2
Sm	12,34	32,04	22,58	27,88
Eu	3,54	11,96	7,72	9,21
Gd	21,98	61,58	38,15	63,65
Tb	2,00	8,34	3,75	5,29
Dy	8,40	39,68	14,77	20,58
Ho	1,83	7,11	2,46	3,20
Er	4,72	14,96	5,94	7,70
Tm	0,60	1,83	0,89	0,92
Yb	3,53	8,67	4,56	5,41
Lu	0,45	1,29	0,67	0,67

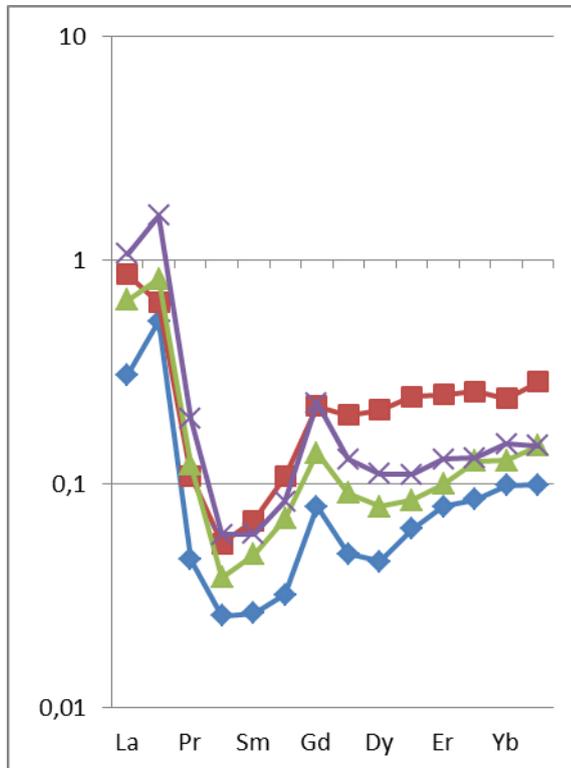


Figura III.29 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-09 (azul), SG-01-AM-10 (vermelho), SG-01-AM-11 (verde) e SG-01-AM-12 (roxo).

### **III.5 Crosta Manganésifera.**

A crosta manganésifera ocorre no intervalo de 31m a 40m de profundidade. A crosta manganésifera é constituída por faixas argilosas ocre com muitas intercalações de óxido de manganês que ocorrem de duas formas. Podem formar faixas irregulares que conferem à crosta um aspecto bandado (Fig. III.30A). O segundo caso é constituído por brechas com elementos de goethita e matriz de óxidos de manganês. Os elementos são também cortados por veios de óxidos de manganês que mostram continuidade com a matriz (Fig. III. 30B).

#### ***III.5.1 Mineralogia***

A mineralogia foi identificada através da análises de raios X, tendo como composição da crosta manganésifera Hematita (45,1%), Goethita (29,8%), Hollandita (12,3%) e Florencita (Ce) (12,7%) na amostra SG-01-AM-14 (Fig. III. 31), e Goethita (68,6%), Hematita (19%) e Hollandita (12,5%) na amostra SG-01-AM-15 (Fig. III. 32).

A hematita forma massas vermelha-amarronadas e disformes, que em alguns pontos estão fraturadas e preenchidas por hollandita.

Os cristais fibrosos de goethita formam bandas alaranjadas, as quais estão fraturadas e preenchidas por hollandita (Fig. III. 33A).

A hollandita está presente preenchendo as fraturas e os espaços vazios na crosta, em amostras macroscópicas apresenta uma cor cinza escura, já na microscopia apresenta-se como uma massa de grãos opacos.

O Nb-rutilo forma pequenos cristais, 100 micra, bandados e por muitas vezes fraturados (Fig. III. 33B).

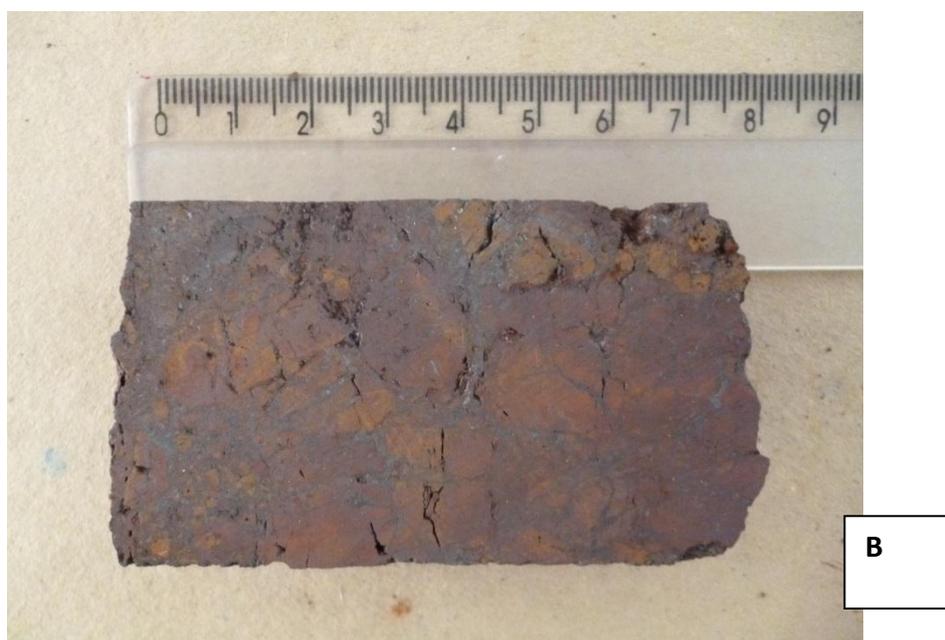
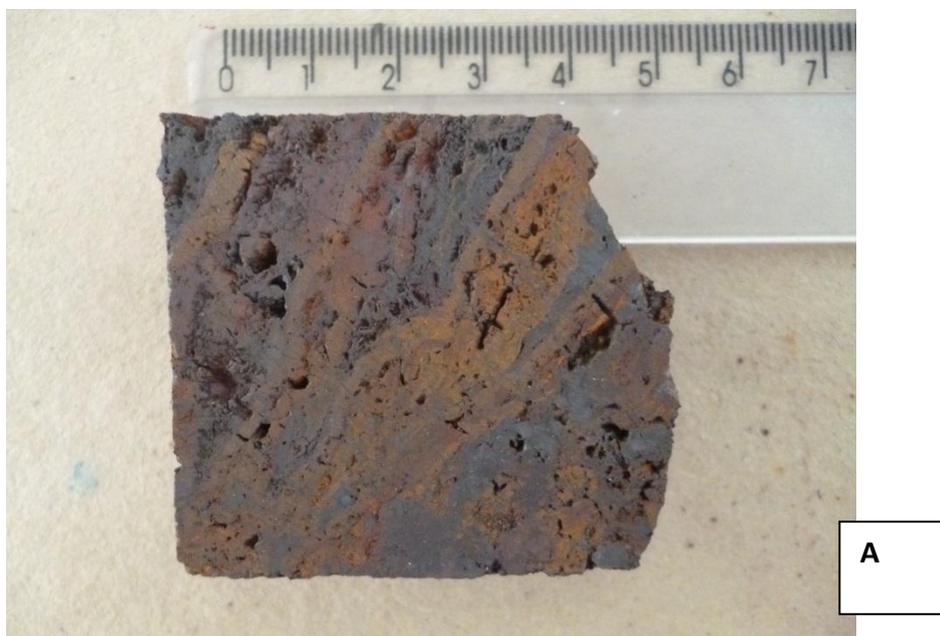


Figura III.30 Aspecto macroscópico da crosta manganésifera. (A) Crosta com aspecto bandado. (B) Crosta brechada.

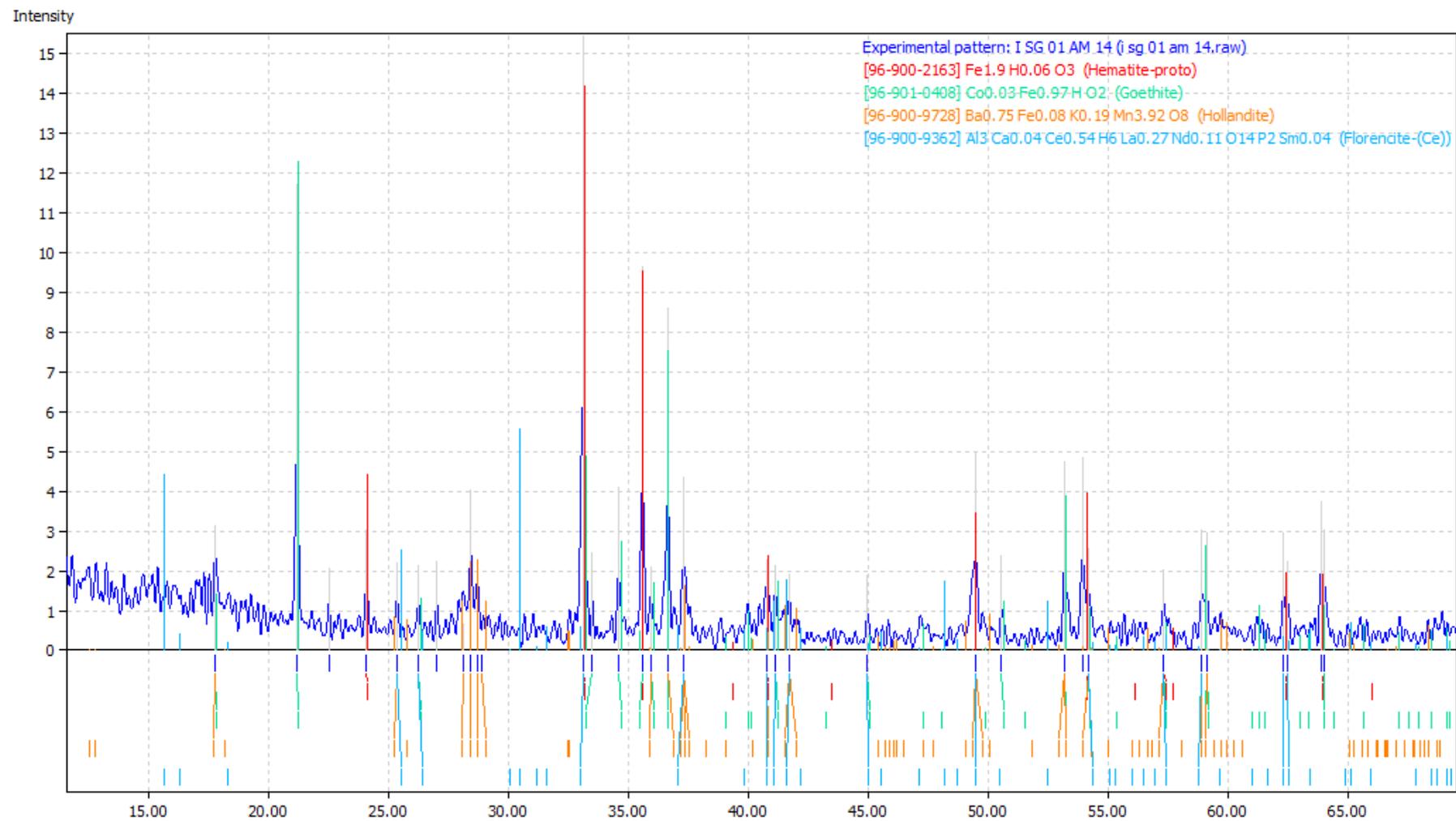


Figura III.31 Difratograma de raios X da crosta manganésifera, amostra SG-01-AM-14.

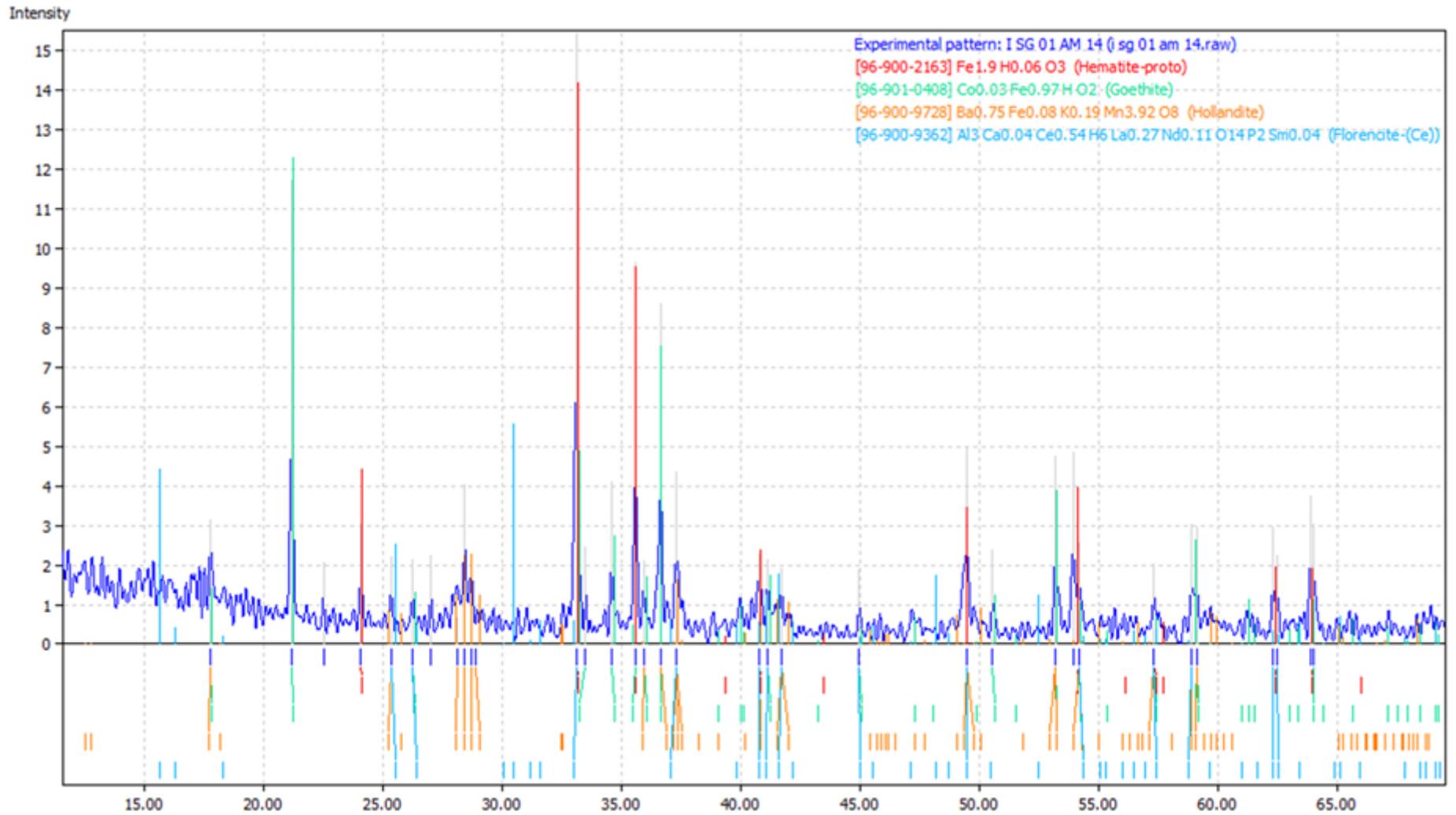


Figura III.32 . Difratoograma de raios X da crosta manganésifera, amostra SG-01-AM-15.

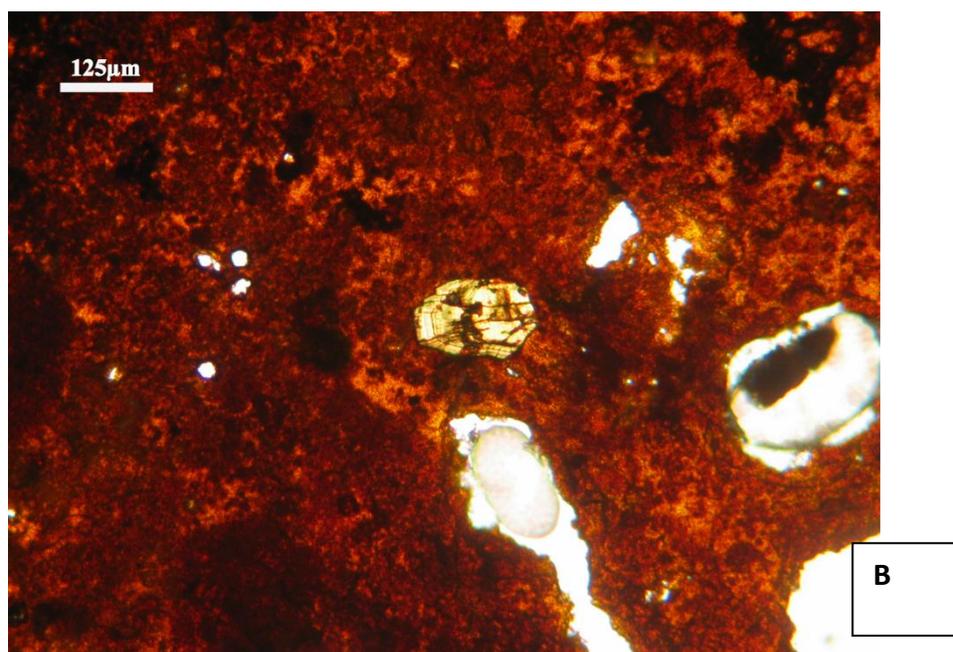
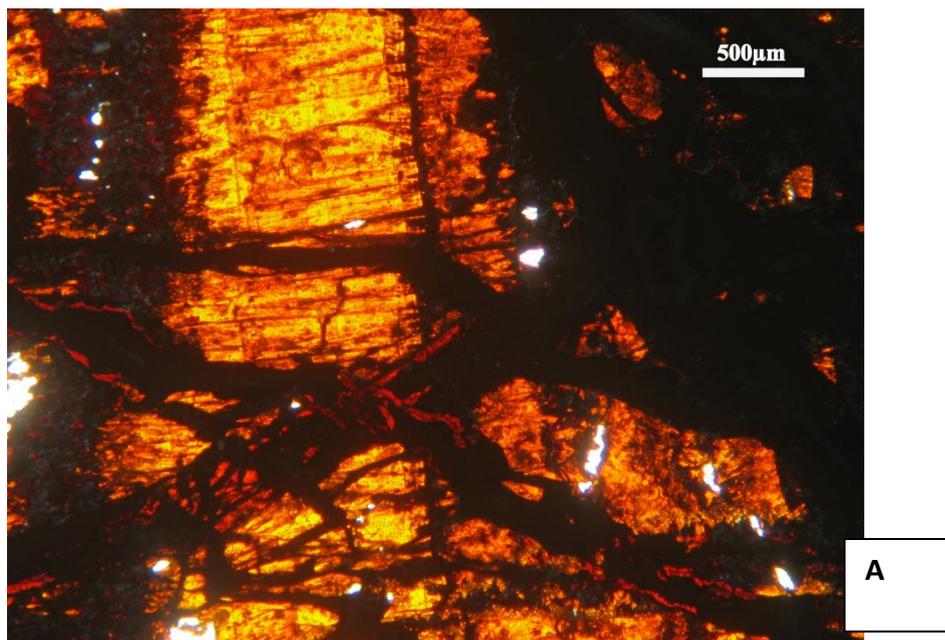


Figura III.33 Aspecto microscópico da crosta manganésifera. (A) Goethita fraturada e fraturas preenchidas por hollandita. (B) Cristal de Nb-rutilo.

### *III.5.2 Composição Química*

#### Elementos Maiores

Quimicamente, a crosta manganésifera apresenta altos teores de Mn e Fe (Tab. III. 13), sendo que o ferro bem menor do que das anteriores, e o Ti, que estava sendo um dos principais elementos da rocha, na crosta manganésifera aparece com teores muito mais baixos, inclusive menores que no carbonatito (Fig. III. 34).

#### Elementos Traço

Em relação aos elementos traço, a crosta manganésifera comporta-se muito diferente das anteriores (Tab. III. 14). Possui uma anomalia positiva de Co e W (esse correspondendo as amostras com mais Ti), teores de Ba muito próximos do teor de Ba no carbonatito (Fig. III. 35), e anomalias negativas dos elementos HFSE (U, Zr, Hf, Ta). Em relação ao Nb, o qual é um elemento de interesse econômico nessa área, a crosta manganésifera apresenta teores baixos desse elemento.

#### Elementos Terras Raras

Os elementos terras raras na crosta manganésifera apresentaram teores elevados de Ce (Tab. III. 15), da ordem de 6 vezes maiores do que o carbonatito (Fig. III. 36), os demais elementos possuem uma anomalia negativa, e com exceção da amostra SG-01-AM-16, as demais mostram um pico de Gd, nota-se também um enriquecimento relativo da elementos terras raras pesados.

Tabela III.13 Composição química em elementos maiores da crosta manganésifera.

	SG-01-AM13	SG-01-AM14	SG-01-AM15	SG-01-AM16	SG-01-AM17
SiO <sub>2</sub>	0,32	0,49	0,40	0,47	0,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,75	0,23	0,23	0,55	0,23
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	50,33	50,55	69,60	57,09	61,24
MgO	<0.01	<0.01	<0.01	0,00	<0.01
CaO	<0.01	<0.01	<0.01	0,00	<0.01
Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	0,01	<0.01
K <sub>2</sub> O	0,04	0,02	0,02	0,04	0,00
TiO <sub>2</sub>	0,51	0,06	0,13	1,31	0,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,21	0,07	0,33	0,07
MnO	32,68	32,20	17,17	25,27	25,94
LOI	8,3	9,2	8,6	9,1	8,4

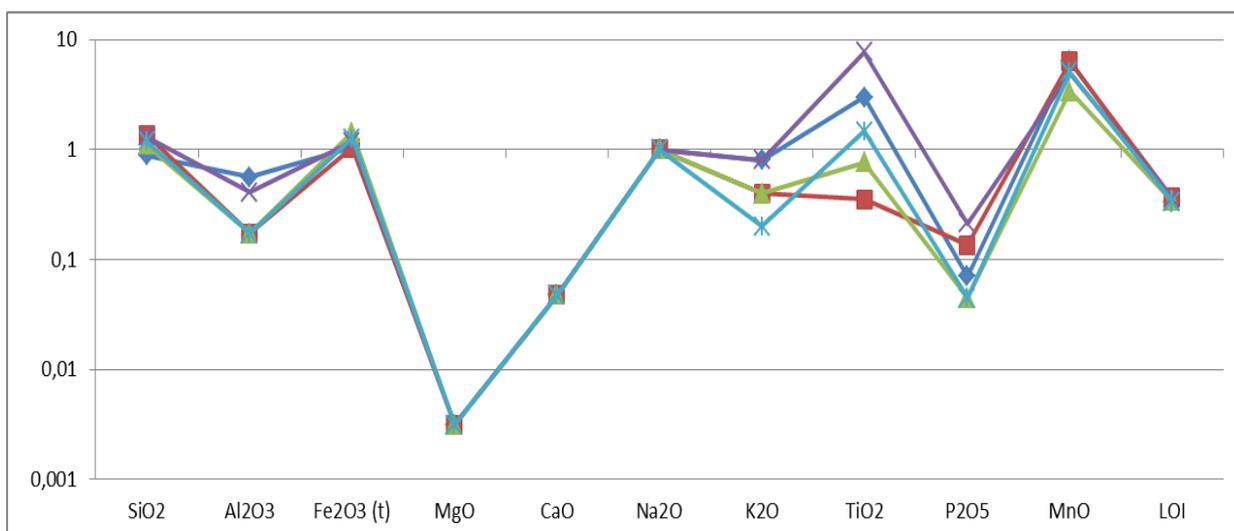


Figura III.34 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta manganésifera normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-13 (azul) SG-01-AM-14 (vermelho), SG-01-AM-15 (verde), SG-01-AM-16 (roxo) e SG-01-AM-17 (azul claro).

Tabela III.14 Composição química em elementos traço (ppm) da crosta manganésifera.

	SG-01-AM13	SG-01-AM14	SG-01-AM15	SG-01-AM16	SG-01-AM17
Cs	<0.1	<0.1	<0.1	0,2	<0.1
Rb	0,6	0,2	0,3	0,6	0,3
Ba	46640	44024	21387	34729	14718
Sr	18,1	19,1	6,5	49,9	6,5
Pb	172,2	261,4	171,2	211,5	185,7
Th	903,3	2076,5	1168,3	1216,5	1238,9
U	<0.1	<0.1	<0.1	0,2	<0.1
Zr	10,1	32,0	23,6	70,6	20,2
Hf	0,4	0,7	0,5	1,9	0,5
Ta	0,1	0,1	<0.1	0,4	<0.1
Y	164,8	163,5	154,2	203,5	154,8
Nb	1662,9	796,6	1216,1	5075,2	2102,3
Sc	315	243	176	193	251
Cr	<0.002	<0.002	0,002	<0.002	<0.002
Ni	<20	<20	<20	<20	<20
Co	331,4	222,4	121,0	144,2	86,3
V	32	20	21	106	27
W	40,3	11,1	13,9	84,1	22,1
Ga	23,7	29,5	21,9	21,5	27,5
Zn	1310	1444	1668	1296	1188
Cu	6,3	6,2	3,7	8,1	3,3

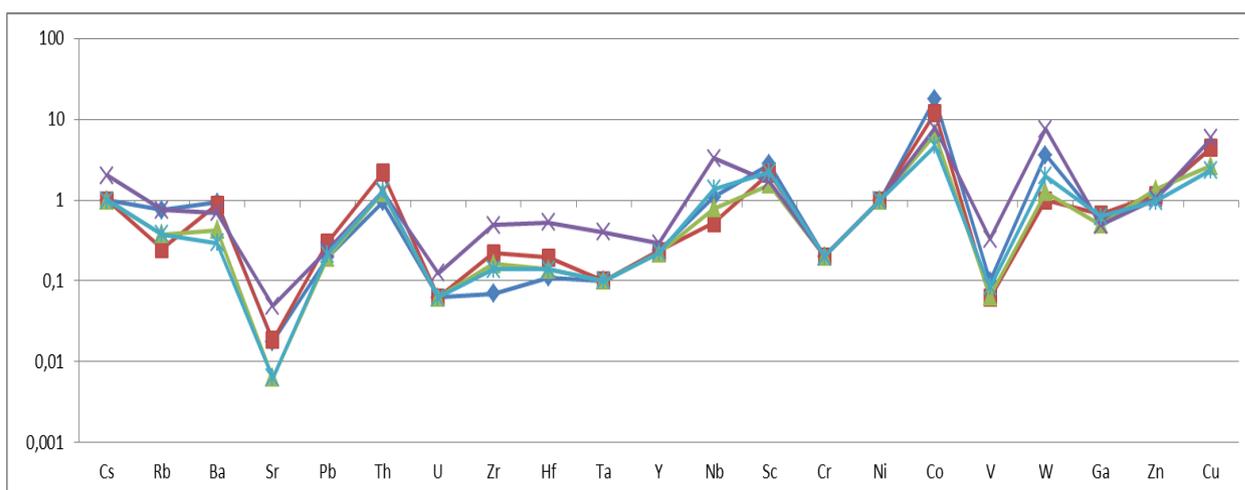


Figura III.35 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta manganésifera, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-13 (azul) SG-01-AM-14 (vermelho), SG-01-AM-15 (verde), SG-01-AM-16 (roxo) e SG-01-AM-17 (azul claro).

Tabela III.15 Composição química em elementos terras raras (ppm) da manganésifera.

	SG-01-AM-13	SG-01-AM-14	SG-01-AM-15	SG-01-AM-16	SG-01-AM-17
La	113,8	262,6	73,6	480,0	133,2
Ce	8050,5	11156,7	5175,9	4233,4	8217,4
Pr	46,99	89,57	28,71	113,05	44,47
Nd	165,1	302,5	106,7	341,4	150,6
Sm	64,10	73,24	37,08	70,96	44,31
Eu	23,55	22,09	14,39	22,96	14,73
Gd	140,29	154,91	86,83	62,03	117,54
Tb	11,99	11,21	8,34	9,77	8,59
Dy	44,91	40,04	35,89	43,86	34,20
Ho	7,63	6,13	6,09	6,98	6,06
Er	16,25	13,10	13,47	16,42	14,51
Tm	1,91	1,67	1,67	2,00	1,65
Yb	10,03	8,75	8,86	10,37	9,10
Lu	1,32	1,14	1,15	1,39	1,14

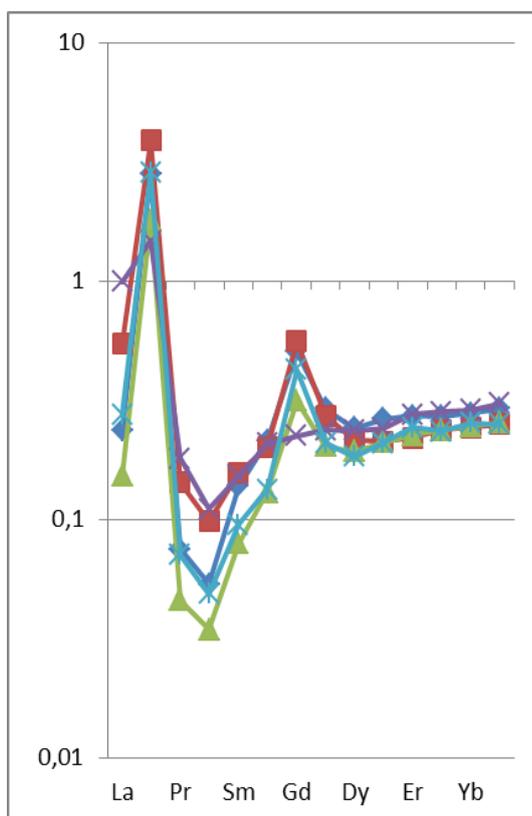


Figura III.36 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta manganésifera, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-13 (azul) SG-01-AM-14 (vermelho), SG-01-AM-15 (verde), SG-01-AM-16 (roxo) e SG-01-AM-17 (azul claro).

### III.6 Crosta Roxa

A crosta roxa é avermelhada e com textura cavernosa, parece muito a crosta roxa anterior, porém possui faixas argilosas ocre (Fig. III. 37). Possui 19 metros de espessura, vai de 40 a 59 metros de profundidade. É representada pelas amostras SG-01AM-20 e SG-01-AM-22.



Figura III.37 Aspecto macroscópico da crosta roxa.

### *III. 6.1 Composição Química*

#### Elementos Maiores

A crosta roxa volta a ser quimicamente similar as crostas anteriores (Tab. III. 16), a exceção da crosta manganésífera, nota-se, no entanto, uma diminuição gradual do teor de alumínio em relação a profundidade das amostras. Novamente o ferro e o titânio são os elementos mais abundantes nas amostras (Fig. III 38).

#### Elementos traço

Quimicamente, a crosta roxa, apresenta altos teores de Nb e W anteriores (Tab. III. 17), elementos os quais possuem um forte vínculo entre eles e com o titânio. Anomalias positivas de Cs e Th também ocorrem nesta crosta (Fig. III 39), à anomalia de Co, registrada somente na crosta manganésífera ainda esta presente nessas amostras.

#### Elementos terras raras

Em relação aos elementos terras raras, esta crosta apresenta altos teores de Ce anteriores (Tab. III. 18) e possui um comportamento oxidante, similar ao da crosta manganésífera, apresentando assim, um enriquecimento relativo de ETRp/ETRI, a exceção de Ce e do La. Nesta crosta já não acontece a anomalia de Gd (Fig. III 40).

Tabela III.16 Composição química em elementos maiores da crosta roxa.

	SG-01-AM20	SG-01-AM22
SiO <sub>2</sub>	0,52	0,43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,37	0,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	86,11	78,68
MgO	<0.01	<0.01
CaO	<0.01	<0.01
Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O	0,01	0,04
TiO <sub>2</sub>	1,37	4,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,17	0,26
MnO	0,25	1,55
LOI	8,7	9,6

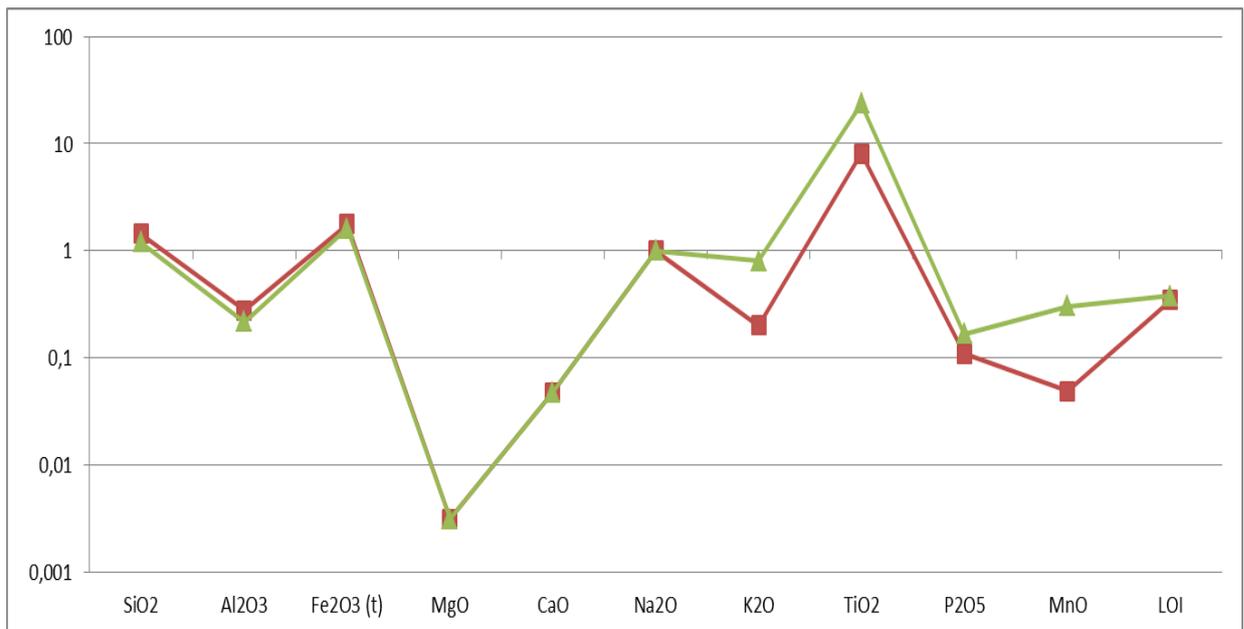


Figura III.38 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-20 (vermelho) e SG-01-AM-22 (verde)

Tabela III.17 . Composição química em elementos traço (ppm) da crosta roxa.

	SG-01-AM20	SG-01-AM22
Cs	0,3	0,7
Rb	0,3	1,0
Ba	621	2617
Sr	19,1	24,7
Pb	181,7	244,1
Th	1094,8	1970,5
U	0,2	0,1
Zr	23,2	53,4
Hf	0,4	2,7
Ta	<0.1	<0.1
Y	374,1	434,4
Nb	7459,9	20032,4
Sc	562	362
Cr	0,002	0,003
Ni	<20	<20
Co	51,6	46,2
V	118	265
W	124,2	361,4
Ga	5,6	4,4
Zn	2293	2263
Cu	15,4	10,7

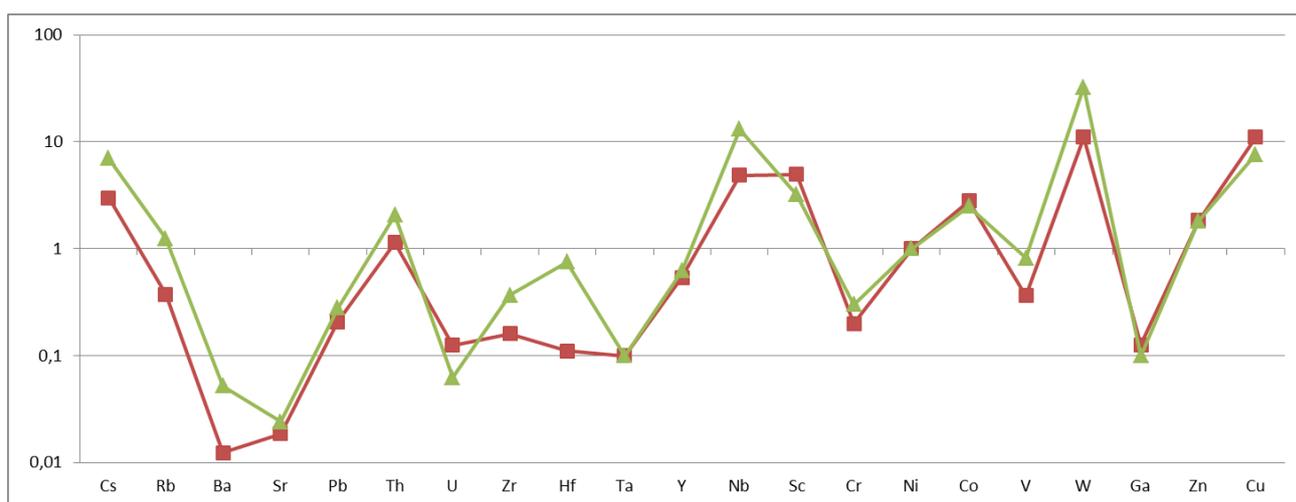


Figura III.39 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta roxa, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-20 (vermelho) e SG-01-AM-22 (verde)

Tabela III.18 Composição química em elementos terras raras (ppm) da crosta roxa.

	SG-01-AM-20	SG-01-AM-22
La	472,2	1206,1
Ce	3093,8	5094,6
Pr	183,81	460,72
Nd	328,0	843,6
Sm	39,44	72,40
Eu	13,83	23,57
Gd	44,92	85,71
Tb	8,70	15,44
Dy	49,41	76,77
Ho	9,79	12,94
Er	23,18	29,66
Tm	2,90	3,31
Yb	14,75	18,68
Lu	1,97	2,35

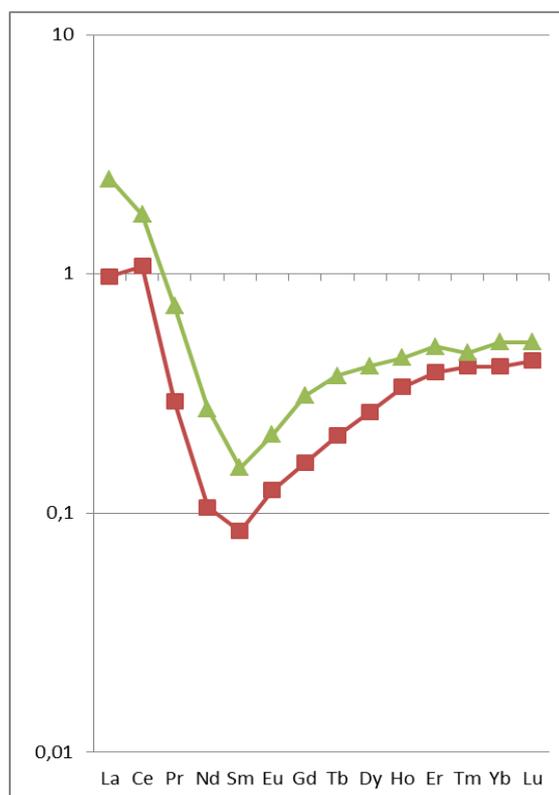


Figura III.40 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta roxa, normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-20 (vermelho) e SG-01-AM-22 (verde).

### III. 7 Crosta Marrom

É uma crosta homogêna de coloração amarelo amarronzada (Fig. III. 41), e devido a baixa recuperação da sonda nesta faixa, não foi possível determinar mais variações. Possui 41 metros de espessura, vai de 59 a 100 metros de profundidade. É representada pelas amostras SG-01AM-24, SG-01-AM027, SG-01-AM-30, SG-01-AM-33 e SG-01-AM-35.



Figura III.41 Aspecto macroscópico da crosta marrom.

### *III. 7. 1 Composição Química*

#### Elementos Maiores

A crosta marrom em relação aos elementos maiores não apresenta variação em relação às demais crostas, na média apresenta um alto teor de Fe e Ti (Tab III. 19). Na relação com o carbonatito (Fig. III.42), apresenta também, um enriquecimento em sílica.

#### Elementos Traço

Os resultados dos elementos traços da crosta marrom (Tab III.20) mostram que há uma variação da do teor de elementos traços de uma amostra para a outra, o que não ocorreu em relação aos elementos maiores. Altos teores de Nb, Th e W, estão na porção mais rasa da crosta, e diminuem gradativamente com a profundidade. Após a normalização em relação ao carbonatito (Fig. III.43), percebe-se que os mesmos enriquecimentos do resto da crosta.

#### Elementos terras raras

Os resultados dos elementos terras raras da crosta marrom (Tab III.21) mostram que também há uma variação da do teor de ETRs de uma amostra para a outra. A amostra SG-01-AM-30 apresentou altos teores de Ce (2,85%), e baixos teores que os demais ETRs, já a amostra SG-01-AM-24 mostra altos teores de todos os ETRs. Após a normalização em relação ao carbonatito (Fig. III. 44), percebe-se na amostra SG-01-AM-30, além de um alto enriquecimento do Ce, um enriquecimento em Gd como em algumas amostras anteriores, o que não ocorre nas outras amostras da crosta marrom.

Tabela III.19 Composição química em elementos maiores da crosta roxa.

	SG-01-AM24	SG-01-AM27	SG-01-AM30	SG-01-AM33	SG-01-AM35
SiO <sub>2</sub>	0,75	1,04	0,53	1,02	1,85
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,40	0,50	0,38	0,24	0,77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (t)	80,16	81,74	82,39	84,82	81,98
MgO	<0.01	0,01	<0.01	<0.01	<0.01
CaO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0,01
Na <sub>2</sub> O	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
K <sub>2</sub> O	0,02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
TiO <sub>2</sub>	2,06	0,99	0,57	0,55	0,37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,46	0,40	0,29	0,24	0,58
MnO	0,23	0,39	0,31	0,25	0,43
LOI	10,3	10,9	10,6	11,2	11,8

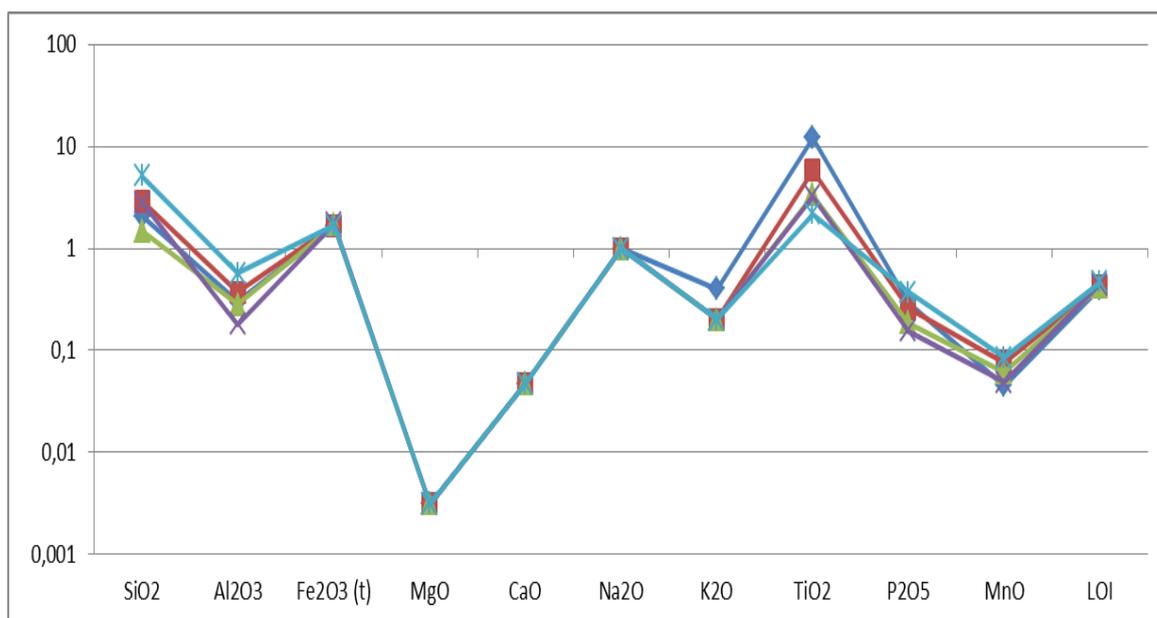


Figura III.42 Padrão de distribuição dos elementos maiores na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-24 (azul) SG-01-AM-27 (vermelho), SG-01-AM-30 (verde), SG-01-AM-33 (roxo) e SG-01-AM-35 (azul claro).

Tabela III.20 Composição química em elementos traço (ppm) da crosta marrom.

	SG-01-AM24	SG-01-AM27	SG-01-AM30	SG-01-AM33	SG-01-AM35
Cs	0,4	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Rb	0,6	0,1	0,2	<0.1	<0.1
Ba	1810	557	431	248	978
Sr	161,5	75,9	107,2	42,0	236,0
Pb	174,0	509,6	395,0	103,1	199,6
Th	2186,0	3451,5	2314,0	1454,1	2373,6
U	0,4	0,8	0,5	0,2	0,2
Zr	108,8	109,4	39,8	40,9	18,2
Hf	3,5	3,8	1,3	1,3	0,7
Ta	0,2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Y	558,4	168,5	88,1	81,6	97,1
Nb	21548,1	10983,6	5444,1	5308,7	3419,1
Sc	382	482	285	395	417
Cr	0,003	<0.002	<0.002	<0.002	0,002
Ni	<20	<20	<20	21	<20
Co	33,0	41,1	51,1	48,5	43,8
V	377	208	125	101	122
W	193,5	88,1	38,3	52,0	30,8
Ga	7,8	6,2	7,5	2,2	4,0
Zn	2391	1543	1592	1342	1553
Cu	5,0	7,0	22,9	3,2	7,6

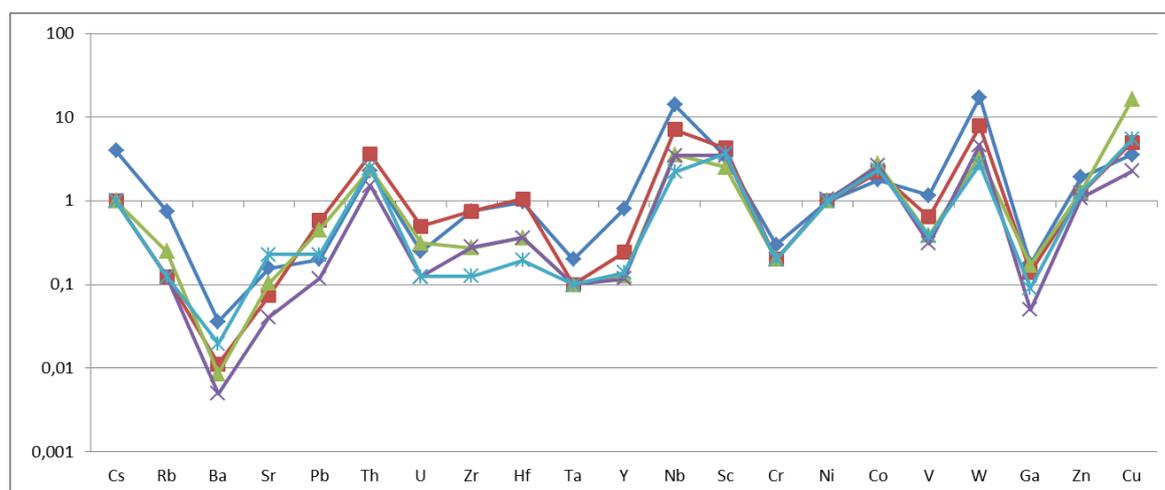


Figura III.43 Padrão de distribuição dos elementos traço na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-24 (azul) SG-01-AM-27 (vermelho), SG-01-AM-30 (verde), SG-01-AM-33 (roxo) e SG-01-AM-35 (azul claro).

Tabela III.21 Composição química em elementos terras raras (ppm) da crosta marrom.

	SG-01-AM-24	SG-01-AM-27	SG-01-AM-30	SG-01-AM-33	SG-01-AM-35
La	1622,0	1042,9	503,2	352,3	1560,5
Ce	5185,6	9331,7	28520,6	2133,8	4500,2
Pr	591,76	252,42	105,77	85,04	248,77
Nd	1413,4	407,3	226,4	148,4	627,1
Sm	152,59	53,03	41,47	17,81	74,66
Eu	40,94	13,60	12,13	5,06	17,00
Gd	116,34	35,61	63,22	12,88	36,81
Tb	19,95	6,02	5,38	2,79	5,18
Dy	101,29	32,43	28,26	18,20	25,65
Ho	18,01	6,63	4,25	3,17	3,77
Er	39,99	17,86	10,00	8,59	8,83
Tm	4,70	2,32	1,48	1,23	1,21
Yb	24,83	13,37	8,28	7,04	6,39
Lu	3,15	1,61	0,92	0,99	0,78

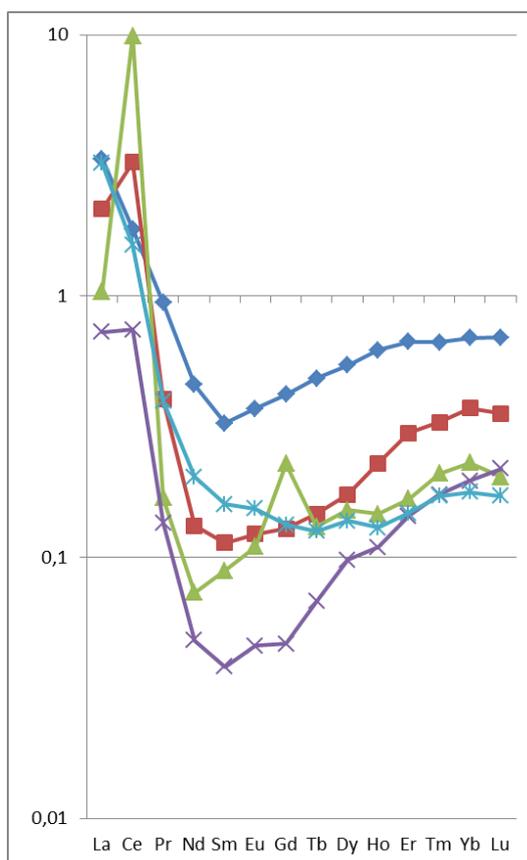


Figura III.44 Padrão de distribuição dos elementos terras raras na crosta roxa normalizada em relação ao carbonatito. SG-01-AM-24 (azul) SG-01-AM-27 (vermelho), SG-01-AM-30 (verde), SG-01-AM-33 (roxo) e SG-01-AM-35 (azul claro).

### III.8 Variação vertical do perfil laterítico

As figuras III.45 a III. 52 apresentam as distribuições verticais das concentrações de elementos selecionados. Nas linhas abaixo, procurar-se-á sintetizar os padrões de variação química encontrados e suas possíveis relações com as variações texturais e mineralógicas que ocorrem ao longo do perfil laterítico. Adicionalmente, procurar-se-á também caracterizar as variações verticais nos padrões de distribuição dos diferentes elementos normalizados em relação ao carbonatito. Não se espera, evidentemente, que o carbonatito descrito no capítulo II desta monografia seja representativo de todo o corpo de Seis Lagos, pois complexos carbonatíticos podem ser constituídos por diferentes tipos de carbonatitos, assim como podem conter rochas alcalinas e rochas ultramáficas associadas (Wooley, 2001). Neste sentido, tentar-se-á também identificar variações verticais que sejam relacionadas a diferentes protólitos.

Não foi possível efetuar para este trabalho medições da porosidade dos diversos tipos de crosta. Entretanto, a partir dos dados petrográficos, a existência de uma gradação vertical parece bem caracterizada. A sequência inicia-se, da base para o topo, pela crosta menos porosa entre todas as descritas, a crosta marrom. Segue-se um material bastante poroso, representado pela crosta roxa. Em seguida, ocorre a crosta manganésífera que tem uma porosidade menor do que a da crosta roxa. Entretanto, esta crosta já deve ter tido uma porosidade bem maior, a qual foi em parte ocupada pelo Mn. Na sequência do perfil, ocorre novamente a crosta roxa que, desta feita, tem como característica adicional à presença dos oólitos. Sua porosidade é igual ou maior do que a da crosta roxa anterior. Acima desta crosta muito porosa, seguem-se a crosta fragmentada, a crosta mosqueada e, novamente, a crosta fragmentada. Trata-se de materiais que são hoje menos porosos do que a crosta roxa, mas que, sem dúvida alguma, já sofreram processos de colapso, ou seja, suas porosidades já foram bem maiores. No topo do perfil ocorre a crosta pisolítica que, petrograficamente, é menos porosa do que as que lhe são subjacentes, mas que, por outro lado, como veremos adiante, é a crosta que foi mais fortemente afetada por processos pós-lateritização. Assim, do ponto de vista da variação textural, o perfil laterítico estudado tem uma configuração normal, caracterizada pelo aumento gradacional da porosidade da base para o topo, sendo esta gradação perturbada apenas pela crosta manganésífera.

A distribuição das concentrações de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Fig. III.45) é caracterizada pela regularidade, com uma grande predominância de valores em torno de 80%, com as seguintes exceções: uma amostra (SG-01-AM06) da crosta mosqueada com valor de 60,18% e todas as amostras da crosta manganésifera, as quais têm concentrações variando de 50,33% a 69,60%. Comparativamente ao carbonatito, o perfil apresenta no geral um enriquecimento de Fe no entorno de 1,5 vezes.

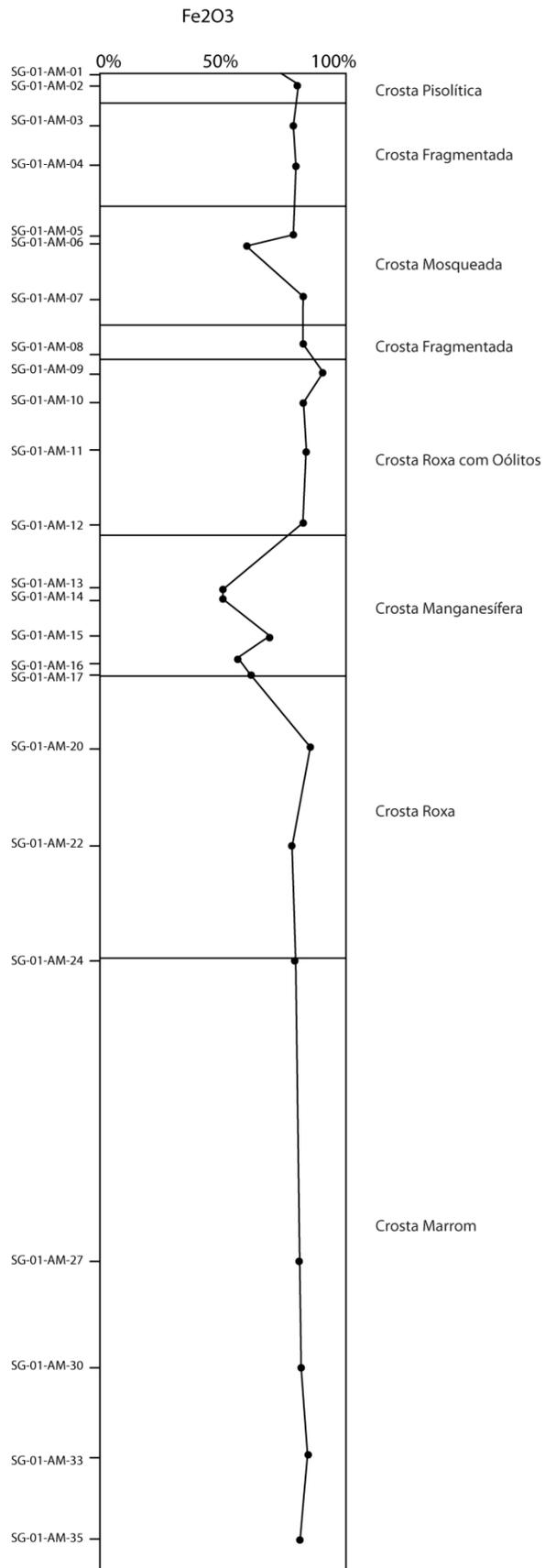


Figura III.45 Distribuição vertical do teor de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Na figura III.46 observa-se que a presença de concentrações mais altas de Mn é totalmente restrita à crosta manganésifera, com valores na faixa de 20 a 40 %, que representariam um enriquecimento extremamente alto em relação ao carbonatito. Neste sentido, a formação da crosta manganésifera seria mais provavelmente ligada a um protólito distinto. Por outro lado, as observações petrográficas mostram claramente o caráter tardio dos minerais de manganês, como veios ou preenchendo espaços vazios, implicando que o manganês sofreu forte remobilização.

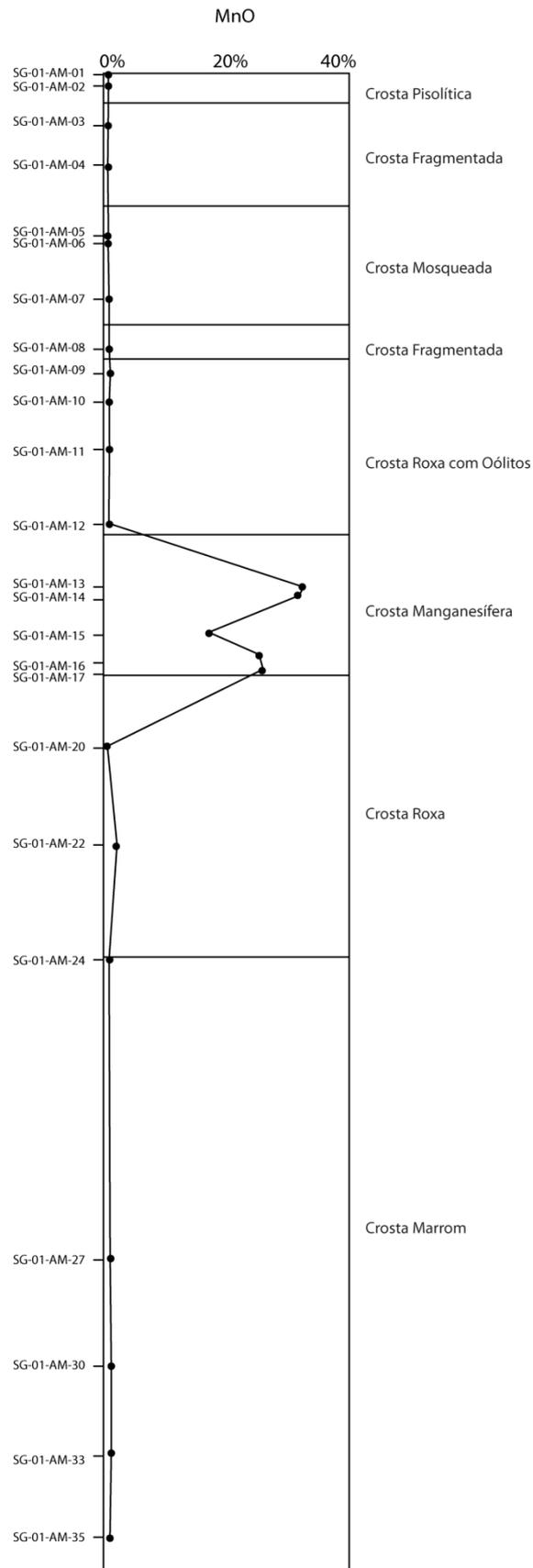


Figura III.46 Distribuição vertical do teor de MnO.

Na figura III.47, observa-se que as concentrações de Ba e Co acompanham as de Mg. O aumento nas concentrações destes dois elementos na crosta manganésifera é muito grande, podendo ser atribuído a processo do tipo scavenger (Zang W. et. al). Por outro lado, no detalhe, Ba e Co têm comportamentos distintos em profundidade: os valores de Co são nitidamente mais baixos nas amostras das crostas situadas acima da crosta manganésifera e mais altos nas amostras das crostas abaixo da crosta manganésifera, enquanto que o comportamento do Ba é indistinto. Comparativamente ao carbonatito, o Co foi levemente enriquecido nas crostas abaixo da crosta manganésifera e depletado nas situadas cima desta, enquanto que o Ba foi fortemente depletado ao longo de todo o perfil (exceto na crosta manganésifera).

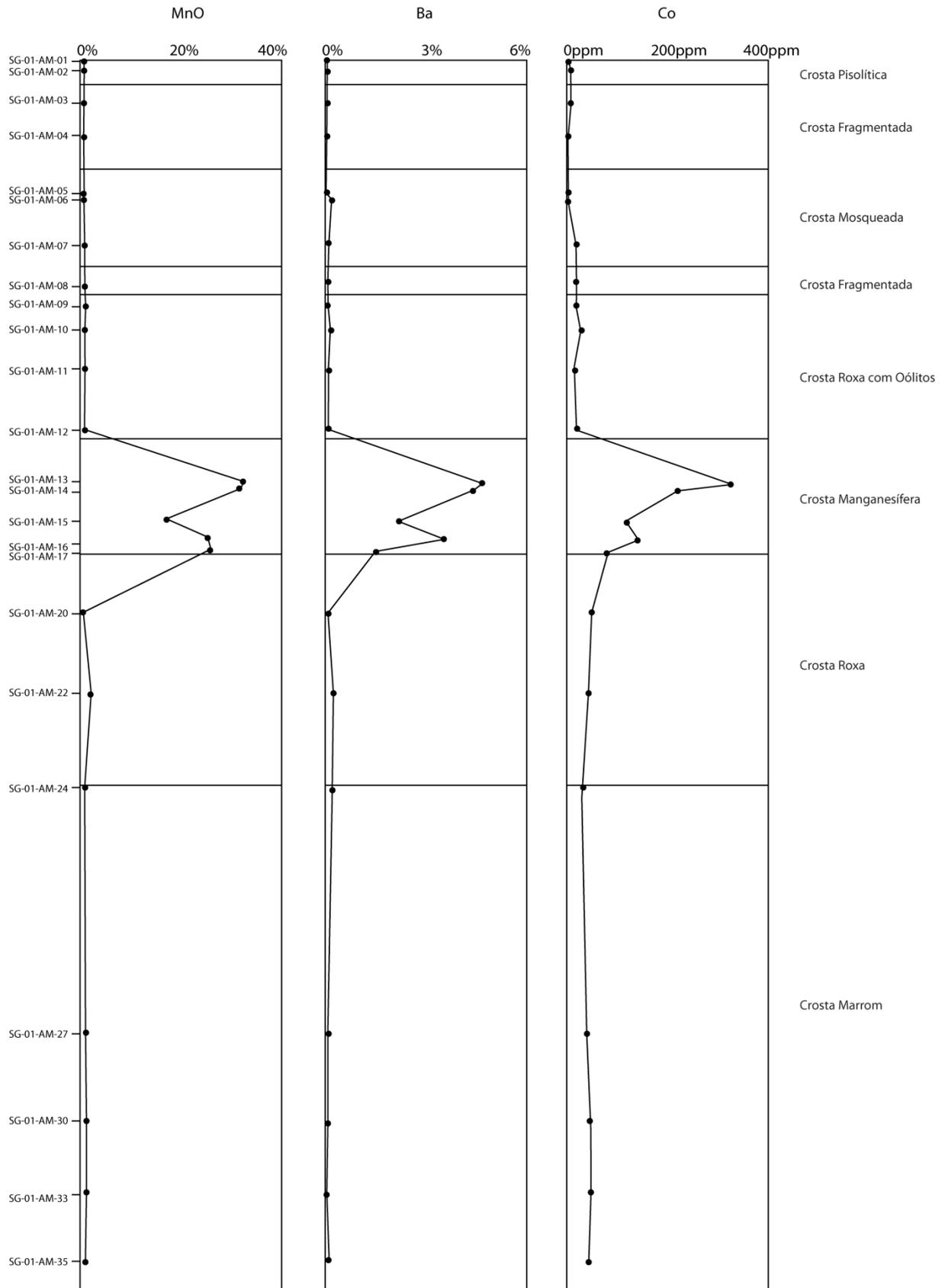


Figura III.47 Distribuição vertical dos teores de ETRL (menos o Ce), Ce, e ETRP+Y.

No caso do Al (Fig. III.48), a crosta manganésífera mais uma vez parece representar um divisor no comportamento da distribuição vertical das concentrações ao longo do perfil laterítico. As concentrações deste elemento são claramente mais altas nas amostras acima da crosta manganésífera. Deixando-se de lado a amostra mais anômala (SG-01-AM-06), o aspecto geral é o de uma diminuição gradual da concentração de Al do topo do perfil até a crosta manganésífera, onde ocorrem oscilações na concentração. Abaixo dessa crosta, o padrão é de uma distribuição uniforme e sempre com baixas concentrações. Entretanto, comparativamente ao carbonatito, o enriquecimento em Al caracteriza-se apenas nas 3 crostas superiores, o que parece eliminar a possibilidade de que os processos envolvidos na formação da crosta manganésífera tenham tido qualquer influência na distribuição do Al.

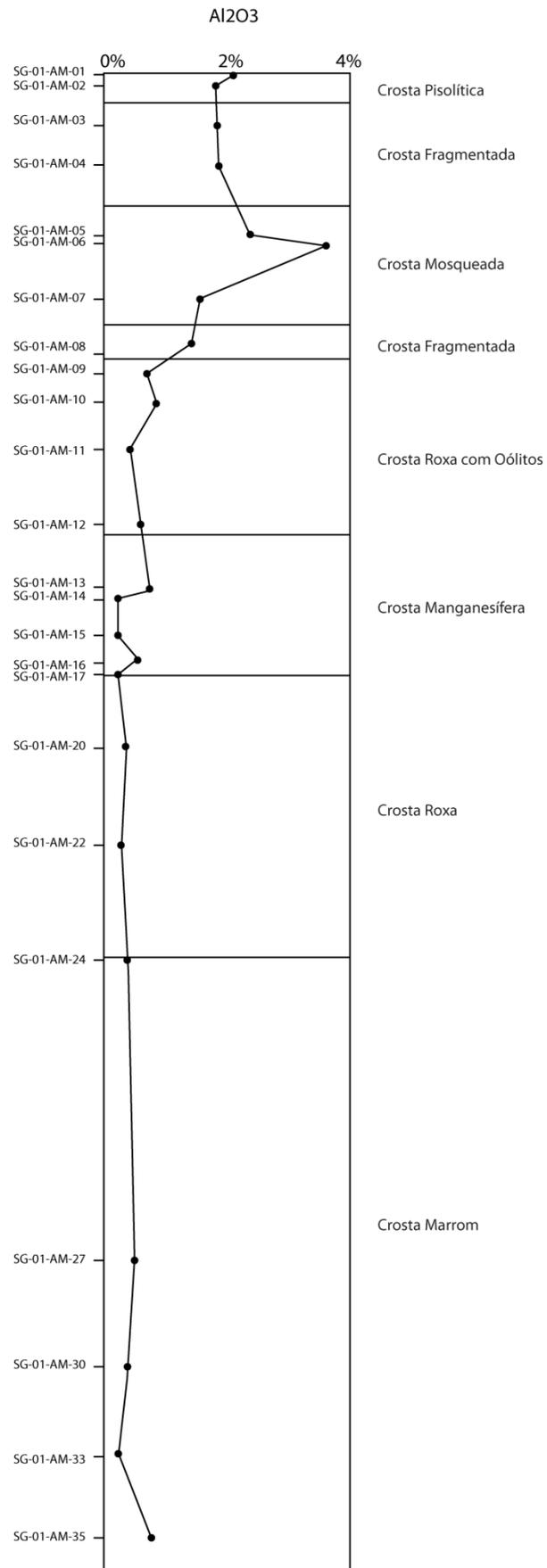


Figura III.48 Distribuição vertical do teor de Al.

A figura III.49 mostra as distribuições verticais das concentrações de Ti, Nb e W. Destaca-se a existência de um paralelismo perfeito entre estes 3 elementos desde o topo do perfil laterítico até a crosta manganésifera. Esta última é caracterizada pelas baixas concentrações nos 3 elementos, mas, mesmo assim, o paralelismo dos 3 elementos é rigorosamente mantido nesta crosta. Comparativamente ao carbonatito, a parte do perfil acima da crosta manganésifera é caracterizada por enriquecimentos em Nb mais frequentemente da ordem de 10 a 15 vezes, excepcionalmente atingindo 100 vezes. Este enriquecimento é bem maior do que o do Fe, que é o elemento mais abundante na rocha original. A crosta manganésifera é a única crosta de todo o perfil que tem amostras (2 de um total de 5) com perda de Nb e Ti em relação ao carbonatito.

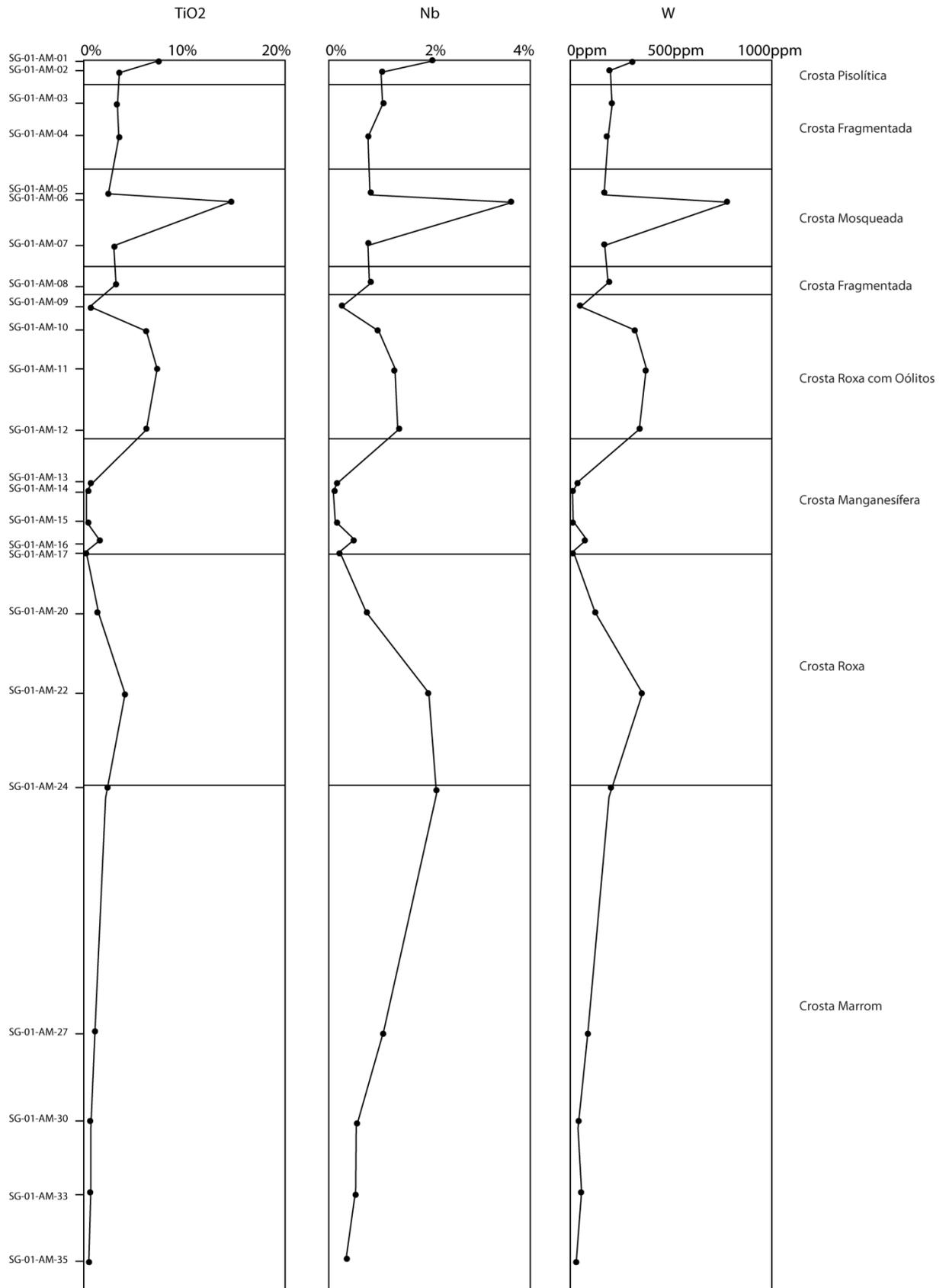


Figura III.49 Distribuição vertical dos teores de TiO<sub>2</sub>, Nb e W.

Abaixo da crosta manganésifera, o paralelismo não é mantido. A crosta roxa apresenta concentrações altas de Nb, mas as de Ti situam-se bem abaixo do esperado. O mesmo se observa nas amostras da crosta marrom, especialmente na amostra superior, na qual se observa claramente um comportamento inverso entre Nb e Ti. Nas demais amostras desta crosta, as concentrações de Nb são médias a baixas, mas as de Ti são sempre muito baixas. Este comportamento pode ser atribuído ao Nb estar contido num diferente, pobre em Ti.

A amostra SG-01-AM-06 mostra-se mais uma vez anômala, no sentido de apresentar concentrações muito altas em Ti, Nb e W, mas mantem-se perfeitamente dentro padrão de paralelismo das amostras do perfil laterítico situadas acima da crosta manganésifera. Não se trata, portanto, de erro analítico. Esta amostra é de fato muito mais rica do que as demais nestes 3 elementos. A partir das observações petrográficas, pode-se inferir que se trata de uma amostra da crosta mosqueada mais rica nas partes argilosas que, por sua vez, são ricas em cristais de Nb-rutilo (Fig. II.16). As altas concentrações de Al reforçam esta interpretação.

O paralelismo entre Nb e Ti já havia sido observado por Correa (1996) e atribuído aos dois elementos estarem essencialmente contidos no mesmo mineral (Nb-rutilo). Por outro lado, registra-se que tal paralelismo também poderia ser ligado a dois minerais diferentes, um portador de Nb e outro de Ti, desde que estes ocorram sempre com a mesma abundância relativa.

A figura III.50 mostra a variação vertical da razão Ti/Nb. Observa-se claramente a existência de 3 grupos. O primeiro é constituído pelas 4 crostas superiores, onde a razão Ti/Nb situa-se no entorno de 3,5. Correa (1996) apresenta uma tabela com a composição química dos minerais de titânio por microsonda eletrônica, sem, no entanto, distinguir onde se trata de rutilo ou brookita. No conjunto, a razão Ti/Nb varia de 3,24 a 3,93, valores estes muito próximos, portanto, da razão típica do grupo constituído pelas 4 crostas superiores. A crosta roxa com oólitos parece constituir um grupo isolado, por possuir as duas amostras com as maiores razões Ti/Nb encontradas no perfil laterítico. Nossos dados sugerem que estes valores estejam ligados à brookita com anéis de liesegang. Entretanto, não dispomos ainda de dados de microsonda eletrônica para confirmar esta hipótese. O terceiro grupo é caracterizado por uma diminuição geral na razão Ti/Nb. Esta diminuição inicia-se de modo irregular na crosta manganésifera, continua na crosta roxa e, na crosta homogênea marrom, atinge um patamar inferior com uma razão Ti/Nb quase constante no entorno de 1. A modificação no padrão vertical é, portanto, contundente e a única explicação que pode ser

aventada no nível atual do conhecimento seria que, com o aumento da profundidade, ocorresse um aumento na abundância de pirocloro.

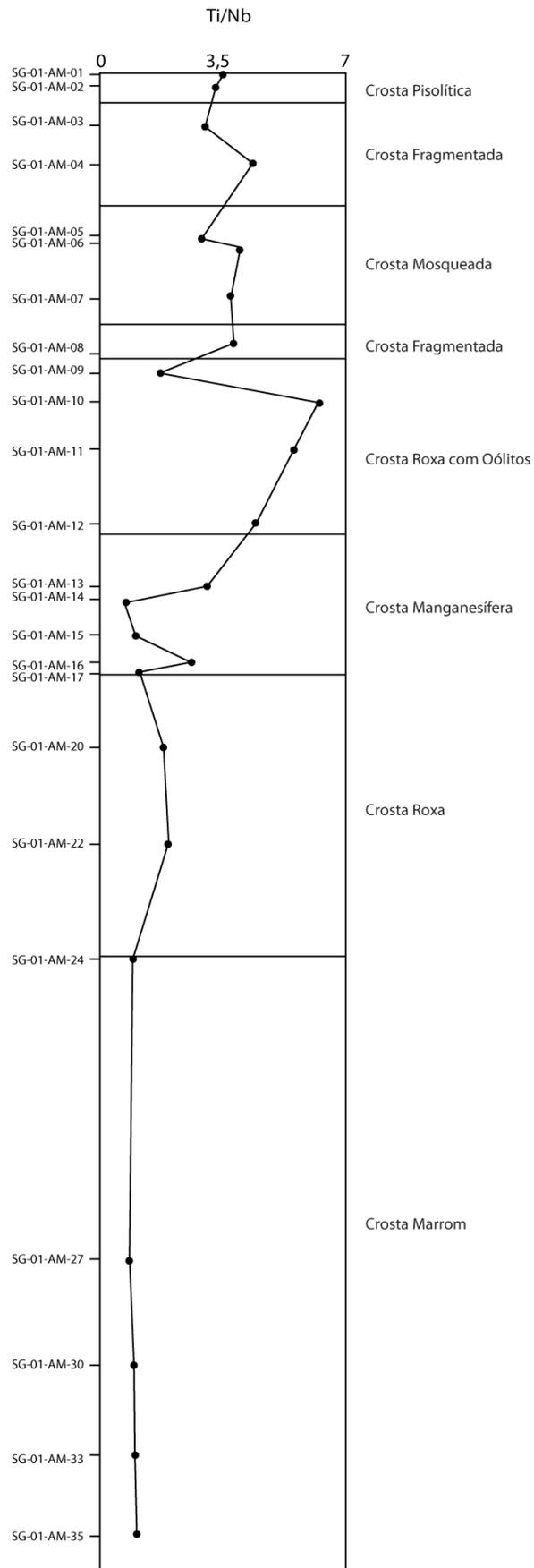


Figura III.50 Distribuição vertical da razão Ti/Nb

A figura III.51 apresenta as distribuições verticais das concentrações de fosfato, ETR e Th. A distribuição mostra claramente que os maiores valores de fosfato ocorrem nas 4 primeiras crostas da parte superior do perfil laterítico. Nestas, os valores situam-se na mesma faixa dos valores encontrados no carbonatito. Ao passar para a crosta roxa com oólitos, as concentrações de fosfato decrescem bastante, passando para valores que são, em geral, de 2 a 10 vezes inferiores aos do carbonatito. Os valores permanecem baixo até a base do perfil. Como o carbonatito apresenta concentrações de fosfato muito baixas (de 0,8% a 2%) qualquer mobilização deste composto gera modificações consideráveis no seu padrão de distribuição. Por outro lado, destaca-se a forte similaridade entre os comportamentos do fosfato e do alumínio. A neoformação de aluminofosfatos na parte superior do perfil uma explicação plausível para a configuração encontrada, inclusive pelo fato de tais minerais poderem conter ETR. Embora estes minerais não tenham sido identificados nos difratogramas, nem nas lâmina petrográficas, esta possibilidade não será aqui descartada e deverá ser investigada através de estudos subsequentes mais detalhados.

Os ETRT apresentam um comportamento bastante semelhante ao do fosfato nas 5 crostas superiores. Entretanto, na crosta manganésifera, contrariamente ao fosfato, suas concentrações aumentam e, de um modo geral, eles mostram uma tendência de apresentarem maiores concentrações com o aumento da profundidade, sendo que a maior concentração (3%) ocorre na crosta homogênea marrom.

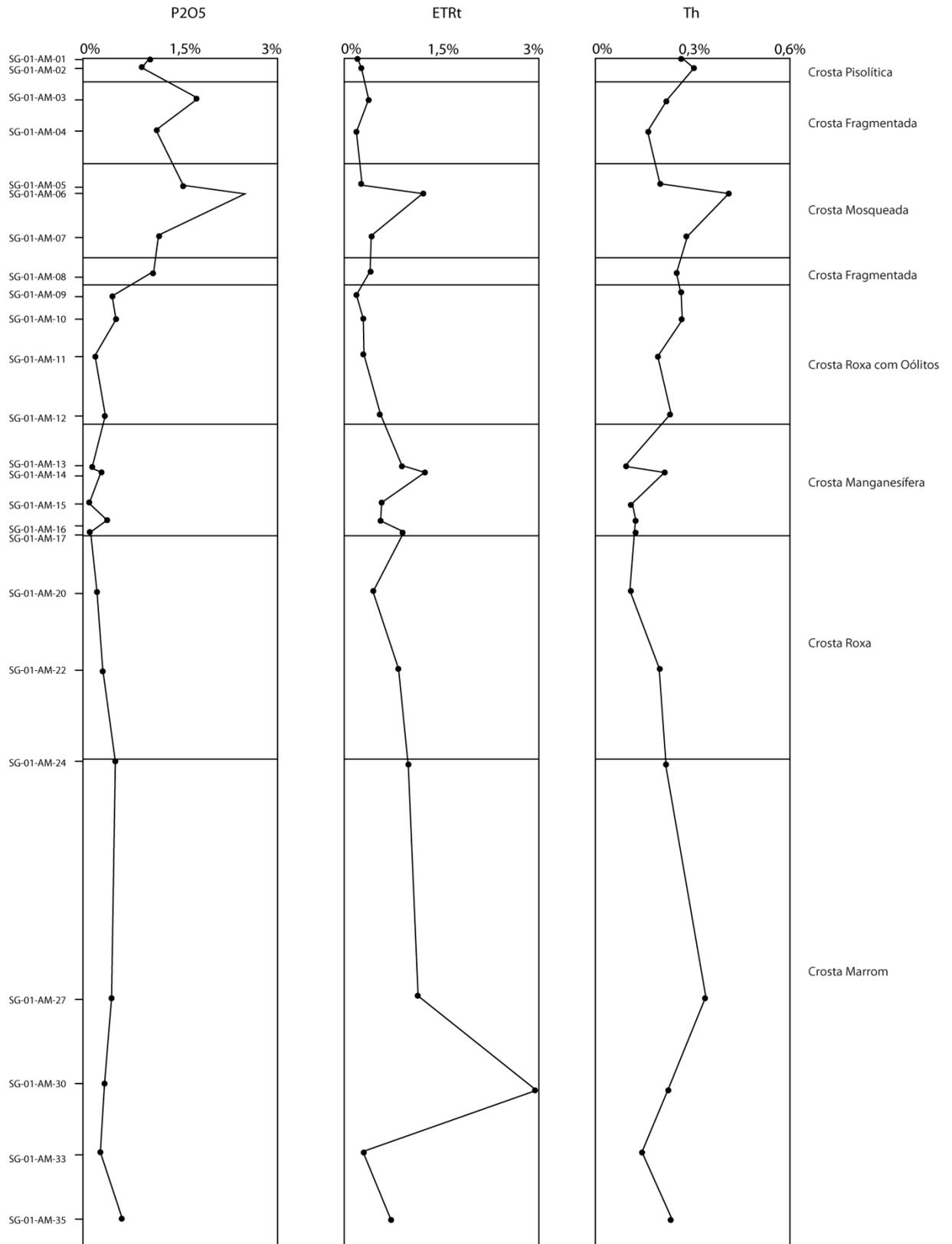


Figura III.51 Distribuição vertical dos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, ETR total e Th.

Na figura III.52, os ETR foram separados em ETRP (incluído o Y), ETRL (sem Ce) e Ce, pois este último elemento é marcadamente mais abundante do que os demais ETRL. Os ETRL ocorrem com concentrações baixas na maior parte do perfil, com as exceções de: uma amostra da crosta mosqueada, a amostra inferior da crosta roxa e 3 amostras da crosta marrom. Apenas estas 5 amostras apresentam enriquecimento de ETRL em relação ao carbonatito e, em todos os casos, trata-se apenas do La; os demais ETRL (exceto pelo Ce) são todos empobrecidos nestas e em todas as amostras do perfil laterítico.

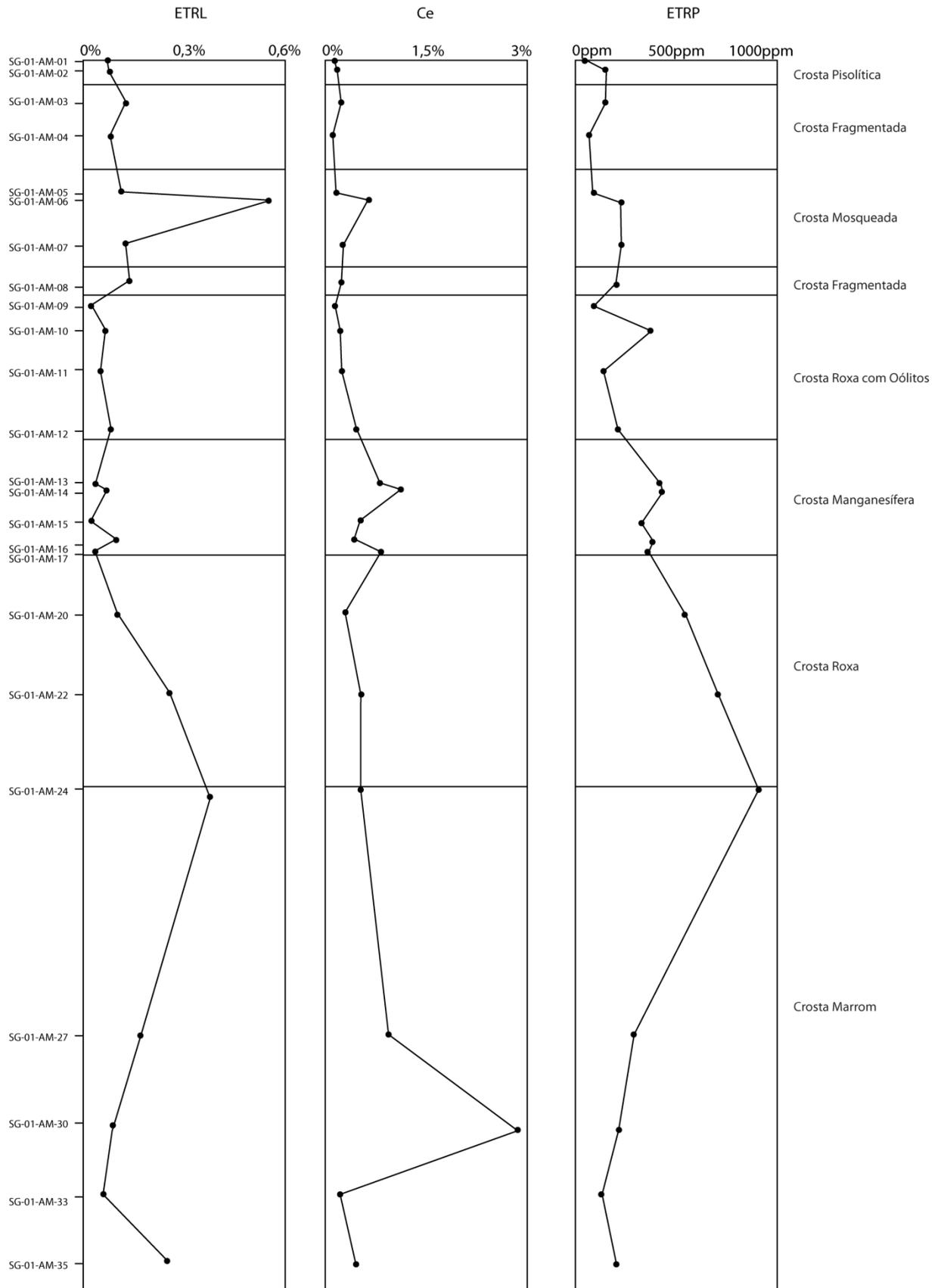


Figura III.52 Distribuição vertical dos teores de ETRL (menos o Ce), Ce, e ETRP+Y.

O Ce ocorre nas 5 crostas da parte superior do perfil com concentrações baixas. Em somente duas das amostras destas crostas, as concentrações encontradas representam enriquecimento em relação ao carbonatito: na amostra SG-01-AM-06 da crosta fragmentada, onde o valor é bem menor do que o esperado, e na amostra inferior da crosta roxa com oólitos. Este elemento ocorre enriquecido em relação ao carbonatito em todas as 5 amostras da crosta manganésifera, o que sugere a intervenções de processos de scavenger pelo manganês, semelhantemente ao ocorrido com o Ba e o Co. O enriquecimento em relação ao carbonatito ainda ocorre, mas é bem menor, nas amostras da crosta roxa e na amostra do topo da crosta homogênea marrom, voltando a crescer até atingir a concentração máxima de 2,85% na amostra SG-01-AM-33 da crosta marrom. Nesta última, a concentração de fosfato é bastante baixa, levando a sugerir que o principal mineral de Ce não seria a florencita.

Os ETRP apresentam uma tendência muito evidente de ocorrem com maiores concentrações com o aumento da profundidade, desde o topo do perfil até a amostra superior da crosta homogênea marrom. Comparativamente ao carbonatito, todas as amostras do perfil são empobrecidas nestes elementos, de modo que a distribuição é interpretada como uma menor mobilização destes elementos com o aumento da profundidade. Neste sentido, as concentrações relativamente baixas das duas amostras inferiores da crosta homogênea devem corresponder a um protólito com concentrações mais baixas.

#### IV. DISCUSSÃO

Um primeiro ponto a ser discutido para o aperfeiçoamento do modelo genético para o depósito de Seis Lagos é a questão do protólito, o qual o presente estudo comprovou tratar-se de carbonatito. Conforme afirmado no início do Capítulo III, as poucas amostras que puderam ser coletadas na base do Furo 2 podem não ser representativas de todo o complexo carbonatítico. Entretanto, é apenas este o material disponível e cabe avaliar se ele possui características mineralógicas compatíveis com as observadas na laterita, notadamente no que tange aos minerais de ETR e Nb.

No caso do Nb, o mineral observado no carbonatito é o pirocloro, mas, na laterita, o principal mineral é o Nb-rutilo. Entretanto, este fato não é incoerente, uma vez que a variação vertical na razão Ti/Nb da laterita deixa supor que existe uma importante mudança mineralógica em profundidade, com uma possível diminuição na abundância de Nb-rutilo possivelmente compensada por aumento na proporção de pirocloro. No carbonatito, o mineral de ETR encontrado é a monazita, um mineral que contém predominantemente ETRL, mas que também pode conter ETRP, e que pode ter seu conteúdo de ETR facilmente lixiviado (Formoso, Melfi e Kronberg 1989) disponibilizando estes elementos para as soluções já antes do processo de alteração atingir o estágio de lateritização. Na laterita, o principal mineral de ETR observado é a florencita, um fosfato de ETR, que contém especialmente Ce e outros ETRL e que ocorre principalmente como mineral secundário. Em comparação com outros carbonatito fonte de ETR do mundo, note-se que o carbonatito de Seis Lagos apresenta altos valores de ETRP (Fig. IV.1) As características do carbonatito são, portanto, compatíveis com as da laterita.

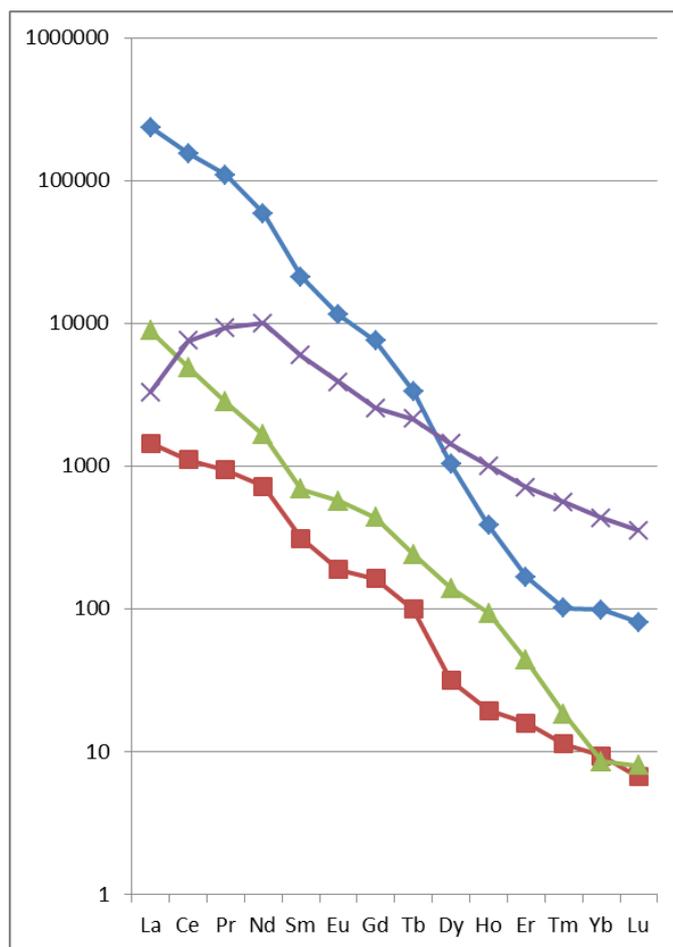


Figura IV.1 Diagrama comparando teores de ETR em carbonatitos do mundo. Seis Lagos (roxo); Bayan Obo (azul); Araxa (verde) e Iron Hill (vermelho)

Conforme revisão de Lottermoser (1990), os carbonatitos têm comportamento similar aos calcários com relação ao intemperismo e existem inúmeros carbonatitos com lateritas sobrejacentes, formando perfis de alteração muito profundos. Lateritas de carbonatitos se desenvolvem em sistemas cársticos pequenos e localmente confinados e suas espessuras variam desde zero, em cristas com material carbonatítico fresco, até mais de 200 m em calhas e depressões. Carbonatitos profundamente alterados comumente exibem uma zonação mineralógica vertical, na qual as águas subterrâneas com condições alcalinas favorecem a acumulação e preservação de um resíduo rico em apatita ígnea primária. Após a descalcificação do perfil, soluções ácidas criam camadas de aluminofosfatos e fosfatos secundários. Os produtos inconsolidados do intemperismo são caracterizados por minerais primários resistatos, substâncias amorfas ou pobremente cristalinas e uma variedade de minerais secundários pouco comuns que são principalmente óxidos, aluminofosfatos e

fosfatos. Carbonatos secundários, sulfatos, argilas, calcedônia e quartzo também podem estar presentes.

O exemplo clássico de depósito de ETR associado a laterita de carbonatito é o de Mount Weld (Austrália). Este depósito foi objeto de algumas dezenas de estudos (Mariano 1984, Lottermoser & England 1988, Willet, Duncane Rankin 1989 entre outros) que permitiram a proposição de um modelo genético desenvolvido por Lottermoser (1990). As principais características mineralógicas e químicas do depósito estão sintetizadas no quadro IV.1.

Quadro IV.1 Conteúdo de ETR na laterita de Mount Weld (Retirado de Lottermoser 1990)

REE contents (ppm) of laterite intersections as determined by instrumental neutron activation analysis

Sample No.	Depth (m)	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	(La/Lu) <sub>cn</sub>	Mineralogy
<i>Drillhole 18 (total laterite intersection: 33–123 m):</i>											
5264	39–42	4,714	10,548	7,127	1,519	518	137	29.1	2.48	197.4	goeth-plumb-qtz-mon-calc-kaol
5267	48–51	15,516	38,266	18,004	2,616	743	156	54.4	4.31	373.9	qtz-plumb-mon-kaol
5270	57–60	81,325	151,870	51,065	7,106	1,707	334	212	n.a.	374.7	mon-plumb-goeth-qtz-mag-ap-cer
5280	87–90	24,241	56,709	26,597	3,686	899	173	45.3	6.37	395.3	mon-ap-plumb-goeth-qtz-kaol-mag
5286	105–108	11.152	25,629	12,481	1,708	391	82.9	25.4	3.22	359.7	goeth-ap-mon-plumb-mag-qtz-dol-calc-ilm-hem-zir
<i>Drillhole 45 (total laterite intersection: 20.5–58 m):</i>											
6275	24–27	3,121	7,608	3,439	834	233	62.3	22.6	2.16	150.1	goeth-plumb-dol-hem-magh-mont-calc-mag
6279	36–39	3,973	9,891	4,288	800	233	95.8	50.3	3.60	114.6	plumb-goeth-hem-magh-mag
6281	42–45	2,911	6,943	2,745	571	163	55.7	256	34.5	8.7	plumb-goeth-hem-dol-chur-mag-crypt-holl
6285	54–57	2,944	6,010	3,343	494	136	37.6	23.3	2.36	129.6	ap-goeth-dol-phlog-ilm-mag
<i>Drillhole 152 (total laterite intersection: 43.5–85.5 m):</i>											
29546	45–48	2,685	n.a.	2,755	527	n.a.	40.6	22.7	2.84	98.2	goeth-plumb-hem-magh-qtz
29549	54–57	3,177	7,578	n.a.	680	187	54.0	43.5	4.61	71.6	goeth-hem-plumb
29551	60–63	3,891	9,786	5,836	905	257	77.5	69.5	8.24	49.1	goeth-plumb-hem-py
29556	75–78	1,219	2,789	1,413	286	85	25.7	21.0	2.76	45.8	ap-goeth-dol-hem-calc-qtz
29559	84–85.5	1,425	3,459	1,507	328	104	29.6	22.0	2.53	58.5	ap-goeth-calc-dol-phlog-mag-hem-plumb-ilm-py
<i>Drillhole 196 (total laterite intersection: 62–104, 7 m):</i>											
27313	63–66	3,312	6,584	3,399	510	134	36.8	27.5	2.44	140.9	goeth-plumb-calc-qtz-kaol
27315	69–72	10,428	21,843	8,320	1,712	469	131	84.6	7.91	136.9	plumb-goeth-calc-qtz-hem-lep-rut-py
27319	81–84	2,914	6,423	3,560	712	200	65.2	34.1	4.03	75.1	ap-goeth-plumb-phlog-calc
27323	93–96	2,028	5,025	3,046	499	136	37.2	23.3	2.26	93.2	ap-goeth-hem-calc-qtz-phlog-py
27325	99–102	1,468	2,886	1,484	241	65	22.4	11.2	1.36	112.1	qtz-goeth-ap
<i>Drillhole 207 (total laterite intersection: 18–70.5 m):</i>											
27433	18–21	2,135	4,158	2,159	318	79	24.3	11.2	1.45	152.9	qtz-goeth-plumb-kaol-hem-calc-magh-lep-mont
27437	30–33	4,516	10,369	6,433	1,217	364	125	33.7	3.72	126.1	plumb-goeth-hem-kaol-mag-ap
27442	45–48	2,685	6,326	3,998	683	189	67.6	61.9	6.66	41.9	plumb-goeth-hem-lep-mag-py
27446	57–60	1,903	4,150	2,369	403	105	32.1	21.5	2.07	95.5	ap-goeth-mag-ilm-calc-plumb-phlog-crypt-holl-mag
27449	68–69	989	2,368	1,295	239	64	18.8	16.7	1.75	58.7	ap-qtz-goeth-phlog-calc-dol-mag-py
Sample No.	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Ho	Yb	Lu	(La/Lu) <sub>cn</sub>
<i>Fresh carbonatite:</i>											
MW1	256	577	252	47	13.5	29	4.1	2.9	4.7	0.56	47.5
MW2	328	665	322	66	18.6	40	6.7	5.4	6.4	0.67	50.9

O depósito ocorre associado a um espesso perfil intempérico formado a partir de uma intrusão de carbonatito do Proterozoico. Conforme Lottermoser (1990), o perfil laterítico de Mount Weld possui altos conteúdos de ETR na forma abundantes fosfatos e alumino-fosfatos secundários. Os ETR sofreram uma alta mobilidade, tanto lateral, quanto vertical, durante o intemperismo, o qual foi favorecido pela alta relação fluido/rocha, pelo longo tempo de residência do fluido, por diversos agentes complexadores de ETR presentes na água subterrânea e pela decomposição de minerais ígneos primários de carbonatito. A grande variação de condições de pH e alcalinidade, e nas concentrações de ânions carbonáticos na água subterrânea influenciaram de forma variada as diferentes estabilidades dos complexos de ETRL e ETRP, o que causou fracionamento, separação e deposição de ETRL e ETRP. Controles cristalquímicos e a absorção de ETR por substâncias não cristalinas levaram à incorporação de ETRL em minerais do grupo da plumbogumita, rabdofânio e monazita secundária na porção superior do perfil intempérico, enquanto que os ETRP e Y foram preferencialmente incorporados pela churchita em níveis mais profundos. O fluxo lateral de água subterrânea em direção a um baixo topográfico central da laterita e o associado decréscimo no pH das soluções favoreceram a mobilização de grandes quantidades de ETRs e a formação de um enriquecimento em ETR na porção central.

Algumas características de Mount Weld (Quadro IV.1) são muito contrastantes com as de Seis Lagos. Aquele depósito apresenta uma zonação vertical relativamente simples (zona supergênica, zona residual e rocha sã) muito menos distinta do que a de Seis Lagos. Na realidade, não sabemos se existe em Seis Lagos uma zona residual, pois a sondagem não alcançou a base da zona supergênica. A zona supergênica de Mount Weld tem uma espessura máxima de apenas 90 m, dentro da qual não foi caracterizada uma zonação vertical na em nível das crostas lateríticas, onde as paragêneses (tanto primária como secundária) são bem mais complexas. A zona supergênica de Mount Weld é bem mais rica em Si, Al, Ca, Ti, P e Mg, e mais pobre em Fe e Mn do que qualquer uma das crostas formadas em Seis Lagos, incluindo a crosta homogênea marrom que, em princípio, é a menos evoluída.

As diferenças entre Mount Weld e Seis Lagos acima registradas podem ser em parte atribuídas a protolitos com composições diferentes. O carbonatito de Mount Weld certamente era mais rico em Ca, enquanto que o de Seis Lagos é muito rico em Fe. Mas, sem dúvida, uma parte destas diferenças certamente são atribuíveis à alteração em Seis Lagos ter sido mais

intensa. A espessura total da laterita de Seis Lagos não é conhecida, pois nenhuma das sondagens a atravessou por completo. O Furo 1 foi interrompido, devido à baixa recuperação, ainda na laterita, a uma profundidade de 255 m.

O processo de laterização implica a remoção de elementos e, conseqüentemente, uma importante redução de volume. No caso de Mount Weld, Lottermoser (1990) estima uma redução semelhante à ocorrida no carbonatito de Mrima Hill (Coetzee e Edwards 1959), onde 5-10 volumes de carbonatito foram intemperizados para produzir 1 volume de laterita. Em Seis Lagos, pode-se inferir uma redução da ordem de 10 vezes, levando-se em conta que os enriquecimentos médios de Nb e de Ti em relação ao carbonatito são desta ordem de grandeza e que estes elementos encontram-se em minerais resistentes, ou seja, sofreram um mínimo ou nada de remobilização em solução.

Assim como o carbonatito de Mount Weld, o de Seis Lagos é circundado por rochas resistentes e isto pode ter causado que, em certos estágios da evolução da alteração, as soluções tenham permanecido mais tempo dentro do domínio do carbonatito. Entretanto, a própria natureza do processo de laterização exige que, na maior parte do tempo, tenha ocorrido um fluxo de água para fora do carbonatito. Em Seis Lagos, o fluxo pode ter sido bem mais acentuado do que em Mount Weld, favorecendo uma maior alteração e conseqüente redução de volume. Neste carbonatito, o padrão distribuição de diversos elementos permitiu identificar um fluxo convergente para uma depressão na zona central do corpo, com um subseqüente runoff na extremidade sul. Em Seis Lagos, existem seis lagos principais e mais alguns lagos de menor espelho d'água. Estes lagos correspondem a depressões de origem cárstica, sendo que na única que foi estudada (bacia Esperança) ocorrem cerca de 150 m de sedimentos oriundos do próprio carbonatito (reinterpretação da equipe do projeto), da laterita e de níveis argilosos do perfil laterítico (Corrêa 1988), o que mostra o caráter antigo destas depressões. Segundo Rossoni (2012), os lagos foram em parte controlados por falhas que cortam o maciço de Seis Lagos. Possivelmente algumas destas bacias podem ser interligadas pelas falhas e, portanto, o carbonatito de Seis Lagos pode ter tido um sistema de drenagem bem mais efetivo do que aqueles de Mount Weld e Mrima Hill, o que, por sua vez, pode ter induzido uma redução de volume maior do que a ocorrida nos dois outros carbonatitos.

Nossa amostra mais profunda do Furo 1 é de 97,5 m (os testemunhos abaixo desta profundidade não se encontravam mais nas caixas) e nela a concentração de Fe é a mesma de quase todo o perfil (com exceção da crosta manganésifera), o que é coerente com a crosta ter ainda uma grande continuidade em profundidade. Alguns padrões de variação de elementos

com a profundidade puderam ser estabelecidos no intervalo passível de estudo. No caso do Nb e Ti as variações observadas não parecem ser ligadas a mobilização destes elementos e sim a modificações na mineralogia do protolito; as maiores concentrações destes elementos são ligadas às concentrações residuais de minerais relictos, formadas pelo processo de lateritização, incluindo os colapsos associados. O caso da formação dos oólitos de brokita será tratado à parte, mais adiante.

A crosta manganésifera parece ter desempenhado um papel importante na distribuição vertical dos elementos mobilizados durante a alteração. Óxidos de Mn podem agir como “scavengers”, controlando o comportamento geoquímico de diversos elementos, especialmente os metais de transição do período 4 e, até mesmo do ouro, da prata e dos ETR (Zang et al. 1997). Este processo pode explicar o fato de os ETRT mostrarem uma correlação positiva clara com o fosfato ao longo de todo o perfil, o que caracteriza a sua deposição como fosfato, menos na crosta manganésifera, na qual as concentrações de ETRT são relativamente altas, mas isto não ocorre com as de fosfato. No detalhe, percebe-se que os ETR mais afetados por este processo teriam sido o Ce e os ETRP. As comparações efetuadas entre os conteúdos de ETR das diferentes crostas e o do carbonatito indicam que mobilizações significativas destes elementos só ocorreram nas 5 crostas superiores. Assim, parte dos ETR elementos mobilizados ficou retida na crosta manganésifera. As maiores concentrações de ETR observadas mais abaixo são, provavelmente, fruto de uma menor lixiviação destes elementos nas crostas menos evoluídas. Nestas, o Ce, provavelmente no estado oxidado, foi fortemente estabilizado, causando enriquecimentos de até 10 vezes em relação ao carbonatito. Além do Ce, somente o La forma enriquecimentos, mas são locais e de pouca intensidade (da ordem de 2 vezes). Não se tem presentemente nenhum argumento para avaliar a existência de mobilizações laterais de ETR, como ocorreu em Mount Weld, pois, para este trabalho, só se dispôs de 1 furo que corta a laterita mineralizada.

Em Mount Weld ocorre um horizonte profundo onde alguns minerais secundários ocorrem com concentrações desde menores até maiores dos minerais secundários hollandita, criptomelana, litioforita, churchita e minerais não identificados de Mn-Pb. A churchita é um mineral que concentra preferencialmente os ETRP. Assim, embora os conteúdos de Mn não sejam tão altos como os da crosta manganésifera de Seis Lagos e os de Al sejam muito altos, nota-se algumas semelhanças entre este horizonte e a crosta manganésifera de Seis Lagos.

O enriquecimento em Al observado apenas nas quatro crostas superiores aparentemente acompanhada pelo enriquecimento P poderia ser atribuído à formação de

alumino-fosfatos por um processo de bauxitização posterior a lateritização. Nesse sentido é possível que parte da florencita seja ligada a esse processo.

A outra crosta considerada anômala em Sei Lagos é a crosta vinho com oólitos. Muitos fenômenos geológicos, como a formação de oólitos e outras estruturas circulares ou mesmo planares e com origem em diferentes processos geológicos têm sido atribuídas como sendo anéis de Liesegang. Este fenômeno foi descrito pela primeira vez pelo químico e fotógrafo Liesegang que, em 1896, descobriu que cristais de nitrato de prata, quando colocados em solução com um gel contendo dicromato de potássio, produzem anéis concêntricos de precipitado de dicromato de prata. Estas estruturas circulares foram denominadas anéis de Liesegang e suas gêneses têm sido investigadas durante muitos anos em experimentos de laboratório e em processos naturais biológicos e geoquímicos.

Os anéis de Liesegang são comumente definidos como sendo bandas formadas por finas precipitações quando dois componentes em solução se difundem um no outro para formar um precipitado insolúvel. Com isso são formados padrões periódicos auto-organizados (*self-organized*), cujas organizações são decorrentes dos processos físico-químicos envolvidos.

Segundo Smith (1984), muitos experimentos podem produzir anéis em soluções, sendo alguns fatores muito comuns a todos os casos como a presença de géis ou de água, sendo que as soluções separadas devem ser supersaturadas, porém no produto final da reação e a solução é completamente estável não ocorrendo precipitação.

Hedges (1932) e Stern (1954), in Krug *et al.* (1996), afirmam que a interação específica de reações químicas de difusão e precipitação e o crescimento competitivo de partículas são reconhecidos como sendo responsáveis pelo padrão de formação dos anéis ao longo do tempo.

Assim, vários fatores estão envolvidos na formação destes anéis como as condições físicas químicas das soluções incluindo suas concentrações, temperaturas para promover a precipitação de colóides ou a existência de núcleos que propiciem o crescimento mineral.

Além disso, segundo Krug *et al.* (1996), os padrões de auto-organização são muito regulares, porém podem possuir muitos tipos de irregularidades, com aparentes deslocamentos ou ramos, vazios nas bandas ou transições entre bandas e padrões esqueléticos. Segundo estes autores, estes deslocamentos são frequentemente explicados devido a fatores

externos como impactos, escorregamentos ou a fraturas tectônicas, mas outra forma de explicar é devido a fatores internos devido a instabilidades intrínsecas.

Portanto, o estudo dos anéis de Liesegang em sistemas naturais envolve aspectos como: (i) quais fases ou metafases estão presentes antes do processo de cristalização, (ii) quais são as condições físico-químicas do meio em que se encontram estas fases, (iii) quais os mecanismos existentes na formação dos anéis. Além disso, devem-se considerar quais são os processos intrínsecos e extrínsecos responsáveis pelas descontinuidades verificadas nos anéis de Liesegang.

Os oólitos têm diâmetros variando de 100  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$ , sendo que alguns são perfeitos (Fig. III.23.A), aparentemente sem nenhuma interferência no crescimento. Também ocorrem pares de anéis com crescimento inicial a partir de 2 núcleos distintos e que, não se tocarem, passaram a crescer conjuntamente (Fig. III.24.B). Mas, em sua grande maioria, os oólitos estão fragmentados (Fig. III.24.C) o que deve ser relacionado a colapso da crosta. Alguns fragmentos apresentam sobrecrecimento de outras bandas (Fig. III.24.C).

As cores das bandas refletem variações composicionais. Com o uso do microscópio eletrônico de varredura foi constatado que os oólitos possuem uma composição média de 75% de titânio, 15% de nióbio e 10% de ferro. No microscópio petrográfico, sob luz natural, (foto) as bandas mais escuras representam bandas mais enriquecidas em Nb em relação às mais claras. Esta técnica também possibilitou verificar que com o aumento do *zoom* as bandas são compostas por diversas outras bandas menores (Fig. III.25).

Observa-se que os experimentos de laboratório descritos até o momento para explicar a formação dos anéis de Liesegang utilizaram somente duas substâncias e, os fenômenos geológicos, como a formação de ágatas, envolvem a predominância de só um composto (no caso o  $\text{SiO}_2$ ). No caso de Seis Lagos os anéis formados são constituídos por três fases (Ti, Nb, Fe). Além disso, estes oólitos são formados por Nb-brookita, que segundo a literatura só pode cristalizar em temperaturas relativamente altas ( $>500^\circ\text{C}$ , segundo Dacheville *et al.*, 1968 ou, em processos sintéticos sempre acima de  $100^\circ\text{C}$ ), o que torna o problema mais complexo, pois podem ter sido gerados em condições geológicas diferentes daquelas que originaram o perfil laterítico, ou seja, podem ser herdados de algum evento geológico anterior.

Os dados da literatura são unânimes no sentido de que anéis de Liesegang só são formados em meios supersaturados, por isso, os oólitos de Seis Lagos devem ter sido gerados em meio fluido. Como a brookita só tem gênese em temperaturas relativamente altas, os

oólitos podem ser herdados de processos geológicos anteriores (hidrotermalismo?) ou terem sido formados em condições geológicas diferentes dos descritos na literatura e estarem relacionados a menores temperaturas de formação em condições geológicas especiais. Em qualquer destes casos deve-se explicar como elementos com baixa solubilidade (Ti, Nb e Fe) precipitaram para formar estas estruturas. Obviamente que a nucleação a partir de diferentes germes e a ação de processos posteriores responsáveis pela quebra dos oólitos também deverão ser mais bem estudados. Ao nível atual do conhecimento, considera-se que a interpretação mais provável é a de que os anéis foram formados por hidrotermalismo. Neste sentido as maiores concentrações de Nb e Ti na crosta vinho com oólitos seriam atribuíveis a variação no protolito.

## V. CONCLUSÃO

O estudo efetuado permitiu chegar às seguintes conclusões.

As características químicas e mineralógicas do carbonatito encontrado no Furo 2 caracterizam-no como um siderita carbonatito. O carbonatito apresenta concentrações anômalas de Nb, ETRL (especialmente pelo Ce), Ba, Sr e Pb. O Nb ocorre na forma mineralógica de chumbopirocloro. Os ETR ocorrem concentrados principalmente na monazita e subordinadamente na barita e na gorceixita.

A crosta laterítica existente sobre o morro de Seis Lagos tem características químicas e mineralógicas compatíveis com a alteração de carbonatito com a composição química do dique encontrado no Furo 2.

A crosta laterítica foi subdividida em 7 tipos texturais/composicionais que são, do topo para a base:

- Crosta pisolítica: atinge a profundidade de 2,20 m; é formada principalmente por bandas de ferro e bandas de argila ocre; mineralogicamente é formada por hematita e goethita; possui altos teores de Fe e Nb, e baixos teores de ETR.

- Crosta fragmentada: ocorre nos intervalos de 2,20 m a aproximadamente 9,00 m e de 17,00 m a 19,75 m de profundidade; tem cor marrom avermelhada e é composta por nódulos ferrosos dentro de uma matriz ocre argilosa; mineralogicamente é formada por hematita, goethita, nb-Rutilo e florencita; possui altos teores de Fe e P, e baixos teores de ETR e Nb.

- Crosta mosqueada: ocorre no intervalo de 9,00 m a aproximadamente 17,00 m de profundidade; caracteriza-se por apresentar bandas verticalizadas com goethita e argila esverdeada; mineralogicamente é formada por hematita, goethita, nb-Rutilo e florencita; possui valores altos de Fe, com exceção da amostra SG-01-AM-06, que apresenta teores menores de Fe, e altos teores de Al, Ti, Nb, Th, e ETR, principalmente os leves.

- Crosta roxa com oólitos: ocorre no intervalo de 19,75 m até 31,00 m; é tipicamente de cor roxa e tem espaços vazios de formas e dimensões muito irregulares; mineralogicamente é formada por hematita, goethita e nb-brookita; possui valores altos de Fe, Ti, Nb e uma alta razão Ti/Nb.

- Crosta manganésifera: ocorre no intervalo de 31m a 40m de profundidade; é constituída por faixas argilosas ocre com muitas intercalações de óxido de manganês que ocorrem formando faixas irregulares que conferem à crosta um aspecto bandado ou como brechas com elementos de goethita e matriz de óxidos de manganês; mineralogicamente é formada por hematita, goethita, hollandita e florencita; possui valores altos de Mn, Ba e de Ce, e baixos teores de Fe e Nb.

- Crosta roxa: ocorre no intervalo de 40 m a 59 m; é roxa, com textura cavernosa, bastante muito com crosta roxa anterior, porém possui faixas argilosas ocre e não possui oólitos; apresenta altos teores de Fe, Nb e ETRt.

- Crosta marrom: ocorre de 59 m até o final dos testemunhos (97 m), é marrom, com altos teores de Fe e de Ce (SG-01-AM-30).

A crosta manganésifera exerceu um forte efeito (scavenger) sobre a distribuição vertical de alguns elementos, notadamente pelo Co, Ba, Ce e ETRP que, lixiviados de crostas superiores, foram enriquecidos na crosta manganésifera.

A remobilização dos ETR durante a lateritização foi bem menor nas crostas mais inferiores. Nestas, o Ce, no estado oxidado, foi fortemente estabilizado e enriquecido em até 10 vezes. Além deste, somente o La foi apenas localmente um pouco enriquecido.

O enriquecimento do Nb na laterita em relação ao carbonatito foi da ordem de 10 vezes, eventualmente atingindo 100 vezes. As modificações nas concentrações de Nb ao longo do perfil laterítico são associadas a variações no protólito e a processos de abatimento da laterita.

A Nb-brookita ocorre na forma de oólitos com estrutura do tipo anéis de liesegang, sua origem pode ser ligada ao estágio hidrotermal.

Um processo de bauxitização posterior parece ter afetado a parte superior do perfil laterítico, enriquecendo-a em Al. Parte da florencita aí existente pode ser ligada a esta fase.

## VI. REFERÊNCIAS

- BELL K. & SIMONETTI A. Carbonatite magmatism and plume activity: implications from the Nd, Pb and Sr isotopes systematics of Oldoinyo Lengai. **Journal of Petrology** 37. 1996. P.1321-1339.
- BIONDI J. C. **Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2003, p. 78-79.
- BONOW C.W. & ISSLER R.S. Reavaliação e aspectos económicos do jazimento de terras raras e ferro-ligas do Lago Esperança, Complexo carbonatítico de Seis Lagos - Amazonas, Brasil. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 31, Camboriu, **Anais**, 1980 3:1431
- CASTOR S.B. & HEDRICK J.B. Rare Earth Elements. In: KOGEL J.E. TRIVEDI N.C. BARKER J.M and KRUKOWSKI S.T. **Industrial Minerals and Rocks: Commodities, Markets and Uses**, ed. 7. SME. 2006. 1568p.
- CORRÊA, S. L. A. **Evolução geoquímica das crostas lateríticas e dos sedimentos sobrepostos na estrutura de Seis Lagos (Amazonas)**. 1996. 212 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- CORRÊA, S.L.A.; COSTA, M.L.; OLIVEIRA, N.P. Contribuição geoquímica à zona laterítica do Complexo Carbonatítico de Seis Lagos (Amazonas). In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém, 1988. **Anais...** Belém, SBG. v. 4, p. 1959-1968.
- COSTA, M. L.; FONSECA, L. R.; ANG'LICA, R. S.; LEMOS, V. P.; LEMOS R. L. Geochemical exploration of the Maicuru alkaline-ultramaphic-carbonatite complex northern Brazil. 1991. **J. Geoch. Exploration.**, 40:193-204
- DACHILLE, F.; SIMONS, P. Y.; RUSTUM, R. 1968. Pressure-temperature studies of anatase, brookite, rutile and TiO<sub>2</sub>-II. *The American Mineralogist*. V. 53, p. 1929-1939.
- FORMOSO, M.L.L.; MELFI, A.J.; KRONBERG, B.I. Comportamento dos elementos terras raras no intemperismo tropical. In. FORMOSO, Milton L. L.; NARDI, Lauro V. S.; HARTMANN, Léo A., eds. *Geoquímica dos Elementos Terras Raras no Brasil*. 1989. Rio de Janeiro, CPRM/DNPM, SBGQ. p. 109-120.

- GITTINS J. The origin and evolution of carbonatites magmas In: Bell K. (Ed). **Carbonatites: Genesis and Evolution**. London: Unwin Hyman; 1989. p. 580-600.
- HOGARTH D. D. Pyrochlore, apatite and amphibole: distinctive minerals in carbonatite. In: Bell K. (Ed). **Carbonatites: Genesis and Evolution**. London: Unwin Hyman; 1989. p. 105-148.
- ISSLER R.S. & SILVA G.G. 1980. The Seis Lagos carbonatite complex. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 31, Camboriu, **Anais**, 3:1564-1573.
- JUSTO L.J.E.C. **Projeto Uaupés**. Relatório Final de Pesquisa, CPRM, Superintendência Regional de Manaus, 1983 v. 1, 224 p.
- JUSTO L.J.E.C. & SOUZA M.M. 1986. Jazida de nióbio do Morro dos Seis Lagos, Amazonas. In. **Principais Depósitos Mineraiis Brasileiros - Ferro e Metais da Indústria do Aço**. DNPM, Vol. 2,463-468.
- KRUG, H.-J; BRANDTSTDTER, H.; JACOB, K. H. 1996. Morphological stabilities in pattern formation by precipitation and crystallization processes. *Geol. Rundsch.* V. 85, p. 19-28.
- LE MAITRE R.W. **A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of igneous rocks**. Blackwell, Oxford, 1989, 193 pp.
- LIMA M.I.C. & PIRES J.L. Geologia da Região do Alto Rio Negro-AM. In. SBG, Simpósio de Geologia da Amazonia, 2, Belém. 1985 **Anais**.
- LOTTERMOSER, B.G. & ENGLAND, B.M. Compositional variation on pyrochlores from the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. **Min. Petrol.** 38, 1988. p.37-51.
- LOTTERMOSER B.G. Rare-earth element mineralisation within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia, In. **LITHOS**, volume 24, no. 2, 1990 p. 151-167.
- MARIANO A.N. **The mineralogy of Nb, Ta and REE in the Mount Weld laterite**. Rep. to Molycrop, Los Angeles, Calif.
- MITCHELL, R.H., Carbonatites and carbonatites and carbonatites. In. **Canadian Mineralogist**, v. 43, 2005, p. 2049–2068.

SANTOS J.O.S.; HARTMANN L.A.; FARIA M.S.; RIKER S.R.; SOUZA M.M.; ALMEIDA M.E.; MCNAUGHTON N.J. **A Compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006.** In. SBG, Simpósio de Geologia da Amazonia, 9, Belém. 2006 Anais.

SMITH, D. 1984. On Ostwald's supersaturation theory of rhythmic precipitation (Liesegang's rings). J. Chem. Phys. V. 81, p. 3102-3115.

PINHEIRO, S.S.; FERNANDES, P. E. C. A.; PEREIRA, E. P.; VASCONCELOS, E. G.; PINTO, A. C.; MONTALVÃO, R. M. G.; ISSLER, R. S.; DALLAGNOLL, R.; TEIXEIRA, W.; FERNANDES, C. A. C. **Folha NA.19 Pico da Neblina; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** 1976. Rio de Janeiro, Cap. 2, p.19-138. (Levantamento de Recursos Naturais)

PEREIRA JÚNIOR, R.F. – **Nióbio.** Sumário Mineral DNPM. 2010.

VIEGAS FILHO, J.R. & BONOW, C.W. **Projeto Seis Lagos.** CPRM. 1976. 131p. (Relatório Interno)

WILLET G.C.; DUNCAN R.K.; RANKIN R.A. Geology and economic evaluation of the Mt. Weld carbonatite, Lvaerton, Western Australia. In: **Kimberlite and Related Rocks.** Geol. Soc. Aust., Spec. Publ. 14. 1989.

WYLLIE P.J., BAKER M.B., WHITE B.S. Experimental boundaries for the origin and evolution of carbonatites. **Lithos** 26 1990, 3–19

WINTER J.D. **An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology.** Prentice Hall. 2001, 699p.

WOOLLEY A.R. **The Alkaline Rocks and Carbonatites of the World.** Part 3: Africa. The Geological Society of London, London. 2001, 372 pp.

WOOLLEY A.R. & KEMPE D.R.C. The spatial and temporal distribution of carbonatite. In. Bell K.(Ed). **Carbonatites. Genesis e Evolution.** Unwin-Hyman; 1989. p. 15-37.

WOOLLEY A.R. & KEMPE D.R.C. Carbonatites: nomenclature, average chemical compositions, and element distribution. In. Bell K.(Ed). **Carbonatites. Genesis e Evolution.** Unwin-Hyman; 1989. p. 1-14.

ZANG W.; FYFE W.S.; CHEN Y. The significance of manganese oxides in the laterite profile at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil. In. Yunhui H., Yawen C. (Ed) **Mineralogy: Proceedings of the 30th International Geological Congress; 1997 v.16, p 85-95**