

CAPÍTULO V

O DEPÓSITO DE MANGANÊS DO AZUL, CARAJÁS: ESTRATIGRAFIA, MINERALOGIA, GEOQUÍMICA E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

*MARCONDES LIMA DA COSTA
OSCAR JESUS CHOQUE FERNANDEZ
MARLIS ELENA RAMÍREZ REQUELME*

SUMÁRIO

CAPÍTULO V

O DEPÓSITO DE MANGANÊS DO AZUL, CARAJÁS: ESTRATIGRAFIA, MINERALOGIA, GEOQUÍMICA E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

| | |
|--|------------|
| RESUMO | 231 |
| ABSTRACT | 231 |
| I. INTRODUÇÃO | 232 |
| Localização e Aspectos Fisiográficos | 232 |
| Geologia Regional | 234 |
| Estudos Anteriores | 234 |
| Materiais e Métodos | 236 |
| A Equipe do Projeto | 239 |
| Financeiramente e Recursos Alocados | 239 |
| II. GEOLOGIA DAS MINAS E ÁREAS ADJACENTES | 240 |
| A Paisagem dos Depósitos e das Minas do Azul | 240 |
| Geologia e Topo-Sequências das Minas | 240 |
| Modos de Ocorrência das Formações Manganésíferas | 242 |
| As Rochas Sedimentares | 243 |
| O Perfil Laterítico | 249 |
| Caracterização dos Horizontes | 250 |
| Produtos de Intemperismo, Erosão e Coluvionamento | 255 |
| Materiais Manganésíferos | 256 |
| III. CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E QUÍMICA DA SEQUÊNCIA SEDIMENTAR ... | 256 |
| Aspectos Petrográficos | 256 |
| Composição Mineralógica | 261 |
| Química das Rochas | 272 |
| IV. QUÍMICA-MINERAL E MICROMORFOLOGIA DOS MINERAIS DO PERFIL LATERÍTICO | 282 |
| Os Minerais de Manganês | 282 |
| Distribuição dos Minerais no Perfil | 296 |
| V. GEOQUÍMICA DO PERFIL LATERÍTICO | 302 |
| Composição Química | 302 |
| Elementos-Traço | 303 |
| Padrão de Distribuição dos Elementos no Perfil Laterítico | 305 |
| VI. OS ESFEROLITOS E SUA MATRIZ ARGILOSA | 314 |
| Modo de Ocorrência | 314 |
| Distribuição Granulométrica | 314 |
| Morfologia e Mineralogia | 314 |
| Composição Química e Elementos-Traços | 316 |
| Química Mineral | 316 |
| Conclusões | 325 |

| | |
|---|------------|
| VII. GEOCROLOGIA DO PERFIL | 325 |
| VIII. CONCLUSÕES | 327 |
| AGRADECIMENTOS | 331 |
| REFERÊNCIAS | 331 |

O DEPÓSITO DE MANGANÊS DO AZUL, CARAJÁS: ESTRATIGRAFIA, MINERALOGIA, GEOQUÍMICA E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA

Marcondes Lima da Costa¹, Oscar Jesus Choque Fernandez² e Marlis Elena Ramírez Requielme³

¹ CG/Universidade Federal do Pará – UFPA. Belém - PA. – mlc@ufpa.br

² Universidade Federal do Pará – UFPA. Belém - PA. – ochof@ufpa.br

³ Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará – CEFET. Belém - PA. – marlis.elena@cefetpa.br

RESUMO

Os depósitos de manganês do Azul, na Província Mineral de Carajás, estão alojados em seqüência sedimentar proterozóica, como parte da Formação Águas Claras, anteriormente conhecida como Rio Fresco, e ao longo de toposeqüência laterítica matura iniciada ainda no limiar Cretáceo-Paleoceno, desenvolvida sobre aquela seqüência. É formada por arenitos finos e siltitos vermelhos a brancos, que englobam camadas lenticulares de siltitos cinzas a folhelhos cinzas a negros, ricos em matéria orgânica carbonosa (MOC) e/ou óxi-hidróxido de manganês (OH-Mn) ou rodocrosita. Criptomelana é o principal OH-Mn, podendo ocorrer ainda todorokita e hollandita. Os sedimentos com rodocrosita são constituídos de quartzo, clorita, illita, muscovita, microclínio e esmectita, por vezes caulinita e pirita. Os OH-Mn e a MOC formam desde folhelhos negros a rochas quase compactas e maciças. Folhelhos e siltitos cinzas normalmente são pobres em Mn, seja OH ou rodocrosita. Em termos gerais a seqüência sedimentar e suas mineralizações, bem como sua idade de formação, composição química e assinatura geoquímica discriminada pelos valores anômalos de metais base se correlacionam com os depósitos de manganês da Formação Franceville, Gabão. O perfil laterítico é profundo (inferior a 100 m), bem desenvolvido, com espesso horizonte argiloso, estabelecido sobre o domínio das lentes manganíferas encaixadas nos siltitos vermelhos a brancos. O principal mineral de Mn é criptomelana, em grande parte herdada, e também neoformada. Observam-se muitas feições de dissolução química e outros minerais de Mn se formam, como hollandita, todorokita, pirolusita e nsutita, além de caulinita, mica, quartzo e OH-Fe. Uma crosta laterítica nodular, brechóide a cavernosa ou maciça se sobrepõe ao horizonte argiloso, e é formada de OH-Fe, OH-Mn, gibbsita e caulinita. Criptomelana também se faz presente, porém ocorre com freqüência litioforita. Boa parte da área das minas, principalmente nas meias encostas, é coberta por material argiloso, marrom amarelado, com esferolitos, concentrados na base, como produto de decomposição química e física dos demais horizontes, e depositados por gravidade em paleodepressões e paleovales. Constitui-se dos mesmos minerais daqueles horizontes, porém se destaca pela maior abundância de caulinita, gibbsita, goethita e litioforita. O perfil laterítico preserva a maioria das feições sedimentares e deformacionais dos sedimentos, bem como herda parte de seus minerais, como criptomelana, muscovita, quartzo, caulinita hidrotermal e mesmo moldes de cristais de carbonatos microscópicos. A assinatura geoquímica dos sedimentos, principalmente dos siltitos e folhelhos mineralizados, indicada pela associação Ni-Co-Cu-Zn-Mo-As-Sr-Ba-ETR-Tl, ou não mineralizados que incluem a sub-associação K-Rb-Cs, está praticamente preservada em todo perfil, retratando a permanência e neoformação de criptomelana e hollandita, bem como a resistência parcial das micas, fixando-os ao longo do perfil. O perfil laterítico iniciou-se há 68 Ma, teve grande desenvolvimento a 45 Ma e 36 Ma, e foi afetado por intenso intemperismo químico e posteriormente físico-erosivo a partir de 26 Ma, quando da formação dos materiais argilosos amarelos com

esferolitos, correlacionáveis com as coberturas de bauxitas e caulins da Amazônia, mais conhecidos com *Argila de Belterra*. Pesquisas visando a ampliação das reservas e descobertas de novos depósitos devem priorizar o estudo do ambiente de sedimentação, concentrando-se nas camadas lenticulares com OH-Mn ou nos perfis lateríticos desenvolvidos ou não sobre estas lentes ou aquelas ricas em rodocrosita.

ABSTRACT

The Azul manganese deposits, in the Mineral Province of Carajás, are hosted in a Proterozoic sedimentary sequence as part of the Águas Claras Formation, previously known as Rio Fresco, and along an old mature lateritic toposequence, developed on that sequence. It is formed by fine red to white sandstones and siltstones, that include lense-form layers made of gray siltstones to gray to black shales, rich in carbonaceous organic matter (COM) and/or manganese oxi-hydroxides (OH-Mn) or rhodochrosite. Cryptomelane is the main OH-Mn, but todorokite and hollandite occur also. The rhodochrosite-bearing sediments are constituted of quartz, chlorite, illite, muscovite, microcline, some smectite, sometimes kaolinite and pyrite. OH-Mn and COM constitute the black shales or the OH-Mn alone compose almost compact and massive rocks. The shales and gray siltstones are usually poor in Mn (OH-Mn or rhodochrosite). In general terms, the sedimentary sequence and its manganese ore, as well as its formation age, chemical composition and geochemical signature discriminated by the anomalous values of base metals are correlated with the deposits of manganese of the Franceville Formation of Gabon. The lateritic profile is deep (up to 100 m deep), well developed, with a thick clayey horizon, established on the domain of the manganese lenses fit in the red to white siltstones. The main mineral of Mn is still cryptomelane, largely inherited, and also neoformed. A lot of features of chemical breakup are observed, and other minerals of Mn are formed as hollandite, todorokite, pirolusite and nsutite, besides kaolinite, mica, quartz and OH-Fe. A nodular lateritic crust, breccia-like, cavernous or massive rests upon the clayey horizon. It is formed of OH-Fe, OH-Mn, gibbsite and kaolinite. Cryptomelane is also present, either inherited or neoformed, but lithiophorite is the typical manganese mineral. The hill slopes of the plateau are covered by yellowish brown earthy to clayey material, with spheruliths, concentrated at the base, as product of chemical and physical weathering of the other horizons, and deposited by gravity in paleodepressions and paleovalleys. It is constituted of the same minerals of those horizons, even as they stand out for the largest abundance of kaolinite, gibbsite and goethite, and sometimes lithiophorite. The lateritic profile preserves most of the sedimentary and tectonic features, as well as it inherited some minerals as cryptomelane, muscovite, quartz, hydrothermal kaolinite and same molds of microscopical carbonate rhombohedra. The geochemical signature of the sediments, mainly of the Mn-bearing siltstones, shales and black shales, displaying the association Ni-Co-Cu-Zn-Mo-As-

Sr-Ba-ETR-Tl-(Pb), and the non-mineralized beds including K-Rb-Cs, is practically preserved in the whole profile, portraying the permanence and neoformation of cryptomelane and hollandite, and the partial resistance of micas retained along the profile. The lateritic profile began 68 Ma ago, had great development at 45 Ma and 36 Ma, and was affected by intense chemical and lately physical-erosive weathering, starting from 26 Ma, with the formation of yellow earthy

I. INTRODUÇÃO

O manganês, Mn, é o décimo primeiro elemento mais abundante da crosta terrestre, com *clarke* de 0,095 % em peso, sendo suplantado, portanto por H, Ti, Mg, Ca, K, Na, Fe, Al, Si e O, em ordem crescente. Embora tenha sido reconhecido como elemento ainda em 1774, sua importância econômica aconteceu com os primórdios da era industrial, como um componente essencial na produção de aço. Nos anos 40 até os anos 60 chegou a ser considerado como um metal estratégico, especialmente pelos EUA, devido à sua distribuição muito irregular na face da Terra. O mínimo fator de enriquecimento para formação de jazida é 350, superando Fe, Al, Cu, Ni, Zn, Sn. As jazidas de manganês são poucas e estão situadas na África (Gabão e Gana), Ucrânia, Austrália, México e Brasil, sendo que as maiores reservas (mais de 70 % do minério de alto teor) estão na Ucrânia, até pouco tempo atrás sob a geopolítica da ex-União Soviética. Com o acelerado desenvolvimento econômico e industrial dos países asiáticos, em especial da China Continental e da Índia, a procura por jazidas de manganês aumentou acentuadamente, sem considerar que algumas minas famosas como Serra do Navio e Conselheiro Lafaiete no Brasil, se esgotaram. O Brasil, um dos principais *players* de Mn, conta no entanto apenas com as minas de Azul na Província Mineral de Carajás, e a pequena reserva de Urucum em Mato Grosso do Sul, além de pequenas explorações na Bahia. Diante do quadro mundial e nacional, tornava-se imperioso o desenvolvimento de estudos geológicos com vistas a entender os processos de formação das jazidas de manganês, predominantemente constituídas por óxido-hidróxidos de Mn relacionados com formações lateríticas sobre seqüências sedimentares, almejando aumentar as reservas das jazidas conhecidas e também descobrir novos depósitos. Assim, surgiu o presente trabalho, centrado em estudo geológico, mineralógico e geoquímico de detalhe sobre o minério manganífero das jazidas do Azul em Carajás e suas rochas encaixantes, cujos resultados são apresentados e discutidos a seguir.

As jazidas de Manganês do Azul estão situadas na Província Mineral de Carajás (PMC), sudeste do Estado do Pará. Carajás constitui-se atualmente na maior província mineral do Brasil e uma das maiores do mundo, formada por jazidas e depósitos de Fe, Cu, Au, Mn, Ni,

to loamy materials, which can be well correlated with bauxite and kaolin covers of Amazon region, well-known as *Belterra Clay*. Mineral exploration aimed at increasing the Mn ore reserves and discoveries of new deposits should prioritize the study of the Azul sedimentary basin, concentrating on the OH-Mn or rhodochrosite lense-form layers or lateritic profiles developed over these lenses.

Al, entre outros. Suas jazidas de Mn são as principais do Brasil. A PMC responde pela região melhor estudada do Cráton Amazônico e também do País. É formada por terrenos granito-*greenstones*, por seqüências vulcano-sedimentares com formações ferríferas bandadas, por granitos, gnaisses e granodioritos, que se estendem do Arqueano ao Proterozóico, além de coberturas sedimentares clasto-químicas, estas podendo conter lentes e camadas de minerais de manganês, também de idade Proterozóica (DOCEGEO, 1988).

Localização e aspectos fisiográficos

A Província Mineral de Carajás (PMC) está localizada no sul do estado do Pará (Figura 1.1), em plena Amazônia Oriental, e interligada ao Brasil como um todo através de rodovias, ferrovia e por via aérea. A mina de manganês do Azul se situa na região dos platôs norte, em sua porção leste. Está a leste da Vila de Carajás, conhecida também como Núcleo Urbano, da qual dista 40 km, e a cerca de 70 km da cidade de Parauapebas, já na planície rebaixada, às margens do rio homônimo.

A região da PMC *sensu stricto* inclui terrenos relativamente elevados para os padrões amazônicos, compreendendo platôs quilométricos, vales e superfícies rebaixadas onduladas entre platôs, os interflúvios, com altitudes que variam entre 600 e 900 m nos platôs e da ordem de 300 a 400 m nos interflúvios. O topo dos platôs, ligeiramente ondulados a quase planos, está coberto geralmente por vegetação de gramíneas e arbustiva, onde esculpido sobre crostas lateríticas, ou por floresta densa, quando estabelecido sobre solos derivados das crostas, e pela mesma floresta nas encostas e nos interflúvios. As minas de Mn do Azul, em alusão ao rio homônimo, encontram-se nas encostas de platô quilométrico leste-oeste com até 600 m de altitude, esculpido pelos igarapés Azul e Kalunga (Figura 1.2). O clima dominante é tropical, quente e úmido, com precipitação pluviométrica média anual de 1.600 mm e temperatura média anual de 26 °C. Segundo a distribuição anual das precipitações pluviométricas, distinguem-se duas estações, como nas demais partes da Amazônia: a estação chuvosa, conhecida como inverno, de novembro a maio, quando ocorre grande parte das precipitações e a estação não chuvosa, conhecida como ve-

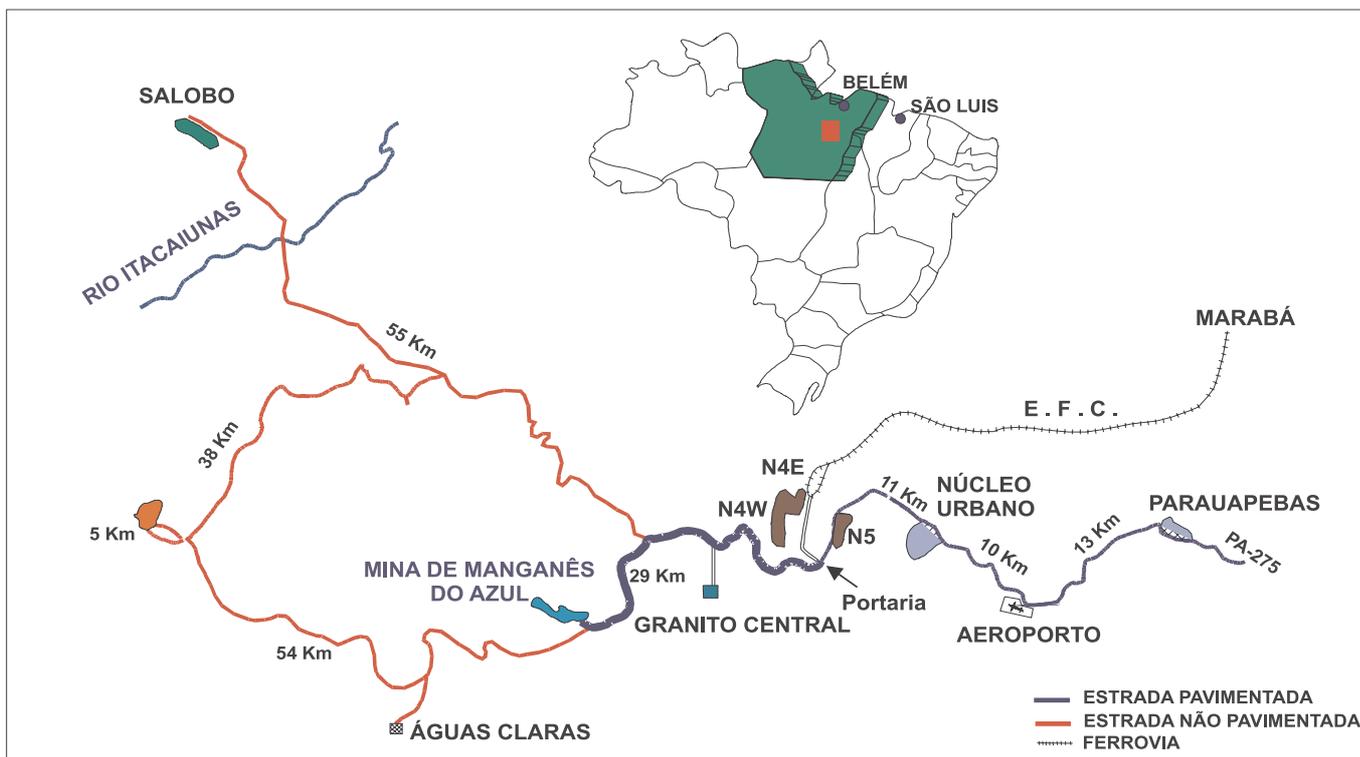


Figura 1.1 – Mapa de localização da Província Mineral de Carajás e do Depósito de Manganês do Azul.

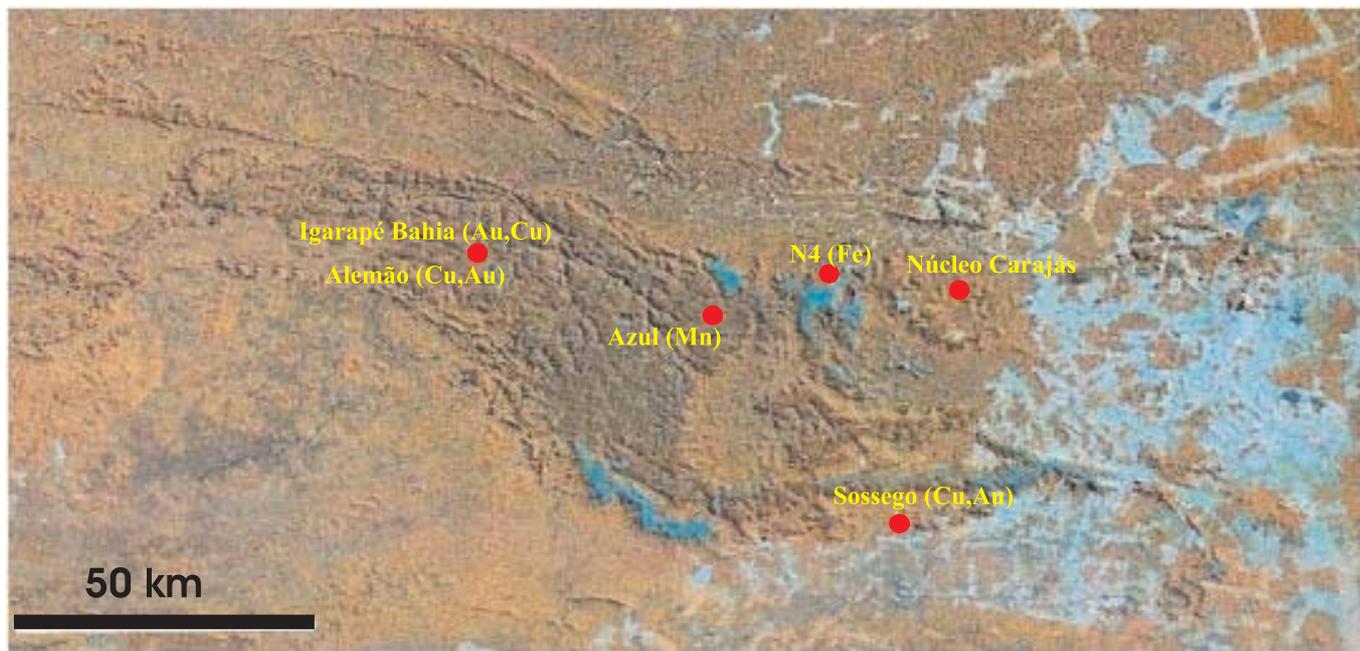


Figura 1.2 – Imagem de satélite Landstat mostrando a região de Carajás, especificamente a Flona (Floresta Nacional) Carajás, em tom marrom, sobressaindo-se as superfícies dos topos de platôs e também as de áreas arrasadas, bem como a região circunvizinha rebaixada e desmatada, em tom azulado. Imagem cedida pela RDM-Azul.

rão ou época da estiagem, que se estende nos demais meses, sendo julho e agosto meses literalmente secos. Sobre os platôs as temperaturas durante a noite e a madrugada são relativamente amenas. Durante as manhãs os platôs ficam normalmente envoltos em nevoeiros.

A vila de Carajás encontra-se cerca de 500 km distante de Belém, Capital do Estado do Pará, apenas 30 km da cidade de Parauapebas, situada na margem direita do rio homônimo e que limita a FLONA (Floresta Nacional) de Carajás. Toda a região é cruzada por rodovias pavi-

mentadas e piçarradas, interligadas com a rede rodoviária estadual e nacional e, por meio da ferrovia Carajás-São Luís com o Porto de Itaqui no Maranhão, que serve ao transporte de carga e de passageiros. A vila de Carajás conta com boa pista de aviação e aeroporto, com capacidade para aeronaves tipo Boeing 737 e equivalentes, e é servida por linhas aéreas regulares a partir de Belém e Brasília. Também é servida por serviço de ônibus rodoviários para Marabá e Belém, entre outros destinos. Vila de Carajás é moderna, ampla e graciosa, organizada, com ótima infra-estrutura urbana, sendo servida por bancos, hotéis, restaurantes, comércio, supermercado, teatro, cinema, escolas, TV, igrejas, agências de viagem, correios, locadoras, além do aeroporto e rodoviária. A vila está situada sobre platô a 600 m de altitude, desenvolvido sobre latossolos vermelhos bauxíticos e cercado pela floresta tropical densa. É o único núcleo urbano do País protegido por cercado telado e torres de observação, e com dois portões de controle de entrada e saída de pedestres e veículos, uma iniciativa para conter a visita indesejada de felinos, especificamente. Na vila Carajás, conhecida mais como Núcleo Urbano, moram atualmente cerca de 5.000 habitantes, todos empregados da CVRD e suas famílias. Nas minas de ferro de N4 e N5 estão envolvidos cerca de 3.000 profissionais.

Geologia Regional

A PMC é formada basicamente por terrenos geológicos do Arqueano-Proterozóico (Figura 1.3), como parte do Cráton Amazônico e compreende: a) ao Sul os terrenos Granito-Greenstones do Rio Maria (Huhn *et al.*, 1988), assim constituídos: *Greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas e o Tonalito Arco Verde com 2,97-2,90 Ga (Pimentel e Machado, 1994; Macambira e Lancelot, 1996), intrudidos por granitóides com 2,87 Ga (Pimentel e Machado, 1994; Macambira e Lancelot, 1996; Leite, 2001); b) ao Norte o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (Araújo *et al.*, 1988), que compreende o embasamento arqueano formado por complexos gnáissicos e granulíticos com 2,85-3,00 Ga (Machado *et al.*, 1991; Avelar *et al.*, 1999; Pidgeon *et al.*, 2000), intrudido por vários corpos graníticos arqueanos deformados da Suíte Plaqué (2,73 Ga; Avelar *et al.*, 1999); e o Supergrupo Itacaiúnas constituído pelos grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Buritirama, Igarapé Bahia e Grão Pará com ca. 2,76 Ga (Wirth *et al.*, 1986; Machado *et al.*, 1991; Macambira *et al.*, 1996; Trendall *et al.*, 1998), todos compostos por seqüências vulcanossedimentares. Destaca-se ainda o magmatismo máfico, também proterozóico, estabelecido amplamente nas formações ferríferas bandadas. Extensa cobertura metassedimentar, arqueana a paleoproterozóica, principalmente clástica,

marinha a fluvial, denominada Formação Águas Claras (Nogueira *et al.*, 1995) abrange grande área da PMC. Nessa cobertura encontrar-se-ia o minério de manganês do Azul, seja como protominério, seja como minério primário ou laterítico.

Estudos Anteriores

Desde a descoberta da mina do Azul, em 1971, a posição estratigráfica das rochas que hospedam ou sobre as quais se aloja o minério de Mn tem gerado controvérsias, trazendo consigo algumas propostas de denominações para as unidades litoestratigráficas da região da mina, não havendo ainda consenso com respeito ao tópico.

Barbosa *et al.* (1966) denominaram de “Formação Rio Fresco” (Cambro-Ordoviciano ?) as rochas sedimentares associadas a vulcanitos aflorantes ao longo do médio e baixo rio Fresco, afluente do Rio Xingu. Knup (1971) verificou que as “rochas sedimentares pré-cambrianas e eopaleozóicas” aflorantes na região da Serra dos Carajás, poderiam corresponder àquelas da Formação Rio Fresco, ou ainda Gorotire. Nos anos seguintes, as rochas em questão foram denominadas de formações Gorotire (Beisiegel *et al.*, 1973), Rio Fresco (Silva *et al.*, 1974; Hirata *et al.*, 1982; Ramos *et al.*, 1984; Meireles *et al.*, 1984) ou elevadas à categoria de Grupo Rio Fresco (Cunha *et al.*, 1984; DOCEGEO, 1988). Mas Figueiras & Villas (1984) concluíram que as rochas da região do Azul não se correlacionam adequadamente com as da Formação Rio Fresco de Barbosa *et al.* (1966), e denominaram-nas de “Seqüência Pós-Grupo Grão Para”. Posteriormente, Figueiras *et al.* (1987) voltaram a usar, provisoriamente, o termo “Formação Rio Fresco”.

Com base em modelo tectono-estrutural para a região de Carajás e admitindo o desenvolvimento de diversas bacias isoladas, Araújo *et al.* (1988) e Araújo & Maia (1991) introduziram a expressão Formação Águas Claras para cobrir a seqüência vulcanossedimentar dos domínios do sistema transcorrente Carajás, não a estendendo para outros compartimentos geotectônicos. Sua idade relativa foi estabelecida por meio de datações radiométricas K/Ar do Granito Serra dos Carajás em ca. 1,8 Ga (Gomes *et al.*, 1971), que corta esta unidade. Com base em datações K/Ar de pelitos da Mina do Azul, Bonhomme *et al.* (1982) e Meireles *et al.* (1984) posicionaram as rochas em questão no Proterozóico Inferior. As idades do Arqueano Superior para os metavulcanitos do Grupo Grão Para, obtidas pelos métodos U-Pb e Rb-Sr (Gibbs *et al.*, 1986; Wirth *et al.*, 1986) seriam a idade máxima de referência para a Formação Águas Claras, sobreposta àquele Grupo.

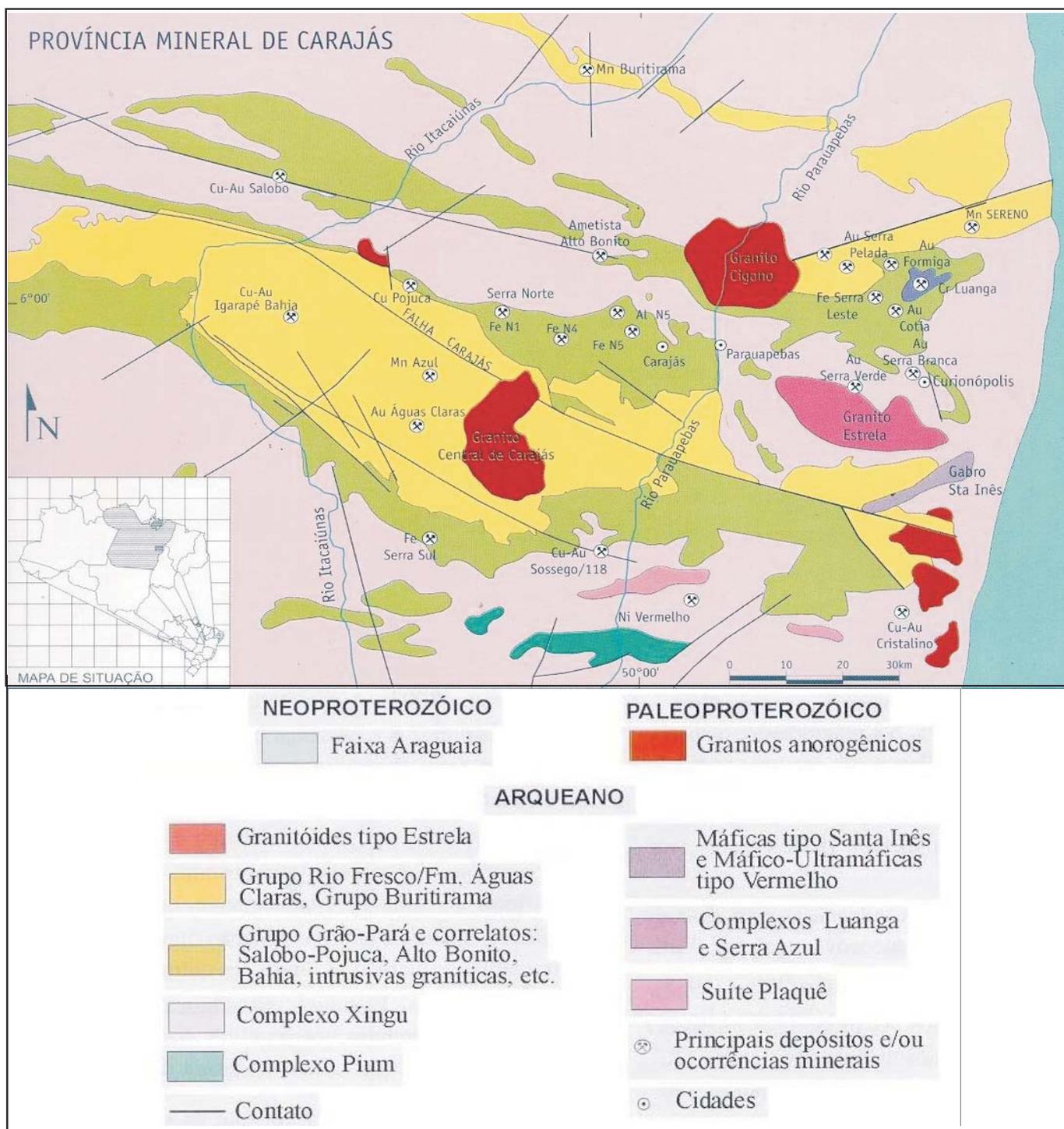


Figura 1.3 – Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás (PMC) (adaptado de Dardenne & Schobbenhaus 2001).

Nos anos 1990 a “Formação Águas Claras” foi objeto de estudo de fácies, análise estratigráfica e medidas de estruturas tectônicas (Nogueira, 1995), propiciado pelos excelentes afloramentos ao longo das estradas recém-abertas.

Embora os depósitos de Mn do Azul estejam situados em uma das mais importantes províncias minerais do mundo, e seja conhecida há mais de trinta anos e esteja

em lavra há 20 anos, não tem sido motivo de muitos estudos geológicos e geoquímicos. Os primeiros estudos são de natureza geológica, com ensaios mineralógicos e sem abordagem química, e mostram que o manganês está relacionado com ambiente supergênico e que possivelmente seu protominério seja uma camada de pelitos carbonáticas (com rodocrosita), atravessada pelo furo 5 (Anderson *et al.*, 1974; Valarelli *et al.*, 1978; Bernardelli

& Beisiegel, 1978). Estes autores classificaram os materiais manganíferos em depósitos superficiais, subsuperficiais e protominério. O quadro geológico mais recente no contexto regional dos depósitos foi apresentado por Pinheiro (1997) e Costa (2002). As principais abordagens mineralógicas sobre o minério foram feitas por Bernardelli & Beisiegel (1978), Valarelli *et al.* (1978), Bernardelli (1982), Beauvais (1984), Coelho & Rodrigues (1986), Beauvais *et al.* (1987), Silva (1988) e sumarizadas no livro de Dardenne e Schobbenhaus (2001). Nos anos 90 dois trabalhos concentraram-se nos estudos de datação do minério de óxi-hidróxidos, demonstrando que os mesmos podem estar relacionados com a antiga lateritização amazônica (Vasconcelos *et al.*, 1994; Ruffet *et al.*, 1996). Weber (2001) descreve e discute aspectos evolutivos de depósitos de manganês, incluindo os de Azul, da mesma forma que Macambira (2003) e Maynard (2004), ao estudar as formações ferríferas da Formação Carajás, Grupo Grão Pará, na bacia Grão Pará, fazem abordagem sobre o ambiente de sedimentação dos sedimentos relacionados com as mineralizações de Mn do Azul.

Materiais e Métodos

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram realizadas as seguintes atividades:

Atividades pré-campo

Consistiram em coleta de dados bibliográficos, avaliação e síntese dos resultados disponíveis, além de contatos com a empresa de mineração, Companhia Vale do Rio Doce.

Atividades de campo

Foram desenvolvidas em várias fases e compreendem basicamente:

- a) Visita às instalações da empresa na Mina de manganês do Azul e reconhecimento preliminar das unidades geológicas nas minas 1, 2 e 3;
- b) Obtenção de fotografias aéreas das áreas mapeadas, mapas e seções geológicas;
- c) Coleta de informações geológicas contidas em relatórios internos de propriedade da empresa;
- d) Mapeamento geológico da Mina do Azul e áreas adjacentes, acompanhado de coleta de amostras de rochas e minério;
- e) Descrição litológica e mineralógica de furos de sondagem nas casas de testemunho.

Atividades de Laboratório

Consistiram em:

- a) Descrição e preparação das amostras coletadas com o objetivo de selecioná-las para as diversas análises mineralógicas, químicas e geocronológicas previstas no projeto;
- b) Captura de imagens com câmara digital, arquivadas em meio digital (Cd-rom e disco rígido), de amostras de mão, ressaltando os diversos tipos de texturas e estruturas sedimentares, mineralógicas e deformacionais;
- c) Confecção de lâminas delgadas e seções polidas de rochas e tipos de minérios para realização de análises por microscopia óptica de luz transmitida e refletida, microsonda eletrônica e microscopia eletrônica de varredura;
- d) Pulverização de amostras de rocha e minério para fins de análises por difração de raios-X e análises químicas diversas;
- e) Determinação mineralógica básica realizada por difração de raios-X, pois a granulometria muito fina das rochas e do minério não permite caracterização tão somente por microscopia óptica;
- f) Estudo mineralógico e petrográfico das rochas e minérios de manganês com o auxílio de microscópio óptico tanto de luz transmitida como de luz refletida;
- g) Caracterização mineralógica e morfológica dos cristalitos dos minerais da rocha e do minério com auxílio de microscopia eletrônica de varredura, envolvendo análises químicas semi-quantitativas pontuais com sistema de energia dispersiva;
- h) Caracterização química total dos cristalitos dos minerais formadores das rochas encaixantes do protominério, bem como dos diferentes tipos texturais do minério por meio de microsonda eletrônica;
- i) Análises químicas multi-elementares de amostras totais tanto das rochas encaixantes e das rochas portadoras do protominério, como dos diferentes tipos de minérios, cobrindo os elementos maiores e os elementos-traço;
- j) Determinação da matéria orgânica de amostras da rocha encaixante, principalmente aquelas de cor cinza escura, tipo folhelhos negros;
- k) Análises geocronológicas para determinação da idade de formação do minério (oxi-hidróxido de manganês) relacionado principalmente a ambiente de formação laterítico, empregando-se o método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$;
- l) Relatórios mensais, trimestrais e anuais coletavam sistematicamente os dados obtidos ao longo do desenlace do projeto e faziam avaliação do desenvolvimento continuado do mesmo;
- m) Os mais distintos dados obtidos eram arquivados em meio digital, tratados com auxílio de distintos *softwares* e microcomputadores.

Os métodos de análises empregados, bem como os equipamentos e materiais envolvidos, e as instituições em que foram desenvolvidos, estão indicados nas tabelas 1.1 e 1.2. O desenvolvimento temporal das atividades citadas acima consta da tabela 1.3, confrontan-

do o cronograma previsto pelo projeto global (*Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros na Amazônia*) e o executado pelo sub-projeto abordado neste trabalho, *O Depósito de Manganês do Azul, Carajás*.

Tabela 1.1 – Métodos analíticos empregados com respectivos equipamentos e instituições envolvidas.

| Técnica Analítica | Equipamento | Local |
|--|---|---|
| Microscopia Ótica | Estereomicroscópio STEMI V11 Zeiss e Microscópio ZEISS, modelo AXIOLAB POL, com luz refletida e transmitida. | Laboratório de Mineralogia – Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada. CG-UFPA |
| DRX | Difratômetro PHILIPS, modelo PW 3710 BASED, equipado com ânodo de cobre (λ Cu $K_{\alpha 1} = 1,5406\text{\AA}$). | Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Geoquímica e Petrologia. CG-UFPA |
| MEV/SED | Microscópio Eletrônico de Varredura LEO 1450VP com EDS SED 500 DP. | Laboratórios de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém-PA, Universidade de Halle/Alemanha e UNSM/Peru |
| Análises Químicas | ICP-MS – Rocha total e multi-elementar Matéria Orgânica – Volumetria | ACTLAB-Canadá Centro de Geociências-UFPA |
| MSE | Microsonda Eletrônica | Laboratório de Microsonda Eletrônica, UnB, Brasília-DF |
| Geocronologia $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | Geocronologia $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ | UQ-AGES Laboratory The University of Queensland- Austrália |

Tabela 1.2 – Resumo demonstrativo das análises realizadas.

| Descrição | Nº de amostras | Detalhe |
|--|-----------------------|----------------|
| Microscopia Ótica | 131 | |
| * Lâminas delgadas (luz transmitida) e Seções polidas (luz refletida) | | 131 |
| - Imagens obtidas | | 141 |
| DRX | 247 | |
| * amostras de furos de sondagens (inclui fases monominerálicas) | | 149 |
| * amostras de superfície (1 conc.) (inclui fases monominerálicas) | | 98 |
| - Difratogramas elaborados | | 247 |
| MEV/SED | 49 | |
| * fragmentos (amostras de superfície e furos de sondagens) | | 20 |
| * seções polidas | | 29 |
| * imagens | | 330 |
| * espectros | | 215 |
| * micro-análises | | 447 |
| Análises químicas junto ActLab - Canadá | 119 | |
| * amostras de furos de sondagens | 63 | |
| * amostras de superfície | 56 | |
| Análises químicas da Matéria Orgânica Carbonosa (MOC) - CG/UFPA | 40 | |
| * amostras de superfície | | 24 |
| * amostras de furos de sondagens | | 16 |
| Análises por microsonda eletrônica-UnB | 22 | |
| * microanálises | | 302 |
| Análises geocronológicas-Universidade de Queensland, Austrália. | 5/13 | 40 |

Tabela 1.3 – Confrontação entre o cronograma previsto no projeto geral e aquele executado de fato no sub-projeto.

X = cronograma ADIMB

 = Cronograma Equipe Alvo Manganês do Azul

| ATIVIDADE/BIMESTRE | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | IX | XII | XIII | XIV | XV | XVI | XVII | XVIII | | |
|--|---|-------------|---|----|---|----|-------|---|----|---|----|-----|------|-----|----|-----|------|-------|--|--|
| Compilação e integração de dados prévios | X | X | | | | | | Pesquisa Bibliográfica | | | | | | | | | | | | |
| Mapeamento | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Amostragem para petrografia de rochas | | Trabalho de | | | | | campo | | | | | | | | | | | | | |
| Amostragem para petroquímica de rochas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Petrografia de rochas | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Remessa de amostras para análises químicas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Análises químicas de rochas | | | X | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | |
| Petroquímica de rochas | | | | | | | | Estudos Petrográficos e Análises Químicas | | | | | | | | | | | | |
| Detalhamento dos corpos de minério | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Petrografia de minérios | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Remessa de amostras para análises de minérios | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Análises químicas de minérios | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Petroquímica de minérios | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Amostragem para inclusões fluidas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Remessa de amostras para estudo de inclusões fluidas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Estudo de inclusões fluidas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Amostragem isótopos estáveis | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Remessa de amostras para estudo de isótopos estáveis | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Estudo de isótopos estáveis | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Remessa de amostras para microsonda eletrônica | | | Caracterização mineralógica: microscopia ótica, DRX, MEV/SED, MSE | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Amostragem geocronológica | | | | | X | X | X | Determinações Geocronológicas | | | | | | | | | | | | |
| Determinações geocronológicas | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Relatórios mensais | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | | | |
| Relatórios quadrimestrais | | X | | 1 | 2 | | | X | | 3 | | 4 | | X | | X | | X | | |
| | | | | X | X | | | | | X | | X | | | | | | | | |
| Relatórios anuais | | | | | | | | | | | | | | | | | 1A | | | |

A matéria orgânica carbonosa (MOC) foi determinada conforme o método da EMBRAPA (1997), que se baseia na ação oxidante do $K_2Cr_2O_7$ em meio ácido H_2SO_4 sobre a fração denominada de carbono orgânico contido na rocha ou no solo. Esta reação é realizada a quente e

na presença de catalisador positivo, geralmente Ag_2SO_4 . O agente titulante é sulfato ferroso amoniacal (SFA) e utiliza-se a difenilamina como indicador de oxi-redução. O teor de MO a partir do carbono orgânico foi obtido segundo a seguinte equação:

$$\% \text{ MO} = \% \text{C}_{\text{org}} \times 1.724.$$

MO: matéria orgânica

C_{org} : carbono orgânico

1.724: fator de conversão admitindo-se que o carbono orgânico represente 58 % da matéria orgânica total do solo.

As análises geocronológicas de amostras constituídas por OH-Mn das minas de manganês do Azul, em Carajás (Figura 6.1), foram realizadas pelo Método de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, nas instalações UQ-AGES Laboratory da University of Queensland, pelo Prof. Dr. Paulo Vasconcelos daquela instituição, com a participação de Mark Baker, que preparou um relatório sobre os resultados finais. Foram analisadas 5 rochas, formando 13 amostras que geraram 40 grãos analisados. Para estudos mais detalhados sobre os procedimentos analíticos e definições (platô, ideograma, etc.) recomenda-se os trabalhos de Vasconcelos (1999) e Vasconcelos *et al.* (2002).

A Equipe do Projeto

A equipe que participou da execução do presente trabalho é relativamente grande; no entanto, efetivamente participaram apenas três, dois dos quais conduziram de fato o projeto. O período de execução do projeto coincidiu de um lado, felizmente, com o aquecimento do setor mineral no País por conta do aquecimento global da economia, proporcionado pelos países asiáticos, especialmente por China e Índia, de tal sorte que os geólogos disponíveis no mercado foram assimilados rapidamente. O projeto que estava baseado em bolsista DTI, não tinha mais atrativo diante do mercado de emprego e foi impossível assegurar a permanência de pessoal, tendo que recorrer a pessoal com outra formação, mas todos apenas aguardando uma oportunidade imediata de mercado. Ou seja, não foi possível formar equipe verdadeira de trabalho, imbuída de um só propósito. Esta forma de desenvolver projeto esteja talvez nos tempos atuais de mercado de setor mineral aquecido, inadequada.

A equipe foi assim dividida: Equipe Executora, formada por aqueles que de fato ficaram à frente do projeto em todo seu desenrolar; a Equipe Colaboradora, formada por pessoal que atendeu pedidos específicos de realização de análises; e a Equipe de Contato, formada por pessoal da CVRD, na Mina do Azul, em Carajás.

Equipe Executora:

MARCONDES LIMA DA COSTA, Professor da UFPA Belém-Pará e pesquisador do CNPq. Coordenador do Projeto.

OSCAR JESUS CHOQUE FERNANDEZ, Pesquisador PRODOC da CAPES e Professor do CEFET, Belém-Pará.
MARLIS ELENA RAMÍREZ REQUELME, Professora do CEFET, Belém-Pará.

Equipe Colaboradora:

Clice de Fátima Monteiro Ribeiro, Geóloga, 31.05 a 01.07.2002;

Maritza Cantoni Vilchez, Geóloga, Lima-Peru, 01.11 a 28.12.2002 e 2003;

Joedy Cristina Cruz Queiroz, Geóloga, 15.08 a 14.11.2003;
Paulo Vasconcelos, Queensland University, Austrália, 06.2003 a 23.04.2004;

Patrícia Oliveira, Técnica em Mineração, Belém-Pará, 04.2003;

Edgar Alexandre Reis de Lima, Químico, Belém-Pará, 10.2003 a 05.2004;

Alciney Miranda da Costa, Químico, Belém-Pará, 05.2004-02.2005;

Daniele Freitas Gonçalves, Geóloga, 04 a 05.2003 e 10 a 12.2003;

Antônio Emídio de Araújo Santos Jr., Geólogo, Belém-Pará, 04 a 05.2003 e 11.2004 a 03.2005.

Equipe de Contato:

Lilian Grabellos B. de Moura, CVRD, 2002/2003;

Celso Antônio Henning Junior, CVRD, 2002;

Cristiano Soares de Souza, CVRD, desde 02.09.2003.

O presente trabalho, em seu formato e conteúdo apresentado neste livro, é de autoria dos três membros da equipe executora, com organização, redação e estrutura técnica-científica do coordenador.

Financiamento e Recursos Alocados

O presente trabalho, inserido no projeto *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros na Amazônia* (Convênio 23.01.0607.00 – ADIMB) e fruto do sub-projeto, *O Depósito de Manganês do Azul, Carajás*, foi uma iniciativa da ADIMB – Agência do Desenvolvimento da Indústria Mineral Brasileira, com recursos da FINEP, com participação do CNPq na gestão dos recursos de bolsas DTI. Os membros da equipe executora não perceberam qualquer remuneração e nem puderam divulgar em eventos e periódicos os resultados de suas pesquisas. Liberação para divulgação destes resultados está prevista para uma carência de seis meses após a entrega da monografia para ADIMB em Brasília, prevista para setembro do corrente ano. O custo orçado do sub-projeto, e, portanto dos resultados de pesquisas constantes neste trabalho foram de R\$ 125.325,70.

II. GEOLOGIA DAS MINAS E ÁREAS ADJACENTES

A paisagem dos Depósitos e das Minas do Azul

A região de Carajás se destaca na planície Amazônica pelo seu relevo dominado por grandes platôs, cujos topos, costurados entre si, constituiriam extensa superfície, com altitude variando entre 600 e 800 m, raramente alcançando cerca de 900 m. Esse platô gigante hipotético teria contorno quase retangular noroeste-sudeste (80 x 60 km), cerca de 4.800 km². O topo dos platôs corresponde a extensa superfície geomórfica de aplanamento, desenvolvida sobre carapaças de antigos, profundos e complexos perfis lateríticos maduros ou sobre os produtos de intemperismo químico parcial das mesmas. Essa superfície geomórfica é correlacionada à Superfície Sul-Americana (King, 1956), admitida como tendo sido estabelecida no Terciário Inferior (Eoceno). Em Carajás se encontra parcialmente em fase de dissecação, tendo os vales conseqüentes orientação principal segundo noroeste-sudeste e uma menos proeminente nordeste-sudoeste, o que faz com que os platôs preferencialmente se alonguem segundo noroeste-sudeste. Os platôs são sustentados por crostas lateríticas ferruginosas compactas, por vezes ferroaluminosas, em tom marrom escuro a negro. As carapaças propriamente ditas não apresentam cobertura de floresta, mas apenas gramíneas e pequenos arbustos, constituindo clareiras que nas imagens de satélite *landsat* se destacam pela superfície muito ondulada, rugosa e negra, em cujas depressões encontram-se diversas lagoas e pântanos (Figura 1.2). Em fotografias aéreas as clareiras se destacam facilmente, pois a ausência de vegetação é facilmente reconhecível. Por sua vez, os platôs encimando os materiais de aspecto terroso a argiloso marrom avermelhado, com blocos remanescentes das crostas, produtos intempéricos das mesmas, apresentam superfície mais aplainada e coberta por floresta tropical fechada, conforme se pode observar nas imagens de satélites e nas fotografias aéreas (Figuras 1.2 e 2.1). O depósito de manganês do Azul está situado na borda Norte de um dos platôs desta superfície, especificamente do conjunto de platôs situados na borda nor-ocidental do granito central (Figuras 1.2, 2.2 e 2.3), ocupando superfície de 5 por 1 km, e a 10 km ao Sul dos platôs de N4 ocupados com minério de ferro. O platô em cuja encosta se encontram as principais minas de manganês forma cotovelo, aproveitando as duas direções principais: noroeste-sudeste e nordeste-sudoeste (Figura 2.2). Os platôs dos depósitos de manganês do Azul são cobertos tanto no topo como na

encosta e planície adjacente por floresta tropical densa, com árvores de grande porte, sendo que na região do Azul aparecem com grande destaque, pela abundância e grande altura, *Bertholetia excelsia*, popularmente conhecida como castanheira, ou ainda a castanheira do Pará.

Geologia e Topo-Sequência das Minas

A área da mina de manganês do Azul e adjacências compreende rochas da Formação Águas Claras, diques de rochas básicas e o Granito Central de Carajás (Figura 2.4).

Formação Águas Claras. Comporta a mineralização e o protominério de manganês da mina do Azul, ocupando praticamente toda a área das minas. Em termos de Carajás ocupa área de 900 km² na parte central do Sistema Transcorrente Carajás. As rochas encaixantes e as mineralizadas são essencialmente pelitos (siltitos e argilitos) com diferentes graus de litificação, podendo estar localmente deformados por falhamentos e dobramentos relacionados à Falha Carajás. A Formação Águas Claras pode ser dividida em dois membros, sendo o inferior composto por argilitos e siltitos depositados em sistema de plataforma marinha e superior representado por arenitos e conglomerados de origem fluvial e litorânea de águas rasas (Nogueira, 1995). Pinheiro (1997) sugere que essas rochas tenham sido depositadas em plataforma marinha afetada por tempestades.

Diques de Rochas Básicas. Diques básicos de direção geral NNE-SSW e NW-SE e espessuras variando entre 10 a 15m, podendo chegar até 200m, seccionam a Formação Águas Claras. Em geral são tabulares a sub-tabulares, estão bastante intemperizados e apresentam coloração vermelha escura a amarelo. Os diques podem ter basculado o acamamento dos sedimentos pelíticos em até 60° (Costa, 2002). A idade dessas rochas é incerta. Datações realizadas por meio dos métodos Rb-Sr e K-Ar registram três fases de colocação das mesmas: a) Proterozóico médio (Tassinari *et al.*, 1982; Cordani *et al.*, 1984; Cunha *et al.*, 1984); b) Proterozóico médio a superior (Teixeira, 1978; Gomes *et al.*, 1971; 1975) e Paleozóico (?) (Gomes *et al.*, 1975; Lindenmayer, 1990). Idade arqueana foi sugerida com base na datação de *sills* de rochas gabróicas que cortam a seqüência e que apresentaram idade Pb/Pb em zircão de 2645±12 Ma (Dias *et al.*, 1996).

Granito Central de Carajás. Ocorre sob a forma de batólito, com cerca de 22x12 km, situado na parte central do Sistema de Falhamento de Carajás (Bernardelli & Beisiegel, 1978). De acordo com Rios (1991) *apud* Pinheiro (1997) neste granito se pode reconhecer quatro



Figura 2.1 – Imagem digital aérea tomada da paisagem de platôs das serras Norte de Carajás, florestados, onde se situa o platô dos depósitos de manganês do Azul

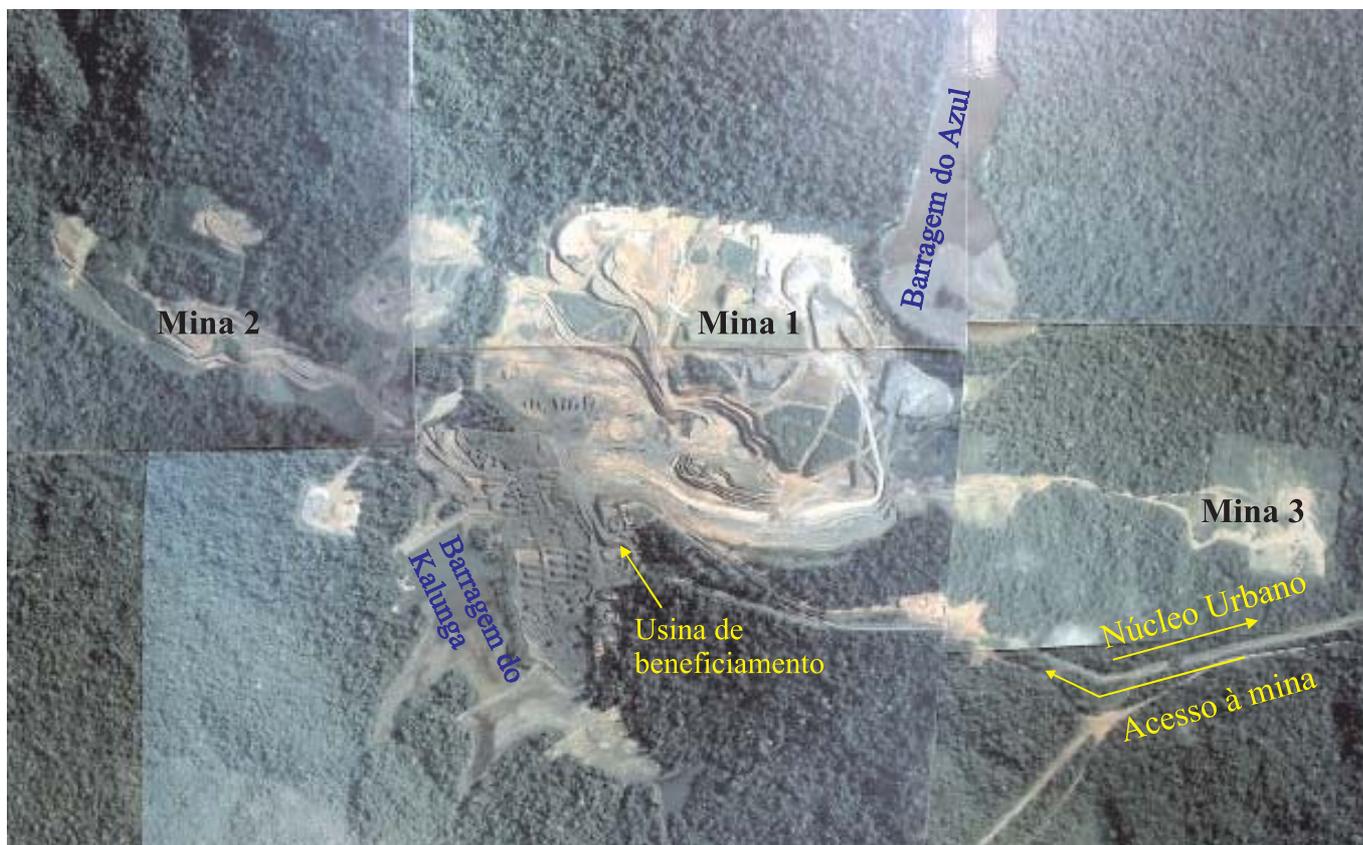


Figura 2.2 – Mosaico composto por fotografias aéreas mostrando as minas de manganês do Azul (minas 1, 2 e 3, bem como as bacias de rejeitos e área de instalação do processamento do minério) e seu entorno tanto sobre o platô como nas suas encostas e áreas adjacentes, onde se destaca a pujança da floresta Amazônica, tanto sobre os platôs, quanto nas encostas e áreas dissecadas.

fácies: biotita-anfibólio sienogranito, anfibólio-biotita monzogranito porfirítico, microgranitos e pegmatitos. Na zona de contato as rochas encaixantes da Formação Águas Claras apresentam ligeiro metamorfismo de contato ocasionado durante sua colocação, ocorrida em torno de 1880 ± 2 (Machado *et al.*, 1991) ou 1820 ± 49 Ma (Gibbs *et al.*, 1986), ambas determinadas pelo método U-Pb em zircão.

Topo-seqüência Laterítica. Grande parte dos terrenos superficiais das minas de manganês do Azul está estabelecida sobre materiais lateríticos, aflorando principalmente crostas ferro-aluminosas, crostas manganésíferas e o topo de horizontes de aspecto argiloso, e seus produtos de alteração intempérica química e física, destacando-se os materiais argilosos (solos) com esferolitos e os materiais ditos detríticos. As formações lateríticas correspondem a perfis lateríticos maduros, antigos, espessos, equivalentes àqueles que formaram partes dos minérios de ferro, alumínio, ouro, níquel, entre outros, de Carajás.

Sedimentos Lacustres. Em depressões sobre as crostas lateríticas compactas e não desmanteladas, estabeleceram-se várias sucessões de sedimentos lacustres, em parte já lateritizados, que na atualidade continuam se formando como mostram os inúmeros pequenos lagos instalados sobre estas mesmas crostas (Costa *et al.*, 2005).

Modos de Ocorrência das Formações Manganésíferas

As observações de campo nas frentes de lavra e ao longo dos furos de sondagem permitiram concluir que as mineralizações e os minérios de manganês, sejam com óxi-hidróxidos ou com carbonatos, encontram-se fundamentalmente como:

a) *Perfil laterítico maduro* e seus produtos de desmantelamento, desenvolvido sobre pelitos e arenitos finos, mineralizados ou não, compreendendo:

- 1) Esferolitos soltos a agregados em materiais argilosos amarelos, constituindo os materiais superficiais (solos) localizados na meia encosta;
- 2) Crostas ferro-aluminosas superficiais e subsuperficiais, de topo dos platôs;
- 3) Crostas manganésíferas subsuperficiais;
- 4) Horizonte argiloso com *lentes decamétricas* constituídas por óxi-hidróxidos de Mn, que podem ser encontradas também nas crostas;
- 5) Horizonte argiloso saprolítico com *lentes decamétricas* constituídas por OH-Mn;



Figura 2.3 – Fotografia aérea mostrando os primeiros trabalhos para operação da lavra de Mn no Azul, nos anos 80. (Cópia de fotografia em quadro afixado no escritório da mina de manganês do Azul, em Carajás).

b) *Veios, vênulas e bolsões* no horizonte argiloso do perfil laterítico ou ainda nas crostas lateríticas, bem como nos siltitos vermelhos.

c) *Rochas sedimentares*: siltitos e folhelhos (pelitos) cinza escuros, podendo estar enriquecidas em óxi-hidróxidos até carbonatos de manganês.

Os depósitos de manganês do Azul afloravam na encosta do Platô Azul, em sua porção norte. Os afloramentos estão na forma de crostas manganésíferas (com óxi-hidróxidos de Mn, aqui doravante denominados simplesmente de OH-Mn) contínuas ou como blocos, por vezes como parte de crostas ferro-aluminosas (com OH-FeAl) na meia encosta dos platôs. Em superfícies sub-aplainadas sobre as encostas se sobressaem na forma de material argiloso amarelo, podendo conter espessos pacotes de esferolitos, no campo denominados de pisolitos, constituídos de OH-Mn, OH-Fe, e/ou OH-FeAl (goethita, hematita e gibbsita). Blocos de crostas com OH-Mn, OH-MnFeAl (litoiorita + criptomelana, goethita e gibbsita) e OH-FeAl encontram-se também na região rebaixada circunvizinha, escondidos pela floresta. Na base das encostas do platô, bem como ao longo dos leitos e paredes de drenagens ocorrem de vez em quando arenitos e siltitos, por vezes folhelhos carbonosos cinzas e negros, em afloramentos contínuos ou como blocos isolados. Exposições de rochas e minérios ocorrem de forma espetacular na frente de lavra nas três minas, com grande destaque para a mina 1. Aí são também atravessados por muitos furos de sondagem, que chegam alcançar a cota de 350m, cerca de 210 m de profundidade, além de muitos poços escavados, rasos, que chegaram a dezenas de metros de profundidade. Com base nessas exposições de frente de lavra e furos de sondagem foi elaborado o mapa geológi-

co da mina, desde os seus primeiros anos de lavra a partir de 1985. No presente trabalho o mapa geológico elaborado e constantemente atualizado pelos geólogos da mina, sofreu pequenas modificações, sendo as mais marcantes as referentes à nomenclatura das rochas e minérios (Figura 2.4).

As Rochas Sedimentares

Os depósitos de manganês do Azul e áreas adjacentes fazem parte de seqüência sedimentar formada principalmente por arenitos finos e siltitos, estratificados, de cor branca amarelada a vermelha, ligeiramente silicificados, com fortes evidências de deformação tectônica, mostrada por intenso fissuramento, microfalhas, dobras e microdobras. As superfícies de fraturas e falhas, bem como cavidades diversas, foram ocupadas por quartzo leitoso a microcristalino, descrevendo veios e bolsões. São raros macrocristais de quartzo. Esses sedimentos constituem a Formação Águas Claras (Araújo *et al.*, 1988; Araújo & Maia, 1991; Nogueira *et al.*, 1995). Na área dos depósitos de Mn os sedimentos estão associados com siltitos e folhelhos cinzas a negros com ou sem manganês, bem como margas rodocrosíticas, relacionados ao membro Azul da Formação Águas Claras (Nogueira *et al.*, 1995). Em termos regionais os sedimentos Águas Claras ocupam a parte central da sinclinal da Serra dos Carajás, com eixo principal na direção noroeste-sudeste (Figura 2.4), a direção dominante das drenagens e dos

platôs. Além de siltitos e folhelhos negros, os sedimentos podem conter camadas conglomeráticas com seixos de jaspilitos, depositados em plataforma marinha, de litorânea a bacinal profunda (Dardenne & Schobbenhaus, 2001).

Na área das minas a seqüência sedimentar Azul encontra-se dobrada, com desenvolvimento de sinclinal, com eixo aproximadamente leste-oeste, estando a mina 1 no centro de sua bacia principal, aparentemente, correspondendo em superfície à zona de domínio dos materiais argilosos marrons amarelados com esferolitos (Figura 2.4).

Embora a maioria dos estudos realizados até o presente mostre que os sedimentos da Formação Águas Claras apontam para uma idade neoarqueana a paleoproterozóica (Costa *et al.*, 1995; Nogueira *et al.*, 1995; Faraco *et al.*, 1996; Dall'Agnol *et al.*, 1997; Macambira, 2003), dados geocronológicos indiretos sugerem uma idade máxima de 1880 ± 2 MA (Gomes *et al.*, 1971), o que se apresenta mais compatível, pois seus sedimentos, inclusive contêm seixos de jaspilitos provenientes das formações ferríferas do Grupo Grão Pará.

SILTITOS: AS ROCHAS HOSPEDEIRAS DA MINERALIZAÇÃO PRIMÁRIA. Na área das três minas de manganês do Azul dominam arenitos finos e siltitos vermelhos, brancos e amarelos, que nas proximidades do contato com os folhelhos cinzas a negros contendo a mineralização de óxi-hidróxidos de Mn se apresentam tipicamente listrados de branco e vermelho, alternadamente, originando marcante estratificação. Os sedimentos se

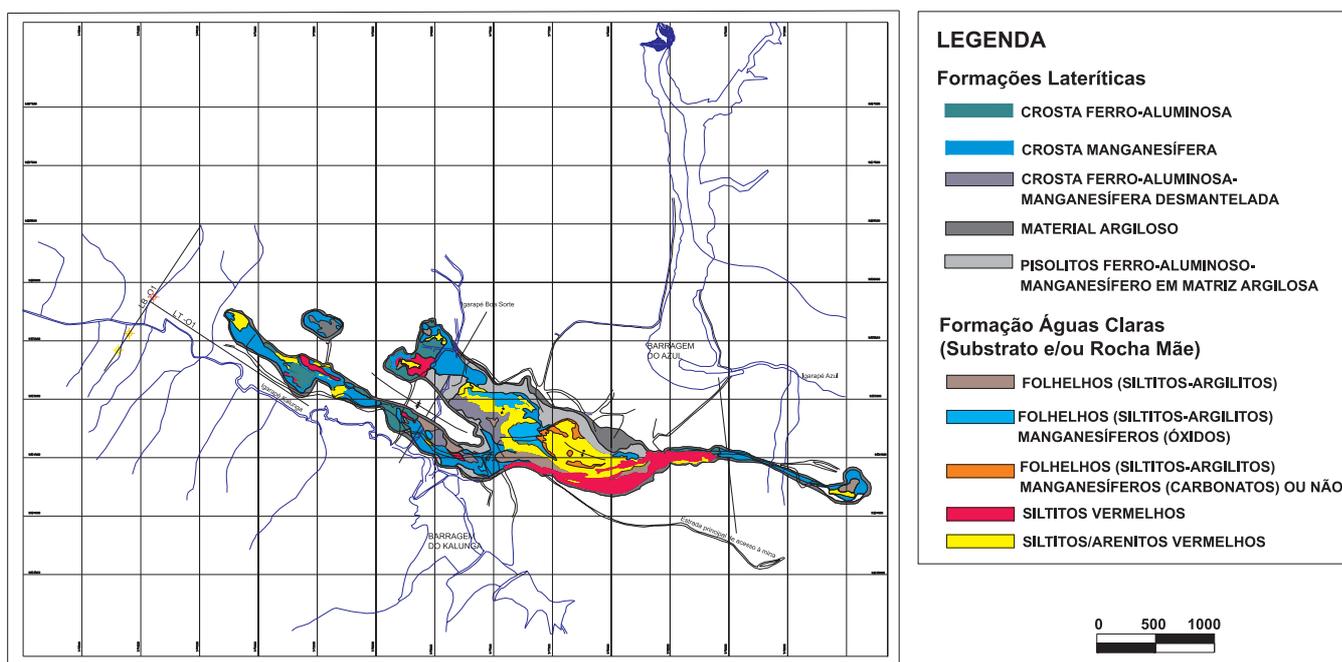


Figura 2.4 – Mapa geológico da região das minas de Mn do Azul, em Carajás. Mapa cedido pelos escritórios da RDM-Azul e parcialmente modificado neste trabalho.

apresentam localmente microfaturados, plenos de microfalhas, com seus espaços preenchidos com caulim branco, remobilizado, que, além de caulinita, contém quartzo e illita/muscovita, por vezes cristais de pirita, quiçá calcopirita, que conferem aos siltitos e arenitos finos padrão de cores muito forte e bonito (Figuras 2.5.1 e 2.5.2). Nos siltitos não são raros bolsões concordantes e discordantes com a estratificação, constituídos de OH-Mn, similarmente ao caulim. Pode se afirmar que o minério de manganês com óxi-hidróxidos encontra-se como corpos lenticulares dentro dos siltitos vermelhos a marrons a siltitos listrados de vermelho e branco. Os siltitos com cor predominante vermelha têm distribuição leste-oeste (Figura 2.4), aparentando distribuição marginal, enquanto os siltitos vermelhos listrados e os folhelhos e siltitos negros estão na zona central, também delineando faixa de mesma direção, na verdade refletindo sua condição de corpo lenticular.

AS CAMADAS LENTICULARES DE FOLHELHOS NEGROS COM OH-Mn. Os siltitos vermelhos a listrados convergem gradualmente para siltitos cinzas, normalmente listrados de cinza e vermelho, até siltitos e finalmente folhelhos negros, tipicamente laminados. A cor negra intensifica-se com o aumento do conteúdo de matéria orgânica carbonosa (MOC), e principalmente com os de OH-Mn. A transição siltitos vermelhos a folhelhos negros se dá tanto lateralmente como nos contatos de topo e base (Figura 2.6). Siltitos cinzas e folhelhos negros se comportam como verdadeiras lentes, principalmente da zona intermediária para mais profunda da cava, tendo várias centenas de metros de extensão aparente e espessura máxima de 15 m nas frentes de lavra. A maioria das lentes aflorantes na base da frente de lavra atual (julho de 2005), por exemplo aquela atingida pela bancada 460 m (cerca de 140 m abaixo da superfície do topo do platô), é constituída por óxi-hidróxidos de Mn, de aspecto maciço a laminado, com lâminas de caulim, poucas feições de dissolução, gradando lateral e verticalmente para folhelhos negros, siltitos cinzas até os siltitos vermelhos listrados (Figuras 2.5.1 e 2.5.2). Este modo de ocorrência sugere que os óxi-hidróxidos de Mn da mega-lente *siltito-folhelho negro-folhelho com OH-Mn*, sejam contemporâneos à sedimentação. Na mina do Azul este material é especial, pois que devido ao seu alto teor é classificado como *bióxido*, o minério mais rico das minas, a criptomelana. Lentes similares se estendem por toda as minas em distintos níveis verticais e posições horizontais e com maior distribuição areal aparentemente na atual zona central, ou seja mina 1 (Figuras 2.4 e 2.6). As camadas ou lentes, cujas descrições mesoscópicas a partir de testemunhos de sondagem, correspondiam a siltitos,

argilitos ou folhelhos, pelitos em geral, de cor cinza esverdeada, em geral mais coeso, com possíveis evidências visuais de carbonatos, tidos como rodocrosita, eram denominadas de unidade manganésifera (UM) pelos descritores de furos de sondagem, o que posteriormente se mostrou de pouca aplicabilidade, pois várias dessas unidades assim descritas não continham manganês ou seus teores eram muitos baixos. A identificação mesoscópica de rodocrosita nesses sedimentos é extremamente difícil, devido à sua granulometria fina, sub-microscópica (micrítica), intercrescida com quartzo e minerais de argila e micáceos, também muito finos, e ainda a sua não-pronta reação em presença de HCl, com efervescência. Além disso, contém muito pouca MOC e a fissilidade não é proeminente, como nas lentes de folhelhos negros. Os siltitos e folhelhos cinzas, ricos em MOC, contém lâminas caulínicas (caulinita, quartzo e illita) concordantes com o acamamento (Figura 2.6), em geral em expressiva concentração, quase uma característica marcante dos mesmos. Este mesmo material apresenta-se também como vênulas, que em ambas situações podem conter cristais dispersos ou agregados de pirita e/ou massas de calcopirita. A distribuição da MOC é concordante com o acamamento, e dá a cor cinza escura aos sedimentos e lhes confere fissilidade. São assim correlacionáveis aos *folhelhos negros*, presentes em mineralizações sedimentares manganésíferas mundiais, já propostos por Beauvais (1984).

A seção transversal à mina 1, elaborada a partir da frente de lavra e de alguns furos de sondagem (Figura 2.7) com destaque maior para os furos 167, 382 e 387, mostra camada lenticular próxima ao topo, logo abaixo da crosta laterítica, mais espessa e maior, enquanto as demais parecem menores, porém mais abundantes. A primeira foi exposta e lavrada já nos primeiros anos de exploração, enquanto as demais foram atingidas pelos furos e também pela frente de lavra mais recente. Os primeiros furos de sondagem conduziram à interpretação de uma “camada”, formada por OH-Mn, os bióxidos de Mn, que, segundo o desenho do perfil, teria a conformação ondulada. Ao serem interpretadas como uma camada contínua, as lentes, situadas em patamares distintos, fizeram surgir a falha do furo 5 apresentada em vários trabalhos (Bernadelli & Beisiegel, 1978; Valarelli *et al.*, 1978; Bernadelli, 1982; Beauvais *et al.*, 1987), bem como as duas unidades manganésíferas (Unidade Manganésifera Superior e Unidade Manganésifera Inferior), já que os furos posteriores alcançavam a “camada” em patamares não compatíveis com uma única camada, necessitando da falha e/ou da ondulação. No entanto, a grande camada lenticular próxima ao topo poderia ser interpretada como a

A375-29 de 0502



A375-21 de 0502



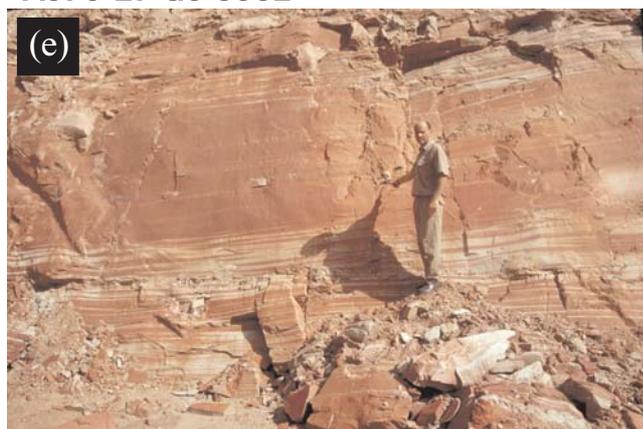
A375-28 de 0502



IMGP3683 - 14/07/05



A375-27 de 0502



A375-21 de 0502



Figura 2.5.1 – Modos de ocorrências dos siltitos vermelhos listrados nas minas de manganês do Azul. (a) Aspectos gerais dos siltitos, de cor branca, amarela e vermelha entre uma camada de OH-Mn no topo e lentes de OH-Mn e MOC na base; (b) Siltitos vermelhos a brancos caulínicos sobrepostos e envolvendo lentes de OH-Mn na base; (c) Siltitos vermelhos bandados estratificados; (d) Detalhe do bandamento (bandas escuras e marrons) ou estratificação de siltitos vermelhos; (e) Detalhe de camadas e/ou bandas vermelhas e brancas alternadas; (f) Microfalhamentos nos siltitos bandados, com vênulas de caulim. (Continua).

IMGP4838 de 040903



IMGP4839 de 040903



IMGP4860 de 040903



IMGP4871 de 040903



IMGP4786 de 030903



IMGP4822 de 030903



Figura 2.5.2 – (Continuação). Modos de ocorrências dos siltitos vermelhos listrados nas minas de manganês do Azul. (g) Siltitos a folhelhos cinza escuros a OH-Mn, laminados; (h) Detalhe das lâminas e camadas de OH-Mn e caulim; (i) Detalhe da transição folhelhos cinzas para siltitos marrons; (j) Siltitos vermelhos com lâminas caulínicas deslocadas e interceptadas por vênulas de OH-Mn; (k) Siltitos cinzas finamente estratificados com MOC e lâminas de sulfetos microfalhados, cujos espaços foram preenchidos com sulfetos e caulim. Furo 387; (l) Contato siltitos a folhelhos cinza escuros com siltitos vermelhos. Furo 387 a 117 m de profundidade.

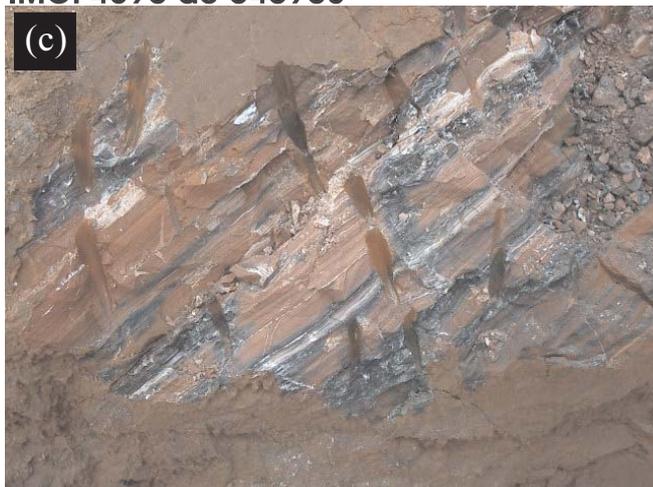
IMGP4865 de 040903



IMGP4897 de 040903



IMGP4890 de 040903



IMGP4906 de 040903



IMGP4882 de 040903



IMGP4900 de 040903



Figura 2.6 – Modos de ocorrência de campo dos siltitos e folhelhos (pelitos) mineralizados ou não a manganês. (a) Transição siltitos a folhelhos cinza escuros a OH-Mn para folhelhos cinza escuros com MOC e siltitos vermelhos na base; (b) Camada ou lente de folhelhos cinza escuros com OH-Mn e MOC intercalados ou envolvidos por siltitos vermelhos no topo e na base; (c) Siltitos vermelhos listrados com siltitos cinza com OH-Mn e MOC, na zona de transição siltitos vermelhos a folhelhos cinza escuros; (d) Detalhe contato folhelho cinza com siltito vermelho; (e) Semelhante ao anterior, em que o siltito vermelho mostra bolsões, lâminas e vênulas de caulim; (f) Folhelho cinza escuro rico em OH-Mn e MOC, mostrando nitidamente a fina estratificação.

Unidade Manganésifera Superior, originalmente com OH-Mn e a seqüência de corpos lenticulares abaixo, dentro do grande pacote de siltitos vermelhos, a *Unidade Manganésifera Inferior*. Também é evidente a presença de siltitos a folhelhos cinzas escuros na secção, identificados como PMR (pelito manganésifero rico) nos furos 44, 177 e 179, sobrepondo a camada de bióxidos, mais precisamente as lentes mencionadas acima. Como apresentado anteriormente, essa transição acontece tanto para o topo como para a base e ainda lateralmente. Lentes diversas também se sobrepoem umas às outras, como se pode deduzir do furo 167 na figura 2.8. Diversos furos de sondagem realizados em várias posições geográficas e topográficas da mina mostram quadro semelhante ao da Figura 2.8. Nos perfis dessa figura os folhelhos cinzas a negros, quando mineralizados, estão indicados pelo símbolo Mn,

normalmente como óxi-hidróxidos. A cota de 460 m, o nível mais baixo (profundo) atingido pela cava em julho de 2005, foi ultrapassada pelos furos 5, 6, 73, 86, 90, 167, 382, 387. Atingiram os siltitos a folhelhos cinzas manganésiferos ou não, que nos furos 5, 382 e 387 podem ser rodocrosíticos, e sempre situados em profundidades distintas, compatíveis com a forma de lentes.

Em termos gerais a seqüência sedimentar portadora das mineralizações manganésiferas primárias (protominério carbonático e minério com OH-Mn) é formada por arenitos finos, mas principalmente por siltitos vermelhos a vermelhos listrados que contém lentes decamétricas de siltitos a folhelhos carbonosos (folhelhos negros), envolvendo folhelhos manganésiferos com OH-Mn ou margas rodocrosíticas. O contato é gradacional tanto na granulometria quanto na quantidade de MOC e

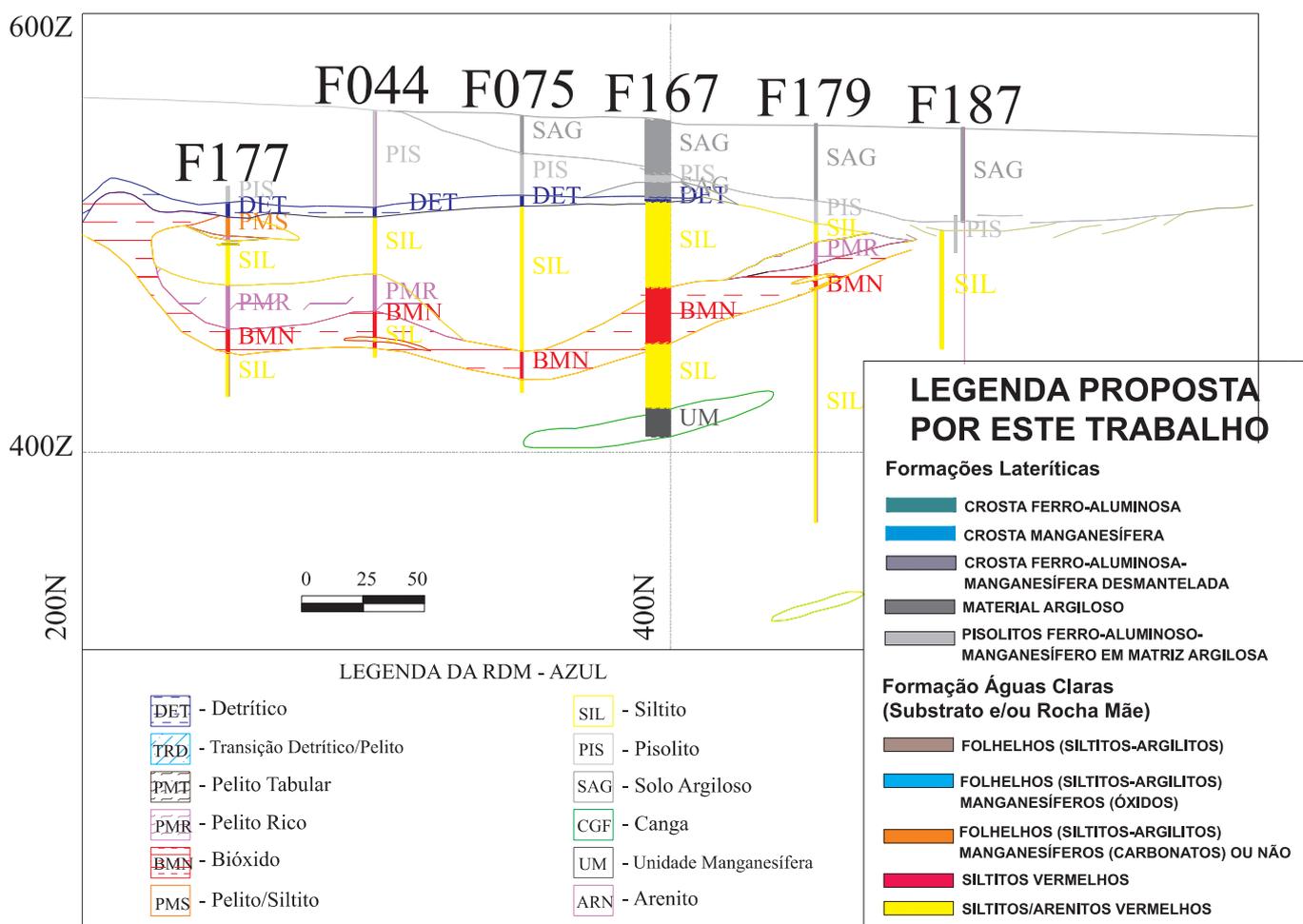


Figura 2.7 – Secção geológica transversal à mina 1 ressaltando a sucessão de rochas sedimentares e a topo-sequência laterítica. A figura apresenta dois grupos de legenda: uma da RDM-Azul, de uso cotidiano na mina pelos seus técnicos e outra proposta por este trabalho, adaptada a sucessão estratigráfica e ao perfil laterítico.

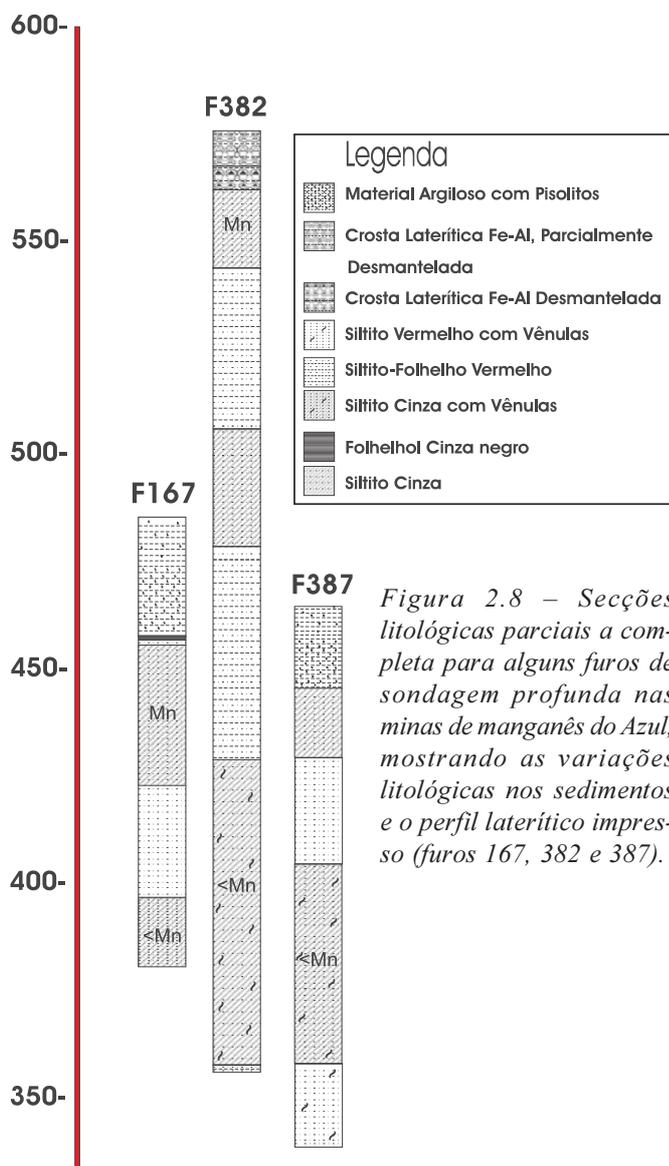


Figura 2.8 – Seções litológicas parciais a completa para alguns furos de sondagem profunda nas minas de manganês do Azul, mostrando as variações litológicas nos sedimentos e o perfil laterítico impresso (furos 167, 382 e 387).



Figura 2.9 – Imagem da principal frente de lavra da mina 1 que mostra toda a topo-seqüência laterítica até o substrato, sobressaindo claramente os corpos de OH-Mn com ou sem MOC, indicados pela cor negra, correspondendo às camadas lenticulares. O perfil laterítico é completo, desde o topo do platô até a base da cava, que aqui está a 490 m, na extremidade leste da mina 1. Ao topo, a crosta seguida pelo horizonte argiloso com a mega-lente de OH-Mn, subjacente a este o horizonte saprolítico estabelecido sobre os siltitos vermelhos e brancos e gradando para folhelhos carbonosos e com OH-Mn.

minerais de OH-Mn. A granulometria fina e a drástica diminuição da MOC favorecem o enriquecimento de OH-Mn. No corpo lenticular com OH-Mn, em nível de detalhe, observa-se ligeira alternância de camadas de folhelhos negros e camadas maciças de OH-Mn (Figura 2.8). Aparentemente o domínio de rodocrosita é acompanhado pela rápida diminuição ou desaparecimento da MOC mesmo na zona de transição ou das camadas subjacentes.

Ao contrário dos trabalhos pioneiros, iniciados ainda com o furo 5, levando à interpretação de duas unidades manganíferas primárias à base de carbonatos de Mn (Bernadelli & Beisiegel, 1978; Valarelli *et al.* 1978), os dados obtidos neste trabalho a partir das observações nas frentes de lavra, que atualmente estão mais profundas, e na descrição dos testemunhos de sondagem, também mais profundos, com cerca de 200 m, e muito mais abundantes, mostram que o protominério, as margas (folhelhos

carbonáticos com rodocrosita), constituem lentes e camadas delgadas alojadas nos siltitos vermelhos listrados. A observação não parece restrita apenas às margas rodocrosíticas, mas cabe também no caso dos OH-Mn, que na zona inferior da cava atual e nos furos de sondagem mais profundos não apresentam qualquer evidência de origem a partir da lateritização.

O Perfil Laterítico

As três frentes de lavra de manganês do Azul encontram-se sobre paisagem laterítica típica, correspondente a perfil *laterítico maturo* quimicamente, completo a truncado erosivo (Figura 2.9), cuja profundidade não alcança 100m. É constituído dos seguintes horizontes (Figura 2.10): A crosta laterítica com manifestações bauxíticas; o horizonte argiloso; o horizonte argiloso saprolítico e finalmente o substrato, que podem representar as rochas-mães do perfil laterítico sobreposto. A topo-seqüência está parcial a totalmente obliterada por materiais detríticos, com destaque para os materiais argilosos com esferolitos.

Os Minerais do Perfil Laterítico

Com a finalidade de facilitar as descrições morfológicas dos diferentes horizontes, serão apresentados a seguir os

minerais identificados nos mesmos, cuja descrição detalhada será feita nos próximos itens. Entre os minerais identificados no perfil laterítico (Tabela 2.1), destacam-se os minerais de manganês, dominados por OH-Mn, tais como criptomelana, todorokita, hollandita, pirolusita, litioforita, nsutita, e ainda hematita e goethita, gibbsita, caulinita, illita e/ou muscovita, em parte esmectita, quartzo e anatásio. Vários destes minerais são de formação laterítica, como gibbsita, litioforita, pirolusita, hollandita (?), parte da criptomelana, anatásio, maioria da caulinita, goethita e hematita. Outros são herdados dos sedimentos como criptomelana, quartzo, muscovita, hematita, illita, esmectita. Ainda outros são exclusivos dos sedimentos, a saber: pirita, calcopirita, clinocloro, rodocrosita e illita-mica e estilpnomelana (?).

Caracterização dos Horizontes

A Crosta Laterítica com manifestações de bauxita

As atuais frentes de lavra e os furos de sondagem deixam claro que sobre a seqüência sedimentar descrita anteriormente se estabeleceu espesso perfil laterítico maturo, presente em grande parte da região serrana de Carajás. O perfil se apresenta no topo do platô principal e sua borda, à altitude de 550 a 600 m por típica *crosta laterítica*, cavernosa, brechóide e mesmo maciça, formada por hematita, goethita, gibbsita, caulinita, podendo incluir OH-Mn (criptomelana, litioforita, hollandita, pirolusita, nsutita), de cor marrom avermelhada a cinza preto dado pelos OH-Mn. As crostas ocorrem tanto como materiais contínuos como em

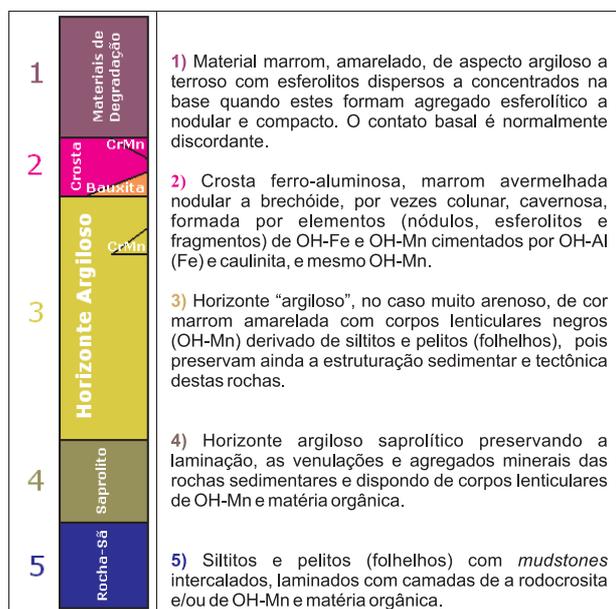


Figura 2.10 – Perfil laterítico composto simplificado para as minas de manganês do Azul.

blocos decamétricos a métricos, descrevendo o horizonte de topo. Na superfície do terreno encontram-se parcialmente transformadas em material amarelo amarronzado, de aspecto terroso a argiloso, contendo fragmentos e nódulos reliquias das crostas e constituindo *solos residuais ou depósitos de talus*, ou ainda materiais terrosos a argilosos marrons a amarelos com esferolitos. Sobre estes se desenvolve a pujante floresta tropical local. O horizonte *bauxítico* a gibbsita se apresenta mais restritamente sob as crostas ou constituindo fácies destas. Seu desenvolvimento mais restrito parece re-

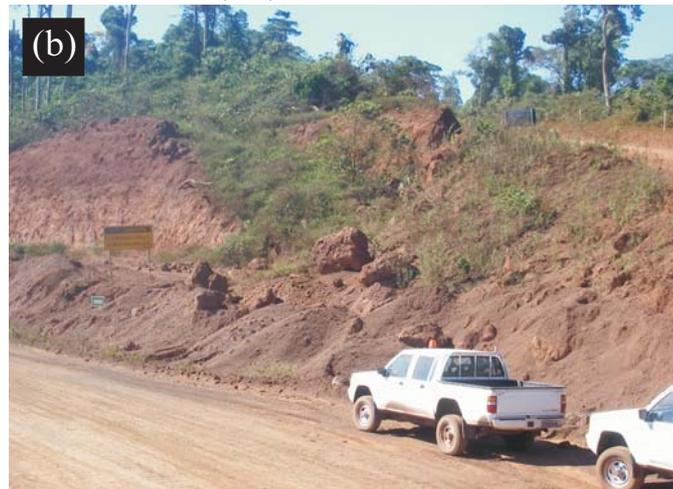
Tabela 2.1 – Minerais identificados nas minas de Mn do Azul.

| Mineral | Fórmula Química | Mineral | Fórmula Química |
|----------------------|--|------------------|---|
| Criptomelana | $K(Mn^{+4}, Mn^{+2})_8O_{16}$ | Pirita | FeS_2 |
| Hollandita | $Ba(Mn^{+4}, Mn^{+2})_8O_{16}$ | Calcopirita | $CuFeS_2$ |
| Litioforita | $(Al, Li)Mn^{+4}O_2(OH)_2$ | Pentlandita | $(Fe, Ni)_9S_8$ |
| Nsutita | $\alpha-MnO_2$ | Covellita | CuS |
| Todorokita | $(Mn^{+2}, Ca, Mg)Mn_3^{+4}O_7H_2O$ | Calcocita | Cu_2S |
| Pirolusita | $Mn^{+4}O_2$ | Illita/Muscovita | $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH, F)_2$ |
| Rodocrosita | $Mn^{+2}CO_3$ | Esmectita | $(Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2nH_2O$ |
| Siderita | $FeCO_3$ | Microclineo | $KAlSi_3O_8$ |
| Calcita | $CaCO_3$ | Quartzo | SiO_2 |
| Espessartita | $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ | Estilpnomelana | $K(Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al)_{10}O_{30}(OH)_{12}$ |
| Clinocloro-Chamosita | $(Mn, Fe, Mg, Al)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$ | Anatásio | TiO_2 |
| Goethita | $\alpha-Fe^{+3}O(OH)$ | Zircão | $Zr[SiO_4]$ |
| Hematita | Fe_2O_3 | Ilmenita | $FeTiO_3$ |
| Caulinita | $Al[Si_4O_{10}](OH)_8$ | Monazita | $(Ce, La, Nd, Th)PO_4$ |

IMGP3866 - 15/07/05



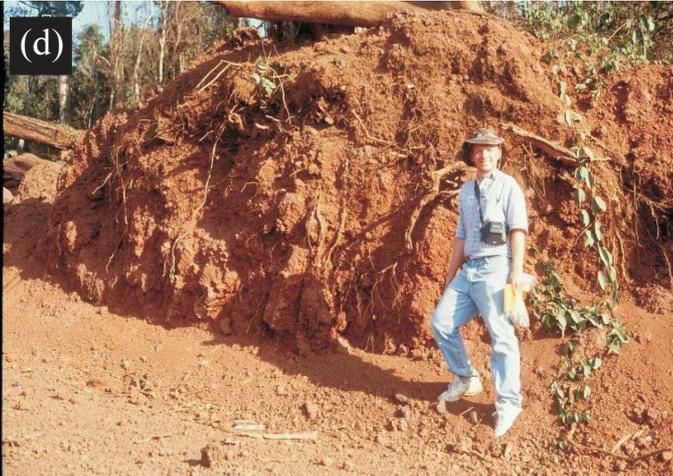
IMGP3874 - 15/07/05



IMGP3875 - 15/07/05



A282-29 de 0895



A376-11 de 0401



A 376-12 de 0502



Figura 2.11 – Diferentes aspectos do modo de ocorrência das crostas lateríticas nas minas do Azul. (a) Exposição de perfil laterítico na borda norte do platô Azul, mostrando (cava em 2002), a sucessão de horizontes, sobressaindo-se a crosta no topo, uma faixa rica em OH-Mn (a lente superior) dentro do horizonte argiloso, da mesma forma siltitos vermelhos a brancos com lentes escuras de OH-Mn; (b) Detalhe da crosta; (c) A crosta parcialmente desmantelada; (d) A crosta com aspecto colunar; (e) A crosta transformada em material nodular a pisolítico; (f) Crosta manganésifera.

fletir o domínio de quartzo-arenitos e siltitos quartzosos na seqüência sedimentar pré-laterítica.

Sob o microscópio óptico as crostas lateríticas se apresentam criptocristalinas a microcristalinas (Figura 2.12), com aspecto de massas compactas ou esferoidal, pisolítica e ainda tipo brecha. Massa criptocristalina, constituída de hematita e goethita, encontra-se infiltrada por gibbsita microcristalina, seja na forma de vênulas descrevendo o aspecto brechóide, seja como cimento de esferolitos de hematita e goethita. Localmente gibbsita intercrescida com caulinita criptocristalina, além de hematita e goethita subordinadas, constituem parcela da crosta aluminosa, formando verdadeiras bauxitas. Manchas negras de OH-Mn, como vênulas, infiltram-se nessas crostas. São representadas principalmente por litioforita, todorokita, hollandita, por vezes criptomelana. Fragmentos de material manganêsífero de oxi-hidróxidos compactos e formados principalmente por criptomelana são também comuns nas crostas lateríticas, fortes indicadores da mineralização manganêsífera subjacente e adjacente.

Crostas Manganêsíferas

Além das crostas lateríticas típicas, ocorrem ainda nas frentes de lavra e nas encostas do platô do Azul, exposições de crostas fundamentalmente manganêsíferas, representadas por OH-Mn, quase sempre maciços, densos

e duros, guardando muitas vezes a estratificação da rocha sedimentar (Figura 2.13), mas também com feições de deposição coloidal típica, com estruturas coliformes. Representam o encouraçamento de camadas já previamente enriquecidas em Mn ou próximas a fontes de Mn e que alojaram as soluções altamente enriquecidas sob condições oxidantes, fato muito comum em ambiente supergênico, principalmente quando há mineralizações de manganês. O encouraçamento se apresenta como antigo, pois que já foi em parte atingido pela formação de gibbsita venular (Figuras 2.12 e 2.13), dando aspecto brechóide a crosta.

Provavelmente trata-se de *encouraçamento* com OH-Mn a partir de protominérios e lentes locais, ou seja, intra-lentes. Encouraçamentos manganêsíferos de óxi-hidróxidos são freqüentes em perfis lateríticos no topo do horizonte saprolítico. Tudo indica que as crostas manganêsíferas compactas representam o topo do saprolito do paleo-perfil laterítico, e que ao serem expostas e sub-expostas à superfície pela erosão, ou seja, truncadas, deram origem ao material detrítico (MD), da mesma forma como outros materiais detríticos, melhor denominados de colúvios, se originaram das outras rochas também expostas. Os MD têm importância apenas local, por conta da sua riqueza em Mn. Imagens de MEV (Figura 2.14) mostram a complexidade de sua micromorfologia e associação mineral.

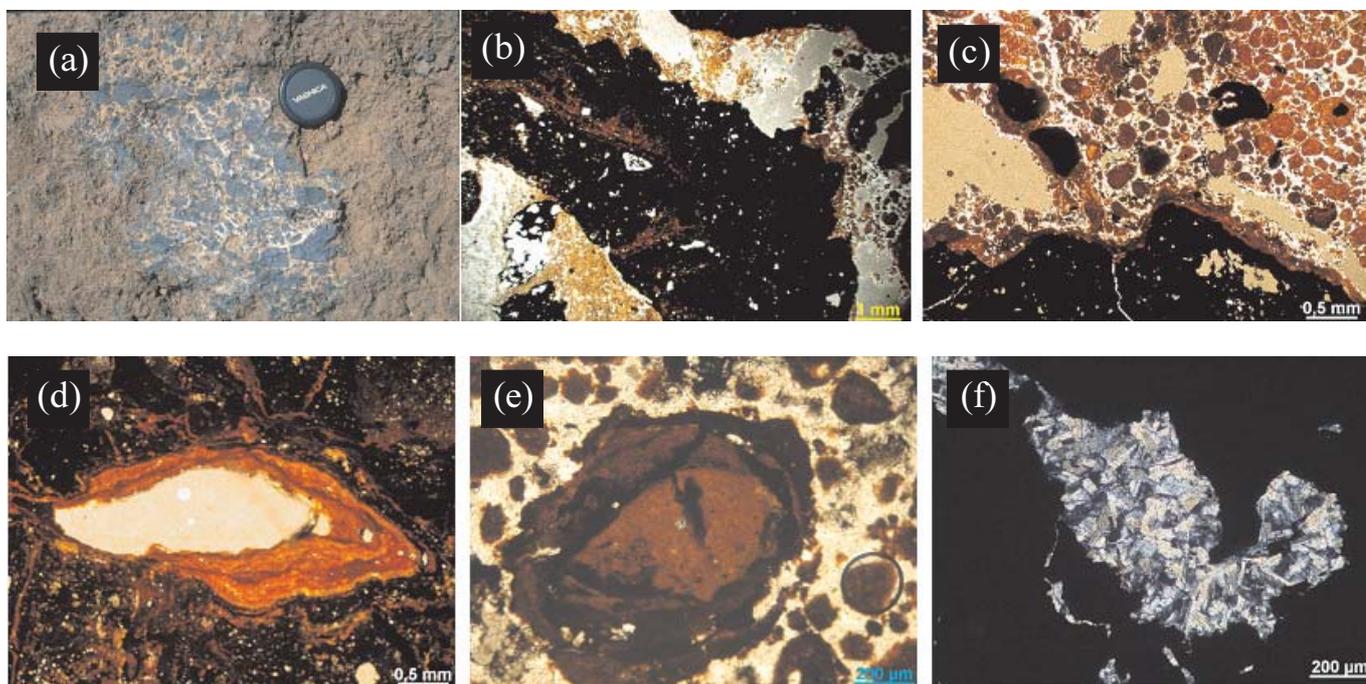


Figura 2.12 – Aspectos texturais das crostas lateríticas com bolsões bauxíticos sob o microscópio óptico nas minas do Azul. (a) Crosta manganêsífera microvenulada com gibbsita; (b) Plasma hematítico circundado por gibbsítico; (c) Aspecto microbrechóide dado por bordas, cimento e vênulas de gibbsita cristalina; (d) Cutans goethíticos em plasma hematítico; (e) Nódulo goethítico em crosta nodular com cimento gibbsítico; (f) Cavidade preenchida com gibbsita macrocristalina polissintética.

A376-14 de 0502



A376-17 de 0502



IMGP4988 de 050903



IMGP4980 de 050903



IMGP3883 de 150705



IMGP4982 de 050903

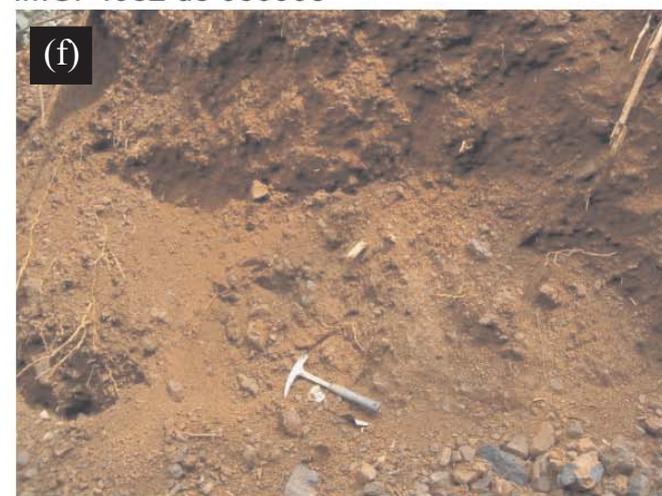


Figura 2.13 – Modos de ocorrência de crostas manganésíferas. (a) Crosta manganésífera maciça com ligeira estratificação plano-paralela; (b) Crosta manganésífera de aspecto brechóide, Mina 3; (c) Ocupando o acamamento da rocha silteica; (d) Relictos de crosta manganésífera em depósitos e talus; (e) Material detrítico derivado de crosta manganésífera; (f) Detalhe do material manganésífero detrítico.

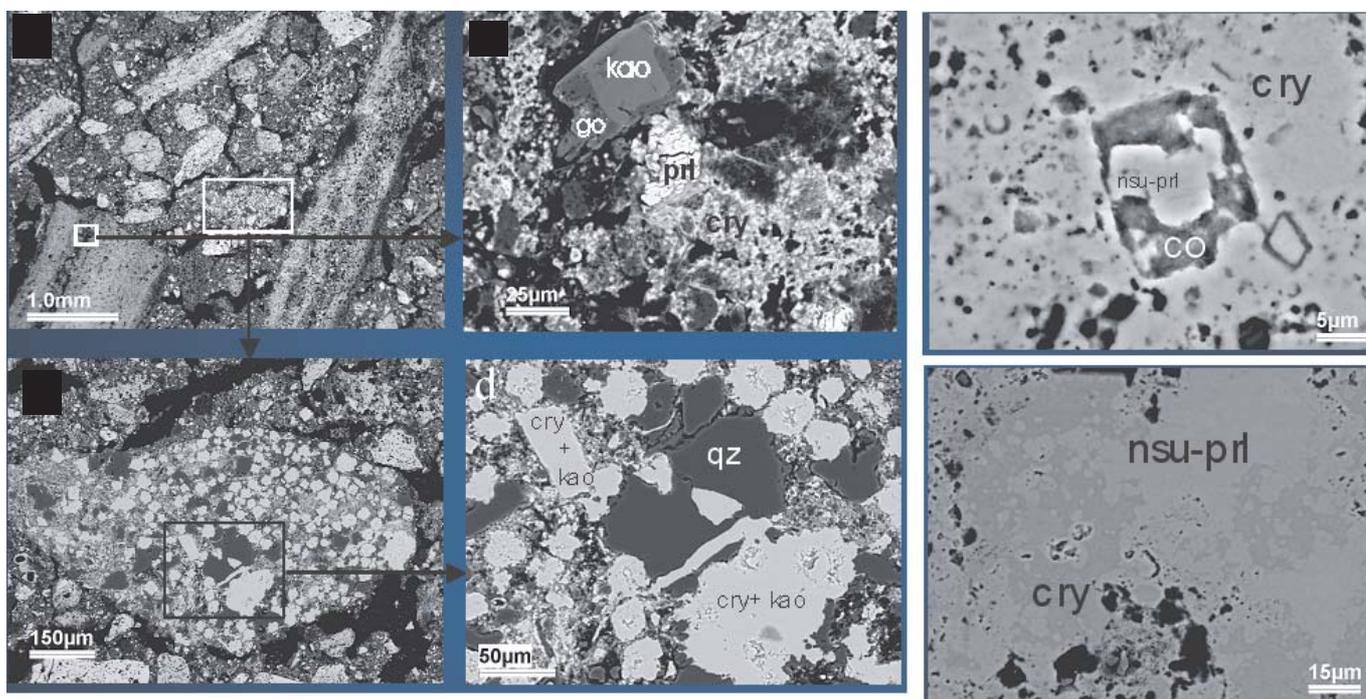


Figura 2.14 – Aspectos micromorfológicos dos componentes das crostas manganíferas sob o microscópio eletrônico de varredura.

Horizonte argiloso com lentes decamétricas mineralizadas em OH-Mn

Sob as crostas lateríticas, encontra-se espesso pacote de material amarelado, por vezes marrom a marrom avermelhado, parcialmente desagregado, de aspecto argiloso a silto-argiloso, que em profundidade preserva perfeitamente as estruturas das rochas quartzo-areníticas e pelíticas, principalmente os siltitos vermelhos e brancos com suas lentes negras de OH-Mn. Este nível é comparável com o *horizonte argiloso* de perfis lateríticos, incluindo espessa zona saprolítica. A zona superior deste horizonte corresponderia ao que comumente se denomina de *zona mosqueada*, que, pelo domínio de OH-Mn, se manifesta na mina de forma restrita, e a zona inferior correspondendo ao *saprolito* clássico. O padrão listrado e microfaldado dos siltitos nada tem a ver com o mosqueamento, sendo feição primária herdada. Por outro lado, os siltitos argilosos vermelhos a amarelados, manchados podem representar o mosqueamento. Dada a natureza quartzo-arenítica siltítica (quartzo e argilominerais) do *bedrock* (substrato) e/ou da *rocha-mãe*, a zona saprolítica confunde-se parcialmente com as rochas sedimentares não alteradas, primárias. Os critérios mais seguros são a presença de muita MOC apenas nas rochas e/ou mesmo traços de sulfetos e carbonatos. Dos perfis de sondagens estudados (Figura 2.8), somente o furo 382 se estendeu da antiga superfície do terreno (cerca de 600 m de altitude) até além da cota de 350 m, atravessando todo perfil laterítico e adentrando *bedrock*



Figura 2.15 – Aspecto geral da frente de lavra da mina 1 em 2004, mostrando o domínio de siltitos vermelhos envolvendo vários corpos lenticulares de cor negra e constituídos normalmente de OH-Mn, ou seja minério de manganês, correspondendo em primeiro plano ao horizonte argiloso saprolítico e mesmo à rocha-mãe e bed-rock e aos fundos para o topo o horizonte argiloso mosqueado com a megalente de OH-Mn e finalmente a crosta laterítica. O fundo da cava estava à cota mínima de 472 m.

e rocha-mãe. Esse furo confirma o domínio das crostas lateríticas típicas, sejam a OH-FeAl ou OH-FeAlMn e as zonas bauxíticas na cota de 550 a 600 m, principalmente. Da superfície do platô até a base da cava (2004), que atingia a cota de 472 m (Figura 2.15), verifica-se sucessão lateral e vertical de corpos lenticulares constituídos por OH-Mn imersos em siltitos vermelhos, deixando clara a forma de ocorrência da mineralização primária (protominério), como camadas lenticulares sedimentares

decamétricas que foram em parte afetadas pela lateritização na zona do horizonte argiloso.

Desta forma, em termos genéticos distingue-se zona de minério de OH-Mn com forma lenticular decamétrica desenvolvida no horizonte argiloso de topo, o mosqueado, e zona de minério de OH-Mn também de forma lenticular decamétrica desenvolvida no horizonte argiloso inferior, o saprolito, que se confunde parcialmente com a própria rocha-mãe e *bed-rock* em geral.

Produtos de Intemperismo, Erosão e Coluvionamento

Estão representados por *solos concrecionários* marrons amarelados, *material argiloso com esferolitos (pisolitos)* em matriz amarela argilosa e *depósitos de talus* constituídos pelos diversos materiais, principalmente do perfil laterítico, com destaque para aqueles com fragmentos de OH-Mn, conhecidos no Azul como *material detrítico (MD)*. Os solos concrecionários e o material detrítico serão tratados nos próximos tópicos como parte da crosta laterítica, que inclui também as crostas manganíferas, enquanto os materiais argilosos e argilosos com esferolitos, bem como os de talus, constituirão simplesmente materiais argilosos com esferolitos.

Os *solos concrecionários* encontram-se principalmente no topo e na meia encosta do platô, derivados das crostas lateríticas que sustentam o platô e ao mesmo tempo favorecem a atual cobertura florestal, que também protege o platô (Figura 2.11 c). Esses solos podem conter fragmentos de OH-Mn. Quando alóctones, confundem-se com os depósitos de talus e/ou material detrítico (MD).

Material argiloso com esferolitos é encontrado nas encostas, entre 500 e 530 m de altitude; a superfície do terreno é formada por espesso pacote de *material argiloso a terroso*, incoeso, amarelo, estando assinalado nos mapas e perfis (Figura 2.7) por SAG (pensado como abreviatura de solo argiloso), que normalmente contém proporções variadas de fragmentos centimétricos e *esferolitos de OH-Mn e/ou de OH-MnFeAl*. É encontrado em toda área da mina, capeando as demais rochas, ou seja, constituindo o material de superfície. Pode atingir dezenas de metros, mas em geral está abaixo de 6m de espessura, a exemplo da mina 1. Chegam a formar aglomerados métricos, coesos, constituídos basicamente de esferolitos. Este material pode ser correlacionado com latossolo. O contato com os esferolitos é gradual. O furo 578 realizado em 2005 na mina 1 atravessou 85 m desse material, com a primeira metade dominada por material argiloso e a segunda com aumento continuado dos pisolitos até o contato com as camadas de OH-Mn e siltitos.

Por conta da erosão de grande parte da seção laterítica ou das camadas sobrepostas, trazendo-as para mais perto da superfície, os encouraçamentos manganíferos, ou

simplesmente crostas manganíferas, bem como as crostas lateríticas típicas e os corpos lenticulares de OH-Mn, foram palco de intenso intemperismo químico, pois convergem gradualmente em direção ao topo para fragmentos angulosos a sub-arredondados do mesmo material, imersos em matriz marrom a marrom amarelada de aspecto argiloso. Ao mesmo tempo, estes fragmentos vão sendo acrescidos de películas concêntricas de OH-Mn e/ou OH-MnFe e/ou OH-FeAl, além de caulinita. Após sua formação, observa-se acúmulo de fragmentos e esferolitos grandes na base, passando a se diluir na matriz amarela argilosa em direção ao topo do material argiloso a terroso amarelo, ao mesmo tempo em que diminuem de tamanho e também no conteúdo de Mn. Constituem, assim, a camada de *esferolitos*, mais conhecidos como *pisolitos*, acumulados por gravidade nas cavidades, como paleo-canais e depressões do paleo-relevo.

À vista de sua extensão e espessura relativamente grandes e de sua forte relação com a paleo-paisagem, estes materiais são abordados de forma mais detalhada nos próximos tópicos.

Os *depósitos de talus* encontram-se, como era de esperar, nas encostas e paleo-encostas, neste último caso sobrepostos por esferolitos e material argiloso, e são formados por fragmentos principalmente dos materiais mais coesos, compactos e duros do perfil, como as crostas lateríticas, as bauxitas e principalmente massas de OH-Mn encouraçadas, ressaltando sua abundância nas minas. Corpos paleo-coluviários ricos em Mn têm sido procurados, encontrados e lavrados, tendo em vista sua derivação do encouraçamento, que tem a capacidade de promover grande enriquecimento, como o fazem as crostas lateríticas. Furos de sondagem, como 44, 75, 167 e 177 atingiram estes materiais na cota de 500 a 520 m, sendo denominados pelos técnicos da mina do Azul de *material detrítico (MD)*.

Veios, vênulas e bolsões, principalmente de OH-Mn, são frequentes nos horizontes do perfil laterítico, especialmente no horizonte argiloso. São corpos milimétricos a centimétricos de espessura, com dezenas de centímetros de comprimento, lineares a não lineares, seccionando o acamamento e também bandas de caulim, MOC e OH-Mn. Além de serem constituídos de OH-Mn, também apresentam caulim, OH-Fe marrons e relictos de sulfetos e ainda, quartzo, que por vezes ocuparam o espaço de carbonatos, denunciados pelos contornos romboédricos. O padrão dos veios encontrados neste horizonte e por vezes nas crostas é de rochas sedimentares, quando são mais caulínicos, quartzosos, piritosos e até rodocrosíticos. OH-Mn também foram observados. Concreções centimétricas de OH-Mn ocorrem com frequência nos siltitos vermelhos e em infiltrações nos planos de acamamento a partir da parede de veios. Grandes

bolsões métricos, compactos a duros, maciços a estratificados e deformados localmente, ocorrem de vez em quando e apresentam muitas vênulas de material OH-Mn cristalino. Estão claramente relacionados a zonas de intenso fraturamento e falhamento (Figura 6b).

Materiais Manganésíferos

Trata-se dos materiais mais ricos em manganês. Ocorrem na parte central da mina na forma de lentes de até 1,5m de espessura, intercaladas nos pelitos, guardando sua estruturação sedimentar original. Os técnicos da Mina os classificam como granulares, pulverulentos, placóides e como blocos maciços.

O material manganésífero, constituído basicamente de OH-Mn, é granular e ocorre como grãos finos, angulosos, cor cinza-preta, sub-milimétricos, friáveis e/ou duros, distribuídos em matriz manganésifera pulverulenta fina de igual composição, podendo conter ainda algum quartzo e caulinita, por vezes muscovita e OH-Fe. Representam distintas camadas ou horizontes na mina, correspondendo a materiais sedimentares, por vezes parcialmente intemperizados a intemperizados, mas ainda no horizonte argiloso.

O material pulverulento é constituído por alternâncias de finas lâminas de OH-Mn com argilo-minerais. É friável e grada para pelito manganésífero, em geral com baixo teor.

O material placóide ou plaquetas ocorre como plaquetas de 10 a 20cm de comprimento, cinza preta, duro, denso, de difícil desagregação. Exibe laminação plano-paralela, com inúmeras fraturas perpendiculares ao acamamento. Essas fraturas geralmente estão preenchidas por OH-Mn (pirolusita). Algumas cavidades foram preenchidas com cristaltos de OH-Mn (criptomelana e pirolusita) e argilominerais, constituindo micro-geodos. São encontrados nos diferentes níveis do horizonte argiloso.

Os *blocos maciços* ocorrem em fragmentos de diversos tamanhos, podendo alcançar até 4 metros. Apresentam cor cinza preta, são bastante duros, densos e por vezes com cavidades revestidas com cristaltos de OH-Mn. Caracterizam-se por incipiente laminação plano-paralela e predominância de estruturas coliformes (botrioidal e mamilares). Localmente, pelas leves variações nas tonalidades cinza pretas das laminações, ocorrem substituições entre os diferentes minerais de manganês, o que sugere posterior remobilização desses minerais. Nas cavidades das estruturas coliformes observa-se também a substituição concêntrica alternada entre os minerais de manganês.

III. CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E QUÍMICA DA SEQUÊNCIA SEDIMENTAR

Aspectos Petrográficos

Amostras de rochas da seqüência sedimentar em lâminas delgadas sob microscópio ótico com luz transmitida mostraram as seguintes fácies na área das minas do Azul e adjacências: a) arenito fino a siltito; b) siltito laminado a folhelho manganésífero e/ou com MOC (pelito); c) argilito laminado manganésífero e/ou com MOC; d) siltito-argilito manganésífero carbonático: *mudstones* manganésíferos; e) pelito (siltito-argilito finamente estratificado); f) pelito (folhelho) manganésífero; g) pelito não manganésífero; h) *arenito* fino impregnado; i) silexito com estruturas orgânicas.

Siltito laminado a folhelho manganésífero (Figura 3.1) – Esta fácies é constituída essencialmente por grãos de quartzo e, subordinadamente, muscovita, cimentados por OH-Mn e caulinita. Os grãos de quartzo são finos a muito finos, subangulares e com boa seleção, enquanto os de muscovita ocorrem de forma dispersa e estão parcialmente alterados para caulinita. O cimento é representado por OH-Mn e caulinita. A relação entre OH-Mn e caulinita é difusa, em que núcleos isolados de caulinita são comumente bordejados pelos primeiros. O siltito laminado manganésífero caracteriza-se por estruturação plano-paralela dada por faixas claras e escuras, alternadas, compostas por OH-Mn e/ou MOC. As faixas claras são representadas por grãos de quartzo, muscovita e caulinita, enquanto nas escuras, além do quartzo e muscovita, ocorrem em abundância OH-Mn e/ou MOC. Também se caracterizam pela ocorrência de micro-fraturas e/ou estruturas pseudobrechóides. As micro-fraturas são comumente retilíneas e estão preenchidos por quartzo e caulinita, por vezes sulfetos.

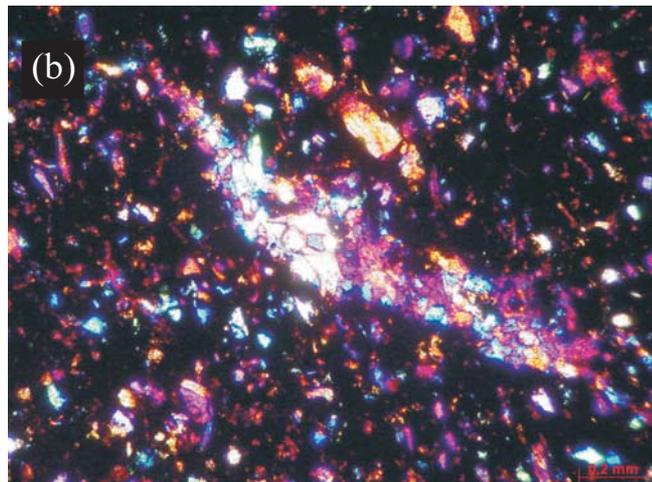
Argilito laminado manganésífero (Figura 3.1) – Esta fácies é caracterizada por intercalações de OH-Mn e/ou MOC (partes escuras) e faixas de caulinita (tons claros), formando interacamamento como estrutura principal. Além do arranjo acamadado, as faixas de OH-Mn e/ou MOC e caulinita apresentam relação difusa, caracterizada por núcleos de caulinita envolvidos por óxidos de manganês. Grãos de quartzo ocorrem raramente.

Argilito a siltito manganésífero carbonático (Figura 3.2) – Esta fácies é formada por grãos de quartzo em ampla matriz carbonática e argilosa, com relação difusa entre as suas fases mineralógicas e também pontos de nucleação de OH-Mn. Os grãos de quartzo são finos a muito finos, subangulosos e apresentam boa seleção. A matriz é caracterizada pelo impregnado suave de material escuro, que pode ser OH-Mn ou MOC (partes escuras)

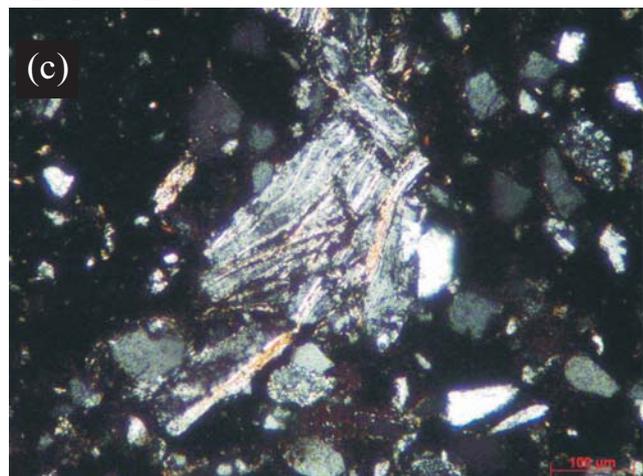
AZUL 12-1



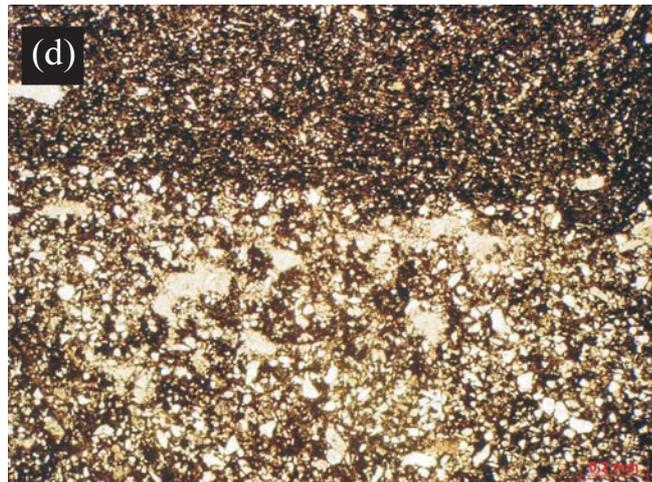
AZUL 12-4



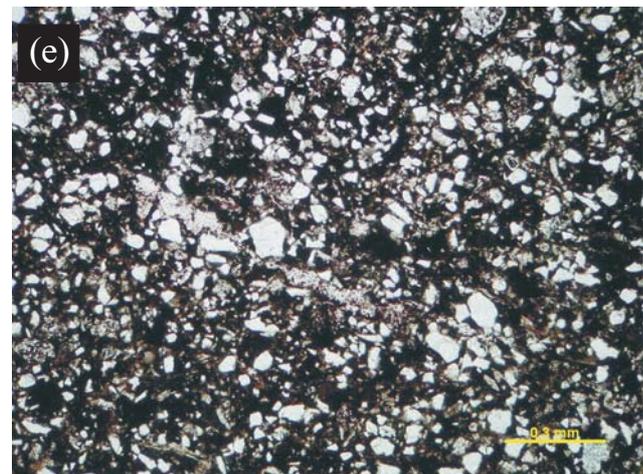
AZUL 13-2



AZUL 13-3



AZUL 13-5



AZUL 13-6

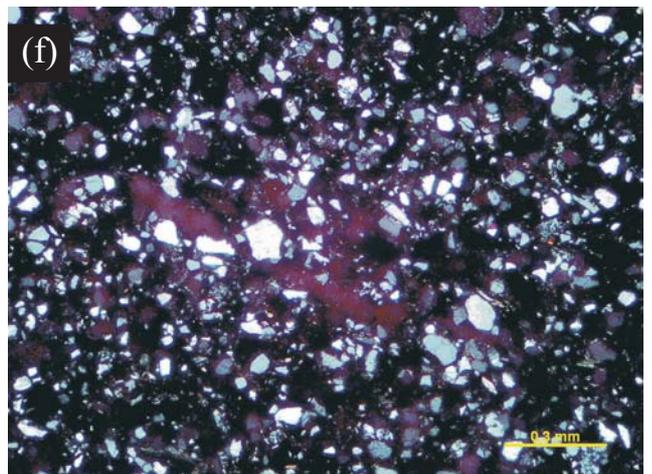
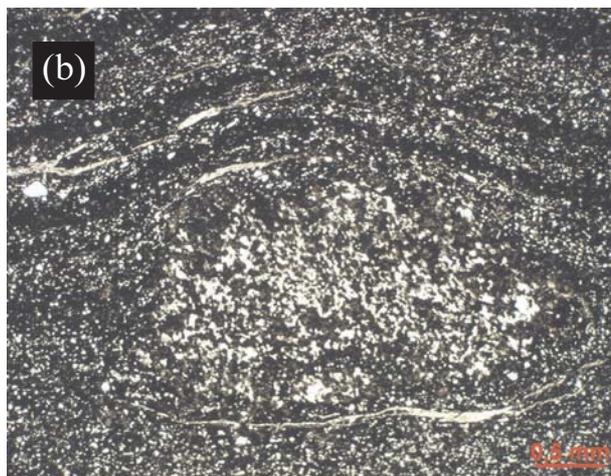


Figura 3.1 – Aspectos mineralógicos e microtexturais dos siltitos estratificados. (a) Siltito carbonoso com vênulas de quartzo; (b) Quartzo recristalizado em bolsões ou vênulas; (c) Plaquetas de muscovita caulinizada parcialmente; (d) Arenito fino a siltito impregnado com OH-Fe; (e) e (f) Arenito sob nicóis // e #, respectivamente.

AZUL 89-1



AZUL 89-10



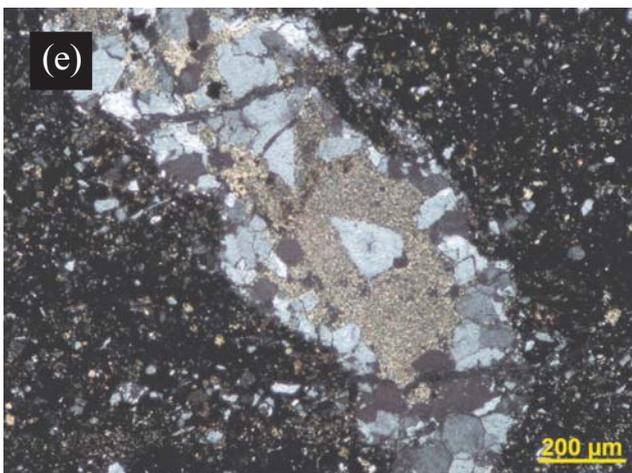
AZUL 89-11



AZUL 89-4



AZUL 89-7



AZUL 89-14

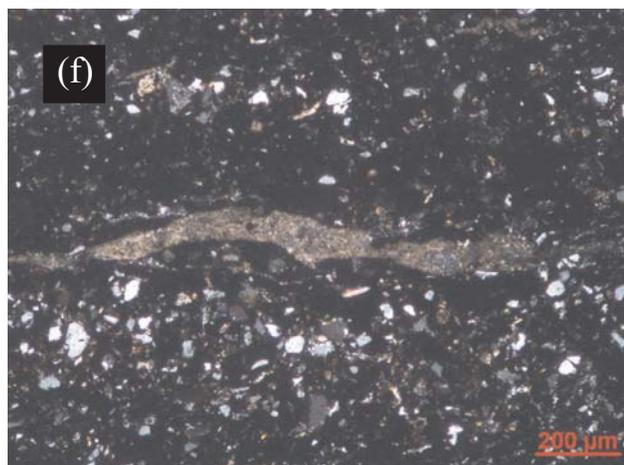


Figura 3.2 – Aspectos mineralógicos e microtexturais dos pelitos com rodocrosita. (a) Detalhe da estratificação dada pela alternância de MOC com lâminas de muscovita, rodocrosita, quartzo, caulinita e feldspato; (b) Ligeira recrystalização de rodocrosita; (c) Formação de rodocrosita microcristalina no contato com MOC; (d) Vênula de quartzo na borda e rodocrosita microcristalina no núcleo seccionando a estratificação; (e) Detalhe do interior da vênula de quartzo e rodocrosita; (f) Detalhe dos grãos de quartzo, muscovita e cristais de rodocrosita.

com relação difusa com as partes claras representadas por caulinita e carbonatos. Esta fácies raramente apresenta estruturação acamadada.

Mudstone manganífero (Figura 3.2) – Esta microfácies consiste em *mudstone* (de acordo com a classificação de Dunham, 1962 in Adams *et. al.*, 1987). Compõem-se essencialmente de massa micrítica muito fina com grãos de quartzo sub-arredondados, micrométricos dispersos e pontuações de OH-Mn. Veios de quartzo preenchendo microfissuras ocorrem formando arranjos caóticos na massa micrítica. Os veios de quartzo são constituídos por cristais submilimétricos a micrométricos, inequigranulares e com extinção ondulante. Associados aos veios ocorrem carbonatos ora dispersos em meio aos cristais de quartzo (rodocrosita e menos freqüentemente dolomita), ora preenchem microfissuras. Localmente, também ocorre massa com coloração cinza-escuro constituída, possivelmente, de material manganífero, na qual freqüentemente ocorrem grãos de quartzo dispersos de dimensões submilimétricas a micrométricas, com formas sub-angulosas a sub-arredondadas.

Pelito (siltito-argilito finamente estratificado), Figura 3.2) – É formado por bandas submilimétricas (0,5 a 0,8 mm de espessura), constituídos por grãos de quartzo, cristais de rodocrosita, illita-muscovita, caulinita e mesmo clorita, por vezes microclínio, alternadas com bandas mais delgadas (0,2 a 0,4 mm), mais ricas em rodocrosita, e que na amostra estudada (**Azul 89**, furo 6, profundidade 136 m, correspondendo à cota de 450 m), mostra também a presença de OH-Mn, com evidência textural indicadora de origem também sedimentar. No mesmo furo, à profundidade menor, de 128 m, rodocrosita e OH-Mn (criptomelana) foram identificados por DRX. A presença conjunta de rodocrosita e OH-Mn não é critério para afirmar que os OH-Mn sejam produtos de intemperismo dos carbonatos. Isto pode ser confirmado pela presença de vênulas de quartzo e rodocrosita seccionando estas rochas, e neste caso não se observa presença de OH-Mn. Quartzo se apresenta em grãos finos, angulosos, ao lado de cristalitos muito mais finos de rodocrosita e minerais de argila, bem como cristalitos cúbicos de pirita. Cristais sub-milimétricos de rodocrosita e quartzo são encontrados apenas nas vênulas.

Pelito (folhelho) manganífero (Figura 3.2) – Esta microfácies compõe-se essencialmente de massa micrítica muito fina com grãos micrométricos de quartzo sub-arredondados, dispersos e pontuações de oxi-hidróxidos de manganês. Veios de quartzo preenchendo microfissuras ocorrem formando arranjos caóticos na massa micrítica. Os veios de quartzo são constituídos por cristais submilimétricos a micrométricos, inequigranulares e com extinção ondulante. Associada a estes veios encontra-se rodocrosita, ora dispersa em meio aos cristais de quartzo,

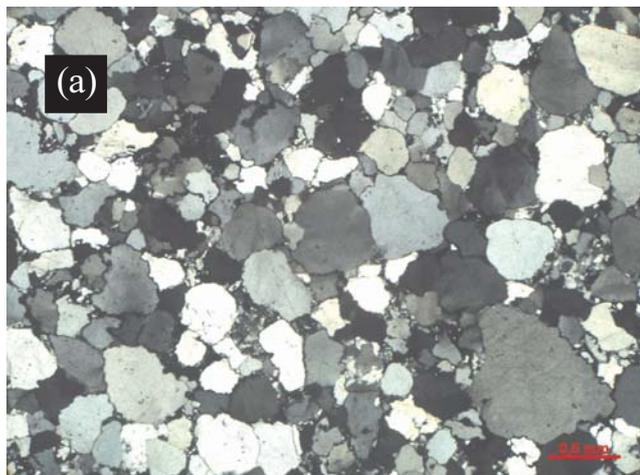
ora nos contatos entre os veios e a massa micrítica. Vênulas de rodocrosita e de óxi-hidróxidos de Mn ocorrem preenchendo microfissuras. Localmente, ocorre massa com coloração cinza-escuro constituída, possivelmente, de OH-Mn, onde se encontram freqüentemente dispersos grãos de quartzo de dimensões submilimétricas a micrométricas, com formas subangulosas a subarredondadas.

Arenito fino impregnado (Figura 3.3) – Arenito com coloração branco-acinzentada, arcabouço aberto, constituído por grãos de quartzo envolvidos em matriz argilosa, cimentados por OH-Fe e OH-Mn. A textura geral constitui-se de amplas variações, desde arranjos maciços até laminações plano-paralelas. Os grãos de quartzo são angulosos a subarredondados, com tamanhos variando de 0,2 mm a 5 mm, os quais exibem extinção reta, majoritariamente, e extinção ondulante, subordinadamente. Em geral mostram-se monocristalinos, ocorrendo grãos policristalinos com menor freqüência. Feições de dissolução, como bordas irregulares e golfos, também são freqüentes. Inclusões de turmalina ocorrem raramente em alguns grãos de quartzo. A matriz (*pseudo-matriz*), com abundância variável, às vezes ausente, compõe-se essencialmente de caulinita; entretanto, grãos de muscovita bastante alterados são freqüentes e dispersos. Ocorrem, ainda, *booklets* de caulinita e raros grãos micrométricos de feldspato. Nas faixas em que o arenito se mostra laminado, OH-Fe ou OH-Mn ocorrem acompanhando a laminação e nas faixas em que a textura é maciça ocorrem dispersos na matriz. Localmente ocorrem veios de quartzo discordantes e concordantes com o acamamento, mostrando cristais submilimétricos a micrométricos, cimentados por OH-Mn. Associada a estes veios e por vezes preenchendo fissuras concordantes e discordantes com o acamamento, encontra-se rodocrosita com textura micrítica e, localmente, pontuações de OH-Mn com textura em cárie.

Quantificação volumétrica visual dos principais constituintes minerais mostra 40% de grãos (quartzo); 35% matriz (caulinita) e 25% de cimento (OH-Fe e OH-Mn).

Arenitos (Figura 3.3) – São rochas mais distais das mineralizações de manganês, em cores brancas, amarelas até vermelhas, quando apresentam ligeiro enriquecimento em OH-Fe. Sob o microscópio se apresentam ricos em grãos de quartzo arredondados a subarredondados, com tamanhos variando de 0,5 a 5mm, monocristalinos em sua maioria e policristalinos, com contatos íntimos, mostrando sobre-crescimento e, nos poucos interstícios, a presença de OH-Fe e por vezes de OH-Mn. Os primeiros conferem a cor avermelhada às rochas. Grãos monocristalinos com extinção ondulante mostram inclusões de turmalina e estauroлита. Além disso, golfos e embainhamentos, bordas irregulares e microfraturamentos são freqüentes nestes

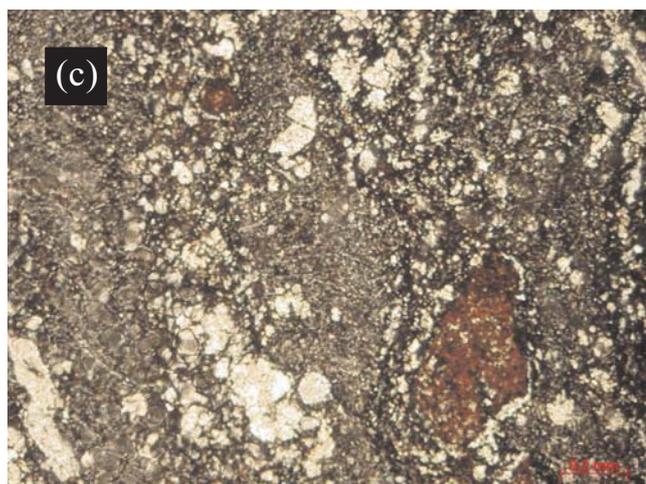
AZUL 70-2



AZUL 70 - 1.1



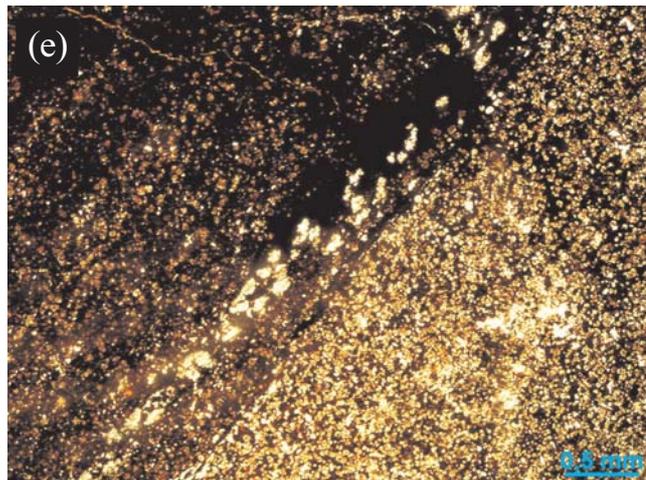
AZUL 25-1 - 2.2



AZUL 102-1



AZUL 113-2



AZUL 113-3

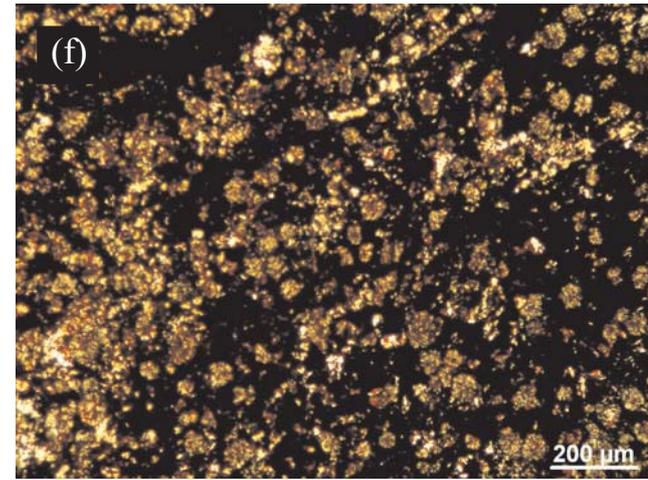


Figura 3.3 – Aspectos mineralógicos e microtexturais de arenitos e pelitos. (a) Imbricamento denso de grãos de quartzo com contatos retos e suturados; (b) Imbricamento de grãos de quartzo mostrando a presença de OH-Fe inter-grãos; (c) e (d) Aspecto geral de pelito; (e) Contato siltito (quartzo, muscovita, hematita, esmectita e caulinita) em contato com zona rica em espessartita; (f) Detalhe de espessartita alterada para OH-Mn (?).

grãos. As microfraturas contêm material caulinitico. Este material também ocorre pontualmente, envolvendo grãos de quartzo e preenchendo poros secundários. Grãos de quartzo com inclusões de turmalina são comuns e parecem indicar uma fonte nos quartzos-arenitos deformados turmaliníferos encontrados na região de Águas Claras.

Siltitos estratificados (Figura 3.1) – É variação faciológica constituída por grãos angulosos, de forma triangular e placosa de quartzo e muitas plaquetas de muscovita, orientados segundo um possível plano de acamamento em matriz ou cimento plásmico de OH-Mn, argilominerais e talvez MOC, que, sob o microscópio, sugere leve estratificação. Vênulas constituídas de quartzo ou quartzo e rodocrosita seccionam linear ou irregularmente a estratificação, indicando que estas rochas não foram intemperizadas.

Pelito bandado (Figura 3.1) – Esta microfácies possui coloração avermelhada e caracteriza-se pelas camadas milimétricas de material caulinitico alternadas com OH-Fe e/ou OH-Mn. As faixas cauliniticas exibem coloração amarelo-esbranquiçada e, por vezes, ocorrem grãos de quartzo com extinção ondulante, sub-angulosos a sub-arredondados, monocristalinos e policristalinos, com tamanhos variando de 0,1mm a 0,3 mm. Pontualmente alguns grãos estão envolvidos por material caulinitico, que, por sua vez, está envolto por OH-Fe ou OH-Mn. Ocorrem ainda grãos milimétricos de muscovita alterados para caulinita. As faixas com OH-Fe e/ou OH-Mn apresentam coloração vermelho-amarelada e/ou opaca, com poros irregulares milimétricos contendo gibbsita e goethita recristalizadas e franjas de OH-Fe em sua periferia. Nesta microfácies são freqüentes microfraturas, contendo grãos de quartzo cimentados por OH-Fe e/ou OH-Mn e outras contendo quartzo recristalizado, que cortam discordantemente os leitos cauliniticos e de OH-Fe/OH-Mn. (Azul 26, furo 277 profundidade 77 m).

Pelito não manganésífero – Apresenta-se como massa micrítica, constituída de quartzo, caulinita, illita, raramente rodocrosita. Essas massas são manchadas por MOC. Monazita, prismas de mineraiis de Ti (rutilo) e de Ba ocorrem localmente. Os grãos de quartzo apresentam inclusões de pirita, calcopirita, rutilo, carbonatos, por vezes sulfeto Fe-Ni-S, tipo pentlandita. Os mineraiis de Ti formam lamelas na massa micrítica.

Silexito com estruturas orgânicas (Figura 3.4) Feições sugestivas de microorganismos foram observadas localmente em facies de tipo *mudstones*. São formas sub-esféricas com estrutura radial a aglomerações subesféricas, como se fossem colônias de algas.

Litoarenito manganésífero – Esta microfácies compreende litoarenito constituído por fragmentos milimétricos (alguns até maiores que 10 mm) de arenito impregnado com OH-Mn. Os grãos de quartzo dos

fragmentos possuem tamanhos micrométricos a milimétricos, são sub-angulosos a sub-arredondados e apresentam extinção ondulante. Os fragmentos estão dispersos em matriz caulinitica e/ou de OH-Mn. Além disso, ocorrem grãos de quartzo angulosos a sub-arredondados envolvidos por OH-Mn. Localmente observa-se muscovita alterada para caulinita e clastos de calcedônia (?). (Azul 14, furo 167 profundidade 107m).

Composição Mineralógica

Tendo em vista o domínio de granulometria fina a muito fina da maioria das fácies litológicas da seqüência do Azul, o que dificulta a identificação dos mineraiis por microscopia óptica, com exceção dos grãos de quartzo e lamelas de muscovita, recorreu-se à difração de raios-X, à microscopia eletrônica de varredura e às análises por microsonda eletrônica, inclusive para OH-Mn, OH-Fe e argilominerais.

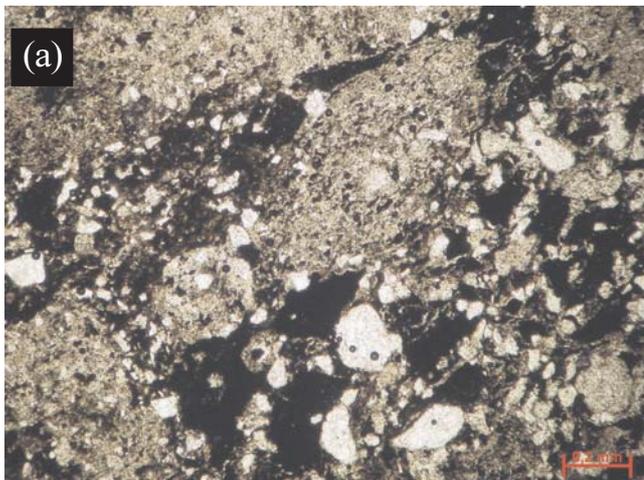
Os siltitos carbonosos e folhelhos carbonosos e/ou manganésíferos, além de quartzo, que se encontra sempre como mineral dominante, os difratogramas de raios x mostram abundância de caulinita, illita-muscovita, clorita, por vezes feldspatos, pirita e calcopirita. Localmente, em especial no fácies tipo *mudstones* ou argilito síltico cinza esverdeado, ocorre ainda rodocrosita, em amostras dos furos 5, 382 e 387. Os OH-Mn também só foram caracterizados através da DRX auxiliados por micro-análises químicas.

CLORITA. Os difratogramas (Figura 3.5) e as micro-análises químicas mostram que a clorita é do tipo clinocloro (Tabelas 3.1 a 3.3), com poucas variações estruturais e composicionais nas amostras estudadas. É clinocloro **manganésífero** pobre em ferro. Clinocloro não foi identificado em lâminas delgadas, provavelmente por conta do tamanho dos pequenos cristalitos. As micro-análises de MSE mostram ainda que clorita e illita parecem formar agregados microcristalinos (Tabela 3.2), indicados pelos teores de K₂O e MgO. Clinocloro ocorre em cavidades, onde desenvolve cristais microscópicos.

ILLITA-MUSCOVITA. Palhetas de mica branca tipo muscovita são evidentes em lâminas delgadas, porém em quantidade insuficiente para explicar a composição química da matriz, conforme as análises de MSE, que mostram que illita deve fazer parte da matriz argilosa das rochas sedimentares do Azul, ao lado de clinocloro. Os difratogramas de raios-X também mostram ampla presença destes mineraiis (Figura 3.5).

RODOCROSITA. Ocorre predominantemente em textura micrítica, e por conseguinte, não pode ser identificado por microscopia óptica, exceto quando encontrado em vênulas, quando forma cristais sub-milimétricos. No entanto, rodocrosita foi identificada com relativa freqüência por

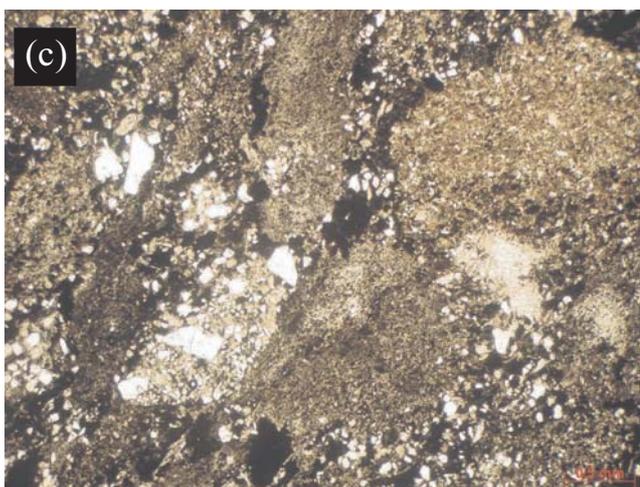
AZUL 14-2



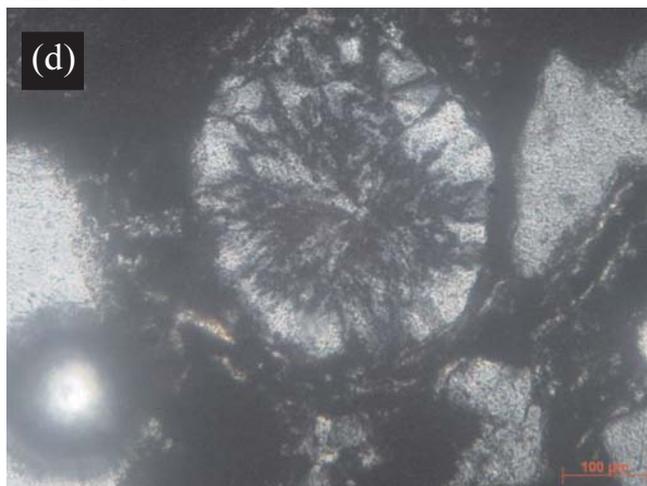
AZUL 14-4



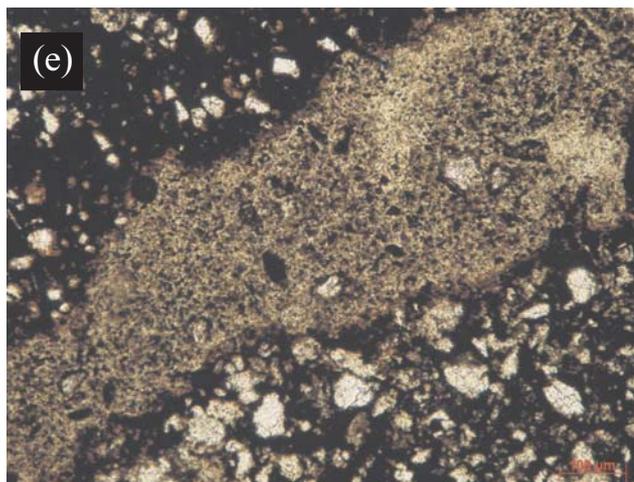
AZUL 14-6



AZUL 14-8



AZUL 15-1



AZUL 15-2

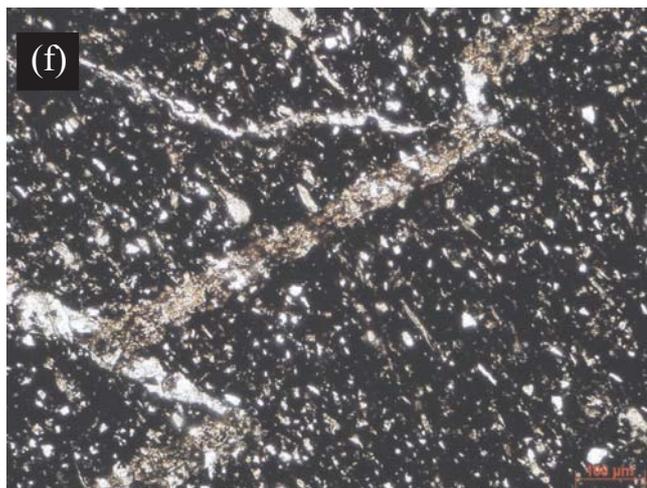


Figura 3.4 – Aspectos mineralógicos e microtexturais de mudstones com estruturas sugestiva de microorganismos. (a) e (b) “litoarenito” com OH-Mn; (c) Fragmento de pelito; (d) Forma sub-esférica constituída de calcedônia com feições sugestivas de microorganismos; (e) Vênula ou bolsão de caulim no pelito estratificado e carbonoso; (f) Vênulas de quartzo e rodocrosita concordantes com e discordantes da estratificação do pelito.

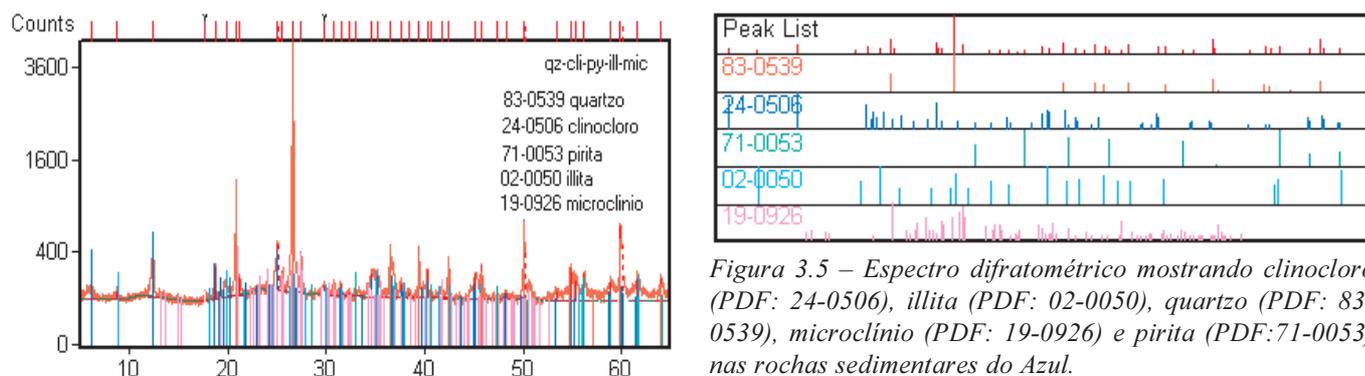


Figura 3.5 – Espectro difratométrico mostrando clinoclóro (PDF: 24-0506), illita (PDF: 02-0050), quartzo (PDF: 83-0539), microclínio (PDF: 19-0926) e pirita (PDF: 71-0053) nas rochas sedimentares do Azul.

Tabela 3.1 – Análises químicas pontuais obtidas por MSE em materiais correspondentes a intercrescimento de clorita ± illita ± estilpnomelana.

| | AZUL89-C1D | AZUL89-C1E | AZUL164-C2A | AZUL164-A | AZUL164-G | AZUL166-C3A | Clorita Literatura |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|---------------|--------------|---------------|-------------|-----------------------|
| Furo/Mina | F6P136,40 | F6P136,40 | F382P199,20 | F382P199,20 | F382P199,20 | F382P206,55 | |
| Litologia | PL | PL | UM | UM | UM | UM | |
| | Illita + clorita (?) | Illta + clorita (?) | Clorita (?) + | Clorita(?) + | Clorita (?) + | Clorita | |
| Na ₂ O | 0,006 | 0,007 | 0,045 | 0,026 | 0,000 | 0,005 | |
| SiO ₂ | 39,873 | 38,227 | 29,069 | 32,148 | 31,540 | 30,173 | 30,28 |
| Al ₂ O ₃ | 18,755 | 18,244 | 16,453 | 12,765 | 17,132 | 17,805 | 17,13 |
| MgO | 19,492 | 18,855 | 14,954 | 12,870 | 19,623 | 25,215 | 25,39 |
| K ₂ O | 7,901 | 7,930 | 0,984 | 3,188 | 0,002 | 0,319 | |
| MnO | 2,282 | 2,535 | 6,926 | 3,765 | 0,002 | 7,293 | |
| PbO ₂ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| CaO | 0,080 | 0,007 | 0,855 | 0,754 | 0,002 | 0,024 | |
| TiO ₂ | 0,438 | 0,439 | 0,048 | 0,131 | 0,000 | 0,037 | |
| SO ₃ | 0,013 | 0,065 | 4,958 | 0,828 | 0,000 | 0,022 | |
| Cl | 0,000 | 0,042 | 0,019 | 0,016 | 0,003 | 0,008 | |
| FeO | 4,803 | 4,692 | 6,021 | 2,136 | 8,172 | 5,508 | 15,09 |
| BaO | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,130 | 0,115 | 0,037 | |
| H ₂ O | 3,831 | 3,705 | 3,324 | 2,894 | 3,235 | 3,509 | 12,11 |
| Total | 97,474 | 94,748 | 83,656 | 71,651 | 79,826 | 89,955 | |

DRX (Figura 3.6) e confirmada pelas análises morfológicas e químicas por MEV (Figura 3.7) e MSE (Tabelas 3.5 e 3.6). Encontra-se no furo 5, no qual era conhecida desde os anos 70 (Valarelli *et al.*, 1978), até pouco tempo atrás a única ocorrência registrada. No entanto, o presente trabalho mostra que rodocrosita é mineral de abundância variável, podendo constituir verdadeiras lentes e camadas delgadas de calcários rodocrosíticos. Foi alcançada pelos furos 6, 382, 387 e 396, além do furo 5 (Figura 3.6), e sempre nas camadas mais profundas, distantes do fronte de intemperismo, em rochas pobres em MOC ou mesmo desprovida dela. Por vezes pode ser observada associada a ou contendo inclusões de pirita e sulfetos de cobre.

As micro-análises por MSE (Tabelas 3.5 e 3.6) mostram três conjuntos químicos de rodocrosita: um constituído de rodocrosita típica, apenas manganésifera, encontrada no furo 396; um segundo mostrando conteúdos de Ca, possivelmente indicando inclusões sub-micrométricos de calcita, um fato comum; e um terceiro formado por rodocrosita ferrosa, típicas do furo 5. Os teores de MgO são variáveis, podendo alcançar 1,2 % em peso. As análises químicas mostram uma solução sólida rodocrosita-siderita com domínio da primeira (Figura 3.8).

CAULINITA. É um dos principais componentes da matriz e da massa micrítica dos pelitos e *mudstones*, quase sempre ao lado de illita-muscovita. Fato de destaque é a

Tabela 3.2 – Exemplo de resultados de análises químicas de massa microcristalina a micrítica por MSE de sedimentos com teores anômalos e variáveis de manganês e mostrando composição de clorita ± illita ± rodocrosita e ainda pirita, quartzo e calcita.

| Amostras | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | totais |
|---|-------------------|------------------|--------------------------------|-------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|------|------|------------------|--------|
| AZUL164-C2A, clorita, illita, rodocrosita, pirita, calcita | 0,05 | 29,07 | 16,45 | 14,95 | 0,98 | 6,93 | 0,00 | 0,86 | 0,05 | 4,96 | 0,02 | 6,02 | 0,00 | 3,32 | 83,66 |
| AZUL164-I, CLORITA, rodocrosita, illita, pirita | 0,05 | 38,49 | 15,89 | 12,94 | 1,34 | 6,82 | 0,00 | 1,27 | 0,07 | 3,16 | 0,04 | 6,41 | 0,11 | 3,61 | 90,20 |
| AZUL164-D, CLORITA, illita, rodocrosita, quartzo, pirita | 0,05 | 33,82 | 16,46 | 13,56 | 3,53 | 6,36 | 0,00 | 0,90 | 0,10 | 2,88 | 0,03 | 5,56 | 0,00 | 3,41 | 86,66 |
| AZUL164-B, rodocrosita, illita, calcita, quartzo, pirita | 0,04 | 20,89 | 8,18 | 0,63 | 3,80 | 18,20 | 0,00 | 2,78 | 0,28 | 2,03 | 0,06 | 1,10 | 0,00 | 2,08 | 60,06 |
| AZUL164-E, clorita, rodocrosita, (illita), quartzo, pirita, calcita | 0,07 | 26,73 | 11,83 | 8,59 | 0,52 | 12,50 | 0,00 | 4,74 | 0,03 | 4,03 | 0,03 | 6,09 | 0,04 | 2,93 | 78,12 |
| AZUL164-C2B, quartzo, clorita, rodocrosita | 0,04 | 53,68 | 10,73 | 8,84 | 0,10 | 4,32 | 0,00 | 0,04 | 0,05 | 0,26 | 0,02 | 4,60 | 0,00 | 3,69 | 86,36 |
| AZUL164-A, CLORITA, illita, rodocrosita, calcita, pirita, quartzo | 0,03 | 32,15 | 12,77 | 12,87 | 3,19 | 3,77 | 0,00 | 0,75 | 0,13 | 0,83 | 0,02 | 2,14 | 0,13 | 2,89 | 71,65 |
| AZUL164-C, quartzo, clorita(?), rodocrosita | 0,04 | 82,72 | 2,18 | 2,63 | 0,02 | 2,49 | 0,04 | 1,69 | 0,00 | 0,17 | 0,02 | 0,97 | 0,09 | 4,45 | 97,52 |

Tabela 3.3 – Composição química de micas, argilominerais e microclínio para fins de comparação com as análises obtidas por MSE em amostras pontuais de rochas sedimentares do Azul.

| | Muscovita | Illita | Biotita | Estilpnomelana | Estilpnomelana | Clorita | Clorita | Montmorillonita | Beidellita | Nontronita | Microclínio |
|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|----------------|----------------|--------------|-------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|
| SiO ₂ | 45,24 | 51,25 | 38,3 | 48,2 | 44,9 | 25,6 | 22,64 | 56,59 | 55,8 | 51,46 | 64,2 |
| Al ₂ O ₃ | 36,85 | 23,5 | 15,2 | 4,3 | 6,7 | 21,19 | 18,6 | 20,06 | 28,6 | 2,2 | 19,1 |
| Fe ₂ O ₃ | - | 2,02 | 1,5 | 13 | 25,5 | 3,88 | 4,43 | 3,19 | 0,41 | 24,7 | 0,4 |
| FeO | - | 0,33 | 15,6 | 14 | 2,7 | 21,55 | - | - | - | - | - |
| MnO | - | - | 0,2 | 0,27 | 0,5 | 0,35 | 38,9 | 0,03 | - | 0,03 | - |
| MgO | - | 3,32 | 13,2 | 9,11 | 7,16 | 15,28 | 1,48 | 3,1 | 2,03 | 3,27 | - |
| CaO | - | 0,59 | 0,74 | 0,28 | 0,79 | 0,16 | - | 0,68 | 2,23 | 1,45 | 0,34 |
| Na ₂ O | 0,6 | - | 0,2 | - | 0,12 | - | - | 2,17 | 0,09 | 1,06 | 2,6 |
| K ₂ O | 10,08 | 7,61 | 8,01 | 1,99 | 1,54 | - | - | 0,45 | 0,48 | 0,24 | 12,76 |
| H ₂ O ⁺ | 4,12 | 5,87 | 4,04 | 8,5 | 8,8 | 10,87 | 9,4 | 13,67 | 9,7 | 15,34 | 0,72 |
| H ₂ O ⁻ | - | 5,26 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Análises coletadas em Deer *et al* (1993).

ocorrência de *booklets* micrométricos, por vezes como agregados de *booklets* também micrométricos, alguns deles preservando padrão micáceo bem característico com 120 µm de comprimento (Azul 72), ou como alteração herdada de muscovita (Azul 13-1, 13-2) (Figura 3.9). As microanálises por MSE (Tabela 3.7) e os difratogramas de raios x confirmam a presença abundante de caulinita na matriz e na massa micrítica, inclusive seu intercrescimento com illita, esmectita ou sua condição de

produto de alteração intermpérica ou hidrotermal a partir de muscovita e microclínio.

FELDSPATOS (microclínio). Os feldspatos constituem grãos ao lado dos de quartzo e muscovita, embora em menor quantidade, mas presentes em arenitos, siltitos e pelitos, inclusive *mudstones*. Foram caracterizados tanto por DRX como por microscopia óptica e por MSE (Tabela 3.4). Da mesma forma que quartzo, também se encontram feldspatos na matriz fina.

SULFETOS. São representados principalmente por pirita e calcopirita. Ambas ocorrem em siltitos, pelitos cinzas e em *mudstones*, ao longo dos planos de acamamento, mas também em inúmeras vênulas e bolsões milimétricos a centimétricos. Nas vênulas de caulim que cortam estas rochas, principalmente aquelas com MOC, estes minerais são relativamente freqüentes. Teores de SO₃ detectados com MSE em fases minerais da matriz e massa micrítica são creditados a sulfetos finamente

disseminados. Além de pirita e calcopirita, foram encontradas composições exóticas como Fe-Ni-S inclusas em pirita e Cu-S em quartzo (Figuras 3.10.1 e 3.10.2).

QUARTZO. São feitas considerações sobre os grãos de quartzo dos pelitos e *mudstones* que constituem os folhelhos em geral, com ou sem MOC. São grãos finos, em geral abaixo de 70 µm, com formas mostrando contornos triangulares, quadráticos, trapézicos, alongados, ponta de lança, muito angulosos a sub-angulosos,

Tabela 3.4 – Análises químicas pontuais obtidas por MSE correspondentes a illita e K-feldspato.

| Furo/Mina | F6P128,16 | F382P199,20 | F382P206,55 | F382P206,55 | Illita Literatura |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|
| Litlogia | Illita | Feldspato | Feldspato ± | Feldspato ± | |
| Na ₂ O | 0,191 | 0,158 | 0,087 | 0,137 | |
| SiO ₂ | 45,316 | 59,685 | 64,960 | 61,721 | 45,21 |
| Al ₂ O ₃ | 30,865 | 17,657 | 15,563 | 17,415 | 38,36 |
| MgO | 1,300 | 0,076 | 0,271 | 0,216 | |
| K ₂ O | 10,398 | 14,873 | 12,436 | 14,931 | 11,81 |
| MnO | 1,153 | 0,169 | 0,774 | 0,360 | |
| PbO ₂ | 0,000 | 0,000 | 0,008 | 0,000 | |
| CaO | 0,051 | 0,019 | 0,158 | 0,034 | |
| TiO ₂ | 0,013 | 0,014 | 0,000 | 0,172 | |
| SO ₃ | 0,072 | 0,023 | 0,220 | 0,101 | |
| Cl | 0,055 | 0,097 | 0,020 | 0,007 | |
| FeO | 3,048 | 0,137 | 0,196 | 0,099 | |
| BaO | 0,275 | 0,512 | 0,578 | 0,308 | |
| H ₂ O | 3,928 | 3,993 | 4,181 | 4,127 | |
| Total | 96,665 | 97,413 | 99,452 | 99,628 | |

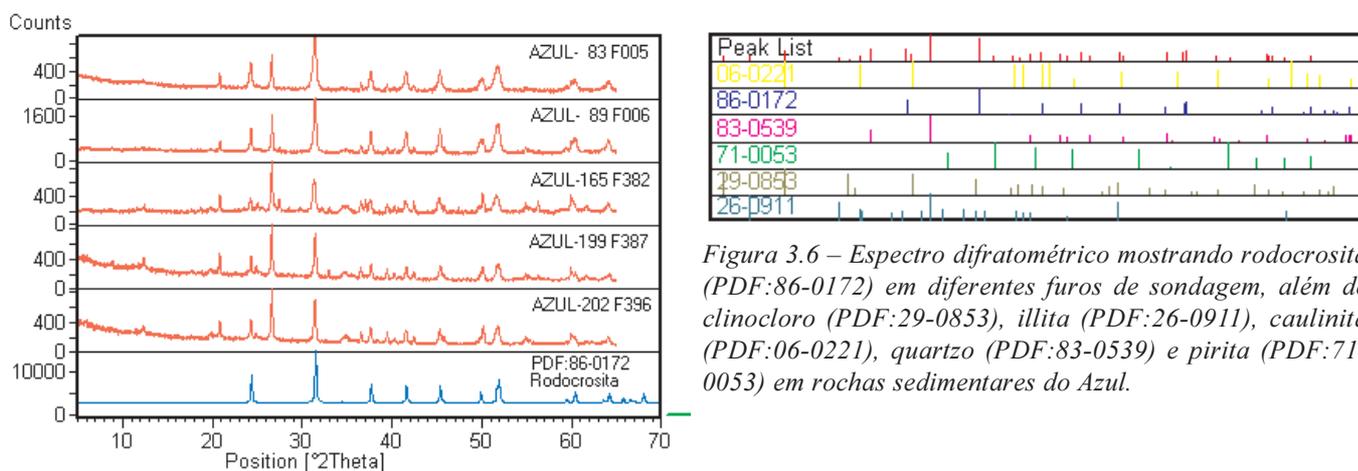


Figura 3.6 – Espectro difratométrico mostrando rodocrosita (PDF:86-0172) em diferentes furos de sondagem, além de clinocloro (PDF:29-0853), illita (PDF:26-0911), caulinita (PDF:06-0221), quartzo (PDF:83-0539) e pirita (PDF:71-0053) em rochas sedimentares do Azul.

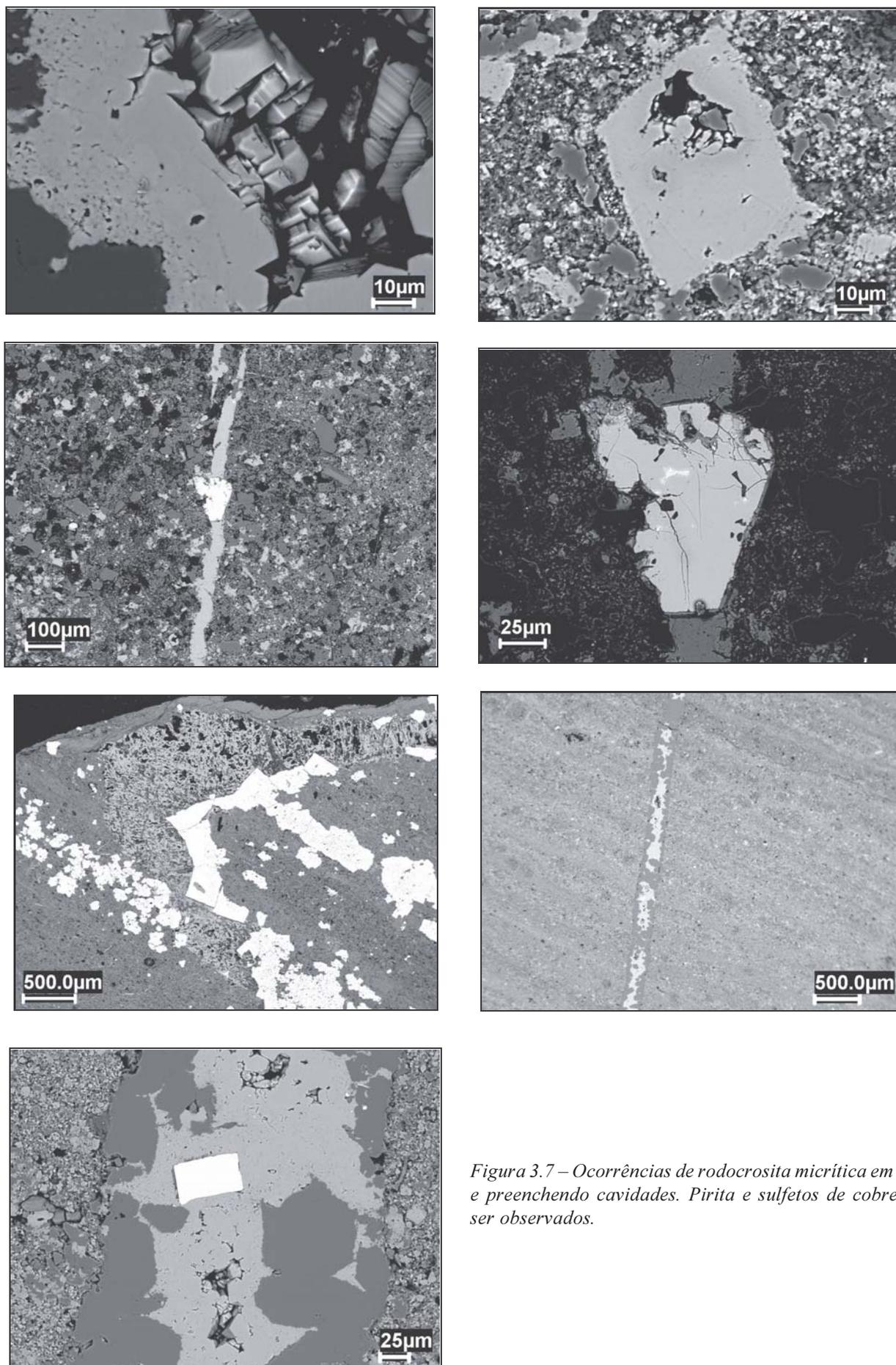


Figura 3.7 – Ocorrências de rodocrosita micrítica em vênulas e preenchendo cavidades. Pirita e sulfetos de cobre podem ser observados.

Tabela 3.5 – Composição química de rodocrosita obtida por MSE em siltitos/mudstones provenientes de diferentes furos de sondagem, mostrando um conjunto praticamente puro, outro com Ca-Mg.

| | AZUL 201-C1 | AZUL 201-C1 | AZUL 201-C1 | AZUL 201-C1 | AZUL 201-F | AZUL 166-D | AZUL 166-E | AZUL 166-C3 | AZUL 166-C1 | AZUL 201-G | AZUL 201-H | Padrão |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|--------------|
| FURO | F396 P79,7 | F396 P79,7 | F396 P79,7 | F396 P79,7 | F396 P79,7 | F382 P206,6 | F382 P206,6 | F382 P206,6 | F382 P206,6 | F396 P79,7 | F396 P79,7 | % |
| LITOLOGIA | UM | UM | UM | UM | UM | UM | UM | UM | UM | UM | UM | |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | |
| SiO ₂ | 0,09 | 0,23 | 0,44 | 0,08 | 0,50 | 0,32 | 0,08 | 0,043 | 0,22 | 0,26 | 0,09 | |
| Al ₂ O ₃ | 0,08 | 1,15 | 0,11 | 0,04 | 0,30 | 0,03 | 0,08 | 0,06 | 0,15 | 0,09 | 0,07 | |
| MgO | 0,41 | 0,20 | 0,30 | 0,17 | 0,41 | 0,86 | 0,99 | 1,27 | 1,18 | 0,51 | 0,38 | |
| K ₂ O | 0,01 | 0,06 | 0,02 | 0,03 | 0,12 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,04 | |
| MnO | 56,87 | 54,84 | 56,48 | 57,15 | 56,28 | 52,41 | 51,55 | 51,41 | 52,19 | 55,94 | 55,85 | 61,17 |
| PbO ₂ | 0,14 | 0,24 | 0,00 | 0,06 | 0,11 | 0,09 | 0,04 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | |
| CaO | 0,50 | 0,59 | 0,63 | 0,50 | 0,89 | 3,65 | 4,17 | 3,59 | 1,73 | 1,24 | 1,21 | |
| TiO ₂ | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 0,00 | 0,08 | 0,02 | 0,01 | 0,29 | 0,28 | 0,00 | 0,00 | |
| SO ₃ | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,06 | 0,05 | 0,19 | 0,00 | 0,01 | |
| Cl | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| FeO | 0,68 | 0,73 | 0,31 | 0,14 | 0,12 | 0,82 | 0,54 | 0,87 | 0,94 | 0,02 | 0,11 | |
| BaO | 0,00 | 0,35 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| Total | 60,08 | 59,67 | 59,66 | 59,42 | 60,11 | 59,62 | 58,80 | 59,34 | 58,20 | 59,34 | 59,04 | |

Tabela 3.6 – Composição química de rodocrosita obtida por MSE em siltitos/mudstones provenientes de diferentes furos de sondagem, mostrando um conjunto com FeO.

| Rodocrosita | AZUL 82-C1C | AZUL 82-C1D | AZUL 82-C1E | AZUL 82-C1H | AZUL 82-C2A | AZUL 82-C2B | AZUL 82-C2E | AZUL 82-C2F | AZUL 83-C2G | AZUL 83-C3C | Padrão |
|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| FURO/MINA | F5P202 | % |
| LITOLOGIA | UM | |
| Na ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| SiO ₂ | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,00 | 0,02 | 0,04 | 0,06 | |
| Al ₂ O ₃ | 0,04 | 0,03 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,04 | |
| MgO | 0,11 | 0,20 | 0,22 | 0,03 | 0,02 | 0,10 | 0,11 | 0,26 | 0,36 | 0,05 | |
| K ₂ O | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | |
| MnO | 52,77 | 52,46 | 53,12 | 52,50 | 52,73 | 52,66 | 52,91 | 51,70 | 51,29 | 53,08 | 61,71 |
| PbO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,08 | 0,04 | 0,04 | 0,19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| CaO | 0,38 | 0,87 | 0,66 | 0,14 | 0,02 | 0,11 | 0,32 | 0,81 | 0,93 | 0,08 | |
| TiO ₂ | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | |
| SO ₃ | 0,04 | 0,00 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,07 | 0,02 | 0,05 | |
| Cl | 0,00 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,00 | |
| FeO | 5,17 | 5,15 | 5,36 | 5,18 | 5,30 | 4,84 | 4,91 | 5,47 | 5,88 | 5,42 | |
| BaO | 0,00 | 0,00 | 0,17 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | |
| Total | 59,80 | 60,00 | 60,95 | 59,20 | 59,42 | 59,29 | 59,57 | 59,60 | 59,84 | 60,15 | |

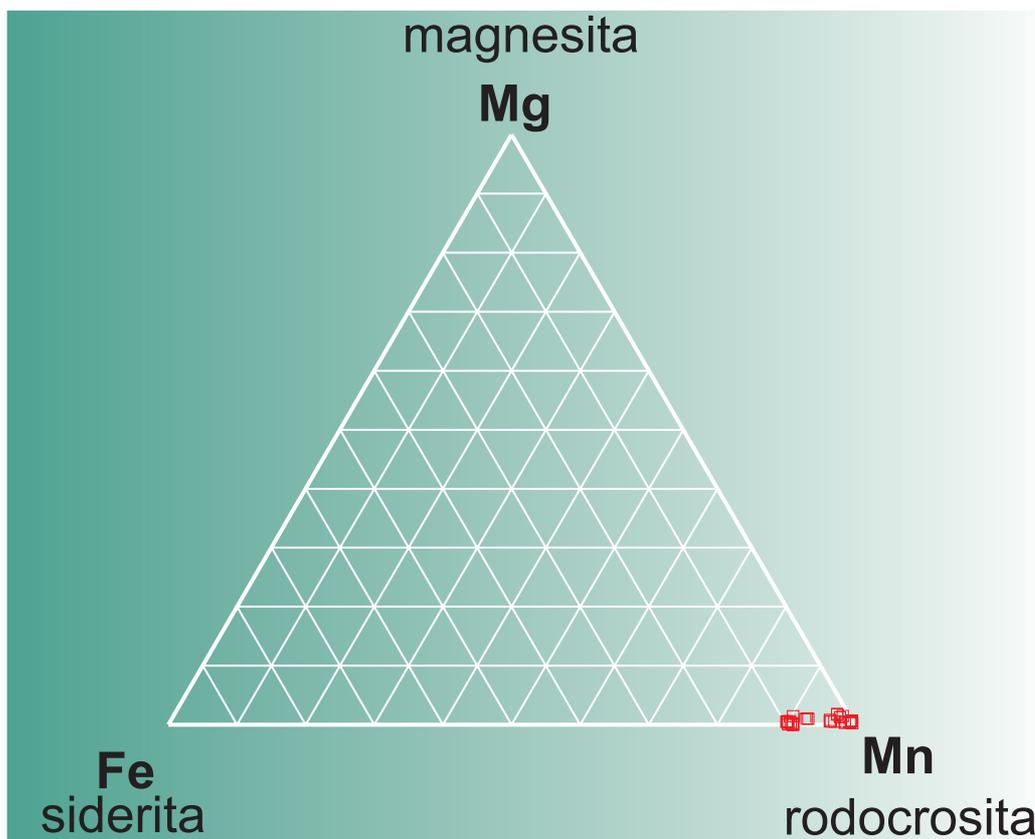


Figura 3.8 – Diagrama Mn-Fe-Mg mostrando o domínio do membro rodocrosita com pequena contribuição siderítica.

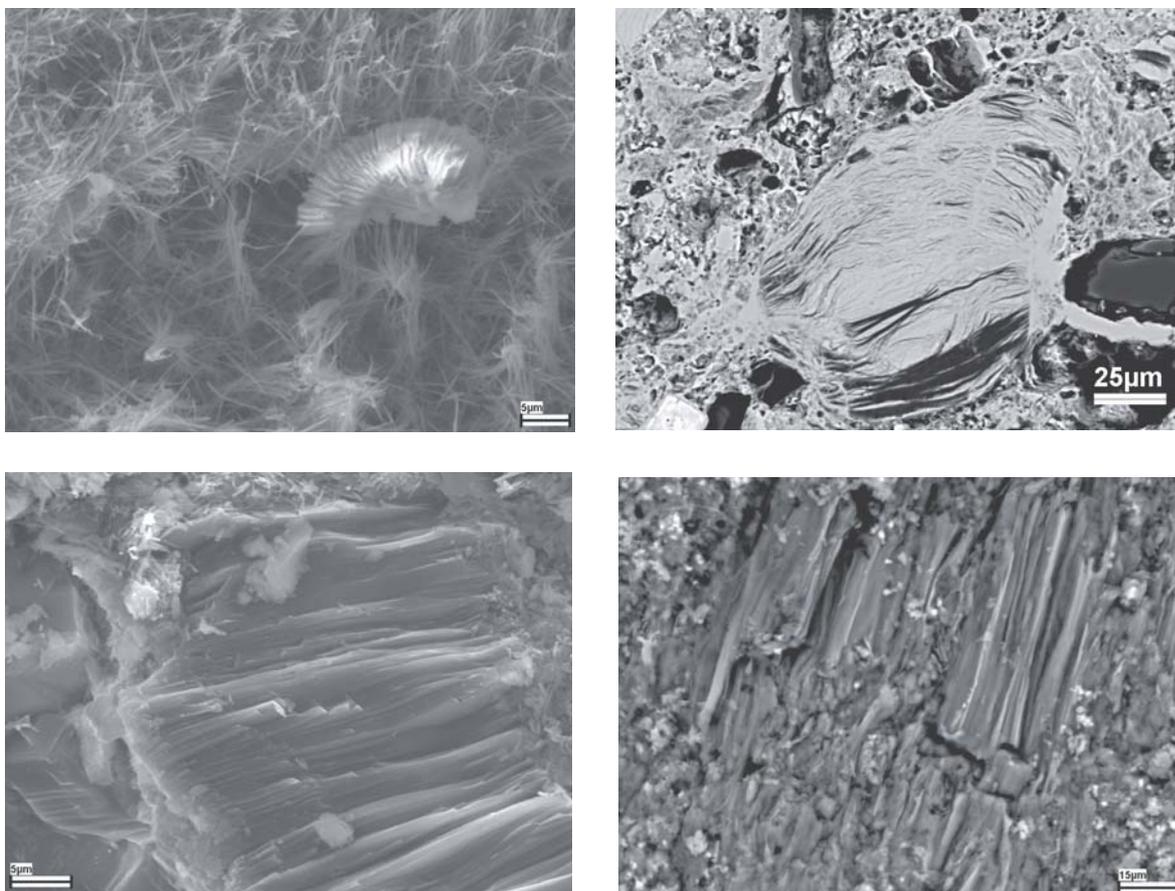


Figura 3.9 – Imagens de MEV de booklets de caulinita e de muscovita em rochas sedimentares.

denteados e muito irregulares (Figuras 3.10.1 e 3.10.2). Contêm inclusões micrométricas de rodocrosita, sulfetos, como pirita, calcopirita, entre outros não identificados. As inclusões de rodocrosita são importantes e sugerem que pelo menos parte dos grãos de quartzo resultaram de cristalização diagenética ligeiramente posterior aos primeiros cristais de rodocrosita. Inclusões de óxidos de Ti tipo anatásio ou rutilo e ilmenita foram observadas.

ESTILPNOMELANA. A natureza microcristalina da matriz dos sedimentos dificultou em parte as análises mineralógicas e petrográficas, bem como microquímicas, pois dificilmente foi possível selecionar pontos monominerálicos, fato que transparece nas análises químicas obtidas com MSE, que, na maioria dos casos, não resultaram em composição coerente com uma única fase mineral. Muitas análises sugerem a presença de minerais formados por Si, Al, Fe, Mg e K (Tabelas 3.1 e 3.3), mas as possíveis fases correspondentes, como biotita e estilpnomelana, não foram identificadas, seja por microscopia, seja por DRX. Na amostra Azul 25, um pelito não manganésífero, foram encontrados alguns cristalitos equivalentes a biotita, alterando-se para caulinita. Admite-se que seja estilpnomelana. Estilpnomelana é mineral freqüente em rochas sedimentares submetidas a anquimetamorfismo ou mesmo em condições de alta diagênese, com clorita, muscovita e feldspatos, e associada com formações manganésíferas e ferríferas. Com base nestes aspectos e nas análises químicas pontuais de MSE, admite-se que estilpnomelana esteja presente nos sedimentos do Azul.

ÓXIDOS DE TITÂNIO. Além das inclusões de óxidos de Ti nos “grãos” de quartzo foram encontrados localmente agregados abundantes de cristais prismáticos finos na massa micrítica dos pelitos e *mudstones* (Figuras 3.10.1 e 3.10.2), que, segundo as análises obtidas com MEV/EDS, são tipo rutilo.

MATÉRIA ORGÂNICA CARBONOSA (MOC). Mesoscopicamente verificou-se que siltitos e pelitos cinzas (incluem folhelhos cinzas e negros) contém MOC, sendo a responsável pela cor cinza a negra destas rochas e também pela sua fissilidade e untuosidade. Junto com OH-Mn por outro lado confere a cor negra aos pelitos e folhelhos, embora normalmente o domínio de OH-Mn aconteça com o desaparecimento da MOC. O teor máximo foi de 3.9 % em peso de MOC e os valores mais altos estão nas amostras do furo 382 (amostras Azul 153 a 166, Figura 3.11), intervalo 195 a 206 metros de profundidade, no furo 387 à profundidade de 114 m (Azul 199) e no furo 396, que correspondem às conhecidas unidades manganésíferas, de fato siltitos e *mudstones* cinzas esverdeados com rodocrosita, pirita, clinocloro, muscovita, pirita, além de bastante quartzo e até OH-Mn. Valores mais baixos foram encontrados nos siltitos e

Tabela 3.7– Análises químicas pontuais obtidas com MSE de matriz equivalente a caulinita ou caulinita + OH-Mn.

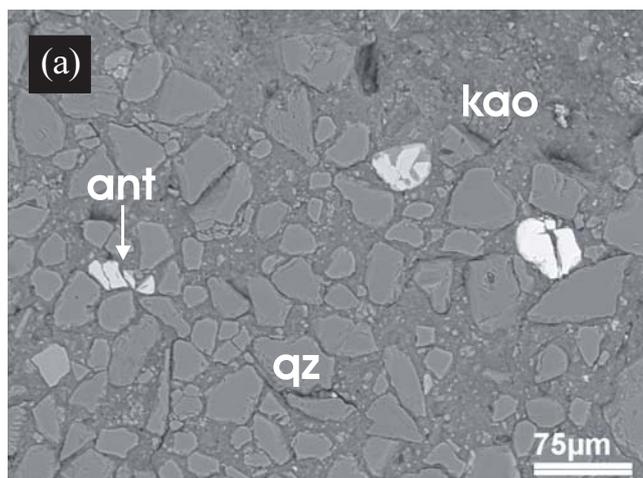
| Furo/mina | F167P62,80 | F79P31,90 | F79P31,90 | Caulinita |
|--------------------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------|--------------|
| Litologia | PL: caulinita | PL: caulinita + OH-Mn | PL: caulinita + illita + OH-Mn | |
| Na ₂ O | 0,009 | 0,065 | 0,260 | |
| SiO ₂ | 45,332 | 41,160 | 44,045 | 46,55 |
| Al ₂ O ₃ | 38,499 | 35,546 | 33,653 | 39,50 |
| MgO | 0,006 | 0,111 | 0,671 | |
| K ₂ O | 0,002 | 1,317 | 4,205 | |
| MnO | 0,226 | 7,519 | 3,910 | |
| PbO ₂ | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| CaO | 0,034 | 0,026 | 0,013 | |
| TiO ₂ | 0,000 | 0,009 | 0,096 | |
| SO ₃ | 0,083 | 0,042 | 0,010 | |
| Cl | 0,009 | 0,000 | 0,000 | |
| FeO | 0,341 | 0,479 | 0,527 | |
| BaO | 0,000 | 0,076 | 0,000 | |
| H ₂ O | 3,982 | 3,827 | 3,884 | 13,96 |
| Total | 88,523 | 90,177 | 91,274 | |

folhelhos a quartzo, muscovita, pirita, caulinita. Nas amostras coletadas na mina e constituídas fundamentalmente de OH-Mn, além de hematita, goethita, por vezes caulinita, quartzo e gibbsita, a MOC não alcança 0.4 % (Figura 3.11).

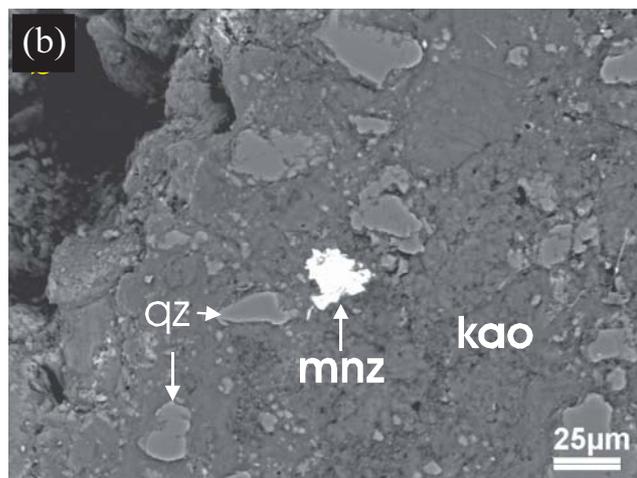
A matéria orgânica não forma complexo e/ou quelato. No entanto correlaciona-se com SiO₂, MgO e K₂O, alguns dos constituintes principais dessas rochas, como foi demonstrado pela matriz de correlação, indicando relação positiva com os teores de illita-muscovita e/ou feldspatos e clorita, formadores dos siltitos a *mudstones*. Todavia, a MOC correlaciona-se negativamente com MnO, ou seja, matéria orgânica e carbonatos são antagonicos, como já tinha sido demonstrado pelas análises mineralógicas. Isto demonstra que a oxidação da MOC e conseqüente redução de Mn nos OH-Mn favoreceu a formação de rodocrosita. Assim se explica a coexistência OH-Mn e rodocrosita.

Lindenmayer *et al.* (1993) foram os primeiros a sugerir a presença de organismos tipo colônia de células interligadas em cadeias curtas: cocobactérias da família *Siderocapsaceae*, células esféricas a elipsoidais, medindo de 0,1 a 0,5 mm nos siltitos e folhelhos carbonáticos e carbonosos. Macambira (2003) também identificou

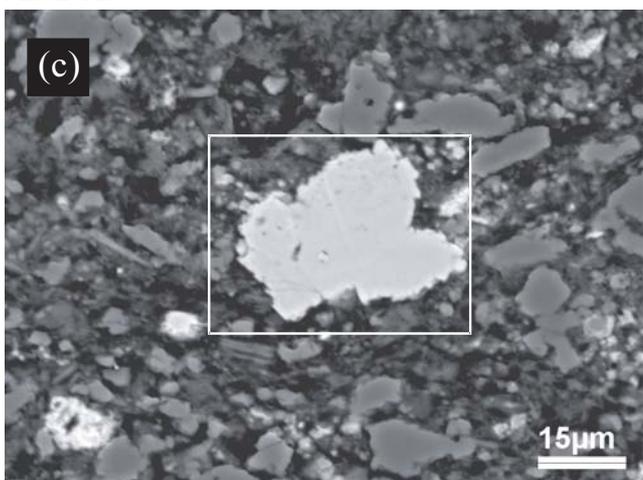
AZUL 14



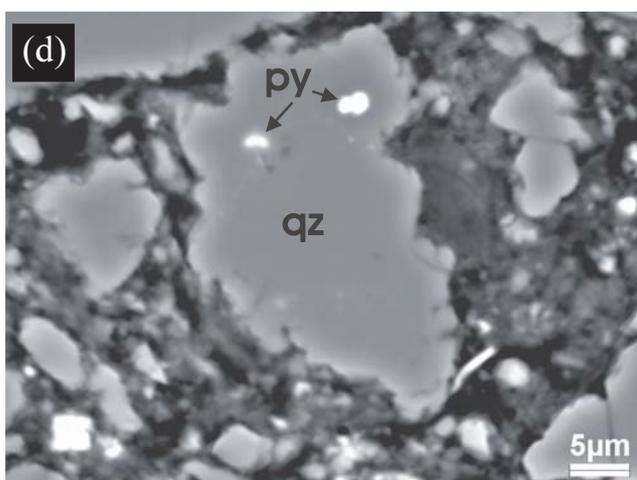
AZUL 14



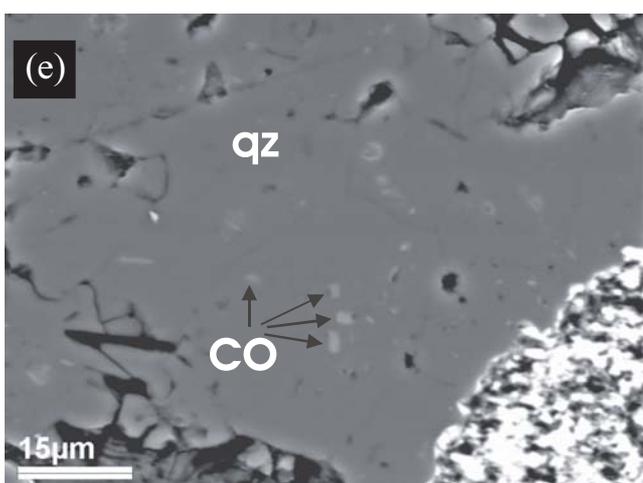
AZUL 12



AZUL 12



AZUL 13



AZUL 13

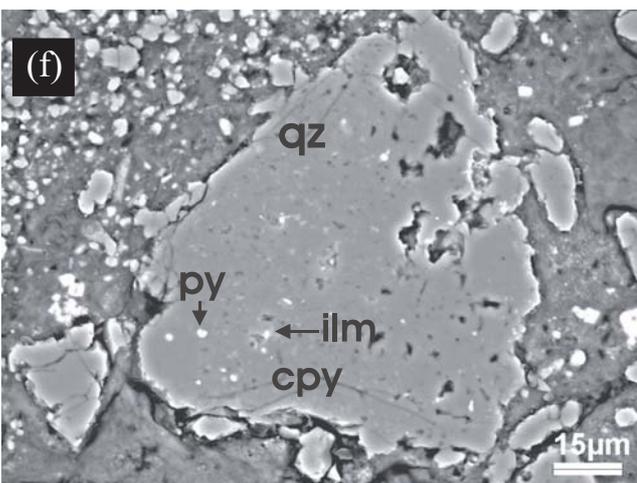


Figura 3.10.1 – (a) Grãos sub-angulares de quartzo (qz) e mineral de Ti (anatásio?) em matriz de caulinita (kao); (b) Grãos finos de monazita (mnz) e quartzo (qz) em matriz de caulinita (kao) (Azul 14, unidade manganêsífera); (c) Grãos finos e irregulares de quartzo (qz) em matriz de caulinita (kao) e hematita (hm). Ao centro mineral de Ti (anatásio?); (d) Grão de quartzo (qz) e inclusões de pirita (py) (Azul 12, unidade manganêsífera); (e) Grão de quartzo (qz) com relictos de material carbonático de Mg, Ca, Fe e Mn (CO); (f) Quartzo (qz) com inclusões de pirita (py), calcopirita (cpy) e ilmenita (anatásio?) (Azul 13, unidade manganêsífera). Imagens de elétrons retroespalhados no MEV. (Continua).

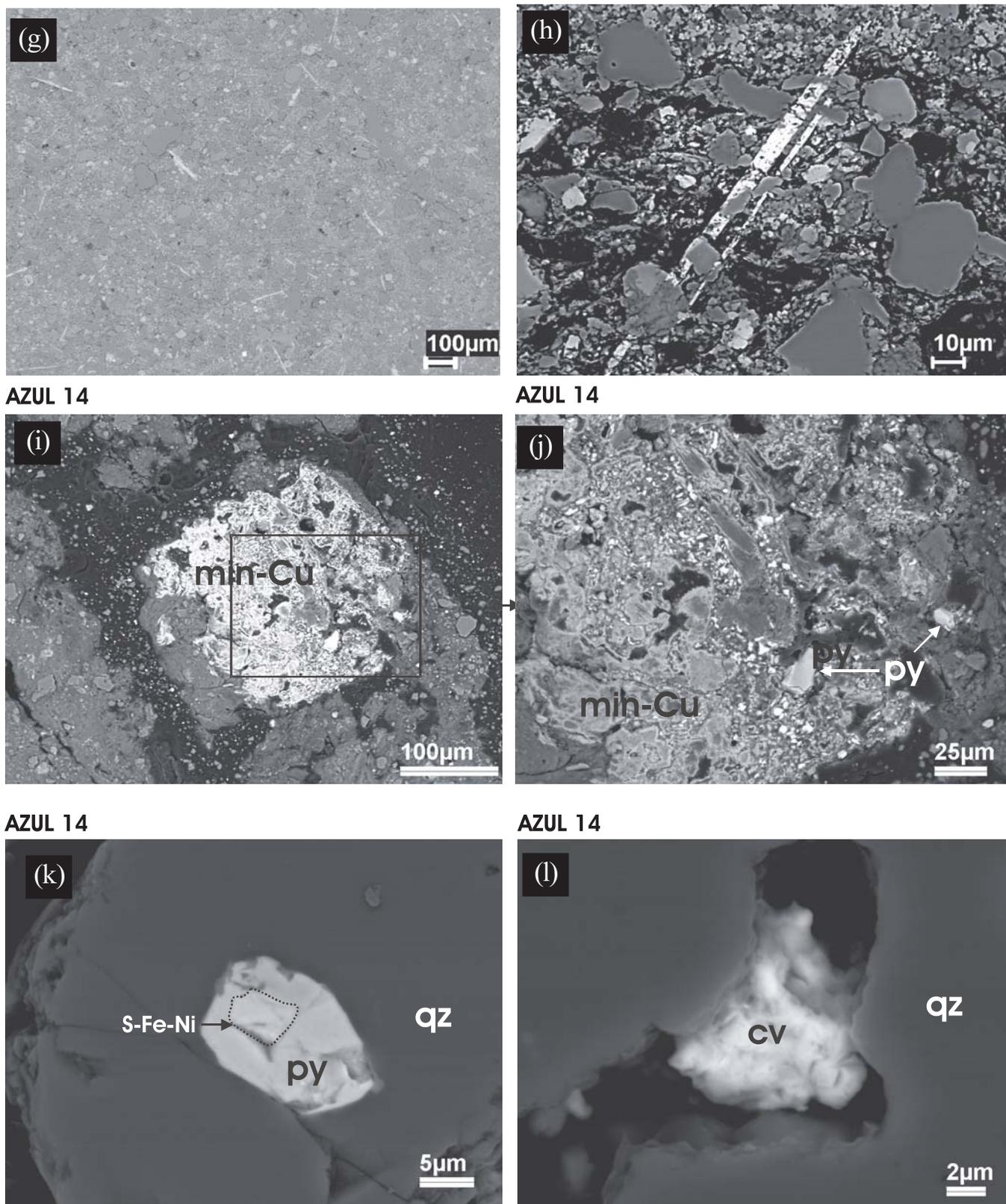


Figura 3.10.2 – (Continuação). (g) Cristais prismáticos de óxidos de Ti em massa micrítica de pelitos; (h) Detalhe de um desses cristais; (i) Agregados microcristalinos de minerais de cobre (min-Cu: sulfetos e sulfatos) em matriz de caulinita-quartzo; (j) Detalhe da imagem anterior mostrando grãos de pirita (py) em minerais de cobre (Azul 14, unidade manganesífera), (k) Quartzo com inclusões de pirita (py) e S-Fe-Ni (provavelmente pentlandita); (l) Inclusão de mineral de Cu (provavelmente covellita, cv) (Azul 25, unidade manganesífera). Imagens de elétrons retroespalhados no MEV.

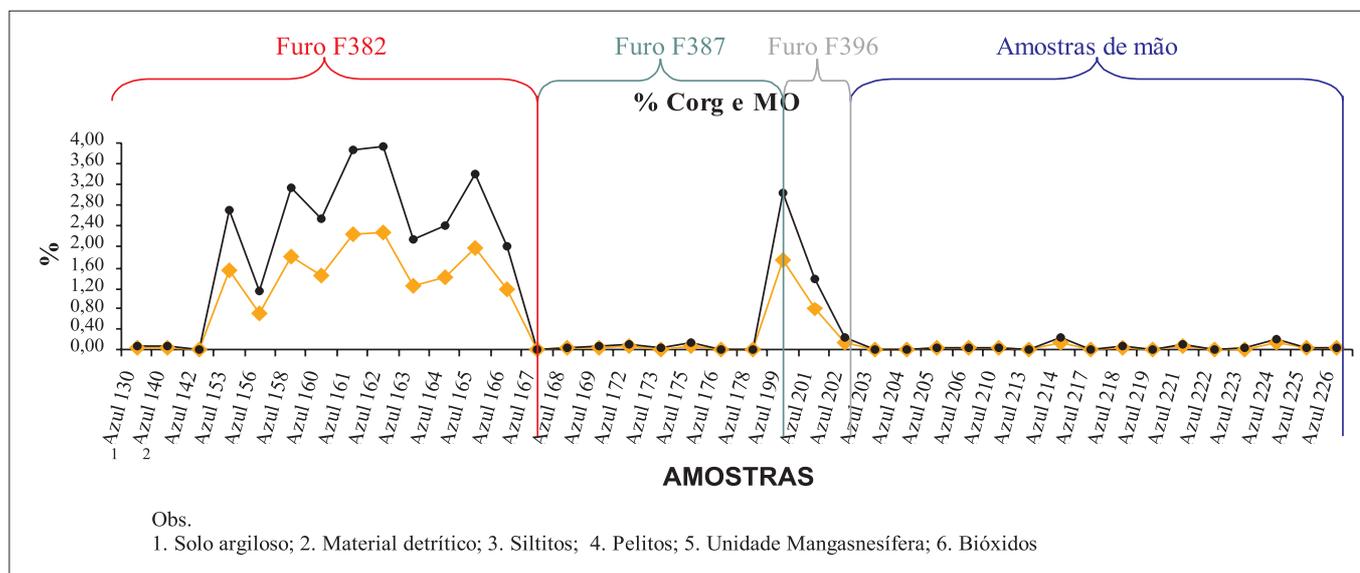


Figura 3.11 – Distribuição dos teores de matéria orgânica (MO) nas amostras investigadas, ressaltando o domínio em amostras do furo 382.

indícios de MOC na forma de esferas (< 0.3 mm), indicativas de querogênio, ao investigar 8 furos em siltitos carbonáticos, formados por rodocrosita, quartzo, muscovita, caulinita, pirita e matéria orgânica. Neste trabalho também foram encontradas fortes evidências de feições orgânicas, silicosas, sub-esféricas (Figura 3.4).

Química das Rochas

Elementos Maiores

As principais fácies não intemperizadas identificadas e amostradas nas minas do Azul, principalmente em furos de sondagens, e que efetivamente não apresentam evidências de alteração intempélica, foram classificadas, segundo os teores de manganês, em rochas *sedimentares não manganesíferas* e rochas *sedimentares manganesíferas*, independentemente da mineralogia do Mn, sejam óxi-hidróxidos ou rodocrosita. Como já foi demonstrado nos tópicos anteriores, a simples presença de OH-Mn não se apresenta como critério para identificar alteração intempélica laterítica. Em ambos os casos são pelitos como siltitos cinzas e folhelhos, que, quando ricos em MOC, são cinzas e quando ricos em OH-Mn são cinza escuros a negros. As análises químicas (Tabela 3.8) mostram que as fácies não manganesíferas são ricas em SiO₂, na mesma ordem de grandeza dos folhelhos em geral, enquanto os teores de Al₂O₃, MgO, CaO e K₂O são variáveis, mas também dentro do campo dos folhelhos em geral, da mesma forma que TiO₂. Os teores de Fe₂O₃ são significativos, com algumas amostras tipo formação ferrífera. Os teores de Mn, quando abaixo de 7 % de

MnO, indicam relação com K₂O. K₂O e MgO encontram-se em valores relativamente mais altos na fácies siltito cinza. Desta forma, as fácies da seqüência siltitos a folhelhos cinzas são quimicamente comparáveis também com os folhelhos em geral.

Por outro lado, as fácies ricas em manganês (Tabela 3.9) se compensam pela pobreza em SiO₂ e Al₂O₃, que são extremamente variáveis, refletindo a grande variação dos teores de MnO. Os valores de K₂O, Na₂O (muito baixo) e MgO são equivalentes as fácies não manganesíferas ou mesmo mais baixos, enquanto CaO está mais concentrado nas manganesíferas. Além disso, estas fácies se caracterizam pelos teores de TiO₂ baixos, enquanto os de P₂O₅ são idênticos nas duas fácies. Portanto, as diferenças químicas marcantes entre os dois grandes grupos segundo a mineralização estão em SiO₂, Al₂O₃, TiO₂ e CaO, além, obviamente de MnO.

Estes aspectos químico-composicionais estão compatíveis com a mineralogia à base de muito quartzo, caulinita, illita-muscovita, clorita, microclínio, pirita, (MOC), possivelmente estilpnomelana nas fácies não manganesíferas, e os mesmos minerais, porém com presença expressiva de rodocrosita e/ou OH-Mn, nas manganesíferas. As rochas mais ricas em OH-Mn tendem a ser mais pobres em MgO, mas geralmente mais ricas em K₂O (exemplos: Azul 120, 130, 140, 142).

Os diagramas SiO₂-Al₂O₃-MnO, SiO₂-Fe₂O₃-MnO e K₂O-MgO-CaO mostram as variações composicionais entre as duas fácies sedimentares mineralizadas e não mineralizadas em manganês (Figura 3.12), indicando que as não mineralizadas são mais silicoaluminosas com ferro e potássio.

Tabela 3.8 – Composição química total das principais rochas sedimentares não intemperizadas, como siltitos cinzas, folhelhos cinzas a cinzas escuros, não manganésíferos (MnO < 7.0 %).

| Amostra | Furos | Litologia | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | PF |
|--------------|---------------|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------|
| AZUL 13 | F167P105,45 m | PL | 65,12 | 16,26 | 5,93 | 0,04 | 0,80 | 0,03 | -0,01 | 2,25 | 1,52 | 0,09 | 7,18 |
| AZUL 15 | F167P107,85 | PLST | 68,73 | 13,13 | 7,95 | 0,02 | 0,32 | 0,02 | 0,01 | 1,06 | 1,26 | 0,13 | 6,16 |
| AZUL 24 | F277P68,25 | PLST | 72,71 | 10,53 | 5,26 | 0,10 | 0,64 | 0,02 | 0,02 | 1,72 | 0,72 | 0,09 | 7,09 |
| AZUL 25 | F277P77,00 | FOL | 57,35 | 10,43 | 21,28 | 0,14 | 0,09 | 0,04 | 0,02 | 0,20 | 0,53 | 0,22 | 8,55 |
| AZUL 84 | F5P 220,00 | FOL | 65,59 | 14,28 | 4,09 | 0,317 | 3,89 | 0,02 | 0,04 | 1,19 | 0,891 | 0,04 | 8,82 |
| AZUL 93 | F63P121,00 | FOL | 64,87 | 11,45 | 15,17 | 0,038 | 0,16 | 0,02 | 0,09 | 0,47 | 0,520 | 0,13 | 7,30 |
| AZUL 98 | F86P63,60 | FOL | 62,91 | 11,47 | 9,86 | 0,078 | 0,82 | 0,02 | 0,08 | 2,20 | 0,557 | 0,17 | 10,87 |
| AZUL 102 | F90P82,40 | FOL | 72,37 | 15,15 | 2,57 | 0,129 | 0,97 | -0,01 | 0,08 | 2,35 | 0,718 | 0,04 | 6,02 |
| AZUL 110 | F174P60,40 | FOL | 71,96 | 13,68 | 4,42 | 0,066 | 0,36 | 0,06 | 0,22 | 1,26 | 0,574 | 0,10 | 6,26 |
| AZUL 113 | F304P79,40 | FOL | 31,27 | 6,76 | 41,52 | 7,052 | 0,89 | 0,70 | 0,06 | 0,48 | 0,443 | 0,07 | 11,18 |
| AZUL 114 | F304P92,00 | FOL | 63,98 | 14,22 | 5,15 | 0,305 | 2,83 | 0,14 | 0,09 | 6,23 | 0,938 | 0,02 | 6,42 |
| AZUL 115 | F304P94,00 | STc | 60,31 | 13,09 | 8,44 | 0,270 | 2,25 | 0,32 | 0,09 | 3,64 | 0,787 | 0,01 | 10,44 |
| AZUL 153 | F382 P150,15 | STc | 68,00 | 14,11 | 3,51 | 0,076 | 1,14 | 0,02 | 0,12 | 4,30 | 0,583 | 0,04 | 6,95 |
| AZUL 156 | F382 P168,50 | STc | 67,20 | 14,31 | 3,09 | 0,093 | 1,48 | -0,01 | 0,15 | 4,23 | 0,696 | 0,04 | 7,69 |
| AZUL 158 | F382 P176,10 | STc | 61,83 | 13,35 | 5,71 | 0,437 | 4,37 | 0,02 | 0,04 | 3,90 | 0,647 | 0,03 | 9,05 |
| AZUL 160 | F382 P185,35 | STc | 63,20 | 13,07 | 4,78 | 0,570 | 3,40 | 0,02 | 0,04 | 4,21 | 0,627 | 0,03 | 8,96 |
| AZUL 161 | F382 P188,45 | STc | 54,80 | 11,86 | 10,27 | 1,297 | 3,29 | 0,05 | 0,06 | 3,67 | 0,551 | -0,01 | 12,97 |
| AZUL 162 | F382 P195,05 | STc | 42,61 | 9,85 | 16,52 | 4,718 | 4,29 | 0,37 | 0,07 | 2,96 | 0,566 | -0,01 | 16,99 |
| AZUL 163 | F382 P198,25 | STc | 46,72 | 9,61 | 12,70 | 6,816 | 3,85 | 0,75 | 0,33 | 2,46 | 0,464 | 0,37 | 15,02 |
| AZUL 164 | F382 P199,20 | STc | 53,39 | 11,04 | 7,29 | 6,245 | 3,71 | 0,46 | 0,05 | 3,39 | 0,586 | 0,16 | 12,74 |
| Média sem Mn | | | 60,7 | 12,4 | 9,8 | 1,4 | 2,0 | 0,2 | 0,1 | 2,6 | 0,7 | 0,1 | 9,3 |
| Média com Mn | | | 21,2 | 10,4 | 6,1 | 40,3 | 1,0 | 0,5 | 0,1 | 1,5 | 0,5 | 0,1 | 17,7 |
| Folhelhos | | | 62,8 | 18,9 | | 0,1 | 2,2 | 1,3 | 1,2 | 3,7 | 1,0 | 0,2 | 6,0 |

PL: pelito; PLST: pelito-siltito; FOL: folhelho; STc: siltito cinza.

Elementos-Traço

As concentrações dos elementos-traço nessas mesmas rochas mostram que sua qualificação em manganésíferas e não manganésíferas se deixa delimitar claramente pelas variações e valores médios desses elementos. As rochas classificadas como mineralizadas em manganês, tanto em OH-Mn como rodocrosita, estão fortemente enriquecidas em Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba e Mo, além de ETRL, Ga, Sn, Sb e Tl e empobrecidas em Cr, Ge, Rb, Ag, e Cs (Tabelas 3.10 e 3.11), quando comparadas com as não manganésíferas. Por outro lado, elas se assemelham nos valores médios de V, As, Y, Nb, Ta, Zr, Hf, Pb, Bi, Th e

U. Dessa forma, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba e Mo, além de ETRL, Ga, Sn, Sb e Tl constituem a assinatura geoquímica da fácies sedimentar mineralizada primariamente em manganês, correspondendo em grande parte à assinatura geoquímica de folhelhos negros (*black shales*, Levinson, 1974; Quinby-Hunt *et al.*, 1997) (Figura 3.13), principalmente de folhelhos negros manganésíferos, se comparados com os dados do Gabão (Weber, 1997; Figura 3.14), em parte com os dados de depósitos da China (Maynard, 2004; Tabela 3.12). Não obstante, em termos de concentração de alguns elementos, assemelham-se a depósitos hidrotermais modernos do Pacífico e aos depósitos neoproterozóicos da China (Maynard, 2004).

Tabela 3.9 – Composição química total das principais fácies sedimentares não intemperizadas, siltitos cinzas, folhelhos cinzas a cinzas escuros, manganíferos ($MnO > 7.0\%$), como minério a OH-Mn ou como protominério rodocrosítico.

| Amostra | Furos | Litologia | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | PF |
|---------------------|--------------|-----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|-------------|
| AZUL 06 | F167P27,30 | PL | 3,70 | 9,04 | 4,11 | 65,32 | 0,11 | 0,04 | 0,07 | 2,00 | 0,37 | 0,08 | 13,80 |
| AZUL 09 | F167P62,80 | ST | 5,04 | 6,39 | 4,41 | 65,94 | 0,23 | 0,19 | 0,08 | 2,35 | 0,42 | 0,44 | 13,25 |
| AZUL 10 | F167P68,50 | ST | 0,83 | 1,83 | 1,70 | 80,74 | 0,12 | 0,14 | 0,10 | 1,26 | 0,17 | 0,42 | 13,05 |
| AZUL 18 | F277P4,70 | PL | 15,29 | 13,14 | 9,97 | 41,20 | 0,72 | 0,39 | 0,09 | 1,41 | 0,56 | 0,11 | 15,68 |
| AZUL 50 | Mina 1 | ST | 14,05 | 17,67 | 9,07 | 38,50 | 0,45 | 0,19 | 0,04 | 0,62 | 0,736 | 0,07 | 18,96 |
| AZUL 81 | F5P183,83 | FOL | 35,72 | 8,06 | 5,46 | 23,36 | 1,88 | 0,52 | 0,14 | 1,90 | 0,424 | 0,06 | 22,30 |
| AZUL 82 | F5P202,00 | FOL | 31,22 | 5,13 | 6,05 | 29,11 | 1,49 | 0,58 | 0,15 | 0,92 | 0,273 | 0,05 | 24,05 |
| AZUL 83 | F5P216,30 | FOL | 17,42 | 2,54 | 3,46 | 45,16 | 1,48 | 1,52 | 0,18 | 0,50 | 0,112 | 0,06 | 27,92 |
| AZUL 88 | F6P128,16 | FOL | 46,63 | 9,67 | 5,13 | 15,85 | 2,62 | 0,38 | 0,10 | 2,79 | 0,551 | 0,10 | 15,52 |
| AZUL 89 | F6P136,40 | FOL | 23,31 | 4,44 | 2,44 | 39,46 | 1,39 | 1,18 | 0,19 | 1,06 | 0,319 | 0,06 | 24,85 |
| AZUL 120 | F318P73,00 | ST | 2,56 | 3,38 | 1,94 | 75,18 | 0,12 | 0,21 | 0,25 | 2,27 | 0,186 | 0,47 | 13,79 |
| AZUL 130 | F382 P22,60 | ST | 18,15 | 19,92 | 8,18 | 35,17 | 0,36 | 0,14 | 0,03 | 0,65 | 0,808 | 0,09 | 16,46 |
| AZUL 140 | F382 P73,40 | ST | 14,78 | 15,88 | 8,25 | 40,96 | 0,58 | 0,23 | 0,11 | 0,72 | 0,829 | 0,10 | 17,24 |
| AZUL142 | F382 P 93,70 | ST | 6,44 | 13,15 | 5,93 | 53,28 | 0,55 | 0,22 | 0,04 | 0,93 | 0,587 | 0,10 | 17,70 |
| AZUL165 | F382 P202,00 | ST | 39,53 | 7,77 | 9,79 | 16,85 | 3,08 | 1,33 | 0,04 | 2,47 | 0,392 | 0,16 | 18,71 |
| AZUL166 | F382 P206,55 | ST | 33,38 | 6,67 | 3,74 | 28,68 | 3,12 | 1,25 | -0,01 | 2,38 | 0,361 | 0,17 | 20,26 |
| AZUL173 | F387 P18,00 | ST | 7,99 | 14,58 | 8,10 | 49,96 | 0,26 | 0,13 | 0,05 | 0,92 | 0,443 | 0,10 | 17,03 |
| AZUL 175 | F387 P25,00 | ST | 17,17 | 16,03 | 8,87 | 41,00 | 0,20 | 0,17 | 0,19 | 1,13 | 0,741 | 0,18 | 13,53 |
| AZUL 176 | F387 P27,60 | ST | 9,45 | 15,72 | 9,03 | 47,49 | 0,20 | 0,12 | 0,03 | 0,87 | 0,718 | 0,18 | 16,32 |
| AZUL 178 | F387 P33,00 | ST | 24,43 | 23,32 | 12,72 | 21,84 | 0,23 | 0,13 | 0,13 | 0,76 | 0,987 | 0,19 | 14,31 |
| AZUL 199 | F387 P114,20 | ST | 43,22 | 9,42 | 7,66 | 16,65 | 1,79 | 0,35 | 0,27 | 2,31 | 0,518 | 0,10 | 16,42 |
| AZUL201 | F396 P79,70 | FOL | 34,33 | 7,43 | 2,33 | 31,25 | 0,88 | 0,72 | 0,14 | 1,28 | 0,283 | 0,08 | 20,35 |
| AZUL 202 | F396 P83,50 | FOL | 43,16 | 9,00 | 2,78 | 24,13 | 1,03 | 0,36 | 0,02 | 1,93 | 0,345 | 0,05 | 16,33 |
| Média com Mn | | | 21,2 | 10,4 | 6,1 | 40,3 | 1,0 | 0,5 | 0,1 | 1,5 | 0,5 | 0,1 | 17,7 |
| Média sem Mn | | | 60,7 | 12,4 | 9,8 | 1,4 | 2,0 | 0,2 | 0,1 | 2,6 | 0,7 | 0,1 | 9,3 |
| Folhelhos | | | 62,8 | 18,9 | | 0,1 | 2,2 | 1,3 | 1,2 | 3,7 | 1,0 | 0,2 | 6,0 |

PL: pelito; PLST: pelito-siltito; FOL: folhelho; STc: siltito cinza.

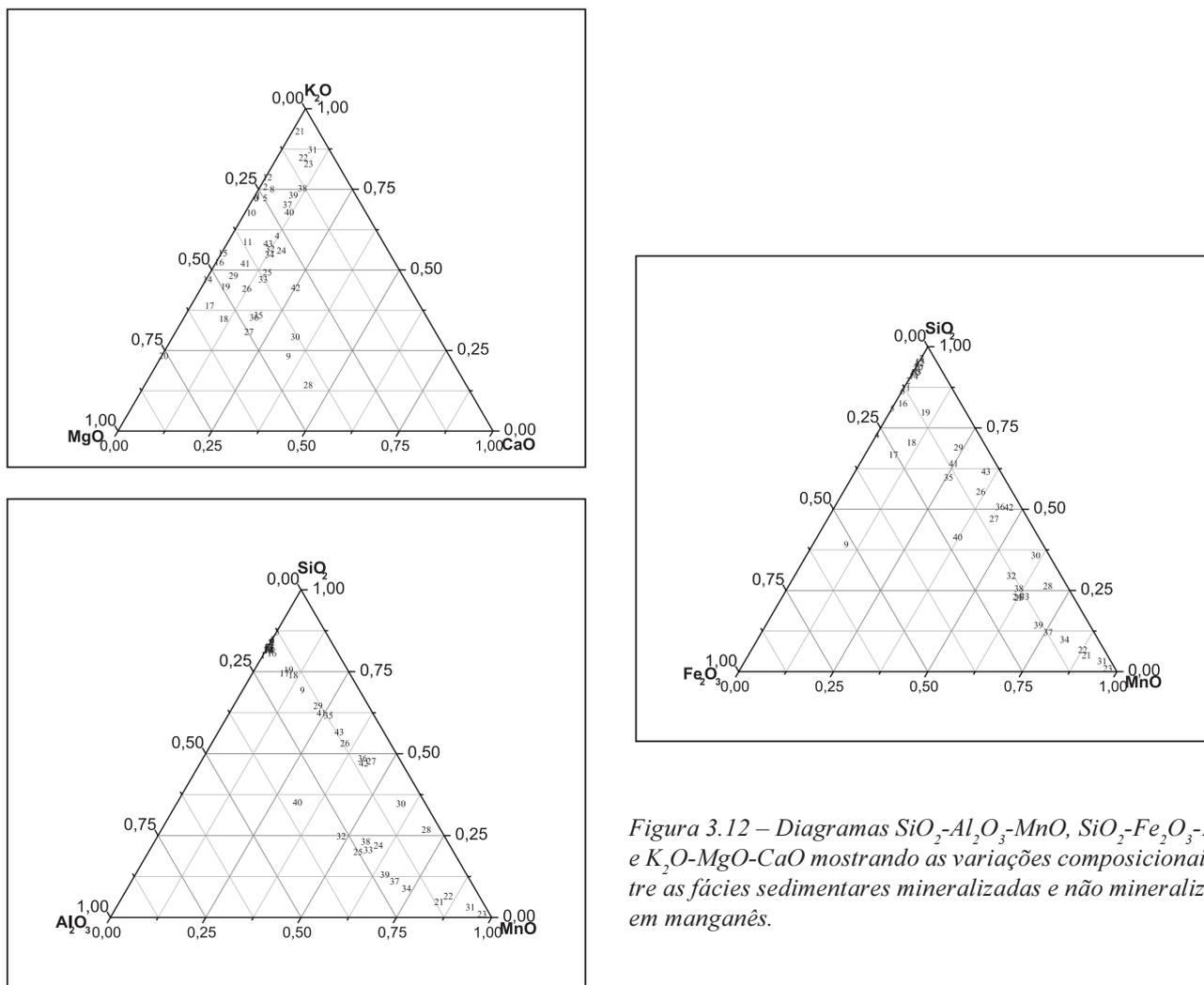


Figura 3.12 – Diagramas $SiO_2-Al_2O_3-MnO$, $SiO_2-Fe_2O_3-MnO$ e $K_2O-MgO-CaO$ mostrando as variações composicionais entre as fácies sedimentares mineralizadas e não mineralizadas em manganês.

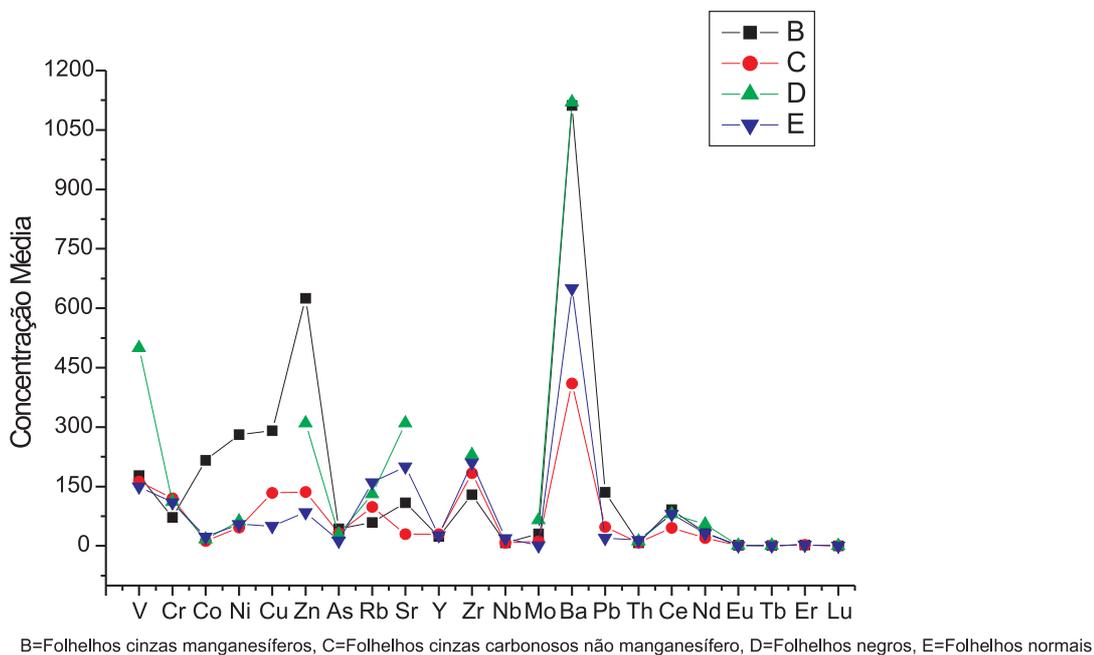


Figura 3.13 – Comparações entre os teores médios dos elementos-traço dos sedimentos Azul mineralizados e não mineralizados com os folhelhos negros (Quinby-Hunt et al., 1997) e folhelhos normais (Taylor & McLennan, 1985 e Turekian & Wedepohl, 1961).

Ni e Co apresentam forte correlação positiva com Mn em toda seqüência sedimentar, enquanto em relação a Zn essa correlação é apenas parcial, exceto em amostras de pelito e silito com OH-Mn (Figura 3.15.1). Na seqüência não manganésifera a correlação é negativa. Zn e Cu mostram o mesmo comportamento de Zn e Mn. O diagrama de dispersão Ba-Mn delinea duas populações, uma, representando os OH-Mn, com correlação positiva entre Ba e Mn, e outra representando as rochas não mineralizadas, negativa, compartilhada pela relação Sr-Mn. Sr-Ba se mostram como discriminantes das rochas mineralizadas, com Sr não se correlacionando negativamente com OH-Mn. Mn-K também discrimina as duas populações, correlacionando-se positivamente quando da presença de OH-Mn e negativamente quando rodocrosita está presente. A afinidade entre Mn, Sr, Ba e ETRL e ETRP, e ainda entre Ce-Ba e Ce-Sr também fica muito evidente nos diagramas de dispersão (Figuras 3.15.1 e 3.15.2). No entanto, a afinidade entre Mn e ETR é variável, parecendo mais forte quando da presença OH-Mn, como se pode observar na dispersão maior nos diagramas. A correlação K-Rb é classicamente positiva e altamente significativa, aplicando-se também como discriminante mineral e das rochas mineralizadas. Correlacionam tipicamente com illita-mica e feldspato. Os diagramas de dispersão Rb-Mn e Rb-Sr se mostram categóricos na discriminação das duas populações de rochas sedimentares do Azul, mineralizadas e não

mineralizadas (Figuras 3.15.1 e 3.15.2). A associação Y-Nb-Ta-Zr-Hf-Pb-Bi-Th-U espelha a assembléia de minerais resistatos como zircão. Elementos como Co, Ni, Cu e Mo estão mais enriquecidos nas fácies ricas em OH-Mn e matéria orgânica (material carbonoso), enquanto Zn se concentra tanto nas anteriores como também nas fácies a rodocrosita, preferencialmente mais nos siltitos do que nos folhelhos. A associação Cr-Ge-Rb-Ag-Cs discrimina as rochas não mineralizadas em manganês, mais ricas em K_2O , que ressalta a maior abundância de mica-illita e feldspato.

As curvas de distribuição dos ETR normalizados aos condritos (Figura 3.16) mostram o enriquecimento típico dos ETRL nos folhelhos cinzas manganésiferos, ao contrário dos folhelhos cinza não manganésiferos que tendem a apresentar ligeiro aumento dos ETRP quando comparados com os manganésiferos. Algumas amostras delinham ligeira anomalia de Ce, sugerindo remobilização e oxidação deste elemento e neoformação de OH-Mn.

Arsênio, em parte Mo e Sb, encontram-se em valores variáveis e anômalos, com distribuição errática, e parecem refletir a distribuição heterogênea de pirita, e menos freqüentemente de calcopirita e outros sulfetos, como vênulas e bolsões aleatórios. Pb encontra-se em valores médios idênticos nos dois grupos, porém muito isoladamente verifica-se valor muito anômalo.

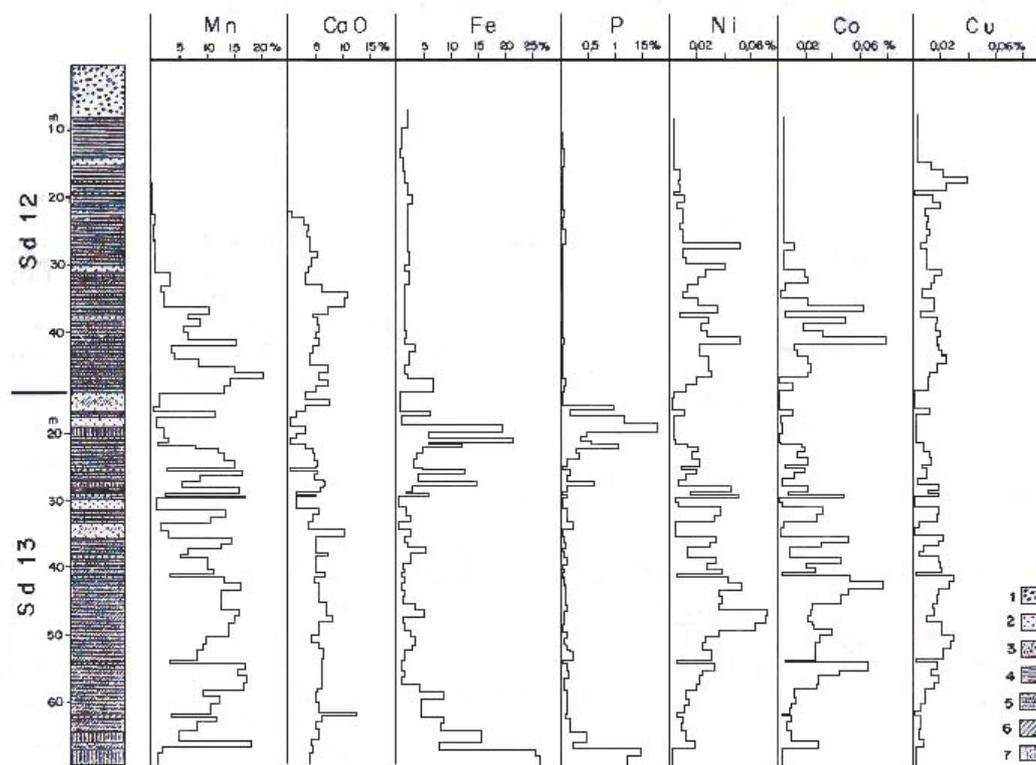


Figura 3.14 – Distribuição de Mn, CaO, Fe, P, Ni, Co e Cu na seqüência sedimentar de Franceville, Gabão. Modificado de Weber (1997).

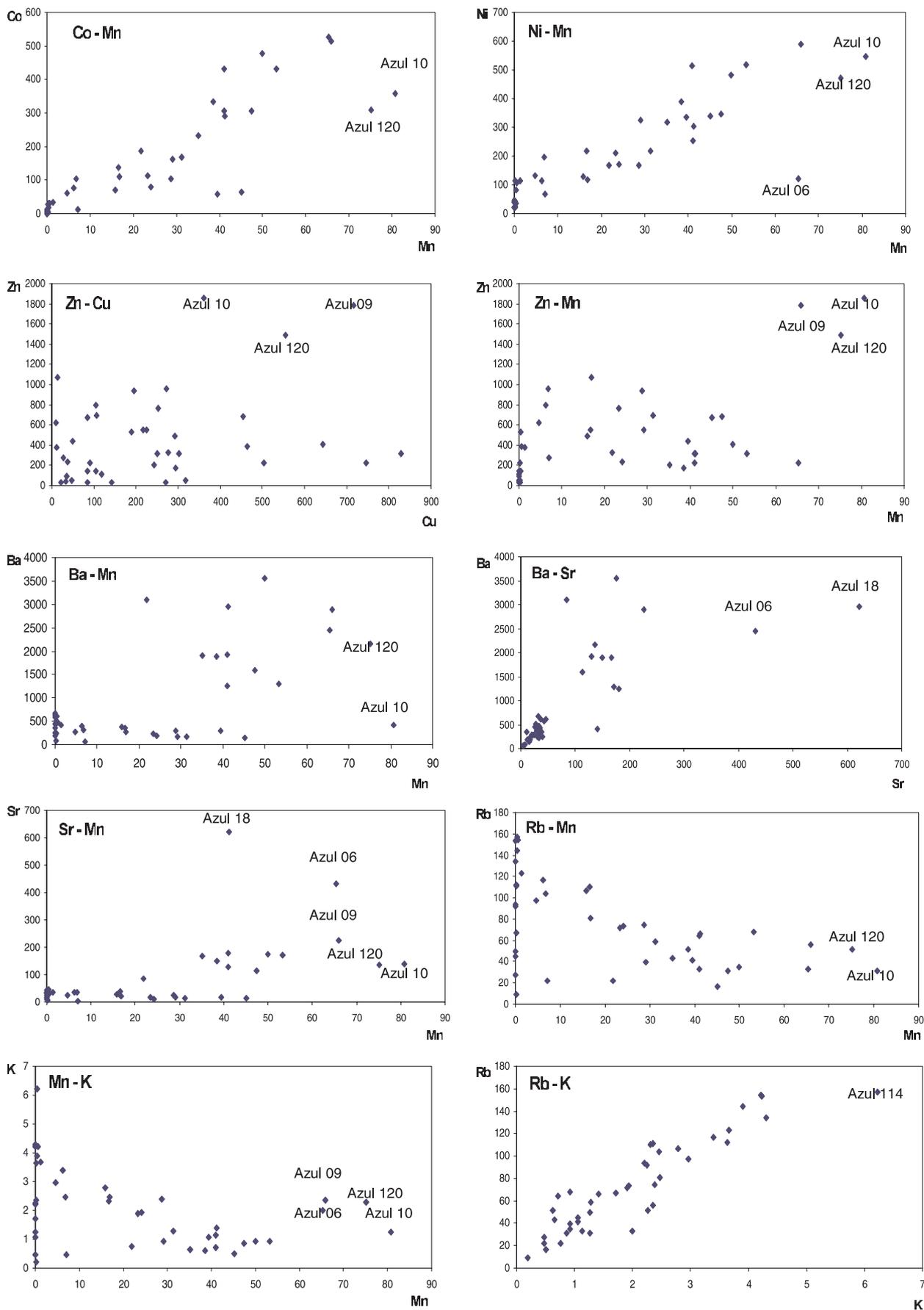


Figura 3.15.1 – Diagramas de dispersão geoquímica: Co-Mn, Ni-Mn, Zn-Cu, Zn-Mn, Ba-Mn, Ba-Sr, Sr-Mn, Rb-Mn, Mn-K, Rb-K, nas amostras dos dois grupos litológicos da Formação Azul nas minas do Azul. (Continua).

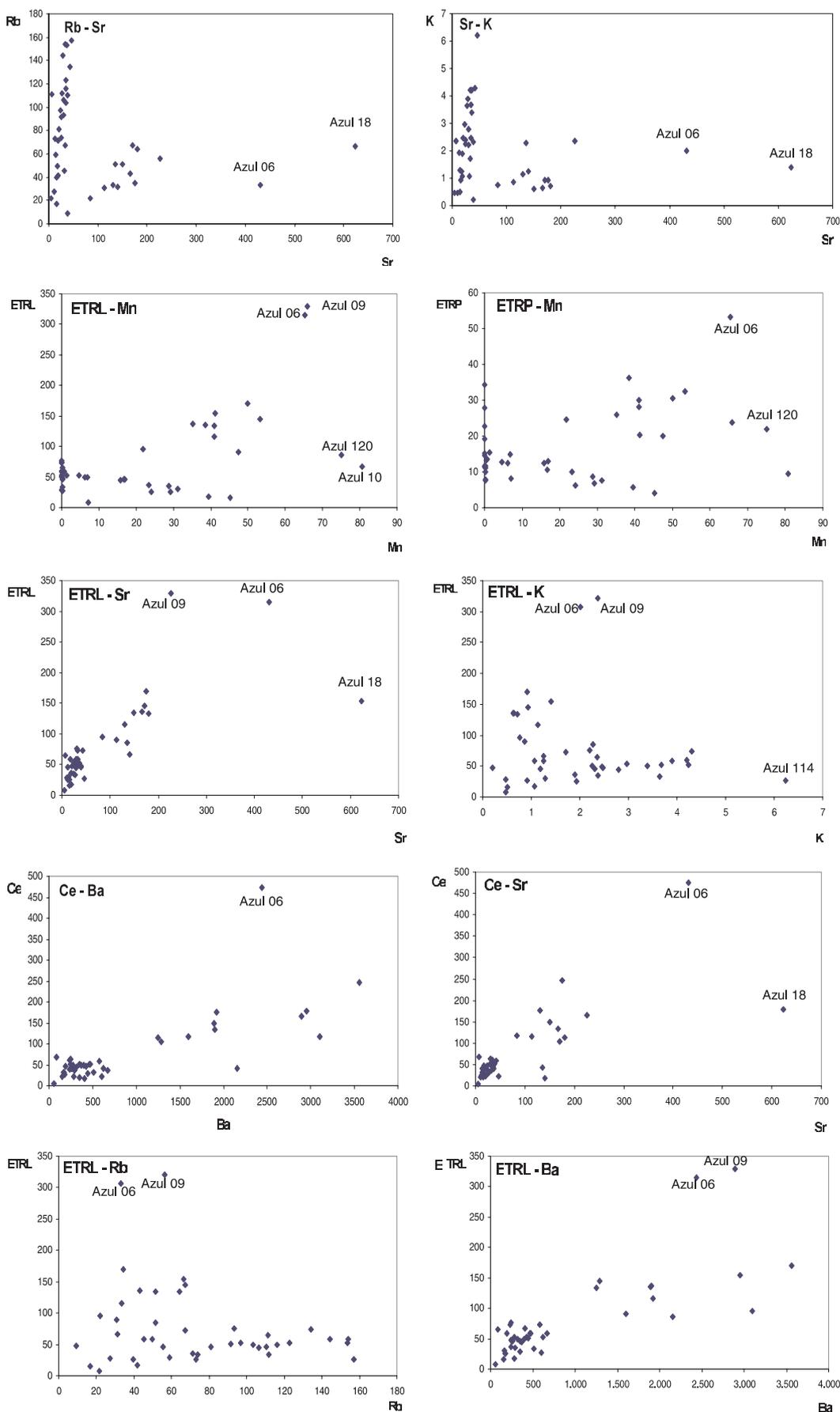


Figura 3.15.2 – (Continuação). Diagramas de dispersão geoquímica: Rb-Sr, Sr-K, ETRL-Mn, ETRP-Mn, ETRL-Sr, ETRL-K, Ce-Ba, Ce-Sr, ETRL-Rb, ETRL-Ba, nas amostras dos dois grupos litológicos da Formação Azul nas minas do Azul.

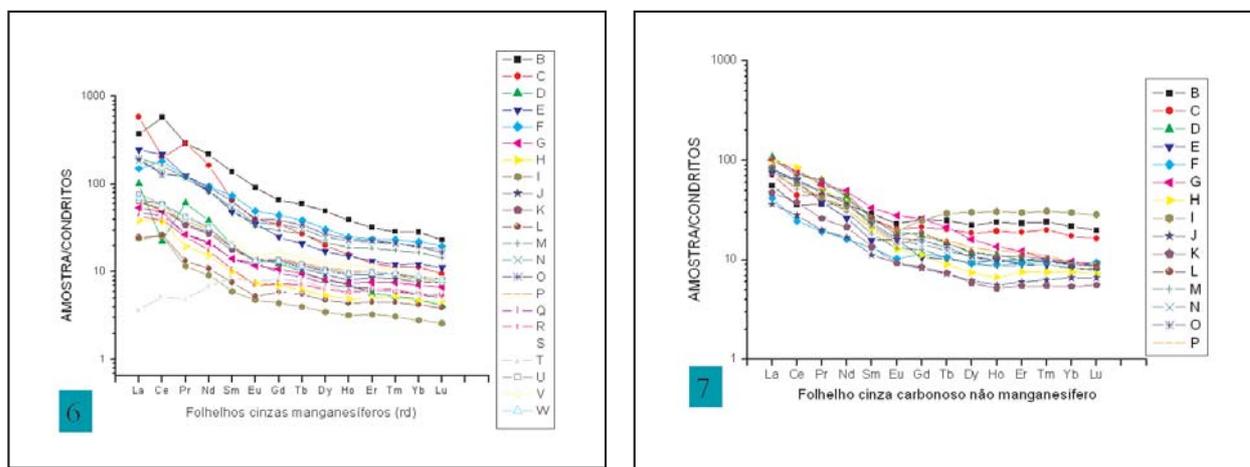


Figura 3.16 Distribuição dos ETR normalizados aos condritos nos siltitos-folhelhos manganésíferos e não manganésíferos.

Tabela 3.10 – Concentrações dos elementos-traço nos siltitos cinzas, folhelhos cinzas a cinzas escuros, não manganésíferos (MnO < 7.0 %) não intemperizados.

| Amostra | Furos | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Ag | In | Sn | Sb | Cs | Ba | |
|----------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| AZUL 13 | F167P105,45 | 228,98 | 101,97 | 1,19 | 20,68 | 21,73 | 30,00 | 20,60 | 1,99 | 21,13 | 91,38 | 25,25 | 68,91 | 215,16 | 9,27 | 10,35 | 3,53 | 0,13 | 1,93 | 0,98 | 3,27 | 447,28 | |
| AZUL 15 | F167P107,85 | 159,29 | 92,44 | 1,00 | 20,00 | 33,28 | 37,43 | 17,73 | 1,79 | 25,38 | 45,33 | 32,36 | 53,37 | 262,56 | 9,51 | 4,94 | 2,27 | 0,10 | 1,18 | 1,39 | 1,72 | 666,95 | |
| AZUL 24 | F277P68,25 | 228,68 | 125,81 | 2,51 | 24,42 | 141,31 | 30,00 | 16,43 | 2,69 | 126,55 | 67,45 | 33,05 | 26,58 | 154,04 | 7,75 | 24,09 | 7,94 | 0,10 | 1,35 | 5,51 | 2,69 | 233,30 | |
| AZUL 25 | F277P77,00 | 290,38 | 104,90 | 2,28 | 22,28 | 269,48 | 30,00 | 11,90 | 1,97 | 9,42 | 9,09 | 39,00 | 23,61 | 86,14 | 5,59 | 23,66 | 5,25 | 0,21 | 1,00 | 1,45 | 0,53 | 241,80 | |
| AZUL 84 | F5P220,00 | 110,26 | 185,62 | 33,32 | 109,71 | 91,25 | 106,36 | 18,02 | 2,03 | 5,00 | 55,58 | 12,62 | 15,83 | 211,14 | 9,02 | -2,00 | 0,50 | 0,20 | 1,28 | 1,65 | 2,71 | 253,70 | |
| AZUL 93 | F63P121,00 | 102,25 | 102,01 | 4,73 | 41,02 | 34,70 | 92,51 | 17,18 | 2,21 | 13,92 | 27,17 | 10,52 | 17,55 | 191,38 | 8,56 | 2,66 | 0,50 | 0,20 | 1,13 | 1,01 | 1,02 | 349,30 | |
| AZUL 98 | F86P63,60 | 264,13 | 108,46 | 12,58 | 40,52 | 317,31 | 50,24 | 13,48 | 1,55 | 70,83 | 93,47 | 30,58 | 31,03 | 143,28 | 7,31 | 38,35 | 0,90 | 0,20 | 1,00 | 3,40 | 4,27 | 244,97 | |
| AZUL 102 | F90P82,40 | 93,92 | 139,20 | 6,45 | 43,34 | 46,68 | 55,57 | 19,30 | 1,29 | 5,00 | 111,26 | 6,88 | 13,07 | 234,81 | 9,28 | 7,31 | 0,50 | 0,20 | 1,74 | 0,50 | 5,72 | 89,50 | |
| AZUL 110 | F174P60,40 | 67,60 | 95,14 | 1,00 | 20,00 | 85,45 | 30,00 | 20,60 | 1,71 | 5,00 | 49,61 | 17,27 | 65,94 | 235,27 | 9,60 | -2,00 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 1,26 | 1,73 | 189,45 | |
| AZUL 113 | F304P79,40 | 226,98 | 61,11 | 13,47 | 69,26 | 28,33 | 275,02 | 14,54 | 8,35 | 166,79 | 21,61 | 4,71 | 13,90 | 137,52 | 4,67 | 36,70 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 1,20 | 2,44 | 59,27 | |
| AZUL 114 | F304P92,00 | 115,26 | 169,48 | 17,40 | 35,19 | 104,32 | 144,09 | 20,79 | 1,67 | 10,66 | 157,30 | 46,12 | 9,63 | 219,41 | 8,45 | 2,60 | 0,50 | 0,20 | 1,65 | 1,10 | 6,20 | 603,91 | |
| AZUL 115 | F304P94,00 | 107,87 | 173,44 | 27,82 | 112,57 | 90,17 | 222,41 | 20,58 | 1,00 | 5,00 | 111,99 | 26,76 | 9,75 | 180,97 | 6,83 | -2,00 | 0,50 | 0,20 | 1,31 | 1,27 | 5,56 | 512,91 | |
| AZUL 153 | F382 P150,15 | 99,53 | 113,10 | 9,00 | 44,34 | 117,66 | 116,75 | 15,90 | 1,59 | 9,98 | 134,45 | 42,54 | 23,72 | 176,25 | 5,79 | 20,20 | 0,50 | 0,20 | 1,04 | 0,67 | 3,95 | 577,71 | |
| AZUL 156 | F382 P168,50 | 143,32 | 125,11 | 6,85 | 45,88 | 85,76 | 147,47 | 17,11 | 1,94 | 8,71 | 153,38 | 36,86 | 21,23 | 188,04 | 6,46 | 14,84 | 0,50 | 0,20 | 1,17 | 0,97 | 5,00 | 620,05 | |
| AZUL 158 | F382 P176,10 | 148,69 | 114,35 | 30,84 | 80,73 | 188,88 | 525,58 | 16,42 | 1,00 | 14,96 | 144,17 | 29,39 | 25,97 | 156,30 | 6,58 | 4,32 | 0,75 | 0,20 | 1,39 | 0,94 | 5,41 | 466,83 | |
| AZUL 160 | F382 P185,35 | 241,71 | 121,18 | 31,68 | 108,00 | 464,61 | 385,52 | 16,18 | 1,00 | 35,73 | 153,99 | 33,08 | 24,31 | 169,13 | 6,97 | 17,73 | 0,73 | 0,20 | 1,02 | 4,19 | 4,94 | 474,66 | |
| AZUL 161 | F382 P188,45 | 147,55 | 113,50 | 34,53 | 115,06 | 11,82 | 381,95 | 14,09 | 1,00 | 156,19 | 122,96 | 34,66 | 31,24 | 137,01 | 6,64 | 2,46 | 0,69 | 0,20 | 1,00 | 0,61 | 3,71 | 427,62 | |
| AZUL 162 | F382 P195,05 | 165,35 | 95,65 | 62,07 | 131,32 | 10,00 | 619,44 | 12,90 | 1,00 | 16,14 | 96,90 | 23,49 | 25,60 | 108,92 | 5,17 | 2,00 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 0,50 | 3,05 | 278,33 | |
| AZUL 163 | F382 P198,25 | 232,50 | 162,27 | 104,65 | 197,67 | 273,16 | 960,79 | 14,41 | 1,60 | 89,01 | 103,46 | 34,84 | 31,52 | 105,77 | 3,97 | 23,08 | 1,64 | 0,20 | 1,00 | 3,24 | 3,61 | 316,10 | |
| AZUL 164 | F382 P199,20 | 226,34 | 119,18 | 76,46 | 115,87 | 104,87 | 792,89 | 16,71 | 1,00 | 28,67 | 116,35 | 35,45 | 23,74 | 124,24 | 5,23 | 7,70 | 0,86 | 0,20 | 1,00 | 0,98 | 3,24 | 394,83 | |
| | MÉDIA | 170,03 | 121,20 | 23,99 | 69,89 | 126,04 | 251,70 | 16,74 | 1,92 | 41,20 | 93,34 | 27,77 | 27,82 | 171,87 | 7,13 | 11,85 | 1,48 | 0,19 | 1,21 | 1,64 | 3,54 | 372,42 | |
| Amostra | Furos | Hf | Ta | W | Tl | Pb | Bi | Th | U | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| AZUL 13 | F167P105,45 | 5,85 | 0,74 | 1,94 | 0,19 | 9,75 | 0,10 | 9,77 | 3,61 | 17,57 | 28,87 | 4,08 | 21,37 | 5,63 | 1,66 | 6,64 | 1,22 | 7,29 | 1,67 | 4,96 | 0,77 | 4,52 | 0,64 |
| AZUL 15 | F167P107,85 | 7,04 | 0,75 | 3,02 | 0,22 | 26,54 | 0,10 | 11,03 | 3,49 | 22,47 | 36,05 | 5,15 | 24,40 | 4,99 | 1,47 | 5,52 | 1,01 | 6,03 | 1,36 | 4,02 | 0,64 | 3,62 | 0,52 |
| AZUL 24 | F277P68,25 | 4,60 | 0,60 | 7,80 | 0,20 | 22,69 | 0,10 | 8,67 | 3,25 | 33,89 | 60,90 | 6,90 | 25,90 | 4,93 | 1,40 | 4,53 | 0,73 | 3,80 | 0,80 | 2,13 | 0,32 | 1,89 | 0,28 |
| AZUL 25 | F277P77,00 | 2,67 | 0,35 | 12,69 | 0,07 | 72,71 | 0,10 | 4,62 | 4,34 | 23,74 | 51,31 | 4,23 | 15,69 | 3,01 | 1,16 | 2,75 | 0,51 | 3,02 | 0,70 | 1,94 | 0,29 | 1,72 | 0,25 |
| AZUL 84 | F5P220,00 | 5,96 | 0,85 | 5,44 | 0,42 | 22,65 | 0,40 | 8,78 | 3,07 | 20,37 | 41,69 | 3,91 | 16,88 | 3,71 | 0,95 | 3,45 | 0,54 | 3,06 | 0,57 | 1,83 | 0,27 | 1,61 | 0,24 |
| AZUL 93 | F63P121,00 | 5,16 | 0,83 | 2,05 | 0,12 | 24,90 | 0,40 | 11,33 | 3,00 | 13,22 | 19,98 | 2,17 | 9,66 | 2,57 | 0,74 | 2,97 | 0,52 | 3,00 | 0,63 | 1,98 | 0,30 | 1,92 | 0,30 |
| AZUL 98 | F86P63,60 | 4,55 | 0,63 | 2,73 | 0,73 | 110,66 | 0,40 | 7,99 | 3,00 | 31,57 | 64,28 | 6,38 | 29,57 | 6,44 | 2,01 | 6,70 | 1,05 | 5,23 | 0,95 | 2,63 | 0,33 | 2,02 | 0,28 |
| AZUL 102 | F90P82,40 | 6,71 | 1,02 | 5,74 | 0,51 | 24,92 | 0,40 | 9,69 | 2,28 | 31,97 | 68,76 | 5,65 | 22,77 | 3,96 | 0,92 | 2,89 | 0,44 | 2,40 | 0,47 | 1,61 | 0,24 | 1,58 | 0,23 |
| AZUL 110 | F174P60,40 | 6,48 | 0,75 | 2,07 | 0,25 | 14,76 | 0,40 | 13,25 | 6,76 | 26,62 | 47,30 | 4,72 | 20,71 | 4,82 | 1,41 | 6,45 | 1,43 | 9,79 | 2,15 | 6,39 | 1,00 | 6,21 | 0,92 |
| AZUL 113 | F304P79,40 | 3,66 | 0,48 | 2,44 | 0,40 | 107,33 | 0,40 | 5,60 | 2,12 | 1,16 | 4,22 | 0,55 | 4,12 | 1,65 | 0,56 | 2,16 | 0,39 | 2,14 | 0,44 | 1,39 | 0,20 | 1,19 | 0,17 |
| AZUL 114 | F304P92,00 | 6,35 | 0,99 | 2,50 | 1,67 | 34,75 | 0,40 | 8,47 | 3,09 | 11,39 | 22,91 | 2,22 | 10,02 | 2,15 | 0,67 | 2,12 | 0,36 | 2,02 | 0,39 | 1,28 | 0,20 | 1,37 | 0,21 |
| AZUL 115 | F304P94,00 | 5,20 | 0,67 | 2,44 | 1,27 | 25,48 | 0,43 | 6,94 | 2,75 | 14,93 | 31,05 | 2,90 | 12,74 | 2,61 | 0,67 | 2,21 | 0,36 | 1,93 | 0,37 | 1,18 | 0,18 | 1,13 | 0,18 |
| AZUL 153 | F382 P150,15 | 4,73 | 0,50 | 3,05 | 1,05 | 58,64 | 0,40 | 9,25 | 3,32 | 32,62 | 57,87 | 7,12 | 27,26 | 5,12 | 1,28 | 4,85 | 0,73 | 3,93 | 0,76 | 2,31 | 0,32 | 1,84 | 0,29 |
| AZUL 156 | F382 P168,50 | 5,05 | 0,60 | 3,41 | 0,70 | 138,87 | 2,05 | 8,51 | 3,03 | 24,97 | 41,71 | 4,63 | 18,19 | 3,49 | 0,95 | 3,28 | 0,52 | 2,94 | 0,60 | 1,87 | 0,29 | 1,72 | 0,26 |
| AZUL 158 | F382 P176,10 | 4,55 | 0,59 | 5,30 | 1,64 | 49,59 | 0,40 | 7,68 | 2,72 | 24,79 | 51,93 | 5,51 | 22,53 | 4,27 | 1,11 | 3,73 | 0,61 | 3,56 | 0,69 | 2,18 | 0,32 | 1,95 | 0,26 |
| AZUL 160 | F382 P185,35 | 4,91 | 0,59 | 6,04 | 1,57 | 63,45 | 0,40 | 8,21 | 3,34 | 26,18 | 51,02 | 5,32 | 22,04 | 4,45 | 1,18 | 4,10 | 0,66 | 3,46 | 0,67 | 2,11 | 0,31 | 1,89 | 0,27 |
| AZUL 161 | F382 P188,45 | 4,03 | 0,53 | 5,25 | 0,22 | 39,62 | 0,40 | 6,89 | 2,65 | 22,70 | 45,18 | 4,72 | 19,21 | 4,06 | 1,04 | 4,36 | 0,77 | 4,35 | 0,86 | 2,55 | 0,36 | 1,93 | 0,27 |
| AZUL 162 | F382 P195,05 | 3,34 | 0,41 | 5,59 | 0,11 | 56,33 | 0,40 | 5,60 | 2,31 | 24,29 | 48,00 | 4,78 | 19,36 | 3,79 | 0,97 | 3,58 | 0,60 | 3,46 | 0,69 | 2,16 | 0,30 | 1,78 | 0,24 |
| AZUL 163 | F382 P198,25 | 2,82 | 0,36 | 6,31 | 0,84 | 965,62 | 10,85 | 5,50 | 2,68 | 20,63 | 43,63 | 4,50 | 18,46 | 4,10 | 1,09 | 4,29 | 0,73 | 4,15 | 0,83 | 2,47 | 0,33 | 1,88 | 0,27 |
| AZUL 164 | F382 P199,20 | 3,69 | 0,48 | 8,50 | 0,63 | 93,04 | 0,40 | 6,84 | 2,84 | 21,60 | 47,87 | 4,67 | 18,95 | 3,82 | 0,95 | 3,42 | 0,56 | 3,30 | 0,67 | 2,05 | 0,31 | 1,84 | 0,26 |
| | MÉDIA | 4,87 | 0,64 | 4,72 | 0,64 | 98,12 | 0,95 | 8,23 | 3,18 | 22,33 | 43,23 | 4,51 | 18,99 | 3,98 | 1,11 | 4,00 | 0,69 | 3,94 | 0,81 | 2,45 | 0,36 | 2,18 | 0,32 |

Azul 13: ST cinza, MOC, NMn, VKao.; Azul 15: ST Mn cinza; Azul 24 e 25: PL/ST cinza, MOC, NMn, VKao.; Azul 84, 93 e 98: PL (folhelho) cinza MOC, NMn; Azul 102 e 110: PL (folhelho) cinza MOC, NMn com VKao.; Azul 113 a 115: PL (folhelho) cinza MOC, NMn com py NMn; Azul 153 a 164: ST cinza lam, MOC, Mn vênulas py.

Tabela 3.11 – Concentrações dos elementos-traço nos siltitos cinzas, folhelhos cinzas a cinzas escuros, manganésiferos (MnO > 7.0 %), não intemperizados.

| Amostra | Furos | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Ag | In | Sn | Sb | Cs | Ba |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| AZUL 06 | F167P27,30 | 159,67 | 23,84 | 526,32 | 121,62 | 503,13 | 226,29 | 26,56 | 1,06 | 48,05 | 33,22 | 431,03 | 42,86 | 81,88 | 4,17 | 26,66 | 1,92 | 0,10 | 1,15 | 0,64 | 1,18 | 2.440,00 |
| AZUL 09 | F167P62,80 | 207,59 | 31,39 | 512,99 | 588,94 | 715,87 | 1.790,00 | 19,76 | 0,89 | 52,94 | 56,18 | 225,63 | 30,20 | 42,01 | 3,25 | 131,41 | 1,23 | 0,10 | 1,00 | 2,71 | 2,78 | 2.890,00 |
| AZUL 10 | F167P68,50 | 126,90 | 31,81 | 357,90 | 544,77 | 361,96 | 1.860,00 | 13,41 | 0,50 | 72,32 | 31,32 | 140,24 | 13,86 | 24,21 | 1,93 | 132,96 | 0,57 | 0,10 | 1,00 | 1,16 | 0,48 | 409,20 |
| AZUL 18 | F277P4,70 | 203,68 | 35,44 | 291,69 | 304,34 | 302,29 | 314,62 | 25,59 | 0,98 | 82,55 | 66,42 | 622,68 | 28,52 | 167,47 | 6,46 | 38,96 | 0,50 | 0,10 | 1,76 | 3,15 | 4,22 | 2.950,00 |
| AZUL 50 | Mina 1 | 141,74 | 20,00 | 333,89 | 389,80 | 295,03 | 172,98 | 26,04 | 1,00 | 24,85 | 51,27 | 150,00 | 41,40 | 193,69 | 7,15 | 12,13 | 0,50 | 0,20 | 2,07 | 5,12 | 5,18 | 1.890,00 |
| AZUL 81 | F5P183,83 | 168,40 | 90,18 | 112,01 | 212,36 | 253,58 | 760,89 | 13,22 | 1,00 | 30,13 | 71,21 | 18,58 | 18,22 | - | 6,18 | 19,20 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 2,08 | 2,72 | 240,83 |
| AZUL 82 | F5P202,00 | 129,74 | 87,58 | 162,39 | 324,75 | 225,14 | 551,11 | 10,89 | 1,00 | 64,06 | 39,60 | 16,25 | 9,88 | - | 4,40 | 64,67 | 0,56 | 0,20 | 8,47 | 5,45 | 1,44 | 173,64 |
| AZUL 83 | F5P216,30 | 135,34 | 35,23 | 64,43 | 340,10 | 84,07 | 673,46 | 10,22 | 1,00 | 22,36 | 16,73 | 15,16 | 5,31 | - | 2,55 | 19,87 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 1,13 | 0,54 | 150,66 |
| AZUL 88 | F6P128,16 | 174,02 | 105,40 | 69,76 | 128,25 | 292,92 | 492,18 | 15,76 | 1,00 | 24,80 | 106,41 | 29,66 | 20,14 | 131,07 | 7,10 | 15,64 | 0,59 | 0,20 | 1,00 | 2,47 | 3,80 | 367,55 |
| AZUL 89 | F6P136,40 | 172,98 | 46,31 | 56,74 | 337,05 | 50,21 | 438,87 | 11,98 | 1,00 | 22,44 | 41,66 | 19,34 | 4,80 | - | 3,40 | 18,63 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 1,57 | 1,14 | 284,09 |
| AZUL 120 | F318P73,00 | 126,91 | 24,64 | 308,73 | 469,95 | 553,97 | 1.490,00 | 20,93 | 1,00 | 46,71 | 51,37 | 135,87 | 10,97 | - | 1,09 | 33,57 | 0,82 | 0,20 | 1,00 | 1,32 | 1,27 | 2.160,00 |
| AZUL 130 | F382 P22,60 | 184,40 | 32,10 | 234,04 | 316,25 | 243,30 | 199,33 | 32,03 | 1,00 | 26,94 | 43,04 | 166,57 | 34,61 | 244,85 | 11,46 | 14,02 | 0,50 | 0,20 | 2,62 | 3,15 | 4,52 | 1.900,00 |
| AZUL 140 | F382 P73,40 | 206,10 | 81,02 | 432,19 | 514,60 | 745,14 | 220,12 | 35,02 | 1,00 | 26,84 | 64,25 | 180,22 | 44,72 | - | 9,99 | 26,26 | 0,50 | 0,20 | 2,80 | 2,50 | 5,45 | 1.250,00 |
| AZUL 142 | F382 P 93,70 | 282,02 | 20,00 | 430,62 | 519,60 | 828,49 | 320,44 | 40,29 | 1,00 | 48,92 | 67,54 | 170,84 | 44,05 | - | 10,97 | 23,50 | 0,93 | 0,20 | 1,80 | 2,94 | 5,63 | 1.290,00 |
| AZUL 165 | F382 P202,00 | 152,14 | 81,62 | 109,53 | 118,95 | 13,34 | 1.070,00 | 15,62 | 1,00 | 19,00 | 81,10 | 20,53 | 28,10 | 90,61 | 3,79 | 2,54 | 0,55 | 0,20 | 1,00 | 0,50 | 2,25 | 265,12 |
| AZUL 166 | F382 P206,55 | 206,86 | 73,74 | 102,57 | 166,41 | 194,85 | 943,42 | 19,08 | 1,00 | 92,78 | 73,99 | 24,73 | 17,17 | 41,07 | 3,20 | 26,82 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 1,72 | 1,03 | 291,95 |
| AZUL 173 | F387 P18,00 | 168,92 | 119,17 | 478,13 | 482,52 | 643,23 | 413,10 | 46,77 | 1,01 | 33,84 | 34,46 | 175,73 | 31,22 | - | 7,75 | 28,09 | 2,34 | 0,20 | 2,19 | 2,60 | 3,08 | 3.560,00 |
| AZUL 175 | F387 P25,00 | 208,46 | 55,62 | 307,62 | 251,97 | 251,56 | 317,33 | 31,49 | 1,00 | 28,48 | 33,26 | 130,03 | 33,49 | - | 9,07 | 24,71 | 2,70 | 0,20 | 2,29 | 4,55 | 2,75 | 1.920,00 |
| AZUL 176 | F387 P27,60 | 233,17 | 72,58 | 306,34 | 345,72 | 454,20 | 684,21 | 38,53 | 1,00 | 75,56 | 30,83 | 113,09 | 29,79 | - | 9,61 | 53,22 | 2,08 | 0,20 | 2,67 | 3,28 | 2,65 | 1.600,00 |
| AZUL 178 | F387 P33,00 | 241,07 | 144,18 | 187,90 | 166,40 | 276,28 | 329,58 | 29,96 | 1,31 | 30,32 | 22,15 | 84,33 | 32,48 | 334,22 | 11,37 | 32,48 | 2,78 | 0,20 | 3,41 | 3,19 | 1,33 | 3.100,00 |
| AZUL 199 | F387 P114,20 | 182,09 | 116,66 | 136,89 | 216,32 | 216,16 | 554,97 | 14,03 | 1,16 | 31,16 | 110,59 | 38,85 | 17,09 | 116,17 | 59,53 | 21,68 | 3,18 | 0,20 | 1,00 | 1,25 | 3,69 | 351,60 |
| AZUL 201 | F396 P79,70 | 120,34 | 74,68 | 166,90 | 219,61 | 106,53 | 695,29 | 15,09 | 1,14 | 10,35 | 59,09 | 13,99 | 12,08 | 69,96 | 5,21 | 17,30 | 1,41 | 0,20 | 1,35 | 1,31 | 2,67 | 167,35 |
| AZUL 202 | F396 P83,50 | 74,48 | 67,26 | 78,87 | 172,31 | 38,06 | 232,85 | 15,91 | 1,14 | 6,37 | 73,13 | 12,49 | 10,40 | 102,69 | 5,00 | 11,67 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 0,50 | 2,86 | 178,96 |
| MÉDIA | com Mn | 174,22 | 63,93 | 250,80 | 315,33 | 332,58 | 641,35 | 22,97 | 1,01 | 40,08 | 54,73 | 127,65 | 24,41 | 126,15 | 8,46 | 34,61 | 1,14 | 0,18 | 1,90 | 2,36 | 2,72 | 1.297,00 |
| MÉDIA | sem Mn | 170,03 | 121,20 | 23,99 | 69,89 | 126,04 | 251,70 | 16,74 | 1,92 | 41,20 | 93,34 | 27,77 | 27,82 | 171,87 | 7,13 | 11,85 | 1,48 | 0,19 | 1,21 | 1,64 | 3,54 | 372,42 |

| Amostra | Furos | Hf | Ta | W | Tl | Pb | Bi | Th | U | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|--------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|------|
| AZUL 06 | F167P27,30 | 3,46 | 0,37 | 2,24 | 5,00 | 68,24 | 0,10 | 8,67 | 4,08 | 118,39 | 474,27 | 33,04 | 131,09 | 26,60 | 6,57 | 17,08 | 2,91 | 16,07 | 2,73 | 6,80 | 0,92 | 5,94 | 0,74 |
| AZUL 09 | F167P62,80 | 2,42 | 0,34 | 10,30 | 4,70 | 133,37 | 0,10 | 4,77 | 2,50 | 184,21 | 165,62 | 32,82 | 97,49 | 12,52 | 2,84 | 9,03 | 1,33 | 6,51 | 1,11 | 2,70 | 0,36 | 2,35 | 0,30 |
| AZUL 10 | F167P68,50 | 0,94 | 0,07 | 3,02 | 1,07 | 21,13 | 0,10 | 1,45 | 1,17 | 31,73 | 18,23 | 6,85 | 23,10 | 3,85 | 0,97 | 3,28 | 0,49 | 2,63 | 0,50 | 1,21 | 0,17 | 1,03 | 0,13 |
| AZUL 18 | F277P4,70 | 4,96 | 0,60 | 3,83 | 5,52 | 144,20 | 0,44 | 10,00 | 4,14 | 78,27 | 177,70 | 14,15 | 49,96 | 9,27 | 2,54 | 6,48 | 1,02 | 5,58 | 1,06 | 2,81 | 0,39 | 2,56 | 0,36 |
| AZUL 50 | Mina 1 | 5,28 | 0,74 | 2,62 | 2,26 | 121,74 | 0,71 | 10,37 | 2,03 | 47,43 | 149,87 | 13,77 | 55,94 | 14,18 | 3,56 | 11,59 | 1,91 | 10,02 | 1,74 | 5,02 | 0,75 | 4,58 | 0,63 |
| AZUL 81 | F5P183,83 | 4,19 | 0,53 | 5,51 | 0,52 | 68,78 | 0,40 | 4,97 | 2,18 | 16,84 | 39,89 | 2,97 | 12,86 | 2,70 | 0,85 | 2,79 | 0,47 | 2,67 | 0,52 | 1,61 | 0,24 | 1,49 | 0,21 |
| AZUL 82 | F5P202,00 | 2,87 | 0,28 | 5,58 | 0,48 | 47,85 | 0,40 | 3,69 | 1,55 | 12,23 | 30,53 | 2,18 | 9,15 | 1,92 | 0,53 | 1,84 | 0,31 | 1,76 | 0,35 | 1,08 | 0,17 | 0,98 | 0,15 |
| AZUL 83 | F5P216,30 | 1,52 | 0,13 | 3,14 | 0,15 | 36,54 | 0,40 | 1,71 | 0,77 | 7,53 | 20,96 | 1,30 | 5,49 | 1,15 | 0,35 | 1,14 | 0,19 | 1,13 | 0,22 | 0,70 | 0,10 | 0,58 | 0,08 |
| AZUL 88 | F6P128,16 | 4,26 | 0,57 | 6,50 | 1,00 | 51,48 | 0,40 | 6,34 | 2,21 | 20,47 | 48,89 | 3,79 | 16,20 | 3,41 | 1,01 | 3,43 | 0,58 | 3,35 | 0,65 | 1,98 | 0,30 | 1,79 | 0,27 |
| AZUL 89 | F6P136,40 | 1,89 | 0,18 | 3,86 | 0,28 | 12,21 | 0,40 | 2,47 | 1,66 | 7,81 | 21,60 | 1,49 | 6,55 | 1,46 | 0,38 | 1,52 | 0,27 | 1,56 | 0,31 | 0,95 | 0,14 | 0,87 | 0,12 |
| AZUL 120 | F318P73,00 | 1,36 | 0,19 | 1,00 | 3,27 | 174,93 | 0,40 | 2,56 | 2,01 | 34,53 | 42,28 | 7,39 | 33,93 | 7,47 | 1,94 | 7,28 | 1,19 | 6,92 | 1,19 | 2,67 | 0,33 | 1,97 | 0,26 |
| AZUL 130 | F382 P22,60 | 8,30 | 0,94 | 5,57 | 2,06 | 158,80 | 1,20 | 13,52 | 2,94 | 62,05 | 134,59 | 13,11 | 48,54 | 10,03 | 2,34 | 7,78 | 1,34 | 7,02 | 1,33 | 3,97 | 0,56 | 3,44 | 0,46 |
| AZUL 140 | F382 P73,40 | 8,59 | 0,88 | 23,86 | 2,15 | 175,72 | 1,44 | 15,04 | 3,10 | 57,71 | 113,77 | 13,13 | 49,54 | 10,43 | 2,57 | 9,00 | 1,52 | 8,04 | 1,58 | 4,68 | 0,67 | 4,05 | 0,58 |
| AZUL 142 | F382 P 93,70 | 5,94 | 0,60 | 15,86 | 3,86 | 282,78 | 1,33 | 9,84 | 2,41 | 61,45 | 104,46 | 13,99 | 54,53 | 12,25 | 2,89 | 10,12 | 1,68 | 8,91 | 1,66 | 4,88 | 0,68 | 4,06 | 0,53 |
| AZUL 165 | F382 P202,00 | 3,14 | 0,33 | 4,97 | 0,19 | 43,87 | 0,40 | 5,08 | 1,94 | 19,97 | 41,15 | 4,23 | 17,90 | 3,79 | 0,94 | 3,70 | 0,62 | 3,62 | 0,72 | 2,14 | 0,30 | 1,66 | 0,24 |
| AZUL 166 | F382 P206,55 | 2,12 | 0,24 | 5,76 | 0,70 | 37,51 | 0,40 | 3,74 | 2,37 | 14,88 | 36,07 | 3,04 | 12,94 | 2,68 | 0,90 | 2,55 | 0,43 | 2,41 | 0,46 | 1,40 | 0,20 | 1,14 | 0,16 |
| AZUL 173 | F387 P18,00 | 5,06 | 0,53 | 18,45 | 7,04 | 165,47 | 1,99 | 18,13 | 3,45 | 65,02 | 247,01 | 17,97 | 68,23 | 15,67 | 3,32 | 9,89 | 1,64 | 8,53 | 1,48 | 4,16 | 0,60 | 3,71 | 0,50 |
| AZUL 175 | F387 P25,00 | 7,82 | 0,85 | 8,05 | 1,52 | 162,40 | 1,09 | 14,88 | 4,68 | 43,49 | 175,54 | 11,32 | 46,77 | 11,68 | 2,75 | 8,11 | 1,39 | 7,84 | 1,45 | 4,22 | 0,63 | 3,91 | 0,54 |
| AZUL 176 | F387 P27,60 | 6,15 | 0,79 | 25,83 | 3,03 | 215,98 | 2,55 | 14,37 | 3,42 | 38,95 | 116,48 | 8,80 | 33,54 | 7,09 | 1,75 | 5,63 | 0,94 | 5,38 | 1,09 | 3,25 | 0,48 | 2,85 | 0,40 |
| AZUL 178 | F387 P33,00 | 9,66 | 1,07 | 6,60 | 2,45 | 266,26 | 1,28 | 18,46 | 4,51 | 37,30 | 117,14 | 9,04 | 37,97 | 8,85 | 2,26 | 7,09 | 1,25 | 6,66 | 1,26 | 3,84 | 0,55 | 3,41 | 0,51 |
| AZUL 199 | F387 P114,20 | 3,86 | 1,30 | 3,83 | 0,40 | 51,62 | 0,40 | 6,80 | 16,76 | 20,53 | 50,94 | 4,30 | 16,63 | 3,24 | 0,86 | 2,96 | 0,50 | 2,78 | 0,58 | 1,75 | 0,26 | 1,54 | 0,24 |
| AZUL 201 | F396 P79,70 | 3,31 | 0,34 | 3,46 | 0,50 | 93,80 | 0,40 | 6,70 | 2,06 | 13,56 | 31,55 | 2,84 | 10,59 | 2,05 | 0,51 | 1,92 | 0,36 | 2,03 | 0,41 | 1,31 | 0,19 | 1,15 | 0,17 |
| AZUL 202 | F396 P83,50 | 3,82 | 0,37 | 3,16 | 0,56 | 12,36 | 0,40 | 5,72 | 1,57 | 12,74 | 25,64 | 2,22 | 8,57 | 1,68 | 0,45 | 1,49 | 0,28 | 1,61 | 0,33 | 1,11 | 0,17 | 1,11 | 0,16 |
| MÉDIA | com Mn | 4,39 | 0,53 | 7,52 | 2,12 | 110,74 | 0,73 | 8,23 | 3,20 | 43,79 | 103,66 | 9,73 | 36,85 | 7,57 | 1,87 | 5,90 | 0,98 | 5,35 | 0,99 | 2,79 | 0,40 | | |

Tabela 3.12 – Composição química e concentrações de isótopos estáveis e elementos-traço em minérios de manganês e acumulações relacionadas, comparadas com folhelhos.

| Elementos Químicos | Unidades | Kalahari S.África Paleoprot. | Tanganshan China Neoprot. | Xiangtan China Neoprot. | Molango México Jurassic | Hydrothermal Pacific Modern | Hydrogenous Pacific Modern | Hydrogenous Nodules Modern | Post Archean shales | |
|-----------------------------------|----------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|------|
| Mn | % | 36.5 | 44.9 | 42.3 | 28.0 | 37.0 | 22.1 | 18.6 | MnO | 0.11 |
| Fe | % | 4.22 | 2.66 | 1.54 | 8.53 | 1.87 | 15.1 | 12.5 | FeO | 6.5 |
| Na | % | 0.01 | 0.03 | 0.01 | 0.00 | 2.37 | 1.6 | 1.7 | Na ₂ O | 1.2 |
| Mg | % | 1.93 | 1.09 | 1.23 | 5.10 | 1.95 | 1.26 | 1.6 | MgO | 2.2 |
| Al | % | 0.09 | 0.74 | 0.44 | 1.43 | 1.57 | 1.01 | 2.7 | Al ₂ O ₃ | 18.9 |
| Si | % | 2.40 | 1.54 | 4.75 | 5.36 | 7.73 | 3.69 | 7.7 | SiO ₂ | 62.8 |
| P | % | 0.01 | 0.12 | 0.07 | 0.06 | 0.13 | 1.18 | 0.25 | P ₂ O ₅ | 0.16 |
| K | % | 0.00 | 0.01 | 0.17 | 0.00 | 1.01 | 0.56 | 0.7 | K ₂ O | 3.7 |
| Ca | % | 12.2 | 2.72 | 1.34 | 1.73 | 2.48 | 4.13 | 2.3 | CaO | 1.3 |
| Ti | % | 0.01 | 0.14 | 0.10 | 0.06 | 0.15 | 0.77 | 0.67 | TiO ₂ | 1.0 |
| C orgânico | % | | 2.90 | 0.60 | | | | | | |
| C carbonato | % | 3.15 | 8.70 | 8.70 | | | | 0.1 | | |
| δ ¹³ C _{org} | per mil | | | | -27.3 | | | | | |
| δ ¹³ C _{carb} | per mil | -9.1 | | | -13.1 | | | | | |
| δ ¹⁸ C _{carb} | per mil | -10.4 | | | -3.6 | | | | | |
| S total | % | 0.04 | 2.00 | 0.80 | 0.20 | 0.06 | 0.305 | 0.47 | | |
| δ ³⁴ S | per mil | | 26.7 | 52.5 | 3.2 | | | | | |
| Sc | ppm | | 13 | 12 | 2.12 | 3.8 | 6.4 | 10 | | 16 |
| V | ppm | 6 | 80 | 53 | 67 | 225 | 515 | 500 | | 150 |
| Cr | ppm | 16 | 23 | 24 | 15 | 48 | 22 | 35 | | 110 |
| Co | ppm | 50 | 64 | 44 | 132 | 72 | 6400 | 2700 | | 23 |
| Ni | ppm | 19 | 45 | 24 | 60 | 287 | 5400 | 6600 | | 55 |
| Cu | ppm | <5 | 16 | 11 | 7 | 228 | 1080 | 4500 | | 50 |
| Zn | ppm | 74 | 19 | 266 | 48 | 238 | 680 | 1200 | | 85 |
| As | ppm | | 48 | 34 | 31 | 33 | 165 | 140 | | |
| Se | ppm | | 2.0 | 0.5 | | 0.12 | 0.4 | 0.6 | | |
| Rb | ppm | 1 | 1 | 14 | <0.2 | <0.2 | <0.2 | 17 | | 160 |
| Sr | ppm | 146 | 69 | 101 | 40 | 555 | 1210 | 830 | | 200 |
| Y | ppm | 5.3 | 41 | 33 | 8.6 | 17 | 166 | 150 | | |
| Zr | ppm | 2 | 33 | 29 | 15 | 23 | 172 | 560 | | 210 |
| Nb | ppm | <0.1 | 25.0 | 17.5 | 1.5 | 9.9 | <0.1 | 50 | | 19 |
| Mo | ppm | <2 | 16.7 | 6.5 | 2 | 327 | 445 | 400 | | 1.0 |
| Sn | ppm | <1 | 6.5 | 4.0 | <1 | | | 2 | | 4.0 |
| Sb | ppm | | 14 | 2.8 | 1.1 | 25 | 24 | 40 | | |
| Ba | ppm | 360 | 50 | 259 | 45 | 1380 | 1700 | 2300 | | 650 |
| Pb | ppm | 6 | 68 | 8 | 6 | 45 | 1780 | 900 | | 20 |
| Bi | ppm | | 0.5 | <0.1 | | | | 7.0 | | 0.25 |
| Th | ppm | 0.4 | 3.3 | 1.2 | 1.4 | 0.7 | 33.0 | 30.0 | | 14.6 |
| U | ppm | 0.2 | 0.9 | 0.7 | 1.6 | 2.1 | 9.6 | 5.0 | | 3.1 |
| La | ppm | 3.18 | 32.0 | 26 | 11.8 | 18.9 | 202 | 157 | | 38 |
| Ce | ppm | 3.3 | 98.8 | 79.4 | 18.1 | 16.3 | 1100 | 530 | | 80 |
| Pr | ppm | 0.5 | 8.0 | 6.7 | 2.4 | | 106 | 36 | | 8.9 |
| Nd | ppm | 2.1 | 32.8 | 27.8 | 9.5 | 7.2 | 162 | 158 | | 32 |
| Sm | ppm | 0.33 | 7.60 | 5.50 | 1.70 | 0.99 | 42 | 35 | | 5.6 |
| Eu | ppm | 0.16 | 2.35 | 1.14 | 0.43 | 0.28 | 9.90 | 9.00 | | 1.1 |
| Gd | ppm | 0.58 | 7.52 | 5.56 | 1.87 | | 26 | 32 | | 4.4 |
| Tb | ppm | 0.09 | 1.24 | 0.88 | 0.29 | 0.25 | 7.53 | 5.40 | | 0.77 |
| Dy | ppm | 0.55 | 7.99 | 5.85 | 1.49 | | 57.8 | 31.0 | | 4.4 |
| Ho | ppm | 0.14 | 1.55 | 1.23 | 0.31 | | 6.60 | 7.00 | | 1.0 |
| Er | ppm | 0.42 | 4.54 | 3.28 | 0.85 | | 31.9 | 18.0 | | 2.9 |
| Tm | ppm | 0.06 | 0.58 | 0.46 | 0.11 | | 4.30 | 2.30 | | 0.40 |
| Yb | ppm | 0.45 | 3.50 | 2.75 | 0.75 | 0.78 | 17.7 | 20.0 | | 2.8 |
| Lu | ppm | 0.08 | 0.43 | 0.38 | 0.15 | 0.14 | 3.34 | 1.80 | | 0.43 |
| Fontes | | a,b | a | a | a,c,d | e | e | f | | g |

Maynard J.B. (2004) *apud* a) Liu *et al.* (2005), b) Gutzmer (1996), c) Okita (1987), d) Liu (1988), e) Usui & Someya (1997), f) Li (2000), g) Taylor & McLennan (1985).

IV. QUÍMICA-MINERAL E MICROMORFOLOGIA DOS MINERAIS DO PERFIL LATERÍTICO

Os Minerais de Manganês

Criptomelana, $K(Mn^{2+}, Mn^{4+})_8O_{16}$.

É o principal mineral de manganês das minas do Azul, em Carajás. É encontrada em todo perfil laterítico e provavelmente é também mineral primário de corpos lenticulares negros da seqüência sedimentar Azul. Apresenta-se em várias fases de formação, no mínimo três, como já foi demonstrado por Beauvais *et al.* (1987). É também mineral criptocristalino, visualmente pulverulento até massas compactas e negras ou negras azuladas. Algumas imagens de MEV mostram agregados micrométricos em forma de gramínea com terminações de pirolusita, plaquetas e cristais aciculares intercrescidos com pirolusita (Figura 4.1). Apresenta-se em diferentes graus de cristalinidade, em consequência do que nem sempre seu espectro de difração de raios-X é claro (Figura 4.2). Nos materiais da base do perfil de alteração ou mesmo não alterados (rocha-sã) a criptomelana tende a ocorrer com baixa cristalinidade, e ser o principal OH-Mn, quando pode estar associada com todorokita e mesmo hollandita. O grau de cristalinidade aumenta em direção ao topo do perfil laterítico, ou seja, em direção a novas gerações mais cristalinas. Nas crostas manganíferas e nos pelitos lateritizados ela se apresenta com alto grau de cristalinidade, comparável com a criptomelana de referência.

Criptomelana por vezes ocorre como agregados romboédricos, pseudomórficos, cimentados por massa microcristalina. Essas formas, em tamanhos de 5 a 25 μm , podem apresentar crescimento poligonal de criptomelana sobre cristal precoce. Às vezes essas formas apresentam inclusões de criptomelana e/ou nsutita/pirolusita reliquiares claramente ligadas ao material carbonático (Mn, Fe, C e O) sugerindo substituição mineral (Figuras 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3).

Foram observadas também massas de criptomelana cortadas por venulações de criptomelana, mostrando suas várias gerações. Nelas ocorrem partículas finas de Au e mineral de Ba (barita?) com $< 2 \mu\text{m}$ (Figuras 4.3.2 e 4.3.3). Nas massas microcristalinas observa-se por vezes criptomelana substituída por nsutita e/ou pirolusita, bem como núcleos de nsutita com zonação de criptomelana, sugerindo diversos estágios de formação da criptomelana.

Criptomelana é encontrada como constituinte dos núcleos dos esferolitos, como mineral residual do perfil pré-existente, quiçá das rochas-sãs mineralizadas. Criptomelana pode ser mineral sedimentar como mostra a seqüência sedimentar manganífera não intemperizada do Morro Urucum em Corumbá, Mato Grosso do Sul, associada com formações ferríferas bandadas (Costa *et al.*, 2005). Aí se encontra também em cristalinidade variada e com composição química restrita a K e Mn (Costa *et al.*, 2005).

As análises químicas pontuais obtidas com MSE (Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4) mostram que se trata de mineral formado apenas de K e Mn, com pequenas quantidades de Al. Não contém Ba nem Ca, Sr, Pb e ETR. Infelizmente não foram dosados elementos como Ni, Co, Cu e Zn, que se encontram em valores relativamente elevados nas rochas, mesmo nas rochas-sãs mineralizadas, portadoras de matéria orgânica. Os ETR não foram dosados na MSE, mas os dados semiquantitativos de MEV/SED mostram a ausência de ETR neste mineral, ou então os baixos teores. Em Urucum a criptomelana praticamente não contém estes elementos, exceto Sr.

Hollandita, $Ba(Mn^{+4}, Mn^{+2})_8O_{16}$.

Da mesma forma como litioforita, hollandita é um OH-Mn típico dos horizontes de topo, encontrada com frequência na crosta manganífera, maciça a compacta, bem como aleatoriamente em pelitos e siltitos lateritizados, mesmo parcialmente intemperizados. Também só foi possível identificá-la com o auxílio de DRX e de análises de MSE e MEV/SED. Embora quimicamente tenha semelhanças com a romanechita, esta não foi identificada nos espectros de DRX. Hollandita é isoestrutural com criptomelana, e seus difratogramas são praticamente idênticos (Figura 4.4). Hollandita no Azul se apresenta também com variado grau de cristalinidade, com alguns espécimes mostrando elevada cristalinidade. A distinção se faz unicamente pela composição química, em que hollandita é o membro rico em bário. Além de Ba, hollandita também contém teores elevados de ETR, principalmente de ETRL, sendo Ce de longe o mais abundante. Nas análises pontuais por MSE (Tabelas 4.5 e 4.6) os valores de BaO são inferiores aos reportados na literatura (webmineral.com), compensados pelos ETR e Sr, que infelizmente não foram dosados na MSE. Os valores de MnO estão acima, enquanto os de BaO estão abaixo dos da amostra de referência da literatura (webmineral.com). Massas coliformes formadas de bandas concêntricas submilimétricas contém bandas criptocristalinas e microcristalinas aciculares (Figura 4.5).

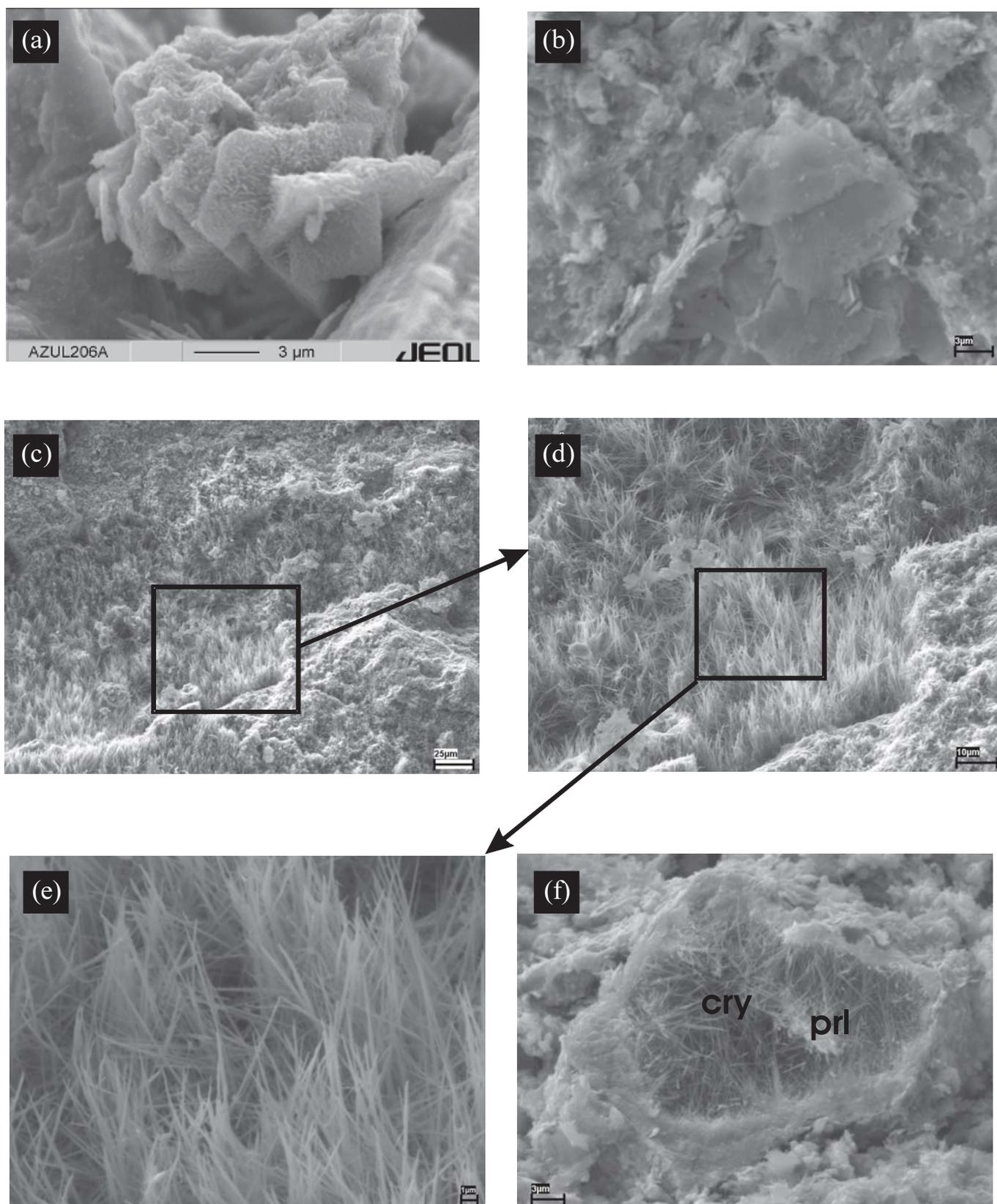


Figura 4.1 – (a) Agregados micrométricos gramíneos com terminações de pirolusita (Azul206); (b) Plaquetas e cristalitos finos irregulares de minerais de manganês (criptomelana) (Azul 09 F 167 P 62.8 m); (c) Intercrescimento de cristais aciculares de criptomelana e pirolusita; (d), (e) Detalhe dos cristais aciculares, mostrando a largura < 1 micrometro das mesmas (Azul 10); (f) Microcavidade preenchida por criptomelana e pirolusita (branco) acicular. As bordas das cavidades são criptomelana (Azul09 F 167 P 62.8 m). Imagens de elétrons secundários (SE).

Todorokita, (Mn, Ca, Mg)Mn₃O₇

É outro OH-Mn, cuja identificação só foi possível com DRX, com suporte da microanálise química de MSE. Também é de aspecto terroso, negro, constituindo os pelitos manganésiferos parcialmente alterados ou mesmo inalterados. Guarda parcialmente uma estruturação de rocha sedimentar estratificada sutilmente ou é maciça. É mineral freqüente nos corpos lenticulares negros lateritizados e aparentemente também nos apenas parcialmente alterados, ao lado da criptomelana. Também se faz presente no núcleo de alguns esferolitos, como parte dos fragmentos que lhe deram origem, ao lado da criptomelana. No MEV foram observados agregados tabulares de todorokita (Figura 4.6). O padrão difratométrico mostra também cristalinidade baixa e íntima relação com criptomelana primária (Figura 4.7). A química-mineral obtida em amostras pontuais do furo 167 de 62 a 68 m de profundidade (Tabela 4.7) é compatível com a todorokita de referência em termos de Mn (webmineral.com). Essas análises mostram ainda um pouco de Al₂O₃ e K₂O.

Pirolusita, MnO₂

É um dos poucos OH-Mn que se apresenta em formas microcristalinas a cristalinas, principalmente quando em microcavidades e em fissuras. São cristais submilimétricos, prismáticos, alojados nos esferolitos, em materiais da crosta manganésifera desmantelada, e ainda nos pelitos lateritizados no horizonte argiloso (Figuras 4.3 e 4.8). Nestes a maioria das vênulas de espessura milimétrica e extensão centimétricas são formadas de pirolusita. Este mineral classicamente não forma o total das crostas ou dos materiais manganésiferos. É sempre um mineral isolado, ocupando principalmente cavidades. Mostra íntimo intercrescimento com criptomelana e nsutita. Os difratogramas de raios x indicam que de fato é material de alta cristalinidade, com padrão similar à pirolusita das fichas ICDD (PDF:01-0799) (Figura 4.9). As análises químicas pontuais obtidas por MSE (Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10) trazem déficit de manganês quando comparadas com a pirolusita teórica, que não é adequadamente compensado com outros elementos como Fé e Al. Quimicamente pirolusita e nsutita se confundem, daí porque na tabela 4.9 os dados são relacionados a pirolusita-nsutita.

Litioforita, (Al,Li)Mn⁴⁺O₂(OH)₂

É um OH-Mn típico do topo do perfil, principalmente das crostas e dos esferolitos, porém só é identificável por DRX (Figura 4.10), pois, além de ser criptocristalina, ocor-

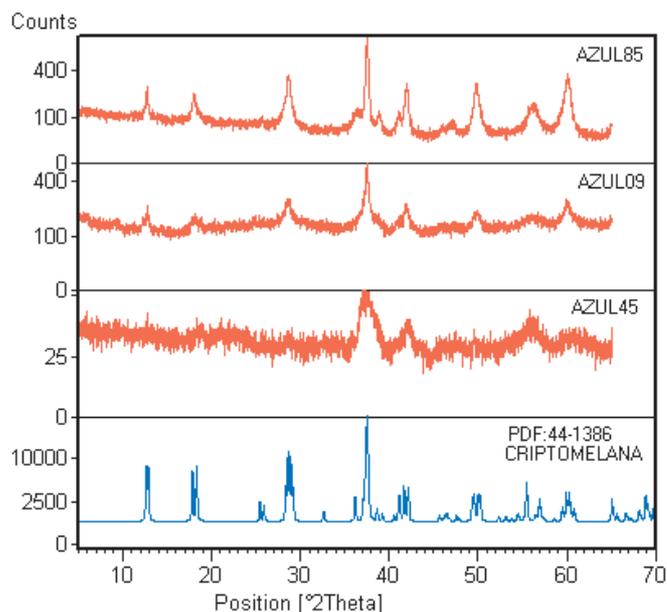


Figura 4.2 – Espectros de DRX das amostras Azul 45 (pelito parcialmente lateritizado), Azul 9 (F167 Prof. 62.80 m, material manganésifero maciço a laminado) e Azul 85 (F6 Prof. 35.8 m, pelito manganésifero lateritizado). As três amostras representam variado grau de cristalinidade, que aumenta do espectro de Azul 45 para o espectro de Azul 09 e para o espectro de Azul 85, ou seja, aumenta em direção ao grau mais elevado de lateritização.

re intercrescida com outros OH-Mn, como se pode observar nas imagens de MEV e nos espectros de DRX (Figura 4.11). Seu grau de cristalinidade é muito variável, mostrando alto índice de amorfismo. Em cavidades micrométricas litioforita pode ocorrer em agregados de folhas de 3 a 5 mm (Figura 4.10), mas em geral seus cristalitos são submicrométricos. Por esta razão foi muito difícil obter análises químicas de litioforita, mesmo por MSE. Em geral, as análises representam misturas de fases micrométricas distintas. As análises contidas na tabela 4.11 sugerem a presença deste mineral como fase dominante, sendo que duas análises são de fato de litioforita.

Nsutita, λ-MnO₂ ou Mn²⁺_xMn⁴⁺_{1-x}O₂(OH)_{2x}

A presença de nsutita na mina do Azul não se faz segura, por falta de critérios determinativos precisos. O material, como a grande maioria dos outros OH-Mn, é criptocristalino e intercrescido com outros minerais de igual natureza (Figura 4.3.1 e 4.3.2). Os difratogramas de raios x não são plenamente conclusivos (Figura 4.12) e mostram que, se presente, nsutita é de baixa cristalinidade. As análises químicas pontuais obtidas por MSE também não permitem conclusões definitivas, conquanto, além de

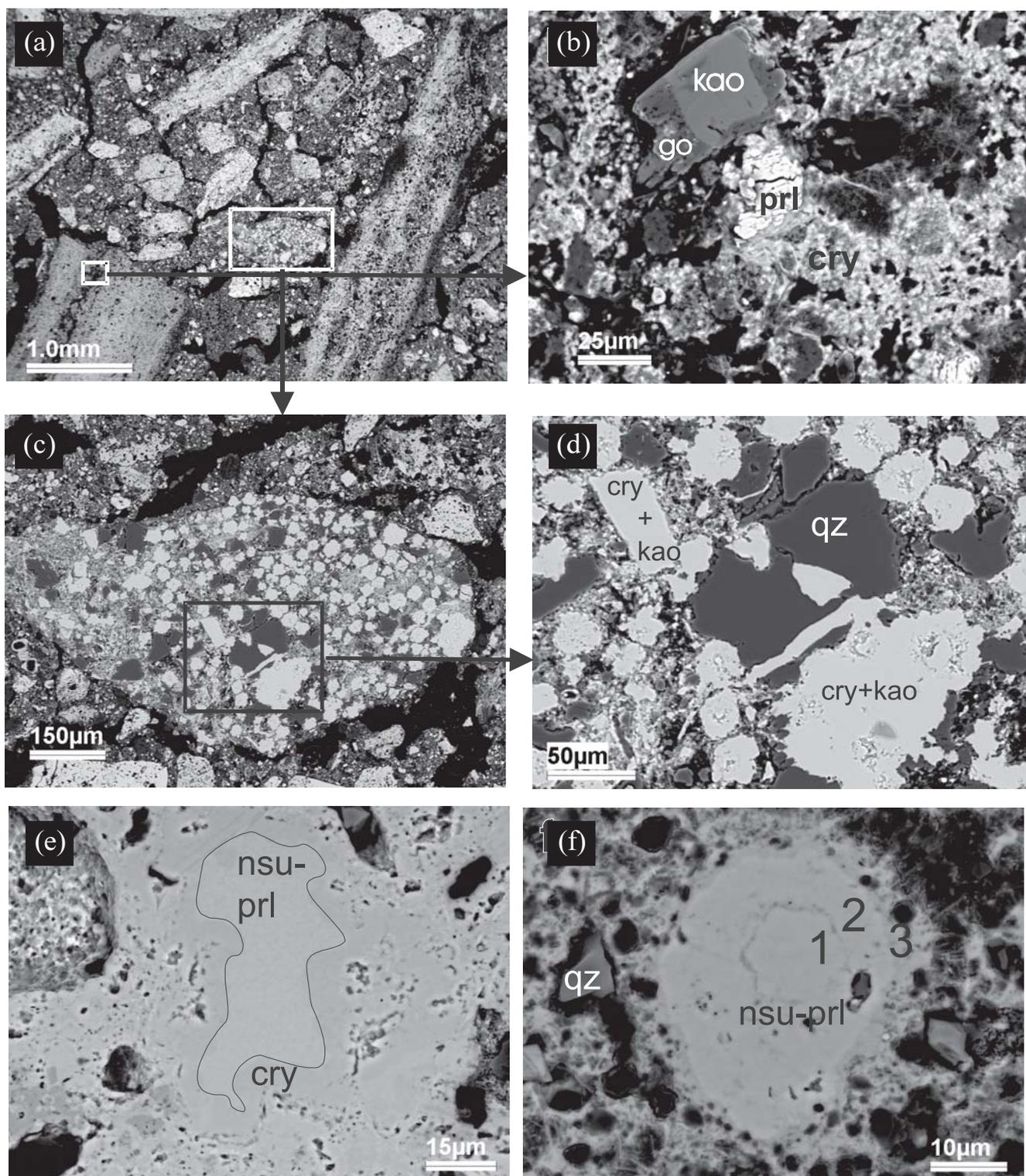


Figura 4.3.1– (a) Agregados de plaquetas, nódulos (brechas) e pseudomorfos formados por microcristais de oxi-hidroxidos de Mn (criptomelana), caulinita, goethita, quartzo e gibbsita; (b) Detalhe de uma banda da plaqueta da imagem anterior mostrando criptomelana (cry) e pirolusita (prl) e intercrescimentos de caulinita (kao) e goethita (go); (c) Detalhe de um brechoide da imagem da figura a, mostrando variedade de grânulos arredondados a subangulares de oxi-hidroxidos de Mn e Al cimentados por esses mesmos minerais; (d) Detalhe das grânulos da imagem anterior mostrando intercrescimentos microcristalinos de criptomelana (cry) e caulinita (kao). Também remanescentes de quartzo fraturado com preenchimentos de oxi-hidroxidos de Mn e caulinita. (Azul09), Pelito Manganífero (Bióxido de Mn); (e) Núcleos pseudomórficos de nsutita/pirolusita (nsu-prl) substituídos por criptomelana; (f) Nódulo com crescimento zonado (1,2,3) de microcristais de nsutita-pirolusita (nsu-prl). O mesmo ocorre na matriz porosa de criptomelana (cry), caulinita e quartzo (qz). Azul06, Material Detritico. Imagens de elétrons retroespalhados de MEV. (Continua).

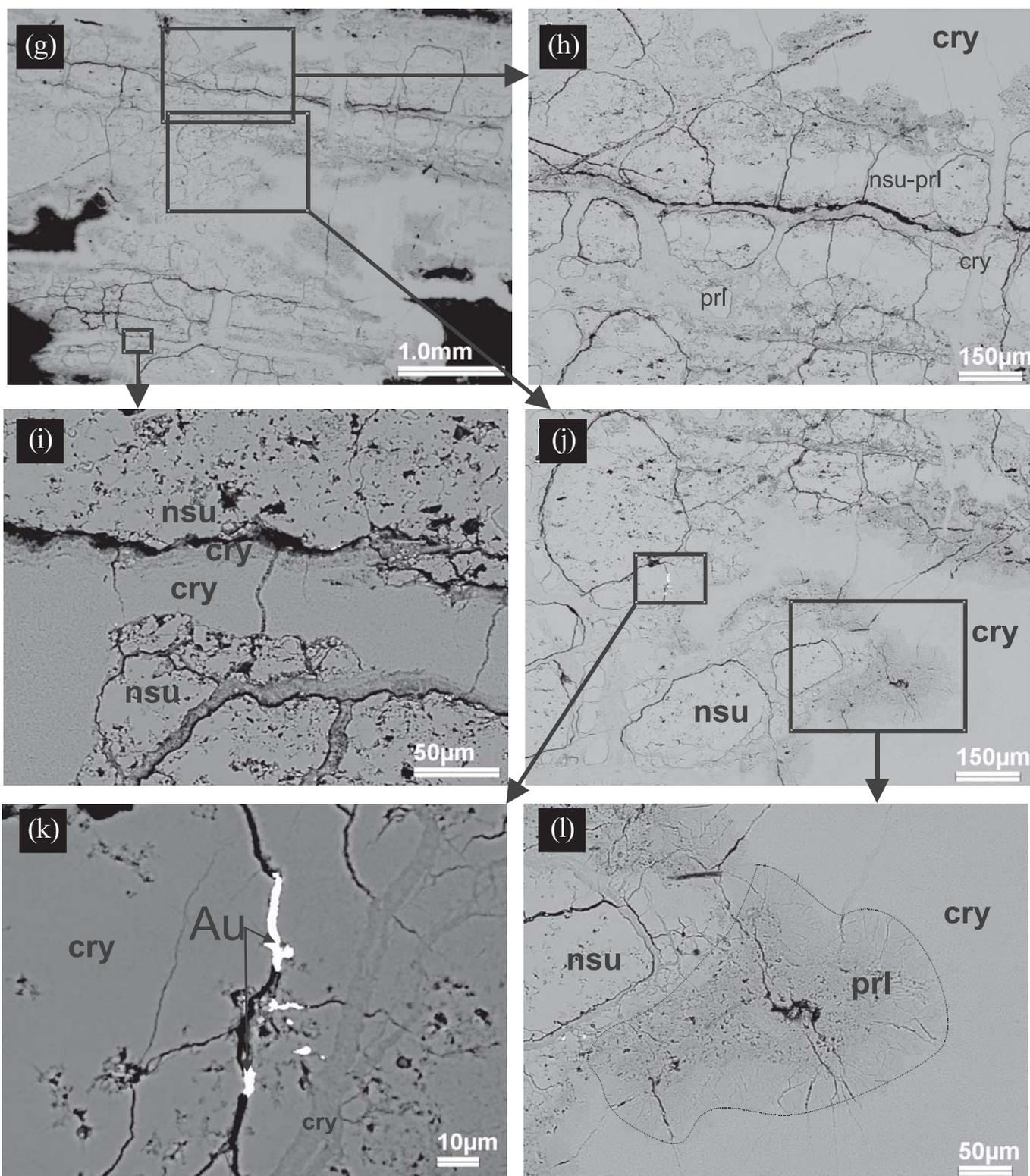


Figura 4.3.2 – (Continuação). (g) Variedade de agregados microcristalinos de OH-Mn, formando camadas e nódulos; (h) Detalhe da imagem anterior mostrando uma matriz de criptomelana (cry-primeira geração) com agregados nodulares de nsutita (pirolusita) e fraturas preenchidas por criptomelana (cry-segunda geração); (i) Detalhe de uma área da imagem g, com fraturas (“de contato”) da nsutita preenchidas por criptomelana (cry); (j) Detalhe de uma área da imagem g, mostrando a matriz de criptomelana (cry) e nódulos de nsutita (nsu); (k) Detalhe de uma área da imagem j mostrando partículas de ouro (Au) em fraturas de criptomelana; também observa-se notadamente vênulas de criptomelana (cry) de segunda geração substituindo criptomelana (cry) de primeira geração; (l) Detalhe de uma área da imagem j mostrando pirolusita (prl) substituindo criptomelana (cry). (Azul10, Bióxido de Mn). Imagens de elétrons retroespalhados de MEV. (Continua).

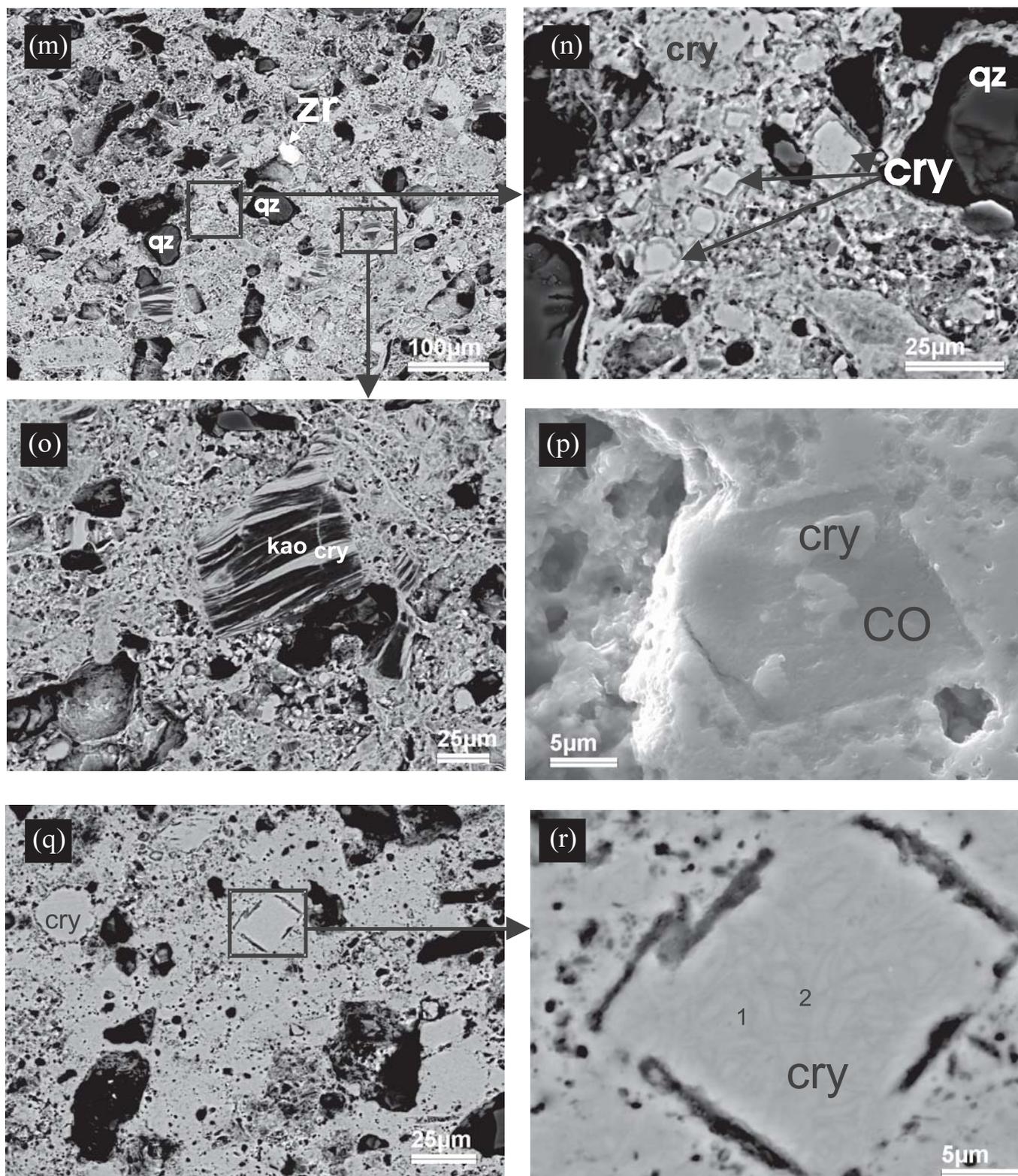


Figura 4.3.3 – (Continuação). (m) Massas micríticas com OH de manganês, caulinita, goethita, quartzo e gibbsita; (n) Detalhe de uma área da imagem anterior mostrando relictos romboidais de criptomelana (cry) recristalizados?; (o) Caulinita preenchida com criptomelana (cry) ao longo de sua clivagem; (Azul17, Bióxido de Mn); (p) Relictos e substituição de criptomelana (cry) no material de Mn, Fe, C, O (CO), de forma romboidal (elétrons secundários, SE); (q) Agregado de microcristais de criptomelana, por vezes com formas nodulares e romboidais. Observa-se também microcavidades; (r) Detalhe da imagem anterior com crescimento dentrítico de criptomelana (1, 2) na criptomelana (cry) delimitado pela forma romboidal do mesmo material (Azul06, Material Detrítico). Imagens de elétrons retroespalhados de MEV.

Tabela 4.1– Composição química de criptomelana constituinte de material detrítico e pelitos manganíferos obtida por microsonda eletrônica. Não foram dosados SrO e ETR.

| CRIPТОМЕЛАНА | AZUL 42-CA | AZUL 85-C1A | AZUL 85-C1D | AZUL 85-C2A | AZUL 85-C2B | AZUL 9-C1G | AZUL 49-C1B | AZUL 49-C1C | AZUL 49-C1D | AZUL 49-C2A | CRY- PAD |
|--------------------------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| FURO/MINA | MINA 1 | F6P35,80 | F6P35,80 | F6P35,80 | F6P35,80 | F167P62,80 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | % |
| LITOLOGIA | MD | PL | PL | PL | PL | PL | PL | PL | PL | PL | |
| Na ₂ O | 0,381 | 0,099 | 0,087 | 0,084 | 0,053 | 0,008 | 0,028 | 0,093 | 0,025 | 0,096 | |
| SiO ₂ | 0,237 | 0,061 | 0,060 | 0,000 | 0,000 | 0,023 | 0,000 | 0,017 | 0,015 | 0,034 | |
| Al ₂ O ₃ | 1,470 | 0,467 | 1,129 | 0,169 | 0,190 | 0,561 | 0,134 | 0,095 | 0,253 | 0,211 | |
| MgO | 0,031 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,043 | 0,000 | 0,000 | 0,006 | 0,025 | |
| K ₂ O | 3,770 | 4,103 | 4,028 | 4,832 | 4,775 | 3,932 | 3,893 | 4,665 | 4,344 | 3,092 | 6,41 |
| MnO | 71,804 | 73,576 | 73,792 | 74,900 | 75,143 | 72,437 | 73,057 | 73,289 | 75,168 | 76,088 | 77,26 |
| PbO ₂ | 0,035 | 0,036 | 0,065 | 0,022 | 0,050 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,147 | |
| CaO | 0,054 | 0,020 | 0,005 | 0,018 | 0,002 | 0,545 | 0,041 | 0,059 | 0,054 | 0,066 | |
| TiO ₂ | 0,012 | 0,006 | 0,013 | 0,010 | 0,000 | 0,014 | 0,035 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| SO ₃ | 0,039 | 0,031 | 0,051 | 0,011 | 0,000 | 0,000 | 0,047 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| Cl | 0,000 | 0,014 | 0,002 | 0,011 | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,006 | 0,030 | 0,018 | |
| FeO | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| BaO | 0,901 | 0,000 | 0,065 | 0,076 | 0,054 | 0,000 | 0,000 | 0,149 | 0,127 | 0,147 | |
| H ₂ O | 1,680 | 1,648 | 1,685 | 1,671 | 1,677 | 1,638 | 1,620 | 1,634 | 1,667 | 1,674 | |
| Total | 80,414 | 80,061 | 80,982 | 81,806 | 81,944 | 79,203 | 78,855 | 80,007 | 81,689 | 81,598 | |

Tabela 4.2 – Exemplo de composição química pontual de criptomelana em pelito do furo 6 a 35 m de profundidade, no alto do platô, mostrando a homogeneidade química do mineral, formado basicamente de K e Mn, além de pouco Al (microsonda eletrônica).

| PELITO | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | total |
|------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|------|------|------------------|-------|
| AZUL85-C3E-CRY, criptomelana | 0,09 | 0,02 | 0,74 | 0,00 | 3,62 | 75,71 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,70 | 81,97 |
| AZUL85-C2B-CRY, criptomelana | 0,05 | 0,00 | 0,19 | 0,00 | 4,78 | 75,14 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 1,68 | 81,94 |
| AZUL85-C2A-CRY, criptomelana | 0,08 | 0,00 | 0,17 | 0,00 | 4,83 | 74,90 | 0,02 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,08 | 1,67 | 81,81 |
| AZUL85-C1D-DIR, criptomelana | 0,09 | 0,06 | 1,13 | 0,00 | 4,03 | 73,79 | 0,07 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,07 | 1,69 | 80,98 |
| AZUL85-C1B-ESQ, criptomelana | 0,03 | 0,01 | 0,42 | 0,00 | 4,07 | 73,71 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,04 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 1,64 | 79,95 |
| AZUL85-C1A-ESQ, criptomelana. | 0,10 | 0,06 | 0,47 | 0,00 | 4,10 | 73,58 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 1,65 | 80,06 |
| AZUL85-C3B-B2, criptomelana | 0,05 | 0,01 | 0,83 | 0,00 | 3,64 | 72,57 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,09 | 0,00 | 0,11 | 1,61 | 78,99 |
| AZUL85-C3F-CRY, criptomelana | 0,10 | 0,02 | 0,73 | 0,01 | 3,41 | 72,22 | 0,14 | 0,04 | 0,00 | 0,03 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 1,62 | 78,34 |
| AZUL85-C3D-BFINA, criptomelana | 0,04 | 0,01 | 1,13 | 0,00 | 3,67 | 70,22 | 0,00 | 0,02 | 0,01 | 0,06 | 0,04 | 0,00 | 0,06 | 1,59 | 76,84 |
| AZUL85-C3C-BFINA, criptomelana | 0,08 | 0,06 | 1,36 | 0,00 | 3,64 | 69,98 | 0,24 | 0,00 | 0,03 | 0,10 | 0,20 | 0,00 | 0,03 | 1,56 | 77,27 |
| AZUL85-C1C-CENTRO, criptomelana | 0,03 | 0,16 | 1,19 | 0,00 | 3,89 | 69,78 | 0,14 | 0,02 | 0,01 | 0,10 | 0,05 | 0,00 | 0,08 | 1,60 | 77,02 |
| AZUL85-C1E-DIR, criptomelana | 0,10 | 0,06 | 1,08 | 0,00 | 3,65 | 69,18 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 1,57 | 75,68 |

Tabela 4.3 – Composição química pontual MSE de pelito lateritizado, tipo bióxido, denso e duro, com material de aspecto botrioidal e muito cavernoso, mostrando composição de criptomelana associada com alguma hollandita.

| Pelitos Lateritizados, bióxido | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | total |
|--|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|------|------|------------------|-------|
| AZUL49-C2A, CRIPTOMELANA, hollandita-romanechita | 0,10 | 0,03 | 0,21 | 0,03 | 3,09 | 76,09 | 0,15 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,15 | 1,67 | 81,60 |
| AZUL49-C1D, CRIPTOMELANA, hollandita-romanechita | 0,03 | 0,02 | 0,25 | 0,01 | 4,34 | 75,17 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,13 | 1,67 | 81,69 |
| AZUL49-C1A, TODOROKITA, criptomelana | 0,03 | 0,15 | 0,11 | 0,00 | 0,45 | 75,06 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,61 | 77,47 |
| AZUL49-C2B, CRIPTOMELANA | 0,07 | 0,02 | 0,13 | 0,00 | 3,64 | 73,68 | 0,03 | 0,06 | 0,00 | 0,08 | 0,03 | 0,00 | 0,01 | 1,62 | 79,37 |
| AZUL49-C1C, CRIPTOMELANA, hollandita-romanechita | 0,09 | 0,02 | 0,10 | 0,00 | 4,67 | 73,29 | 0,00 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,15 | 1,63 | 80,01 |
| AZUL49-C1B, CRIPTOMELANA | 0,03 | 0,00 | 0,13 | 0,00 | 3,89 | 73,06 | 0,00 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,62 | 78,86 |

Tabela 4.4 – Composição química de criptomelana encontrada em materiais equivalentes a pelitos lateritizados (AZUL17 F79, prof. 31,9 m), de crosta laterítica ferroaluminosa manganésifera.

| Pelitos Lateritizados | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | total |
|---|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|------|------|------------------|-------|
| VENULAS, CRIPTOMELANA, litioforita (?) ou gibbsita(?), quartzo (?) | 0,11 | 1,99 | 3,24 | 0,05 | 4,94 | 65,74 | 0,00 | 0,10 | 0,00 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,12 | 1,72 | 78,05 |
| VENULA, CRIPTOMELANA, litioforita (?), goethita | 0,10 | 0,26 | 2,04 | 0,09 | 3,89 | 65,24 | 0,10 | 0,16 | 0,33 | 0,00 | 0,00 | 1,29 | 0,13 | 1,60 | 75,24 |
| CRIPTOMELANA, hollandita, litioforita (?) | 0,17 | 0,07 | 1,33 | 0,13 | 3,55 | 64,97 | 0,00 | 0,12 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,00 | 0,74 | 1,51 | 72,68 |

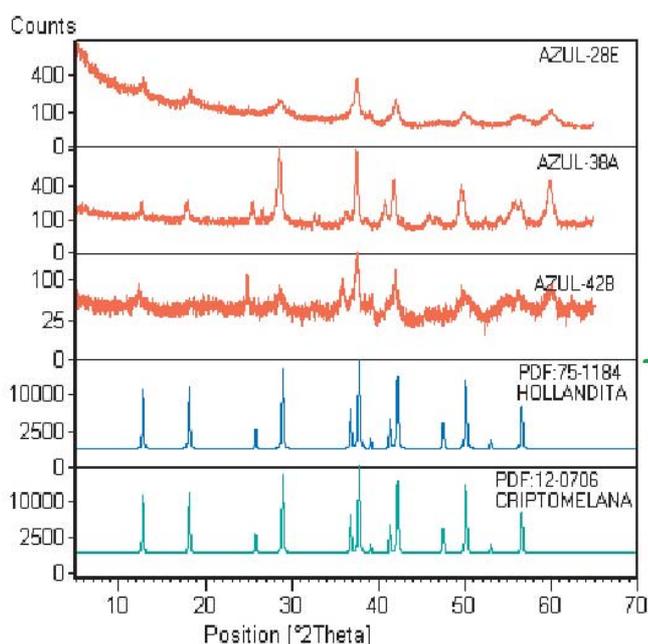


Figura 4.4 – Espectros de DRX de hollandita da mina do Azul e seu padrão PDF: 75-1184 comparados com o padrão da criptomelana PDF: 12-0706 (observar a semelhança dos espectros).

ser criptocristalina e estar intercrescida, sua composição química, pelo menos teoricamente, é similar à da pirrolusita (Tabelas 4.8 a 4.10). Nsutita poderia ocorrer principalmente nos materiais do topo do perfil, provavelmente nos esferolitos e em pelitos lateritizados.

Os minerais de ferro

Hematita, α Fe₂O₃: Além ter sido identificado nas rochas sedimentares, como acessório, este mineral encontra-se em grande quantidade na crosta laterítica, seja intacta, seja parcialmente desmantelada, bem como disseminado no horizonte argiloso, onde ocorrem os siltitos vermelhos, principalmente. Na crosta laterítica e nos bolsões de bauxita hematita se apresenta como concreções, nódulos e pseudofragmentos centimétricos de cor marrom avermelhada ou como cimento dos mesmos, sempre na forma de plasma micro a criptocristalino, por vezes com feições bandadas e concêntricas. Sua identificação pode ser feita tanto por DRX como por microscopia óptica, MEV (Figura 4.13 e 4.16) e mesoscopicamente. Ocorre associada com

Tabela 4.5 – Composição química pontual obtida por MSE de material manganífero de crosta laterítica ferro-aluminosa, mostrando partes de hollandita e talvez criptomelana, segundo os resultados de K_2O .

| Crosta laterítica manganésifera | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | total |
|------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|------|-------|------------------|-------|
| AZUL38-C1C, HOLLANDITA | 0,05 | 0,15 | 1,89 | 0,01 | 1,14 | 66,09 | 0,00 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 11,11 | 1,62 | 82,10 |
| AZUL38-C1B, HOLLANDITA | 0,04 | 0,07 | 1,63 | 0,02 | 1,12 | 64,26 | 0,16 | 0,02 | 0,03 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 10,89 | 1,57 | 79,87 |
| AZUL38-C1F, HOLLANDITA | 0,05 | 0,21 | 1,79 | 0,04 | 0,85 | 65,43 | 0,05 | 0,09 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 9,82 | 1,59 | 79,95 |
| AZUL38-C1E, HOLLANDITA | 0,06 | 0,25 | 2,08 | 0,09 | 0,48 | 62,04 | 0,00 | 0,22 | 0,09 | 0,03 | 0,02 | 0,11 | 12,96 | 1,57 | 80,00 |
| AZUL38-C1F, HOLLANDITA | 0,07 | 0,35 | 3,33 | 0,11 | 0,97 | 60,99 | 0,14 | 0,28 | 0,30 | 0,01 | 0,00 | 0,62 | 12,27 | 1,63 | 81,05 |
| AZUL38-C1A, TODOROKITA, hollandita | 0,02 | 0,20 | 0,92 | 0,05 | 0,13 | 69,48 | 0,14 | 0,14 | 0,08 | 0,07 | 0,00 | 3,63 | 1,41 | 1,63 | 77,90 |

Tabela 4.6 – Composição química obtida por microsonda eletrônica de hollandita encontrada como mineral dominante de materiais detríticos e pelitos manganíferos.

| HOLLANDITA | AZUL 31-C1D | AZUL 31-C1I | AZUL 31-C2A | AZUL 31-C2H | AZUL 38-C1B | AZUL 38-C1C | AZUL 38-C1E | AZUL 38-C1F | AZUL 38-C1F | HOL-PAD |
|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| FURO/MINA | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 3 | % |
| LITOLOGIA | MD | MD | MD | MD | PL | PL | PL | PL | PL | |
| Na ₂ O | 0,079 | 0,095 | 0,091 | 0,057 | 0,044 | 0,048 | 0,059 | 0,072 | 0,046 | 0,36 |
| SiO ₂ | 0,096 | 0,085 | 0,203 | 0,101 | 0,066 | 0,146 | 0,251 | 0,349 | 0,211 | 0,70 |
| Al ₂ O ₃ | 0,528 | 0,664 | 1,015 | 0,392 | 1,630 | 1,888 | 2,084 | 3,333 | 1,788 | 1,20 |
| MgO | 0,106 | 0,015 | 0,061 | 0,014 | 0,017 | 0,006 | 0,088 | 0,111 | 0,036 | |
| K ₂ O | 0,199 | 0,430 | 0,528 | 0,259 | 1,123 | 1,141 | 0,483 | 0,965 | 0,847 | |
| MnO | 56,278 | 65,776 | 61,970 | 63,202 | 64,258 | 66,086 | 62,042 | 60,990 | 65,434 | 54,89 |
| PbO ₂ | 0,072 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,164 | 0,000 | 0,000 | 0,135 | 0,049 | 5,6 |
| Cão | 0,191 | 0,051 | 0,147 | 0,042 | 0,023 | 0,000 | 0,224 | 0,279 | 0,094 | |
| TiO ₂ | 0,049 | 0,050 | 0,035 | 0,063 | 0,030 | 0,047 | 0,090 | 0,299 | 0,036 | |
| SO ₃ | 0,000 | 0,017 | 0,020 | 0,042 | 0,050 | 0,003 | 0,033 | 0,006 | 0,000 | |
| Cl | 0,000 | 0,013 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,005 | 0,019 | 0,000 | 0,000 | |
| FeO | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,105 | 0,615 | 0,000 | 5,47 |
| BaO | 15,498 | 10,908 | 12,627 | 13,654 | 10,893 | 11,107 | 12,958 | 12,266 | 9,816 | 14,38 |
| H ₂ O | 1,388 | 1,543 | 1,509 | 1,505 | 1,568 | 1,618 | 1,565 | 1,630 | 1,591 | |
| Total | 74,484 | 79,647 | 78,206 | 79,333 | 79,868 | 82,095 | 80,001 | 81,050 | 79,948 | |

gibbsita, goethita, caulinita, quartzo e anatásio nas crostas e no horizonte argiloso, estando ausente a gibbsita. Neste último constitui manchas isoladas ou pigmentação e invólucros dos grãos de quartzo, ou vênulas, quando é mais comum, associada com goethita. Padrão difratométrico clássico de crosta laterítica é apresentado na Figura 4.14.

Goethita, α -FeO(OH). É outro mineral de ferro muito abundante no perfil laterítico, principalmente nas crostas

lateríticas desmanteladas e nos materiais argilosos com esferolitos. Ocorre nos nódulos, esferolitos e pseudofragmentos, como plasma cimentando os grãos de quartzo, ou constituindo a matriz terrosa-argilosa amarela, criptocrystalina, associada com caulinita (Figura 4.13). Também forma veios e vênulas na crosta, tendo aspecto coliforme, representando um mobilizado, insinuando caminhos de perfurações de raízes. Os espectros de difração de raios-X principalmente dos materiais amarelos mar-

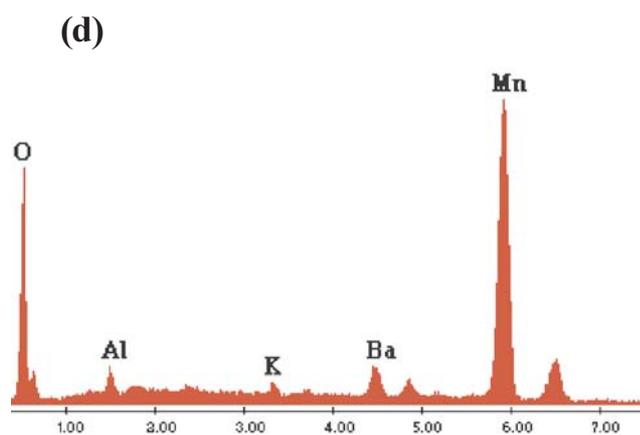
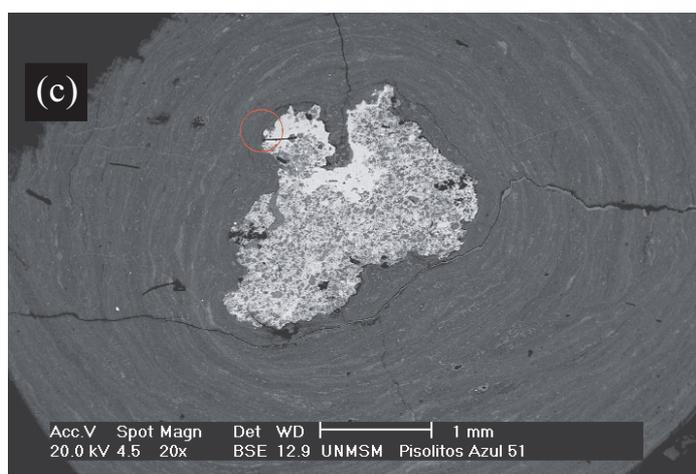
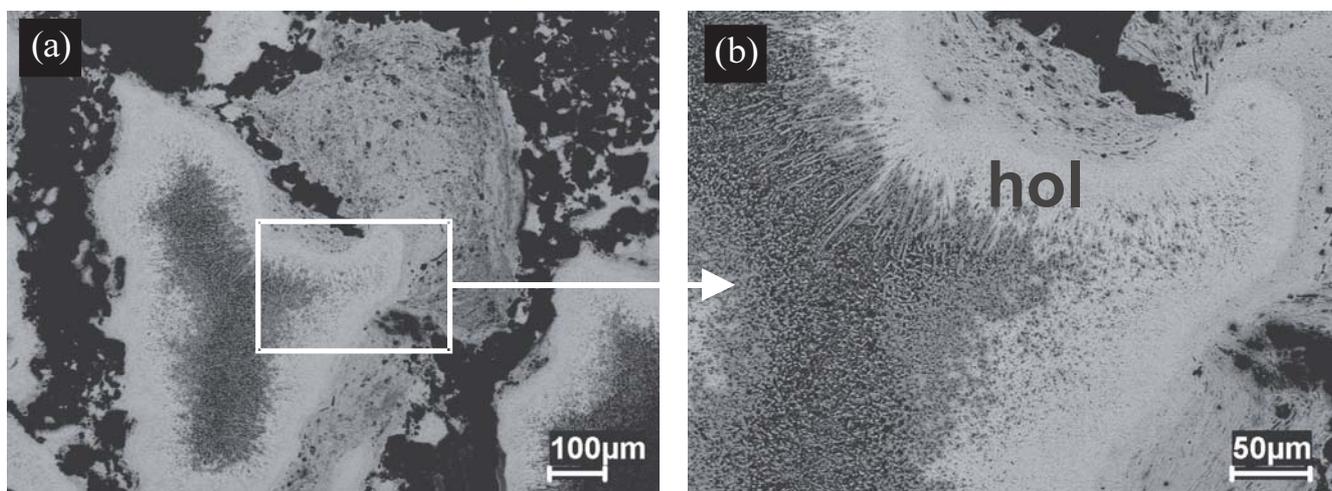


Figura 4.5 – (a) Massas coloformes formadas de bandas concêntricas submilimétricas de hollandita acicular (Azul 38); (b) Detalhe da hollandita da figura anterior; (c) e (d) Esferolito com hollandita no núcleo e seu respectivo espectro analítico obtido com MEV/SED (Azul 51). Imagens de elétrons espalhados de MEV.

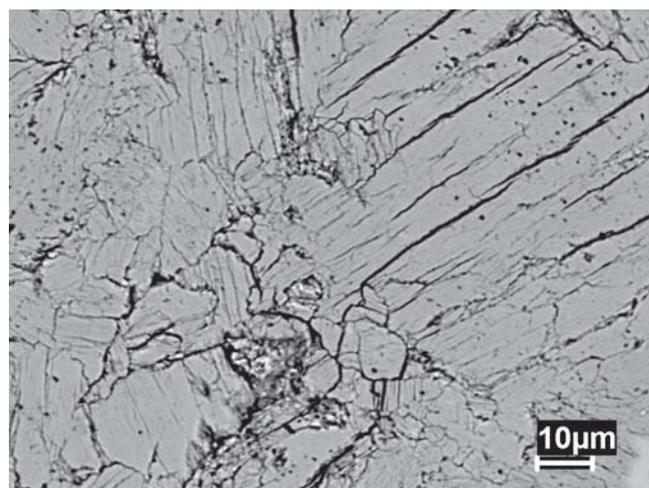


Figura 4.6 – Agregados tabulares de todorokita (a esquerda) e seu detalhe (a direita) (Azul 57). Imagens de elétrons retroespalhados de MEV.

Tabela 4.7 – Composição química obtida por MSE de amostras pontuais indicativas de todorokita nos pelitos manganésíferos, parcialmente alterados.

| TODOROKITA | AZUL9 | AZUL9 | AZUL10-C1B | AZUL10-C1D | AZUL10-C1H | AZUL10-C2A | AZUL10-C2C | TOD-PAD |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------|
| FURO/ MINA | F167P62,80 | F167P62,80 | F167P68,50 | F167P68,50 | F167P68,50 | F167P68,50 | F167P68,50 | % |
| LITOLOGIA | PL | |
| Na ₂ O | 0,035 | 0,000 | 0,006 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 1,06 |
| SiO ₂ | 0,160 | 0,241 | 0,072 | 0,148 | 0,102 | 0,186 | 0,269 | |
| Al ₂ O ₃ | 0,756 | 0,634 | 0,624 | 0,748 | 0,615 | 0,697 | 0,607 | |
| MgO | 0,050 | 0,037 | 0,000 | 0,032 | 0,015 | 0,069 | 0,068 | |
| K ₂ O | 0,435 | 0,311 | 0,402 | 0,375 | 0,279 | 0,934 | 0,256 | 0,16 |
| MnO | 73,282 | 71,601 | 74,507 | 73,305 | 73,683 | 74,827 | 74,444 | 73,00 |
| PbO ₂ | 0,000 | 0,000 | 0,036 | 0,000 | 0,021 | 0,000 | 0,043 | |
| CaO | 0,159 | 0,123 | 0,051 | 0,070 | 0,075 | 0,174 | 0,183 | 0,48 |
| TiO ₂ | 0,000 | 0,027 | 0,025 | 0,000 | 0,020 | 0,027 | 0,009 | |
| SO ₃ | 0,000 | 0,045 | 0,017 | 0,006 | 0,034 | 0,000 | 0,017 | |
| Cl | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,008 | 0,009 | 0,007 | 0,000 | |
| FeO | 0,000 | 2,777 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | |
| BaO | 0,212 | 0,180 | 0,000 | 0,000 | 0,191 | 0,032 | 0,179 | |
| H ₂ O | 1,608 | 1,628 | 1,618 | 1,599 | 1,601 | 1,645 | 1,631 | 9,27 |
| Total | 76,697 | 77,604 | 77,358 | 76,291 | 76,650 | 78,598 | 77,706 | |

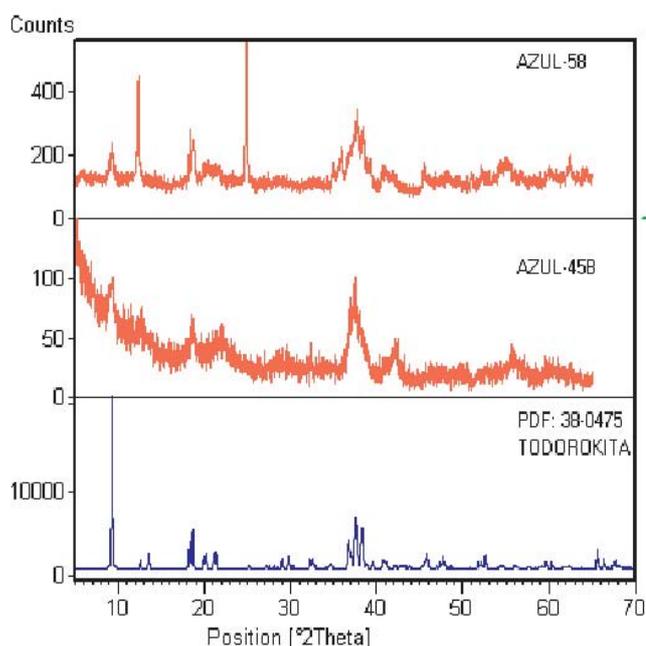


Figura 4.7 – Todorokita em presença de criptomelana na amostra Azul 58.

rons argilosos sugerem a presença de goethita aluminosa (Figura 4.15).

Gibbsita, Al(OH)₃

É mineral abundante na crosta laterítica, principalmente em seus bolsões de cor amarela a vermelha clara, compactos, constituindo verdadeiras bauxitas. Apresenta-se como material microcristalino a cristalino, formando a massa fundamental das bauxitas, ou como parte do cimento dos elementos morfológicos maiores da crosta, quando também se apresenta como vênulas cristalinas seccionando os nódulos, esferolitos e fragmentos, como a própria massa cristalina (Figura 4.13). Ocorre em algumas crostas manganésíferas, com as mesmas propriedades, mas principalmente como padrão venular muito irregular e denso, desenhando pseudobrechas. Como já descrito acima, associa-se a hematita, quartzo, caulinita e anatásio, conforme os difratogramas de raios-X (Figuras 4.14 e 4.15). No horizonte argiloso gibbsita tem sido encontrada apenas em seus níveis superiores.

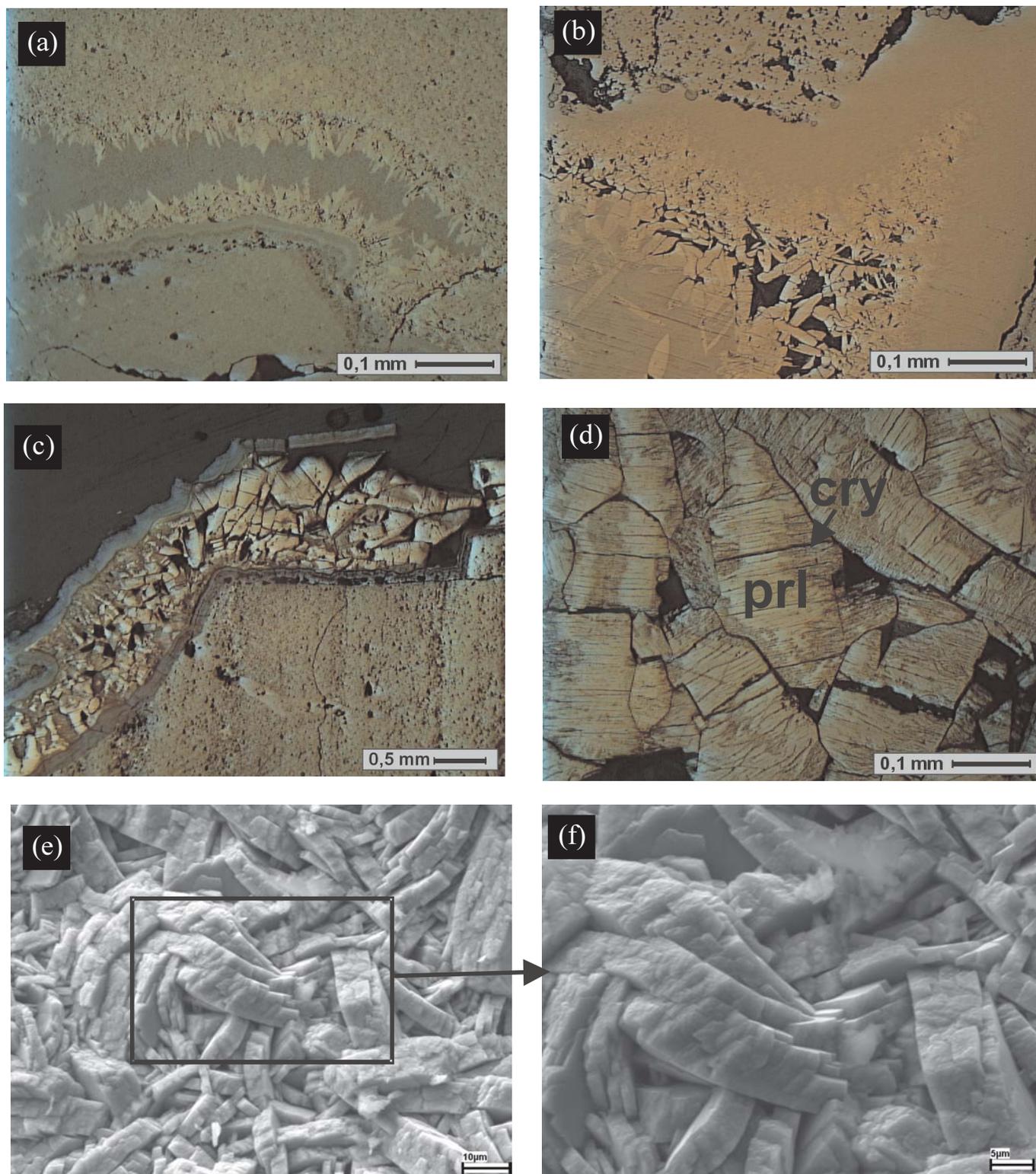


Figura 4.8 – (a), (b), (c) Distintas formas de cristais de pirolusita preenchendo cavidades e fissuras em material detrítico; (d) Cristais de pirolusita (prl) e criptomelana (cry) (Luz refletida, n //); (e) Agregados de cristais prismáticos de pirolusita; (f) Detalhe de cristais de pirolusita da figura anterior. Imagens de elétrons secundários, MEV.

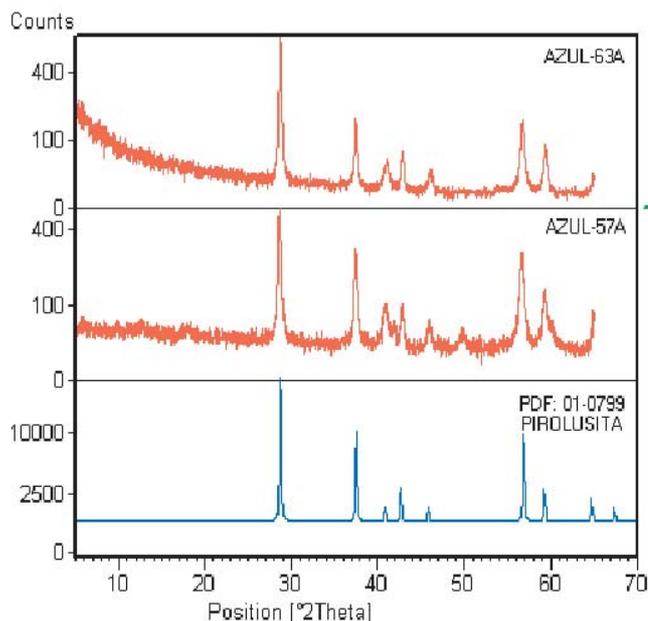


Figura 4.9 – Espectros de DRX de pirolusita bem cristalizada.

Anatásio, TiO_2

Foi reconhecido principalmente por DRX (Figuras 4.14 e 4.15) e inferido pelos teores de TiO_2 no perfil laterítico, pois é o óxido de Ti mais típico de lateritos. É criptocristalino e tudo indica que homogeneamente distribuído nos diversos materiais lateríticos. Ocasionalmente foram observados cristais placosos de anatásio no MEV (Figura 4.13). Seu teor encontra-se entre 0,5 e 1,0 % em peso, ligeiramente abaixo dos lateritos derivados de rochas sedimentares. Óxidos de Ti e de Fe foram encontrados como grãos minúsculos e principalmente como formas aciculares junto às bandas de rodocrosita, interpretados como rutilo e/ou ilmenita.

Minerais de argila

Caulinita, $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Caulinita ocorre tanto nas rochas sedimentares como ao longo do perfil laterítico.

Tabela 4.8 – Composição química obtida por microsonda eletrônica de pirolusita encontrada em esferolitos e materiais detríticos.

| PIROLUSITA | AZUL 16-C1 | AZUL 16-C1B | AZUL 16-C1G | AZUL 31-C1E | AZUL 31-C1H | AZUL 31-C2I | AZUL 31-C2J | AZUL 42-CE | AZUL 42-CF | AZUL 42-CJ | AZUL 57-C2F | AZUL 57-C1D | AZUL 57-C1E | PRL-PAD |
|--------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|---------|
| FURO/MINA | F79P17,80 | F79P17,80 | F79P17,80 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | MINA 1 | % |
| LITOLOGIA | ES | ES | ES | MD | MD | MD | MD | MD | MD | MD | MD | MD | MD | |
| Na ₂ O | 0,183 | 0,167 | 0,119 | 0,088 | 0,015 | 0,023 | 0,000 | 0,019 | 0,003 | 0,027 | 0,060 | 0,002 | 0,000 | |
| SiO ₂ | 0,175 | 0,166 | 0,195 | 0,135 | 0,305 | 0,193 | 0,272 | 0,030 | 0,017 | 0,045 | 0,389 | 0,400 | 0,384 | |
| Al ₂ O ₃ | 2,223 | 2,108 | 2,599 | 0,108 | 0,337 | 0,123 | 0,218 | 0,466 | 0,125 | 0,743 | 1,213 | 0,938 | 0,870 | |
| MgO | 0,059 | 0,059 | 0,025 | 0,003 | 0,000 | 0,005 | 0,003 | 0,000 | 0,008 | 0,001 | 0,390 | 0,003 | 0,028 | |
| K ₂ O | 0,423 | 0,515 | 0,317 | 0,028 | 0,030 | 0,020 | 0,012 | 0,554 | 0,398 | 0,800 | 0,763 | 0,007 | 0,000 | |
| MnO | 71,533 | 71,332 | 70,019 | 76,210 | 74,970 | 74,121 | 70,182 | 76,270 | 77,251 | 76,115 | 70,932 | 71,945 | 73,428 | 81,59 |
| PbO ₂ | 0,058 | 0,108 | 0,281 | 0,000 | 0,000 | 0,029 | 0,101 | 0,092 | 0,021 | 0,070 | 0,000 | 0,021 | 0,134 | |
| CaO | 0,124 | 0,125 | 0,151 | 0,135 | 0,167 | 0,163 | 0,216 | 0,010 | 0,013 | 0,023 | 0,368 | 0,137 | 0,116 | |
| TiO ₂ | 0,016 | 0,004 | 0,019 | 0,001 | 0,000 | 0,005 | 0,004 | 0,000 | 0,006 | 0,009 | 0,002 | 0,031 | 0,032 | |
| SO ₃ | 0,000 | 0,000 | 0,051 | 0,025 | 0,028 | 0,045 | 0,000 | 0,028 | 0,000 | 0,041 | 0,025 | 0,039 | 0,042 | |
| Cl | 0,001 | 0,000 | 0,018 | 0,029 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,006 | 0,002 | 0,026 | 0,000 | 0,007 | 0,000 | |
| FeO | 0,000 | 0,000 | 0,052 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,918 | 0,000 | 0,000 | |
| BaO | 0,365 | 0,301 | 0,205 | 0,096 | 0,000 | 0,107 | 0,065 | 0,398 | 0,386 | 0,556 | 0,233 | 0,063 | 0,000 | |
| H ₂ O | 1,642 | 1,633 | 1,624 | 1,625 | 1,622 | 1,593 | 1,517 | 1,651 | 1,652 | 1,662 | 1,635 | 1,590 | 1,621 | |
| Total | 76,802 | 76,518 | 75,675 | 78,483 | 77,479 | 76,427 | 72,590 | 79,524 | 79,882 | 80,118 | 76,928 | 75,183 | 76,655 | |

Tabela 4.9 – Composição química obtida por microsonda eletrônica de pirolusita ou nsutita encontrada em esferolitos.

| | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | total |
|--|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|------|------|------------------|-------|
| AZUL42-CF-MANCHAS-EM-RELEVO2, pirolusita ou nsutita | 0,00 | 0,02 | 0,13 | 0,01 | 0,40 | 77,25 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,39 | 1,65 | 79,88 |
| AZUL42-CE-MANCHAS-EM-RELEVO2, pirolusita ou nsutita. | 0,02 | 0,03 | 0,47 | 0,00 | 0,55 | 76,27 | 0,09 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,40 | 1,65 | 79,52 |
| AZUL42-CJ-MANCHA-EM-RELEVO, pirolusita ou nsutita | 0,03 | 0,05 | 0,74 | 0,00 | 0,80 | 76,12 | 0,07 | 0,02 | 0,01 | 0,04 | 0,03 | 0,00 | 0,56 | 1,66 | 80,12 |

Tabela 4.10 – Composição química pontual obtida por MSE e MEV/SED de materiais com pirolusita ou nsutita.

| | AZUL31-C1E | AZUL31-C1H | AZUL31-C2I | AZUL42-CE | AZUL42-CF | AZUL42-CJ | Azul 10 10 MEV | Azul 10 13 MEV | Azul 10 15 MEV | Pyr-Pad | Nsu-Pad |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--------------|--------------|
| FURO/MINA | MINA 1 | F167P68,50 | F167P68,50 | F167P68,50 | % | % |
| LITOLOGIA | MD | MD | MD | MD | MD | MD | PL | PL | PL | | |
| Na ₂ O | 0,09 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,00 | 0,03 | | | | | |
| SiO ₂ | 0,14 | 0,31 | 0,19 | 0,03 | 0,02 | 0,05 | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 0,11 | 0,34 | 0,12 | 0,47 | 0,13 | 0,74 | | | 1,22 | | |
| MgO | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | | | | | |
| K ₂ O | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,55 | 0,40 | 0,80 | | | | | |
| MnO | 76,21 | 74,97 | 74,12 | 76,27 | 77,25 | 76,12 | 81,68 | 82,54 | 81,50 | 81,59 | 81,31 |
| PbO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,09 | 0,02 | 0,07 | | | | | |
| CaO | 0,14 | 0,17 | 0,16 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | | | | | |
| TiO ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | | | | | |
| SO ₃ | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,00 | 0,04 | | | | | |
| Cl | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,03 | | | | | |
| FeO | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | | | | | |
| BaO | 0,10 | 0,00 | 0,11 | 0,40 | 0,39 | 0,56 | | | | | |
| H ₂ O | 1,63 | 1,62 | 1,59 | 1,65 | 1,65 | 1,66 | | | | | |
| Total | 78,48 | 77,48 | 76,43 | 79,52 | 79,88 | 80,12 | | | | | |

Nas rochas sedimentares encontra-se como matriz muito fina, de geração primária e como vênulas e bandas nos pelitos cinzas (folhelhos) com MOC e/ou OH-Mn (Figura 4.16), nos siltitos vermelhos e ainda perdurando em seus produtos de alteração. Ao mesmo tempo, uma terceira geração de caulinita se formou ao longo do perfil. Nas camadas inferiores do horizonte argiloso ocorre caulinita vermiforme-sanfonada (quarta geração, Figura 4.16), sendo muito freqüente e admitida como originada de feldspatos. Também ocorre como folhas em bandas paralelas (Figura 4.16), como se tivesse sido originada de micas (quinta geração), com as quais está intercrescida. Uma sexta geração se estabeleceu posteriormente, como parte da matriz dos esferolitos. Raramente encontra-se caulinita como fase única, estando sempre associada,

micro a criptocristalinamente, com outros minerais, como pirita e quartzo nos sedimentos, com quartzo nos veios caulínicos, intercalada com illita e muscovita nas folhas, ou ainda com quartzo, goethita, hematita, anatásio e gibbsita no horizonte argiloso e nas crostas, muitas vezes com litioforita, hollandita e mesmo criptomelana. Por estas características, análises químicas de massas monofásicas de caulinita foram raras. Os distintos padrões difratométricos também sugerem as várias sucessões de caulinita, desde os sedimentos até os esferolitos. No diagrama de distribuição dos minerais no perfil laterítico composto (Figura 4.17) apenas três gerações de caulinita foram indicadas: a primária, a neoformada no perfil laterítico como um todo e uma terceira dos materiais argilosos com esferolitos.

Outros

Quartzo, SiO_2 . Além de ser um dos principais constituintes das rochas sedimentares, quartzo é muito abundante no perfil laterítico, principalmente porque o perfil derivou a partir do domínio dos siltitos vermelhos com corpos lenticulares pelíticos. Fato marcante é a granulometria fina, com grãos desde arredondados a irregulares, como foi observado nas rochas sãs. Cristais de quartzo bem desenvolvidos, por exemplo, de veios, não são comuns. Foi encontrado em vênulas, nas quais chega a formar cristais euédricos, submilimétricos a milimétricos. Nas vênulas de caulim é geralmente microcristalino e euédrico. Por outro lado, como já mostrado nas rochas sedimentares sãs, quartzo se caracteriza por distintas inclusões mineralógicas, que no perfil laterítico são ainda reconhecíveis. Destacam-se: ouro, turmalina, ilmenita (?), rodocrosita (?), hematita-goethita (sulfetos), entre outros.

Raridades

Ouro (Figuras 4.3.2 e 4.3.3), turmalina, zircão, ilmenita, rutilo (?), cromita (?), monazita (?), entre outros, foram observados sob o microscópio óptico e/ou eletrônico de varredura, em alguns casos identificados nas análises químicas pontuais por MSE. A grande maioria contribui também para demonstrar a derivação do perfil laterítico a partir da seqüência sedimentar Azul, a partir em parte de uma seqüência similar àquela encontrada na base da Mina, nos furos mais profundos.

Distribuição dos Minerais no Perfil

Os dados de difração de raios x, as análises por microscopia óptica e eletrônica de varredura, além das observações mesoscópicas permitiram elaborar uma sucessão paragenética para o perfil laterítico, na forma de perfil composto (Figura 4.17). A sucessão mineral mostra clara sucessão de minerais em ambiente laterítico, derivada de seqüência sedimentar pelítica mineralizada ou não em manganês, o qual pode ser encontrado como carbonato e/ou oxi-hidróxido. Os minerais típicos das rochas sãs são illita/muscovita, clorita, microclínio, caulinita, \pm estilpnomelana(?), esmectita, \pm rodocrosita, pirita, \pm calcopirita, criptomelana, nsutita (?), birnessita, hematita, e muito quartzo, além de \pm matéria orgânica carbonosa (MOC). Destes apenas clorita, microclínio, estilpnomelana, rodocrosita e os sulfetos, além da MOC não sobrevivem ao perfil laterítico. Muscovita, caulinita primária,

criptomelana, hematita e quartzo sobrevivem a quase toda evolução do perfil, embora tenham sido fortemente dissolvidos. Esmectita, illita e microclínio, e mesmo MOC, são minerais e materiais ainda observáveis na base do perfil de alteração, na zona denominada saprolito. No horizonte argiloso instalam-se caulinita laterítica, amplamente distribuída, ao lado de goethita, acompanhada por caulinita de veios, bolsões e bandas, com hollandita, criptomelana neoformada, pirolusita (seu modo de ocorrência sugere ser hidrotermal e, portanto, herdada), todorokita, anatásio. No topo do horizonte argiloso surgem ainda litioforita e discreta gibbsita. A crosta laterítica se destaca pela assembléia típica, hematita \pm goethita, gibbsita, caulinita, anatásio, quartzo herdado e \pm OH-Mn, principalmente litioforita, hollandita, pirolusita, criptomelana neoformada e herdada. A cobertura química e detrítica, dominada por materiais argilosos com esferolitos, caracterizam o estágio final e destrutivo do perfil, dominado pela associação caulinita + goethita aluminosa, que confere a tonalidade amarela ocre a marrom à seqüência, pouco quartzo, \pm gibbsita e relativamente ao perfil muito mais anatásio e zircão. Litioforita é abundante, quando ocorre Mn, mas apenas como esferolitos. Criptomelana e pirolusita, bem como hollandita e outros minerais de manganês, constituem os núcleos dos esferolitos, raramente estão nas bandas, ou seja, são herdados.

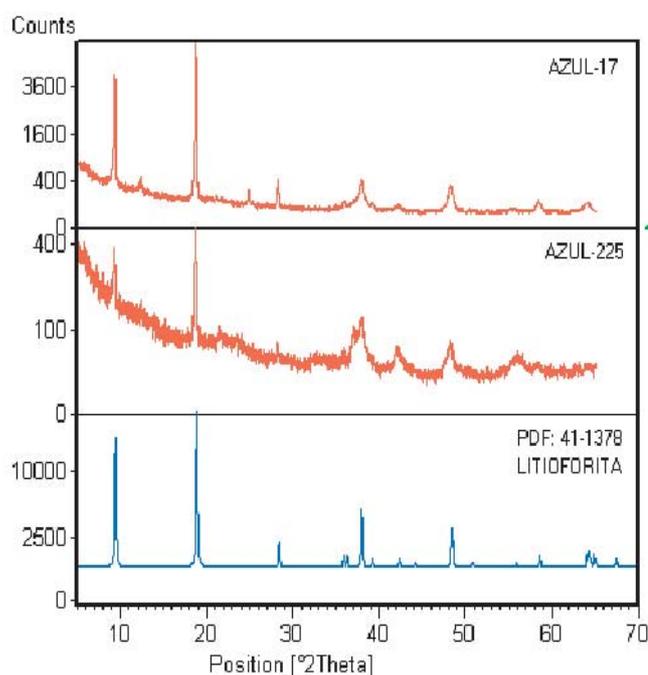


Figura 4.10 – Espectros de DRX mostrando litioforita.

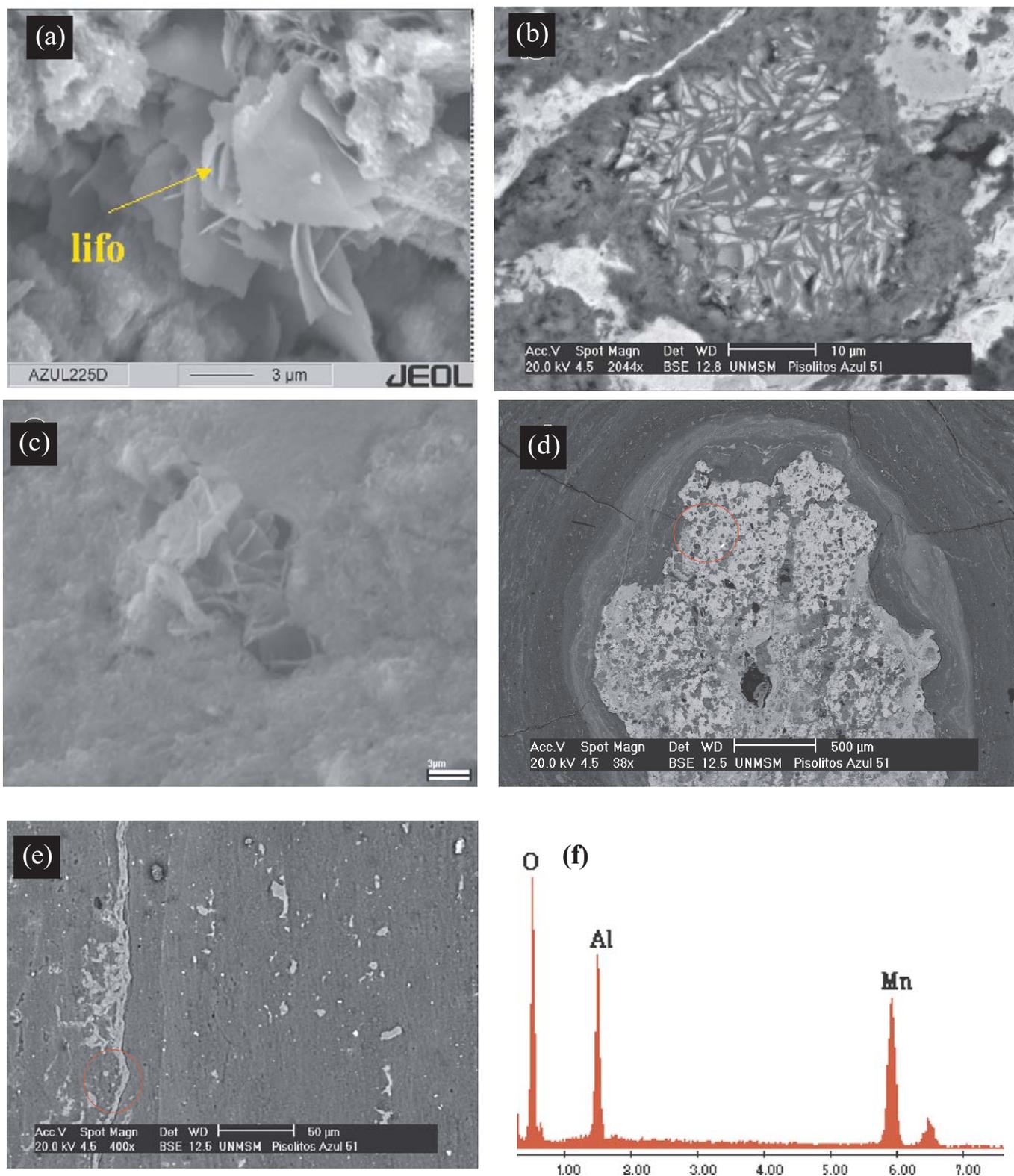


Figura 4.11 – (a), (b), (c) Agregados em folha e tabulares de litioforita preenchendo cavidades; (d) Núcleo de esferulito com litioforita intercrescida com criptomelana; (e) e (f) Camadas de esferulitos com lamelas e vênulas de litioforita e seu respectivo espectro obtido com MEV/SED.

Tabela 4.11 – Composição química de alíquotas pontuais de pisolitos contidos em material argiloso, que é compatível com o domínio de litioforita (Lifo-Pad: litioforita padrão). Os dados da tabela à esquerda são de MEV/SED e os da direita de MSE.

| MEV | Azul 02 6 | Azul 02 14 | Azul 02 15 | Azul 02 16 | Lifo-Pad | | AZUL16-C4C-NUCLEO-PISOLITO-RELEVO | AZUL51-CD-NUCLEO-PISOLITO | AZUL51-CE-NUCLEO-PISOLITO | Lifo-Pad |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|----------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------|
| FURO/MINA | F167P3,60 | F167P3,60 | F167P3,60 | F167P3,60 | | FURO/MINA | F79P31,90 | MINA1 | MINA1 | % peso |
| LITOLOGIA | SAG | SAG | SAG | SAG | | LITOLOGIA | PIS | PIS | PIS | |
| Li | | | | | 1,4 | Na ₂ O | 0,01 | 0,01 | 0,10 | |
| O | 48,2 | 45,7 | 46,2 | 46,0 | 45,4 | SiO ₂ | 13,01 | 0,09 | 1,26 | |
| Al | 15,6 | 9,0 | 9,0 | 9,1 | 12,8 | Al ₂ O ₃ | 17,90 | 25,79 | 22,39 | 24,11 |
| K | | 0,5 | 0,4 | 0,4 | | MgO | 0,04 | 0,00 | 0,08 | |
| Mn | 36,2 | 44,8 | 44,3 | 44,6 | 39,0 | K ₂ O | 1,69 | 0,01 | 0,03 | |
| H | | | | | 1,4 | MnO | 38,06 | 44,85 | 37,76 | 50,33 |
| Total | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | PbO ₂ | 0,09 | 0,00 | 0,02 | |
| | | | | | | CaO | 0,13 | 0,00 | 0,08 | |
| | | | | | | TiO ₂ | 0,49 | 0,02 | 0,03 | |
| | | | | | | SO ₃ | 0,08 | 0,08 | 0,11 | |
| | | | | | | Cl | 0,02 | 0,02 | 0,05 | |
| | | | | | | FeO | 5,80 | 0,00 | 0,00 | |
| | | | | | | BaO | 0,54 | 0,00 | 0,00 | |
| | | | | | | Li ₂ O | | | | 3,04 |
| | | | | | | H ₂ O | 2,42 | 2,09 | 1,85 | |
| | | | | | | Total | 80,27 | 72,94 | 63,75 | |

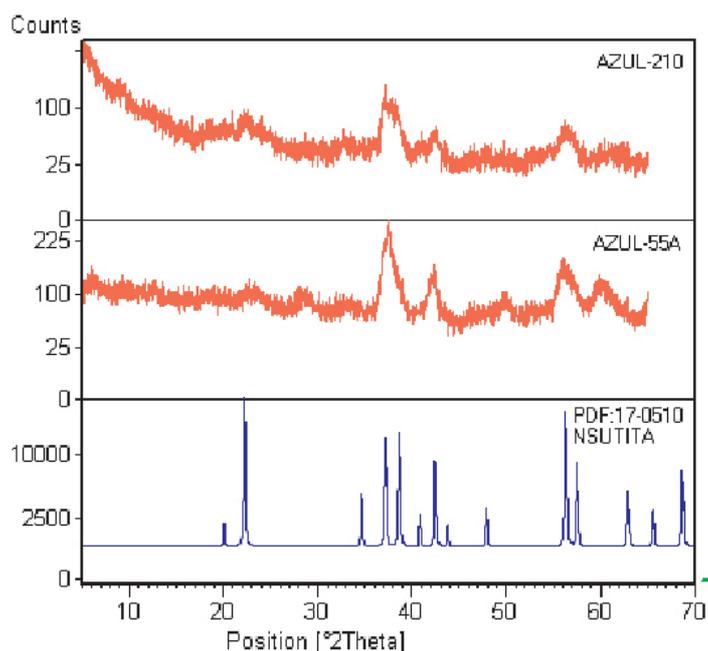


Figura 4.12 – Espectros de nsutita obtidos por DRX.

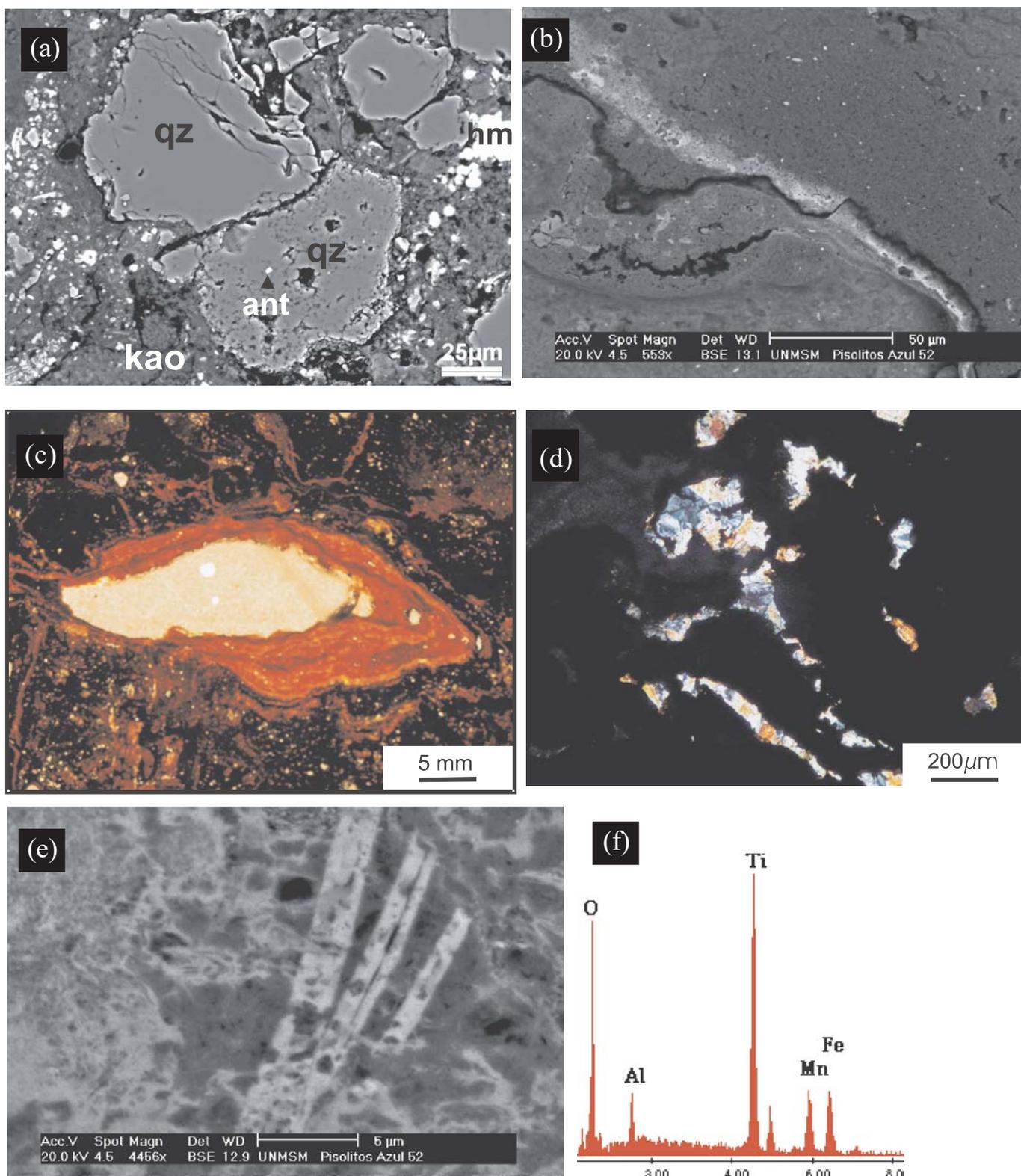


Figura 4.13 – (a) Grãos de quartzo (qz) e hematita (hm) em matriz de caulinita (Pelito, Azul 13); (b) Finas camadas de goethita com caulinita e litioforita (Esferolito, Azul 52) em imagem de elétron retroespalhado de MEV; (c) Franjas (cutans) de OH-Fe na borda de microcavidade (Luz transmitida, n//); (d) Gibbsita mesocristalina preenchendo poros e exibindo maclamento (Luz transmitida, nx); (e) Cristais tabulares alongados de anatásio e (f) Seu respectivo espectro de MEV/SED.

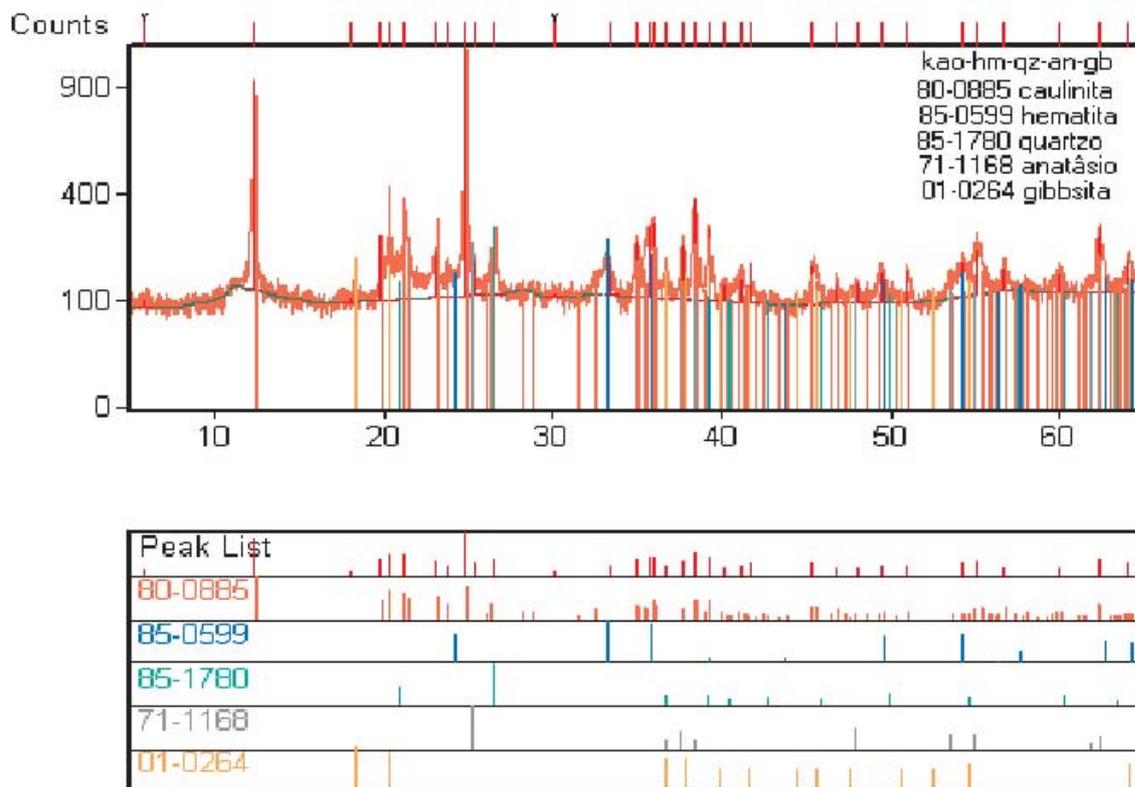


Figura 4.14 – Espectro de DRX mostrando as fases minerais caulinita, hematita, quartzo, anatásio e gibbsita.

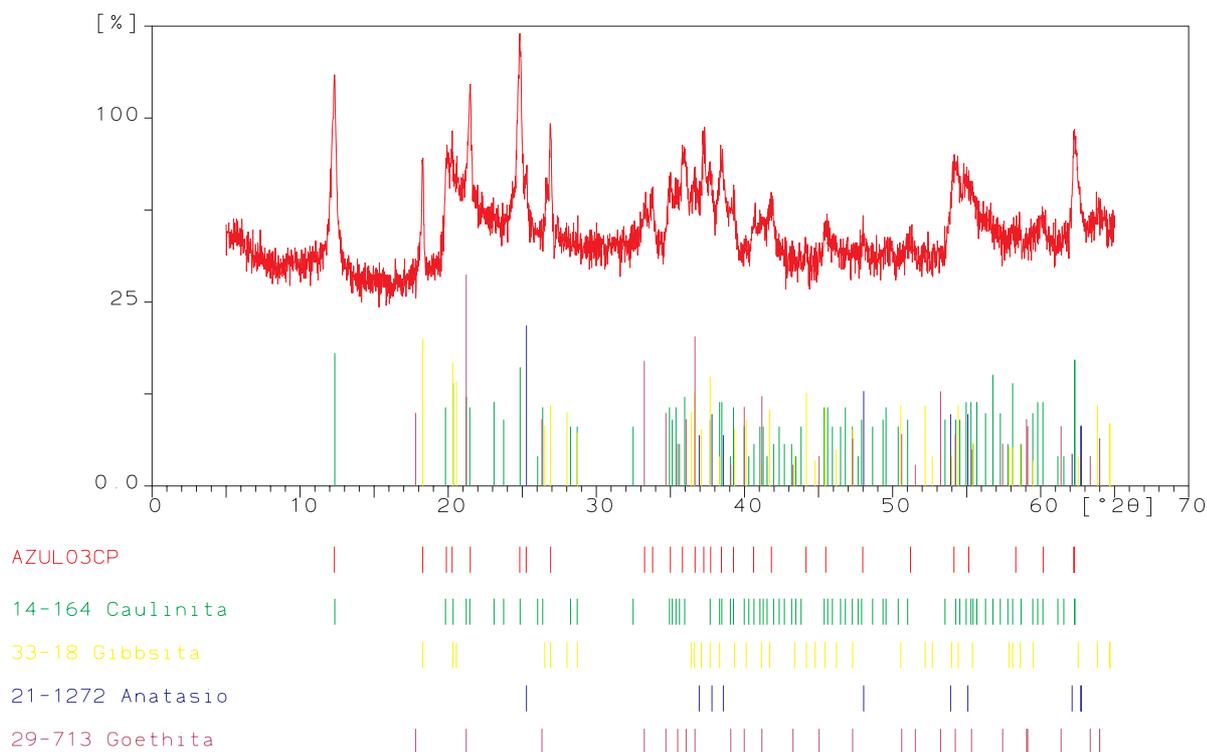


Figura 4.15 – Espectro de DRX mostrando caulinita, gibbsita, anatásio e goethita (Azul03CP, esferolito).

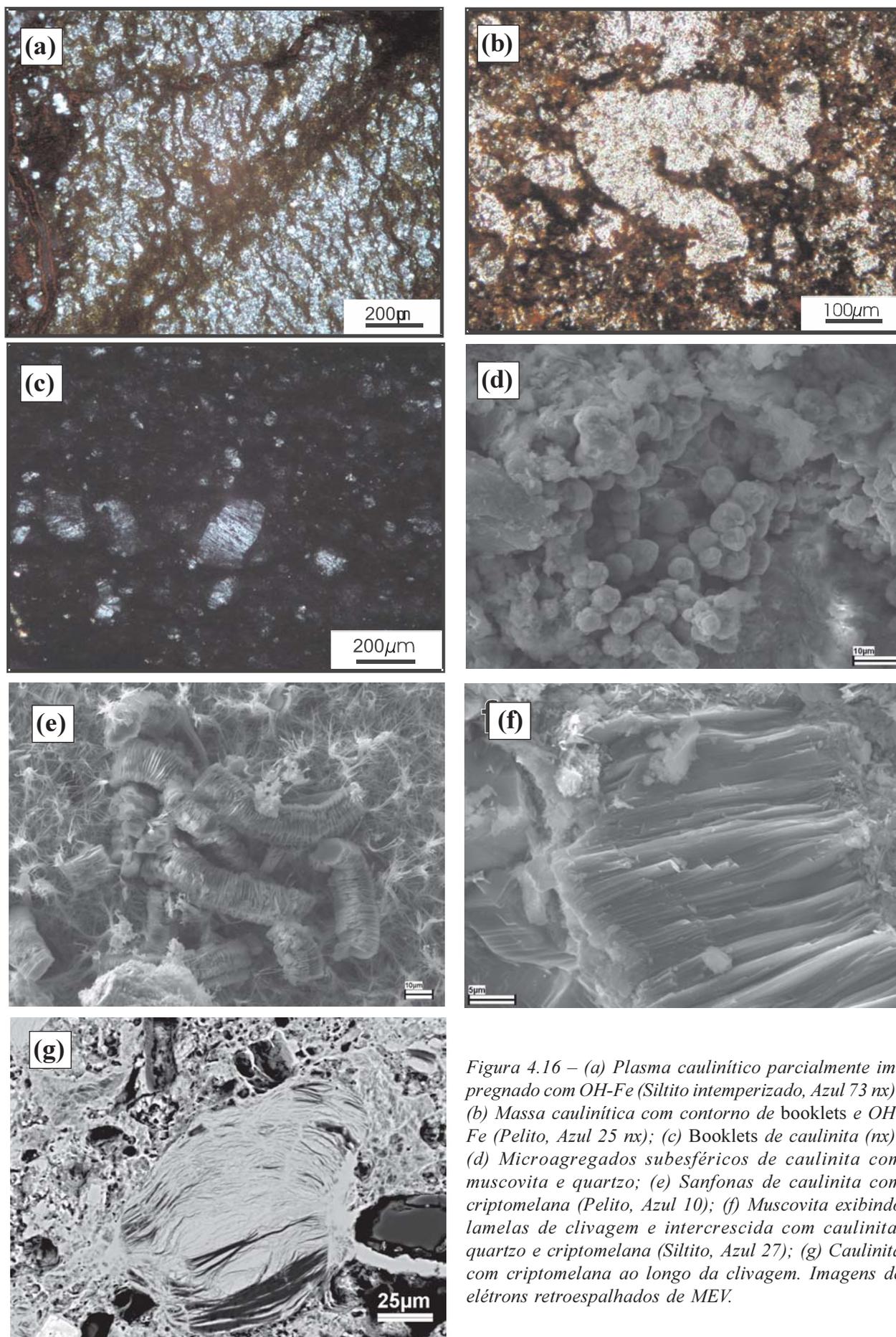


Figura 4.16 – (a) Plasma caulinítico parcialmente impregnado com OH-Fe (Siltito intemperizado, Azul 73 nx); (b) Massa caulinítica com contorno de booklets e OH-Fe (Pelito, Azul 25 nx); (c) Booklets de caulinita (nx); (d) Microagregados subsféricos de caulinita com muscovita e quartzo; (e) Sanfonas de caulinita com criptomelana (Pelito, Azul 10); (f) Muscovita exibindo lamelas de clivagem e intercrescida com caulinita, quartzo e criptomelana (Siltito, Azul 27); (g) Caulinita com criptomelana ao longo da clivagem. Imagens de elétrons retroespalhados de MEV.

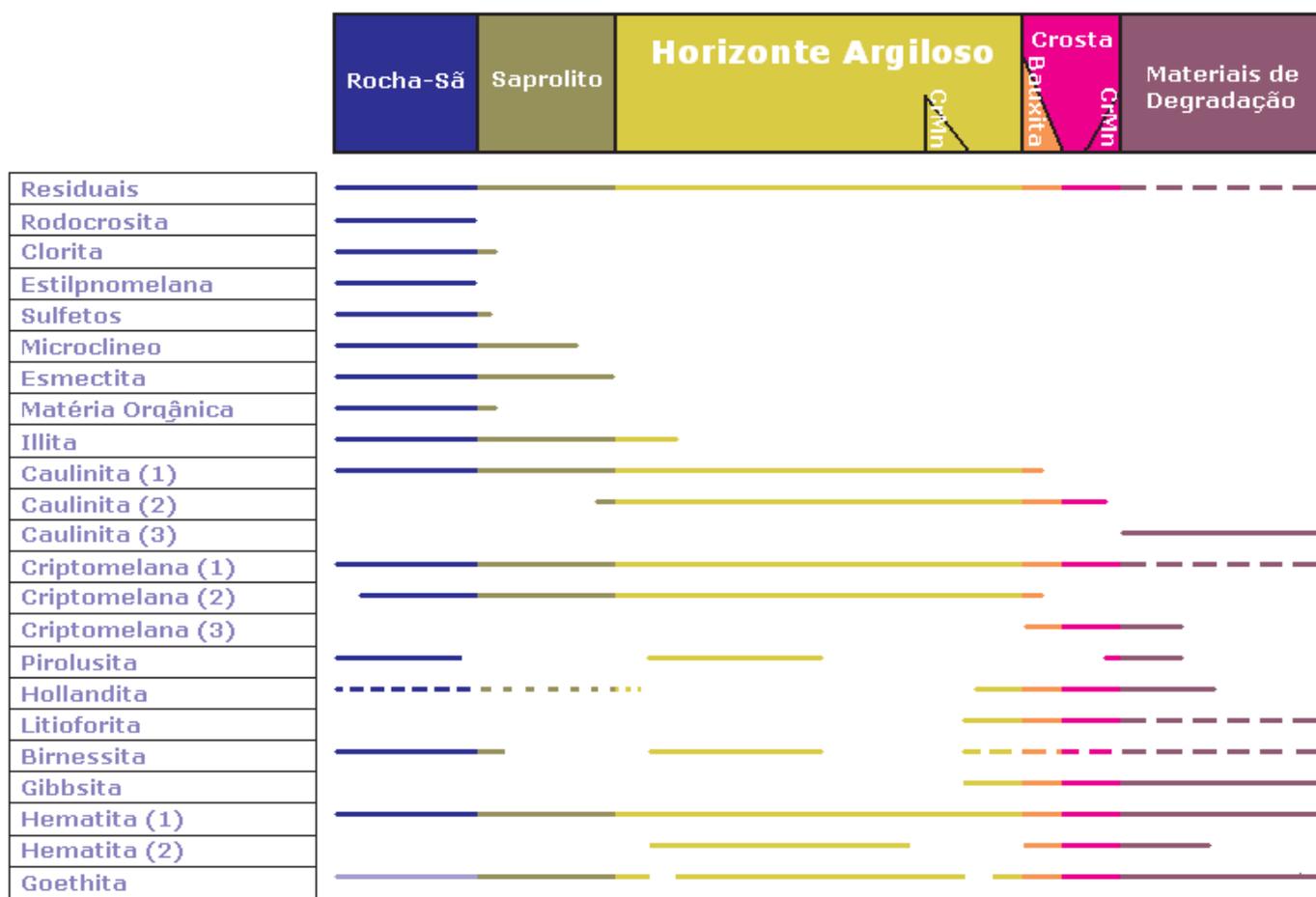


Figura 4.17 – Distribuição esquemática da sucessão paragenética dos minerais ao longo do perfil laterítico da mina de manganês do Azul.

V. GEOQUÍMICA DO PERFIL LATERÍTICO

Composição Química

Horizonte Argiloso

Como já apresentado anteriormente, o horizonte argiloso instalou-se sobre pelitos e siltitos manganíferos ou não manganíferos. A grande maioria das amostras analisadas é rica em Mn (Tabela 5.1), e se classifica como minério. É, assim, uma apresentação tendenciosa. Destacam-se, portanto, os altos teores de MnO, além dos de Al₂O₃ e SiO₂, e em menor escala Fe₂O₃. Os teores de SiO₂ e Al₂O₃ constituem principalmente a caulinita, além de mica, e seus conteúdos são abaixo daqueles dos minerais de Mn. Destacam-se ainda os valores relativamente altos de K₂O, bem mais elevados do que nas crostas, quase sempre correlacionados com o Mn, embora algumas amostras pobres em Mn contenham ainda K₂O, sugerindo a presença ainda de mica, como já apresentado anteriormente na mineralogia. MgO, CaO e Na₂O estão em níveis muito baixos, compatíveis com o horizonte argilo-

so, ligeiramente acima daqueles das crostas, da mesma forma que TiO₂ e P₂O₅. Pode-se, assim, concluir que o horizonte argiloso e as crostas guardam forte afinidade química entre si.

As Crostas Lateríticas

A composição química das crostas é extremamente variável, como era de antever pela grande variação mineralógica apresentada, em termos de proporções de OH-Fe, OH-Mn e OH-Al, além de caulinita. Os teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e MnO, além de SiO₂, mostram grandes variações e juntos representam praticamente a composição química das crostas (Tabela 5.2). Para crostas lateríticas, os teores de K₂O são, no entanto, relativamente altos, em geral acompanhando os de Mn, indicando sua relação com criptomelana, freqüente nas crostas como mineral neoforado ou herdado. MgO, CaO e Na₂O são baixos e dentro do padrão de crostas lateríticas em geral, enquanto TiO₂ está em níveis muito baixos, incomuns para estes materiais, talvez refletindo os baixos teores nas rochas-sãs.

Elementos-Traço

Horizonte Argiloso

Este horizonte de aspecto argiloso, que é rico em OH-Mn e quartzo, caracteriza-se por altas e variadas concentrações dos elementos-traço (Tabelas 5.3.1 e 5.3.2), cujos valores mostram forte correlação com aqueles encontrados nas rochas sedimentares mineralizadas e suas encaixantes (vide item 2). Destacam-se as concentrações relativamente altas de Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Sr, Ag, Cs, Pb e ETR. As grandes variações encontradas ao longo do horizonte parecem refletir aquelas também verificadas nas rochas sãs, refletindo as suas variações granulométricas, mineralógicas e de conteúdo da matéria orgânica. Portanto, além do ambiente sedimentar favorável à concentração destes elementos, o ambiente laterítico

Tabela 5.1 – Pelitos manganêsíferos lateritizados a siltitos lateritizados correspondentes ao horizonte argiloso.

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | PF |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|--------------|
| | 20,22 | 5,31 | 4,60 | 53,41 | 0,14 | 0,05 | 0,12 | 3,14 | 0,38 | 0,25 | 10,58 |
| | 5,63 | 16,41 | 4,61 | 53,09 | 0,14 | 0,06 | 0,11 | 1,25 | 0,37 | 0,07 | 16,89 |
| | 6,57 | 12,17 | 2,80 | 58,65 | 0,22 | 0,11 | 0,09 | 1,26 | 0,26 | 0,06 | 15,64 |
| | 1,62 | 8,03 | 3,98 | 67,00 | 0,06 | 0,16 | 0,04 | 1,78 | 0,34 | 0,33 | 15,30 |
| | 5,21 | 9,20 | 5,94 | 58,68 | 0,49 | 0,27 | 0,18 | 0,87 | 0,55 | 0,15 | 17,24 |
| | 0,49 | 4,72 | 2,63 | 71,25 | 0,53 | 0,28 | 0,19 | 1,31 | 0,12 | 0,10 | 17,43 |
| | 1,27 | 3,34 | 2,94 | 75,37 | 0,32 | 0,29 | 0,24 | 0,97 | 0,14 | 0,20 | 15,24 |
| | 12,48 | 16,11 | 8,94 | 39,68 | 0,64 | 0,27 | 0,22 | 0,66 | 0,65 | 0,07 | 18,86 |
| | 15,58 | 18,42 | 8,44 | 35,00 | 0,58 | 0,28 | 0,22 | 0,62 | 0,75 | 0,12 | 18,88 |
| | 7,66 | 11,96 | 10,52 | 50,46 | 0,06 | 0,10 | 0,16 | 1,86 | 0,67 | 0,18 | 15,08 |
| | 1,30 | 1,81 | 5,34 | 76,26 | 0,25 | 0,20 | 0,16 | 1,04 | 0,08 | 0,19 | 12,18 |
| | 5,59 | 12,26 | 5,44 | 56,68 | 0,38 | 0,19 | 0,24 | 0,78 | 0,54 | 0,12 | 17,95 |
| | 1,30 | 2,22 | 0,64 | 79,53 | 0,08 | 0,06 | 0,21 | 4,17 | 0,06 | 0,05 | 11,70 |
| | 65,39 | 12,87 | 4,20 | 8,11 | 0,35 | 0,04 | 0,06 | 1,61 | 0,45 | 0,08 | 6,53 |
| | 6,58 | 8,62 | 3,44 | 62,85 | 0,28 | 0,16 | 0,26 | 2,64 | 0,31 | 0,18 | 14,66 |
| | 3,44 | 5,64 | 4,22 | 66,45 | 0,75 | 0,20 | 0,21 | 1,96 | 0,26 | 0,23 | 16,56 |
| | 2,34 | 3,64 | 3,00 | 72,50 | 0,32 | 0,24 | 0,32 | 2,70 | 0,14 | 0,28 | 14,62 |
| | 0,54 | 2,18 | 2,14 | 77,39 | 0,18 | 0,20 | 0,20 | 2,10 | 0,08 | 0,30 | 13,78 |
| | 1,77 | 3,19 | 3,33 | 76,78 | 0,09 | 0,16 | 0,16 | 1,53 | 0,21 | 0,43 | 12,78 |
| | 2,88 | 5,85 | 3,63 | 66,56 | 0,84 | 0,19 | 0,20 | 1,26 | 0,23 | 0,14 | 16,92 |
| | 0,93 | 3,78 | 1,95 | 74,11 | 0,55 | 0,18 | 0,14 | 2,46 | 0,17 | 0,22 | 15,40 |
| | 1,30 | 2,89 | 2,25 | 77,04 | 0,23 | 0,29 | 0,12 | 1,39 | 0,10 | 0,24 | 14,20 |
| | 0,86 | 2,63 | 3,53 | 75,59 | 0,51 | 0,48 | 0,16 | 0,85 | 0,12 | 0,19 | 14,98 |
| | 0,54 | 6,74 | 3,37 | 72,61 | 0,13 | 0,20 | 0,13 | 0,34 | 0,32 | 0,22 | 15,29 |
| | 0,53 | 4,62 | 7,46 | 67,91 | 0,46 | 0,31 | 0,12 | 1,08 | 0,13 | 0,14 | 16,15 |
| | 5,29 | 10,38 | 5,13 | 63,45 | 0,09 | 0,12 | 0,11 | 1,63 | 0,35 | 0,18 | 13,09 |
| | 6,81 | 8,65 | 5,77 | 60,52 | 0,64 | 0,19 | 0,16 | 0,89 | 0,43 | 0,13 | 15,84 |
| | 10,99 | 2,72 | 3,20 | 68,07 | 0,34 | 0,23 | 0,21 | 2,40 | 0,12 | 0,43 | 11,29 |
| | 1,79 | 3,21 | 3,13 | 75,97 | 0,15 | 0,19 | 0,17 | 1,27 | 0,12 | 0,28 | 13,85 |
| | 0,60 | 7,41 | 3,07 | 72,48 | 0,22 | 0,19 | 0,10 | 0,16 | 0,30 | 0,12 | 15,33 |
| | 6,82 | 7,46 | 2,16 | 67,29 | 0,10 | 0,05 | 0,16 | 2,87 | 0,33 | 0,17 | 12,65 |
| Média | 6,59 | 7,24 | 4,25 | 63,89 | 0,33 | 0,19 | 0,17 | 1,58 | 0,29 | 0,19 | 14,74 |

do horizonte argiloso promoveu o aumento em sua concentração. As concentrações altas de Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Sb e ETR mostram a forte influência das rochas sedimentares mineralizadas em Mn (> 7.0 MnO), nas quais se encontram primariamente enriquecidos. A menor contribuição das rochas não mineralizadas para as amostras do horizonte argiloso estudado é indicada pelas concentrações de Cr, Ge, Rb, Zr, Ag, Cs e Ba, mais elevadas naquelas rochas, e que no horizonte argiloso não estão plenamente representados, exceto Ba. Por outro lado, V, Ga, As, Y, Nb, In, Ta, Pb, Th e U, cujas concentrações independem da mineralização manganêsífera nos sedimentos, refletem esse quadro geral e residual no horizonte argiloso. Portanto, o horizonte argiloso preserva as assinaturas geoquímicas, destacando-se aquela associada à mineralização com matéria orgânica, Co-Ni-Cu-Zn-Sr-Mo-Sb-ETR +/- As-Ag, +/- Rb-Ba-Pb e com os argilominerais complexos.

Crostras Lateríticas

Da mesma forma que os elementos químicos principais, os elementos-traço apresentam grandes variações de concentração nas crostras lateríticas (Tabela 5.4), refletindo a variabilidade dos componentes principais, principalmente Fe, Mn e Al-Si, ou seja, os minerais goethita, hematita, OH-Mn (criptomelana e hollandita), gibbsita e caulinita. Dentre os elementos-traço que apresentam maior variação, Ba varia de 6 a 89000 ppm; V, Cr, Co, Ni, Cu e Zn mostram valores entre 30 e 1100 ppm; Mo, Sr, Zr e ETR de 3 a 500 ppm; entre 2 e 100 ppm encontram-se Ga, As, Rb, Y, W e Pb, enquanto Ge, Nb, Ag, Sn, Sb, Cs, Hf, Ta, Bi, Tl, Th e U estão abaixo de 40 ppm, mais comumente entre <1 e 20 ppm. Os elementos-traço cujos teores menos variaram são Ga, Ge, As, Y, Sc, Nb, Ta, In, Sn e U. Valores variados e muito elevados de Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Sr, ETR, Ba e As mostram que as crostras lateríticas preservaram a assinatura geoquímica das ro-

Tabela 5.2 – Composição química total de crostras lateríticas em suas variações ferruginosas, aluminosas e manganêsíferas das minas do Azul.

| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | PF |
|--------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|--------------|
| | 0,86 | 5,25 | 2,73 | 72,55 | 0,41 | 0,28 | 0,12 | 0,69 | 0,19 | 0,12 | 16,99 |
| | 3,15 | 3,87 | 3,22 | 62,61 | 0,05 | 0,02 | 0,01 | 0,69 | 0,16 | 0,17 | 11,33 |
| | 4,31 | 5,90 | 8,89 | 59,96 | 0,10 | 0,15 | 0,09 | 1,85 | 0,38 | 0,31 | 14,56 |
| | 0,36 | 1,01 | 0,96 | 80,15 | 0,12 | 0,23 | 0,21 | 2,85 | 0,03 | 0,33 | 12,71 |
| | 16,91 | 20,12 | 48,01 | 1,14 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,65 | 0,07 | 12,43 |
| | 15,86 | 18,33 | 52,67 | 0,15 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | 0,73 | 0,13 | 11,61 |
| | 0,82 | 2,92 | 2,66 | 76,80 | 0,08 | 0,15 | 0,19 | 3,03 | 0,14 | 0,58 | 12,91 |
| | 1,75 | 3,72 | 4,60 | 73,19 | 0,43 | 0,25 | 0,07 | 0,64 | 0,14 | 0,11 | 15,25 |
| | 23,05 | 17,98 | 11,20 | 31,84 | 0,21 | 0,04 | 0,03 | 1,79 | 0,62 | 0,18 | 13,04 |
| | 3,82 | 14,80 | 7,27 | 55,39 | 0,07 | 0,06 | 0,01 | 0,10 | 0,18 | 0,28 | 16,71 |
| | 24,33 | 28,35 | 12,30 | 15,39 | 0,21 | 0,07 | 0,04 | 0,47 | 0,91 | 0,10 | 16,50 |
| | 4,14 | 9,76 | 3,33 | 66,72 | 0,07 | 0,10 | 0,25 | 1,52 | 0,21 | 0,07 | 14,25 |
| Média | 8,28 | 11,00 | 13,15 | 49,66 | 0,15 | 0,11 | 0,08 | 1,14 | 0,36 | 0,20 | 14,02 |

Tabela 5.3.1 – Concentrações dos elementos-traço (ppm) no horizonte argiloso derivado a partir dos pelitos manganíferos das minas de Mn do Azul. (Continua). (+) Abaixo do limite de detecção.

| Amostra | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Ag | In | Sn | Sb | Cs | Ba |
|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| Azul 30 | 160,94 | 27,66 | 541,76 | 124,57 | 480,71 | 283,87 | 33,67 | 1,07 | 26,95 | 40,89 | 297,65 | 34,66 | 125,67 | 4,32 | 24,25 | 1,21 | 0,10 | 1,04 | 0,81 | 2,14 | 5100 |
| Azul 35 | 258,26 | 91,59 | 422,20 | 156,81 | 592,49 | 237,18 | 36,75 | 1,00 | 48,49 | 24,96 | 328,56 | 26,28 | 108,62 | 4,18 | 32,20 | 4,58 | 0,10 | 1,26 | 1,56 | 0,97 | 5260 |
| Azul 36 | 157,53 | 20,00 | 503,04 | 326,81 | 360,17 | 280,59 | 18,55 | 0,74 | 25,96 | 29,49 | 271,43 | 29,47 | 69,61 | 3,90 | 39,73 | 2,16 | 0,10 | 1,48 | 0,87 | 1,86 | 11200 |
| Azul 37 | 107,52 | 20,00 | 739,00 | 655,91 | 510,86 | 855,59 | 26,71 | 0,44 | 45,19 | 26,58 | 244,94 | 51,02 | 109,68 | 4,30 | 38,24 | 3,40 | 0,10 | 1,00 | 1,12 | 1,14 | 10600 |
| Azul 44 | 348,75 | 20,00 | 542,74 | 729,49 | 1260,00 | 365,40 | 21,41 | 1,00 | 91,52 | 67,37 | 163,74 | 61,73 | | + 5,06 | 55,43 | 1,82 | 0,20 | 1,00 | 5,13 | 7,78 | 1210,4 |
| Azul 45 | 152,54 | 20,00 | 272,42 | 787,28 | 892,33 | 374,79 | 14,94 | 1,00 | 45,03 | 89,60 | 121,00 | 49,58 | | + 2,66 | 45,32 | 0,77 | 0,20 | 1,00 | 2,73 | 8,77 | 408,68 |
| Azul 55 | 277,93 | 23,35 | 181,82 | 710,97 | 768,93 | 766,95 | 15,84 | 1,00 | 63,95 | 46,77 | 179,28 | 34,47 | | + 3,36 | 55,64 | 0,50 | 0,20 | 1,44 | 1,90 | 4,92 | 16,97 |
| Azul 58 | 143,83 | 28,48 | 332,63 | 530,60 | 529,38 | 219,11 | 28,23 | 1,00 | 20,07 | 67,00 | 215,18 | 43,62 | 159,13 | 7,75 | 13,86 | 1,06 | 0,20 | 2,00 | 4,62 | 5,84 | 3410 |
| Azul 59 | 176,37 | 20,00 | 318,07 | 339,10 | 308,57 | 163,49 | 28,47 | 1,00 | 26,94 | 53,96 | 158,61 | 39,74 | 202,37 | 8,91 | 9,69 | 0,68 | 0,20 | 1,95 | 5,78 | 4,31 | 2730 |
| Azul 62 | 244,96 | 31,11 | 973,02 | 177,07 | 5130,00 | 422,85 | 38,94 | 1,21 | 214,26 | 43,83 | 109,24 | 73,99 | | + 7,69 | 84,07 | 38,72 | 0,20 | 1,51 | 4,54 | 3,15 | 14900 |
| Azul 63 | 143,25 | 20,00 | 173,90 | 546,34 | 289,69 | 512,66 | 12,36 | 1,00 | 101,39 | 29,26 | 115,70 | 11,19 | | + 3,36 | 160,49 | 2,34 | 0,20 | 1,00 | 1,94 | 1,44 | 145,03 |
| Azul 67 | 297,73 | 20,00 | 533,36 | 511,93 | 466,19 | 413,97 | 27,55 | 1,00 | 26,82 | 51,44 | 74,71 | 33,37 | | + 7,05 | 17,34 | 1,31 | 0,20 | 1,49 | 4,35 | 3,66 | 1820 |
| Azul 85 | 8,23 | 63,71 | 443,36 | 75,25 | 126,19 | 667,23 | 16,17 | 1,00 | 5,00 | 67,34 | 35,64 | 3,38 | | + 1,44 | 14,13 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 0,56 | 0,50 | 212,73 |
| Azul 87 | 68,81 | 101,42 | 81,57 | 40,94 | 104,24 | 119,01 | 18,91 | 1,62 | 8,80 | 56,69 | 38,16 | 8,98 | 217,90 | 7,41 | 2,39 | 0,50 | 0,20 | 1,90 | 1,29 | 1,07 | 741,43 |
| Azul 100 | 125,40 | 20,00 | 576,80 | 222,25 | 387,36 | 600,76 | 23,01 | 1,15 | 12,07 | 52,94 | 126,50 | 32,08 | | + 2,92 | 13,10 | 0,69 | 0,20 | 1,00 | 1,98 | 1,96 | 898,20 |
| Azul 105 | 209,41 | 20,00 | 222,89 | 376,13 | 998,47 | 436,73 | 17,76 | 1,00 | 47,23 | 110,99 | 196,25 | 59,55 | | + 2,55 | 41,11 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 3,05 | 8,93 | 290,47 |
| Azul 106 | 195,12 | 28,86 | 230,23 | 364,59 | 643,42 | 1140,00 | 18,49 | 1,00 | 140,90 | 66,33 | 342,67 | 29,42 | | + 1,81 | 120,86 | 0,60 | 0,20 | 1,00 | 1,68 | 3,84 | 2570,00 |
| Azul 107 | 209,08 | 59,31 | 253,56 | 1030,00 | 475,60 | 1500,00 | 15,38 | 1,00 | 75,21 | 45,49 | 283,50 | 16,98 | | + 1,38 | 67,24 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 1,58 | 2,60 | 100,33 |
| Azul 109 | 145,59 | 31,64 | 348,53 | 507,24 | 501,14 | 1510,00 | 18,61 | 1,00 | 82,86 | 25,71 | 76,50 | 17,25 | | + 1,22 | 27,63 | 1,06 | 0,20 | 1,00 | 1,61 | 0,89 | 1220,00 |
| Azul 203* | 213,32 | 20,00 | 297,86 | 520,74 | 1630,00 | 382,65 | 17,68 | 1,00 | 78,14 | 112,67 | 181,06 | 89,85 | | + 5,04 | 111,35 | 1,09 | 0,20 | 1,00 | 2,18 | 9,53 | 243,09 |
| Azul 204* | 142,70 | 20,00 | 222,77 | 452,99 | 1100,00 | 879,27 | 14,62 | 1,00 | 61,30 | 64,62 | 158,18 | 49,00 | | + 1,65 | 125,82 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 2,63 | 2,82 | 455,30 |
| Azul 205* | 237,26 | 36,88 | 120,55 | 432,87 | 665,34 | 1180,00 | 12,69 | 1,00 | 52,12 | 34,72 | 171,15 | 25,99 | | + 1,76 | 269,56 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 0,52 | 1,62 | 901,70 |
| Azul 206* | 121,99 | 20,00 | 152,65 | 485,84 | 811,67 | 1350,00 | 16,10 | 1,00 | 225,15 | 42,03 | 290,34 | 28,10 | | + 1,44 | 323,78 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 3,54 | 2,65 | 1640,00 |
| Azul 213* | 258,97 | 20,00 | 651,58 | 412,03 | 1230,00 | 708,32 | 18,71 | 1,00 | 37,12 | 11,81 | 67,58 | 27,58 | | + 2,55 | 25,42 | 0,55 | 0,20 | 1,00 | 2,99 | 0,98 | 327,72 |
| Azul 214* | 167,58 | 20,00 | 223,16 | 1020,00 | 780,30 | 618,75 | 15,81 | 1,00 | 101,48 | 46,96 | 156,71 | 38,74 | | + 1,68 | 96,69 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 2,44 | 3,96 | 357,43 |
| Azul 218* | 248,86 | 49,13 | 321,20 | 199,64 | 577,99 | 1020,00 | 38,03 | 1,00 | 101,05 | 26,58 | 367,73 | 24,49 | | + 3,31 | 120,59 | 4,69 | 0,20 | 1,19 | 3,67 | 0,50 | 3670,00 |
| Azul 221* | 272,84 | 124,34 | 208,05 | 750,00 | 1220,00 | 466,90 | 23,37 | 1,00 | 100,01 | 90,77 | 136,92 | 58,29 | | + 3,83 | 159,94 | 0,50 | 0,20 | 1,09 | 5,80 | 9,72 | 321,83 |
| Azul 223* | 98,08 | 22,55 | 273,43 | 338,04 | 157,62 | 435,75 | 14,72 | 1,00 | 37,80 | 66,47 | 396,27 | 17,05 | | + 2,19 | 110,84 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 0,77 | 2,53 | 404,46 |
| Azul 224* | 188,58 | 35,93 | 123,08 | 465,97 | 515,36 | 897,61 | 16,73 | 1,00 | 46,89 | 31,48 | 133,64 | 21,87 | | + 1,54 | 64,01 | 0,83 | 0,20 | 1,00 | 1,20 | 1,75 | 177,26 |
| Azul 225* | 227,29 | 20,00 | 172,05 | 462,12 | 1860,00 | 522,45 | 22,20 | 1,00 | 43,25 | 18,72 | 84,70 | 25,37 | | + 2,16 | 34,56 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 1,53 | 1,54 | 153,50 |
| Azul 226 | | + 33,32 | 451,61 | 85,23 | 389,08 | 1030,00 | 23,98 | 1,60 | 7,04 | 44,64 | 60,22 | 13,45 | | + 3,65 | 33,58 | 0,50 | 0,20 | 1,03 | 0,64 | 0,63 | 5820,00 |
| Média | 186,96 | 35,14 | 351,90 | 446,41 | 831,07 | 656,84 | 21,50 | 1,03 | 64,52 | 51,23 | 180,12 | 34,73 | 141,85 | 3,62 | 75,45 | 2,39 | 0,19 | 1,17 | 2,42 | 3,36 | 2493,76 |

chas sedimentares mineralizadas e mesmo não mineralizadas mas associadas, constituintes do substrato do minério de manganês e até mesmo do próprio minério. A grande variação verificada é reflexo da mesma variação encontrada nas rochas originais, como demonstrado no item 2. Provavelmente a pouca mudança nessa assinatura esteja refletindo o domínio de criptomelana e mesmo hollandita herdadas. Os elementos que apresentam pouca variação como Ge, Ga, Nb, Ta, Y, In, Sn e U, representam aqueles associados a minerais refratários, sem

relação direta com a ambiência manganésifera, fato verificado no horizonte argiloso. Ba apresentou as mais altas variações, comportamento já verificado no horizonte argiloso. Seus valores altos estão tipicamente relacionados com a presença de hollandita, cuja distribuição é muito aleatória em toda a seqüência. Esses dados mostram a forte afinidade química elementar associativa entre Crosta Laterítica/Material Detritico, Horizonte Argiloso e Rochas Sedimentares das minas.

Tabela 5.3.2 – (Continuação). Concentrações dos elementos-traço (ppm) no horizonte argiloso derivado a partir dos pelitos manganêsíferos das minas de Mn do Azul.

| Amostra | HF | TA | W | TL | PB | Bl | TH | U | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Azul 30 | 4,06 | 0,34 | 39,31 | 8,85 | 91,67 | 0,17 | 7,38 | 2,57 | 31,61 | 414,69 | 10,74 | 44,72 | 12,44 | 3,46 | 9,64 | 1,73 | 9,19 | 1,72 | 4,44 | 0,64 | 4,16 | 0,57 |
| Azul 35 | 3,45 | 0,46 | 23,23 | 1,24 | 465,09 | 0,13 | 16,28 | 3,59 | 83,91 | 633,76 | 27,03 | 110,42 | 22,33 | 5,11 | 11,88 | 1,93 | 10,36 | 1,63 | 3,97 | 0,50 | 3,41 | 0,45 |
| Azul 36 | 2,54 | 0,37 | 101,42 | 4,26 | 46,14 | 0,10 | 6,70 | 4,30 | 76,31 | 560,69 | 25,05 | 95,30 | 20,96 | 4,53 | 10,66 | 1,80 | 9,82 | 1,66 | 4,32 | 0,61 | 4,05 | 0,55 |
| Azul 37 | 3,60 | 0,41 | 17,20 | 5,06 | 30,53 | 0,10 | 9,30 | 2,93 | 30,46 | 215,08 | 9,46 | 37,65 | 9,03 | 2,33 | 6,75 | 1,29 | 8,15 | 1,67 | 4,39 | 0,62 | 3,75 | 0,53 |
| Azul 44 | 3,48 | 0,33 | 5,60 | 0,93 | 62,20 | 0,40 | 6,65 | 2,31 | 66,20 | 85,04 | 14,09 | 56,96 | 12,55 | 3,17 | 11,73 | 2,02 | 12,54 | 2,48 | 7,17 | 1,09 | 6,32 | 0,82 |
| Azul 45 | 1,30 | 0,16 | 4,61 | 0,32 | 122,92 | 0,40 | 1,47 | 1,73 | 50,36 | 23,74 | 11,46 | 46,85 | 10,11 | 2,63 | 9,74 | 1,65 | 9,48 | 1,85 | 5,98 | 0,94 | 5,55 | 0,78 |
| Azul 55 | 2,40 | 0,10 | 4,07 | 0,21 | 191,00 | 0,40 | 1,90 | 3,00 | 18,80 | 21,75 | 4,31 | 20,23 | 4,42 | 1,23 | 4,35 | 0,80 | 4,79 | 0,97 | 3,02 | 0,45 | 2,62 | 0,39 |
| Azul 58 | 5,22 | 0,69 | 2,96 | 1,42 | 115,35 | 0,40 | 11,10 | 2,15 | 35,93 | 455,90 | 10,35 | 44,29 | 11,41 | 2,93 | 8,69 | 1,67 | 8,78 | 1,55 | 4,62 | 0,71 | 4,25 | 0,60 |
| Azul 59 | 6,40 | 0,91 | 2,52 | 1,25 | 149,08 | 0,67 | 12,11 | 2,20 | 79,55 | 308,45 | 16,99 | 68,18 | 14,75 | 3,57 | 11,66 | 1,90 | 9,90 | 1,70 | 5,30 | 0,72 | 4,53 | 0,62 |
| Azul 62 | 5,06 | 0,45 | 9,79 | 45,15 | 1680,00 | 0,60 | 8,43 | 5,02 | 50,96 | 254,94 | 13,29 | 61,45 | 18,41 | 5,12 | 19,96 | 3,67 | 21,53 | 3,96 | 11,59 | 1,77 | 10,21 | 1,37 |
| Azul 63 | 1,93 | 0,24 | 3,07 | 0,38 | 49,64 | 4,67 | 1,01 | 2,28 | 20,63 | 32,98 | 5,16 | 22,97 | 5,07 | 1,73 | 4,90 | 0,70 | 3,82 | 0,72 | 2,04 | 0,26 | 1,50 | 0,19 |
| Azul 67 | 4,78 | 0,55 | 5,52 | 1,43 | 141,37 | 0,51 | 9,87 | 2,05 | 63,86 | 102,98 | 14,02 | 54,88 | 12,56 | 3,06 | 10,79 | 1,63 | 8,60 | 1,47 | 4,32 | 0,63 | 3,88 | 0,53 |
| Azul 85 | 1,00 | 0,15 | 1,47 | 0,14 | 10,99 | 0,40 | 1,25 | 1,24 | 13,07 | 14,39 | 2,93 | 12,83 | 2,47 | 0,60 | 2,02 | 0,32 | 1,70 | 0,31 | 0,95 | 0,14 | 0,84 | 0,12 |
| Azul 87 | 6,51 | 0,68 | 4,02 | 0,94 | 32,96 | 0,40 | 7,44 | 1,88 | 11,32 | 18,67 | 2,10 | 8,95 | 1,96 | 0,59 | 1,93 | 0,33 | 1,95 | 0,39 | 1,31 | 0,20 | 1,30 | 0,20 |
| Azul 100 | 2,74 | 0,14 | 2,05 | 1,05 | 104,00 | 0,40 | 6,78 | 3,21 | 117,44 | 348,14 | 25,72 | 104,01 | 21,16 | 4,02 | 14,36 | 2,18 | 10,66 | 1,83 | 5,24 | 0,74 | 4,52 | 0,64 |
| Azul 105 | 1,89 | 0,10 | 3,32 | 1,24 | 406,39 | 0,40 | 3,62 | 2,27 | 27,48 | 44,71 | 5,80 | 27,24 | 5,98 | 1,64 | 6,10 | 1,06 | 6,67 | 1,60 | 5,19 | 0,78 | 4,42 | 0,69 |
| Azul 106 | 1,41 | 0,10 | 2,40 | 11,94 | 256,00 | 0,40 | 2,35 | 3,63 | 16,95 | 36,54 | 3,70 | 17,50 | 3,86 | 1,14 | 4,24 | 0,72 | 4,35 | 0,98 | 3,02 | 0,44 | 2,49 | 0,36 |
| Azul 107 | 0,88 | 0,10 | 5,78 | 0,31 | 94,23 | 0,40 | 1,21 | 3,09 | 11,53 | 22,29 | 2,75 | 13,10 | 3,00 | 0,81 | 3,23 | 0,56 | 3,47 | 0,76 | 2,22 | 0,33 | 1,82 | 0,25 |
| Azul 109 | 1,49 | 0,10 | 3,40 | 1,14 | 322,02 | 0,40 | 2,74 | 2,37 | 34,99 | 73,33 | 6,34 | 27,78 | 5,55 | 1,61 | 6,66 | 1,00 | 4,61 | 0,76 | 2,04 | 0,27 | 1,70 | 0,23 |
| Azul 203 | 1,87 | 0,13 | 3,15 | 2,31 | 142,74 | 0,42 | 3,29 | 2,31 | 34,33 | 35,36 | 10,34 | 45,18 | 12,26 | 3,04 | 10,52 | 1,79 | 10,83 | 2,32 | 7,76 | 1,17 | 7,02 | 1,03 |
| Azul 204 | 1,33 | 0,10 | 19,61 | 0,87 | 50,02 | 0,40 | 2,40 | 2,89 | 26,94 | 31,93 | 8,50 | 37,16 | 8,75 | 2,23 | 7,84 | 1,37 | 8,25 | 1,85 | 6,02 | 0,90 | 5,21 | 0,78 |
| Azul 205 | 0,68 | 0,10 | 5,92 | 1,97 | 98,95 | 0,40 | 1,05 | 2,95 | 17,37 | 45,24 | 4,69 | 19,94 | 4,38 | 1,13 | 4,08 | 0,77 | 4,63 | 0,98 | 3,03 | 0,44 | 2,47 | 0,36 |
| Azul 206 | 0,80 | 0,10 | 33,17 | 8,77 | 92,68 | 0,40 | 1,30 | 3,58 | 13,87 | 16,79 | 4,45 | 20,20 | 4,54 | 1,16 | 4,45 | 0,74 | 4,38 | 0,92 | 2,86 | 0,40 | 2,22 | 0,32 |
| Azul 213 | 1,77 | 0,18 | 17,41 | 1,10 | 93,86 | 0,40 | 3,44 | 2,31 | 38,38 | 51,91 | 9,22 | 34,42 | 7,45 | 1,84 | 6,48 | 1,08 | 5,80 | 1,05 | 3,17 | 0,44 | 2,64 | 0,36 |
| Azul 214 | 0,78 | 0,10 | 6,22 | 0,51 | 76,92 | 0,40 | 1,56 | 2,67 | 42,86 | 19,03 | 8,24 | 31,49 | 7,00 | 1,75 | 6,36 | 1,02 | 5,59 | 1,18 | 3,70 | 0,53 | 3,15 | 0,46 |
| Azul 218 | 3,41 | 0,31 | 3,74 | 9,79 | 390,12 | 0,45 | 13,20 | 2,80 | 66,42 | 271,86 | 14,08 | 52,12 | 10,73 | 2,43 | 7,69 | 1,27 | 6,35 | 1,13 | 3,24 | 0,45 | 2,68 | 0,36 |
| Azul 221 | 3,09 | 0,30 | 8,23 | 2,21 | 442,21 | 1,10 | 5,82 | 2,18 | 37,55 | 60,33 | 10,47 | 45,16 | 11,07 | 2,89 | 9,91 | 1,67 | 9,27 | 1,90 | 6,18 | 0,94 | 5,46 | 0,79 |
| Azul 223 | 1,08 | 0,10 | 32,12 | 0,49 | 30,34 | 0,40 | 2,16 | 2,36 | 15,64 | 24,85 | 3,23 | 14,52 | 2,97 | 0,91 | 3,21 | 0,49 | 2,59 | 0,51 | 1,48 | 0,19 | 1,08 | 0,16 |
| Azul 224 | 0,86 | 0,10 | 26,91 | 0,10 | 150,58 | 0,40 | 1,72 | 2,90 | 15,16 | 17,11 | 3,54 | 15,44 | 3,45 | 0,88 | 3,25 | 0,57 | 3,38 | 0,70 | 2,12 | 0,30 | 1,78 | 0,25 |
| Azul 225 | 1,42 | 0,16 | 25,95 | 0,89 | 42,96 | 0,40 | 2,35 | 1,84 | 29,34 | 26,24 | 6,24 | 24,45 | 5,38 | 1,34 | 4,72 | 0,78 | 4,18 | 0,81 | 2,41 | 0,33 | 2,02 | 0,28 |
| Azul 226 | 4,77 | 0,43 | 6,34 | 4,81 | 148,03 | 0,40 | 10,76 | 2,59 | 19,13 | 84,86 | 4,64 | 17,77 | 3,96 | 0,94 | 3,05 | 0,50 | 2,67 | 0,52 | 1,59 | 0,23 | 1,42 | 0,22 |
| Média | 2,64 | 0,27 | 13,89 | 3,91 | 197,77 | 0,55 | 5,38 | 2,68 | 38,66 | 140,44 | 9,64 | 39,78 | 9,03 | 2,25 | 7,45 | 1,26 | 7,04 | 1,35 | 4,02 | 0,59 | 3,50 | 0,49 |

Padrão de Distribuição dos Elementos no Perfil Laterítico

Os valores médios das concentrações dos elementos maiores (Tabela 5.5) desde as rochas-sãs até o topo do perfil, principalmente até as crostas, assinalam um padrão de distribuição laterítica, já ressaltado anteriormente, e que pode ser bem visualizado nas figuras de perfis compostos (Figuras 5.1 e 5.2) e nos perfis dos furos 167, 382 e 387 (Figura 5.3). Verifica-se, da base para o topo, a gradual diminuição nos teores de SiO_2 , MgO , K_2O , CaO e Na_2O (estão em níveis muito baixos já nas rochas) e aumento de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e MnO . Componente anormal neste quadro é MnO , que constitui o minério. Sua distri-

buição no perfil está compatível com o observado em outros perfis lateríticos, embora o aumento para o topo, não seja normal, como verificou Weber (1997) nos depósitos de manganês do Gabão, reforçando, desta forma, a possível presença de OH-Mn , principalmente criptomelana, como mineral herdado.

A linhagem laterítica dos perfis estudados está evidente nos diagramas $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO-Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO-Na}_2\text{O-MnO}$ e $\text{MnO-MgO-Fe}_2\text{O}_3$ (Figura 5.4), mostrando uma sucessão de horizontes em evolução contínua. Os diagramas também mostram que os materiais argilosos com esferolitos (representados pelo número 1) constituem de fato uma retomada da alteração dos perfis, ou seja, uma inversão no processo.

Tabela 5.4 – Concentrações dos elementos-traço (ppm) nas crostas lateríticas das minas do Azul. (+) Abaixo do limite de detecção.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|-------------|
| | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Ag | In | Sn | Sb | Cs | Ba | |
| | 193,52 | 25,58 | 386,20 | 709,27 | 1100,00 | 466,26 | 16,79 | 0,51 | 45,95 | 49,47 | 94,75 | 43,29 | 49,36 | 3,34 | 60,98 | 0,50 | 0,10 | 1,00 | 2,56 | 1,06 | 390,2 | |
| | 35,50 | 178,73 | 405,90 | 679,38 | 458,86 | 417,00 | 13,85 | 0,70 | 31,02 | 13,39 | 73,31 | 26,76 | 90,83 | 2,40 | 18,13 | 3,50 | 0,10 | 1,19 | 0,91 | 0,22 | 89000 | |
| | 127,29 | 48,55 | 406,72 | 221,15 | 469,71 | 727,67 | 26,82 | 0,90 | 37,05 | 35,59 | 146,30 | 53,43 | 115,20 | 4,69 | 39,79 | 0,73 | 0,10 | 1,51 | 1,36 | 1,33 | 19500 | |
| | 348,11 | 109,88 | 329,49 | 358,52 | 1130,00 | 1550,00 | 14,58 | 1,00 | 18,59 | 41,87 | 403,98 | 5,75 | + | 2,01 | 410,77 | 0,69 | 0,20 | 1,58 | 1,79 | 0,78 | 8770 | |
| | 646,15 | 887,12 | 19,03 | 33,87 | 70,96 | 30,00 | 66,99 | 3,03 | 58,24 | 2,00 | 2,94 | 7,40 | 260,17 | 9,31 | 16,16 | 0,98 | 0,24 | 3,49 | 6,94 | 0,50 | 28,47 | |
| | 665,95 | 724,51 | 4,69 | 20,00 | 106,44 | 30,00 | 66,91 | 2,50 | 59,57 | 2,00 | 3,30 | 8,14 | 309,56 | 9,98 | 11,43 | 1,21 | 0,26 | 4,25 | 8,04 | 0,50 | 24,98 | |
| | 102,74 | 50,81 | 462,33 | 214,34 | 748,17 | 916,57 | 17,13 | 1,00 | 27,10 | 47,34 | 46,77 | 13,35 | + | 1,81 | 184,80 | 1,83 | 0,20 | 1,00 | 0,92 | 0,50 | 708,8 | |
| | 209,63 | 20,00 | 207,35 | 587,94 | 664,55 | 363,95 | 13,43 | 1,00 | 38,98 | 50,00 | 160,44 | 98,55 | + | 1,68 | 61,73 | 0,50 | 0,20 | 1,00 | 0,83 | 5,29 | 6,67 | |
| | 169,72 | 66,16 | 139,70 | 198,31 | 163,98 | 361,08 | 39,24 | 1,55 | 24,91 | 42,63 | 276,73 | 25,53 | 249,20 | 8,45 | 7,14 | 2,03 | 0,20 | 1,88 | 1,51 | 1,09 | 2370 | |
| Média | 277,62 | 234,59 | 262,38 | 335,86 | 545,85 | 540,28 | 30,64 | 1,35 | 37,93 | 31,59 | 134,28 | 31,36 | 179,05 | 4,85 | 90,10 | 1,33 | 0,18 | 1,88 | 2,76 | 1,25 | 13422,1 | |
| | Hf | Ta | W | Tl | Pb | Bi | Th | U | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
| | 1,59 | 0,09 | 4,70 | 1,00 | 21,49 | 0,10 | 2,64 | 1,78 | 46,91 | 38,34 | 12,82 | 48,27 | 10,38 | 2,77 | 9,41 | 1,61 | 8,71 | 1,71 | 4,89 | 0,77 | 4,79 | 0,63 |
| | 3,38 | 0,39 | 7,28 | 27,78 | 32,76 | 0,10 | 7,73 | 3,34 | 12,85 | 82,10 | 2,69 | 9,30 | 1,89 | 0,01 | 1,42 | 0,39 | 3,13 | 0,89 | 2,97 | 0,43 | 2,80 | 0,41 |
| | 3,82 | 0,58 | 55,68 | 7,25 | 69,71 | 0,73 | 14,20 | 4,10 | 43,04 | 347,60 | 13,73 | 56,58 | 13,16 | 3,02 | 8,60 | 1,65 | 10,72 | 2,12 | 5,63 | 0,79 | 5,12 | 0,72 |
| | 0,84 | 0,13 | 6,29 | 13,61 | 45,81 | 0,40 | 0,41 | 3,88 | 5,48 | 8,60 | 1,49 | 6,55 | 1,57 | 0,45 | 1,53 | 0,25 | 1,61 | 0,32 | 0,99 | 0,14 | 0,83 | 0,12 |
| | 6,78 | 0,82 | 2,31 | 0,57 | 65,59 | 1,29 | 34,05 | 2,91 | 8,52 | 43,97 | 1,38 | 5,21 | 1,16 | 0,32 | 1,10 | 0,24 | 1,51 | 0,31 | 1,03 | 0,18 | 1,14 | 0,18 |
| | 7,59 | 0,93 | 2,16 | 0,10 | 49,61 | 0,76 | 37,12 | 3,94 | 5,74 | 12,99 | 1,01 | 4,01 | 0,94 | 0,28 | 1,04 | 0,22 | 1,43 | 0,30 | 1,09 | 0,18 | 1,16 | 0,18 |
| | 1,15 | 0,35 | 4,73 | 2,77 | 36,06 | 0,40 | 1,73 | 0,89 | 23,15 | 64,51 | 4,46 | 17,53 | 2,95 | 0,76 | 2,71 | 0,43 | 2,83 | 0,56 | 1,53 | 0,21 | 1,19 | 0,17 |
| | 0,89 | 0,10 | 5,24 | 0,16 | 56,94 | 0,40 | 1,85 | 3,25 | 25,04 | 26,56 | 3,92 | 18,16 | 3,60 | 1,05 | 5,29 | 1,02 | 7,08 | 1,85 | 6,47 | 0,93 | 5,07 | 0,81 |
| | 7,67 | 0,78 | 19,20 | 4,81 | 44,63 | 0,75 | 19,81 | 4,03 | 20,14 | 73,93 | 4,22 | 17,69 | 4,28 | 1,30 | 4,85 | 0,86 | 4,68 | 0,92 | 2,84 | 0,43 | 2,60 | 0,37 |
| Média | 3,75 | 0,47 | 11,95 | 6,45 | 46,96 | 0,55 | 13,28 | 3,13 | 21,21 | 77,62 | 5,08 | 20,37 | 4,44 | 1,11 | 4,00 | 0,74 | 4,63 | 1,00 | 3,05 | 0,45 | 2,74 | 0,40 |

Tabela 5.5 – Composição química média total dos principais materiais do perfil laterítico composto.

| Óxidos Litologia | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | Perda ao Fogo |
|---------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|---------------|
| 1 | 22,60 | 26,29 | 18,97 | 12,80 | 0,05 | 0,02 | 0,01 | 0,25 | 1,54 | 0,12 | 16,67 |
| 2 | 6,49 | 10,78 | 12,99 | 51,41 | 0,13 | 0,13 | 0,11 | 1,27 | 0,41 | 0,19 | 14,59 |
| 3 | 10,76 | 17,64 | 7,63 | 45,83 | 0,12 | 0,08 | 0,10 | 0,70 | 0,44 | 0,15 | 15,82 |
| 4 | 6,59 | 7,24 | 4,25 | 63,89 | 0,33 | 0,19 | 0,17 | 1,58 | 0,29 | 0,19 | 14,74 |
| 5 | 31,21 | 21,21 | 8,66 | 21,44 | 0,45 | 0,10 | 0,08 | 1,37 | 0,96 | 0,16 | 13,51 |
| 6 | 28,30 | 9,51 | 7,95 | 31,83 | 1,67 | 0,53 | 0,09 | 1,62 | 0,48 | 0,13 | 17,33 |
| 7 | 65,02 | 13,07 | 7,56 | 0,24 | 1,53 | 0,05 | 0,07 | 2,78 | 0,75 | 0,08 | 8,13 |

1 Material argiloso (latosolo)/Material argiloso com pisolitos Mn+Fe+Al; 2 Crosta laterítica/Material Detritico; 3 Siltito ferruginoso manganífero laterizado: HORIZONTE ARGILOSO; 4 Pelitos manganíferos laterizados (hc+arg), siltitos laterizados: HORIZONTE ARGILOSO; 5 Siltito vermelho, siltito rosa a vermelho: HORIZONTE ARGILOSO; 6 Folhelhos cinzas manganíferos (rd); 7 Folhelho cinza carbonoso não manganífero.

Conforme o perfil composto (Tabela 5.6 e Figuras 5.1, 5.2 e 5.5), bem como os perfis dos principais furos (Furos 167, 382 e 387) que atravessam o perfil laterítico e as rochas-sãs (Figura 5.3), as distribuições dos elementos-traço mostram também uma clássica linhagem laterítica, bem diferenciada, em que elementos como Co, Ni, Cu, Zn, As, (Sr), ETRL, W e (Y) apresentam suas mais altas concentrações no horizonte argiloso. Como já mencionado anteriormente, Co, Ni, Cu, Zn, As ocorrem em valores

anômalos; enquanto (V), (Cr), Mo, Sr, Ba, ETR, Tl e Pb estabelecem suas mais altas concentrações nas crostas lateríticas, onde se encontram não somente os minerais OH-Fe, como OH-Mn (com destaque para hollandita), além de gibbsita e caulinita. Nos materiais argilosos com esferolitos concentram-se principalmente os elementos relacionados a minerais residuais resistatos e OH-Fe, como V, Cr, Ga, Zr, Hf, Nb, Ta, Sn, Sb, Bi, Pb, Th, (ETRP) e U. Interessante é que apenas SiO₂, K₂O, Rb e Cs apresen-

Tabela 5.6 – Concentrações médias dos elementos-traço nos horizontes do perfil laterítico composto.

| | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Rb | Sr | Y | Zr | Nb | Mo | Ag | In | Sn | Sb | Cs | Ba | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|------|------|------|------|------|---------|-----|
| Litologia | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| 1 | 314,51 | 228,61 | 104,97 | 81,24 | 203,10 | 137,80 | 43,31 | 1,44 | 51,99 | 7,52 | 62,44 | 21,95 | 591,88 | 21,48 | 32,47 | 3,17 | 0,19 | 7,66 | 4,26 | 0,62 | 1421,8 | |
| 2 | 285,59 | 212,72 | 278,69 | 271,83 | 530,12 | 475,71 | 31,11 | 1,18 | 60,70 | 26,43 | 183,09 | 29,06 | 101,21 | 5,47 | 122,68 | 2,24 | 0,18 | 1,85 | 3,62 | 1,09 | 11215,2 | |
| 3 | 199,26 | 39,25 | 238,43 | 170,71 | 329,52 | 535,10 | 23,75 | 1,05 | 93,19 | 15,24 | 99,18 | 21,44 | 154,28 | 5,57 | 33,22 | 4,01 | 0,18 | 1,40 | 2,55 | 1,06 | 3640,0 | |
| 4 | 180,93 | 35,14 | 351,90 | 446,41 | 831,07 | 656,84 | 21,50 | 1,03 | 64,52 | 51,23 | 180,12 | 34,73 | 32,03 | 3,62 | 75,45 | 2,39 | 0,19 | 1,17 | 2,42 | 3,36 | 2493,8 | |
| 5 | 260,12 | 135,33 | 168,58 | 181,95 | 311,67 | 338,95 | 32,08 | 1,55 | 40,96 | 49,32 | 102,06 | 33,27 | 242,83 | 14,32 | 27,98 | 2,87 | 0,16 | 2,53 | 3,71 | 2,61 | 2400,9 | |
| 6 | 173,08 | 70,97 | 196,95 | 270,16 | 261,89 | 623,47 | 19,23 | 1,40 | 44,61 | 62,28 | 107,68 | 23,50 | 85,32 | 5,65 | 30,62 | 0,74 | 0,18 | 1,65 | 2,08 | 2,86 | 838,3 | |
| 7 | 162,61 | 120,01 | 12,66 | 51,60 | 134,21 | 151,97 | 17,22 | 1,63 | 34,56 | 98,20 | 29,62 | 29,73 | 183,32 | 7,64 | 11,83 | 1,70 | 0,18 | 1,26 | 1,68 | 3,71 | 409,7 | |

| | HF | Ta | W | Tl | Pb | Bi | Th | U | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu | |
|-----------|-------|------|-------|------|--------|------|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Litologia | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| 1 | 16,02 | 2,03 | 8,12 | 2,91 | 200,14 | 1,29 | 29,73 | 4,59 | 31,85 | 115,39 | 5,82 | 21,49 | 4,43 | 1,25 | 3,44 | 0,64 | 3,79 | 0,78 | 2,51 | 0,40 | 2,64 | 0,40 | |
| 2 | 4,06 | 0,49 | 13,09 | 8,24 | 221,14 | 0,77 | 14,39 | 3,62 | 38,29 | 189,48 | 9,34 | 38,78 | 8,66 | 2,14 | 6,84 | 1,13 | 6,31 | 1,18 | 3,37 | 0,48 | 3,01 | 0,42 | |
| 3 | 5,13 | 0,49 | 19,61 | 2,29 | 120,18 | 0,30 | 9,37 | 4,04 | 60,75 | 357,64 | 15,55 | 61,57 | 12,74 | 3,32 | 7,96 | 1,29 | 6,65 | 1,13 | 2,93 | 0,39 | 2,56 | 0,35 | |
| 4 | 2,64 | 0,27 | 13,89 | 3,91 | 197,77 | 0,55 | 5,38 | 2,68 | 38,66 | 140,44 | 9,64 | 39,78 | 9,03 | 2,25 | 7,45 | 1,26 | 7,04 | 1,35 | 4,02 | 0,59 | 3,50 | 0,49 | |
| 5 | 8,17 | 1,07 | 10,65 | 2,17 | 181,20 | 0,98 | 15,14 | 4,89 | 48,42 | 116,63 | 10,17 | 40,09 | 8,52 | 2,16 | 6,88 | 1,13 | 6,20 | 1,20 | 3,41 | 0,50 | 3,10 | 0,45 | |
| 6 | 3,93 | 0,46 | 6,25 | 1,52 | 125,24 | 0,98 | 6,65 | 2,35 | 38,87 | 82,74 | 8,33 | 31,28 | 6,23 | 1,58 | 5,07 | 0,84 | 4,59 | 0,86 | 2,47 | 0,35 | 2,14 | 0,30 | |
| 7 | 5,19 | 0,68 | 4,40 | 0,69 | 47,82 | 0,43 | 8,82 | 3,38 | 23,91 | 45,27 | 4,78 | 20,14 | 4,17 | 1,18 | 4,21 | 0,73 | 4,18 | 0,87 | 2,61 | 0,39 | 2,35 | 0,34 | |

1 Material argiloso (latosolo)/Material argiloso com pisolitos Mn+Fe+Al; 2 Crosta laterítica/Material Detrítico; 3 Siltito ferruginoso manganífero laterizado: HORIZONTE ARGILOSO; 4 Pelitos manganíferos laterizados (hc+arg), siltitos laterizados: HORIZONTE ARGILOSO; 5 Siltito vermelho, siltito rosa a vermelho: HORIZONTE ARGILOSO; 6 Folhelhos cinzas manganíferos (rd); 7 Folhelho cinza carbonoso não manganífero.

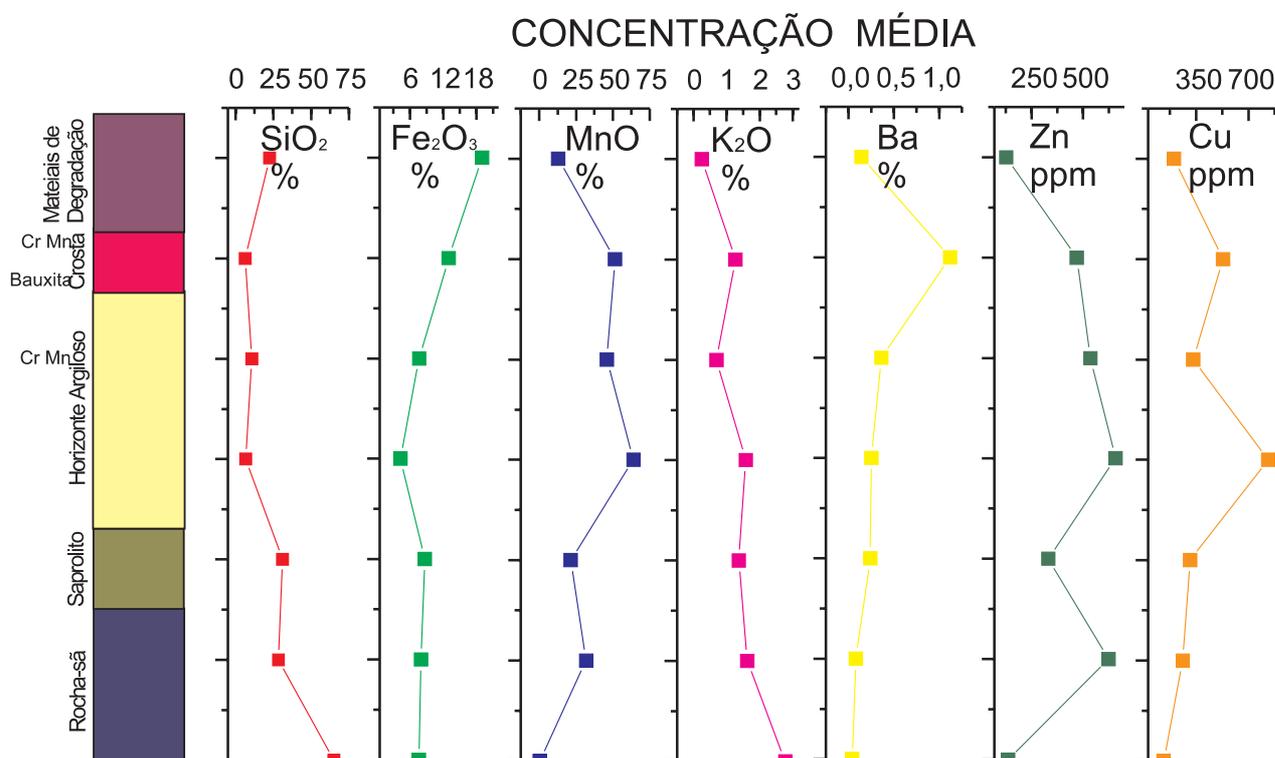


Figura 5.1 – Distribuição dos principais elementos químicos (SiO_2 , Fe_2O_3 , MnO e K_2O) e alguns elementos-traço (Ba , Zn e Cu) ao longo do perfil laterítico composto.

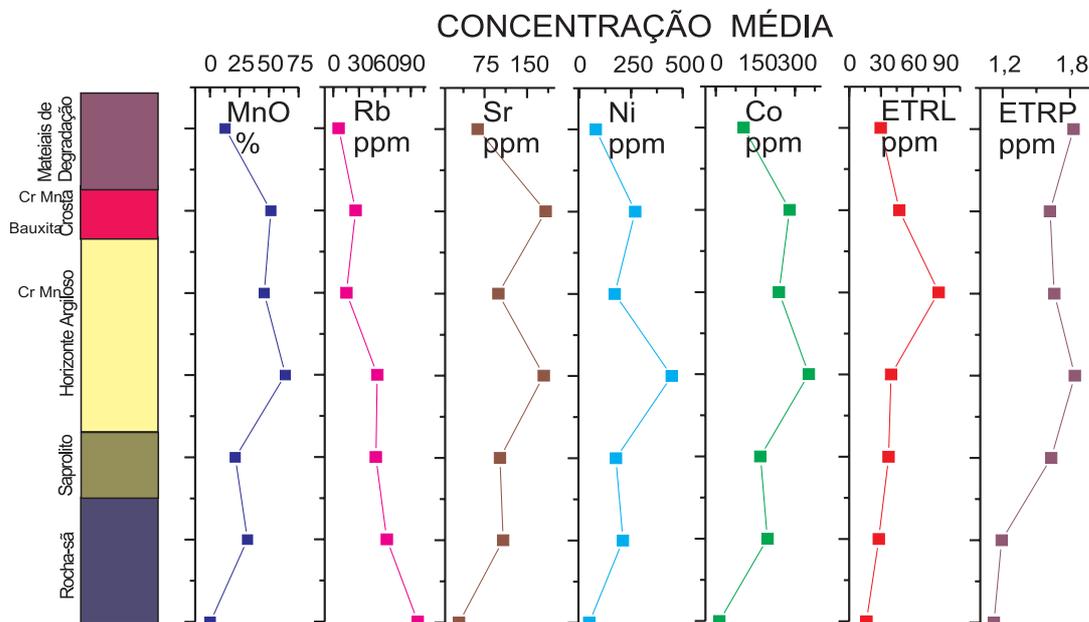


Figura 5.2 – Distribuição de MnO e alguns elementos-traço (Rb, Sr, Ni, Co, ETRL e ETRP) ao longo do perfil laterítico composto.

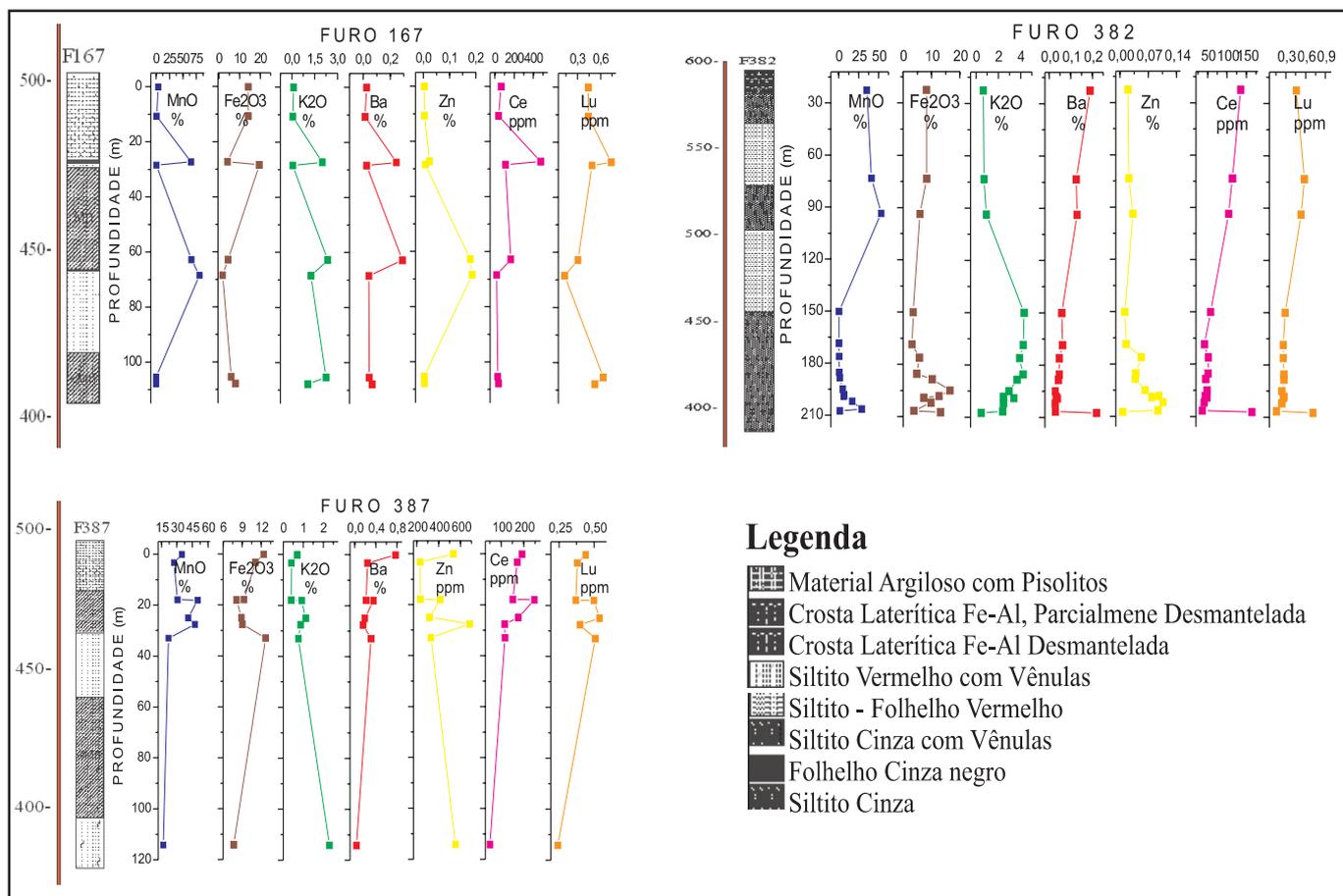


Figura 5.3 – Distribuição dos elementos químicos nos perfis dos furos 167, 382 e 387.

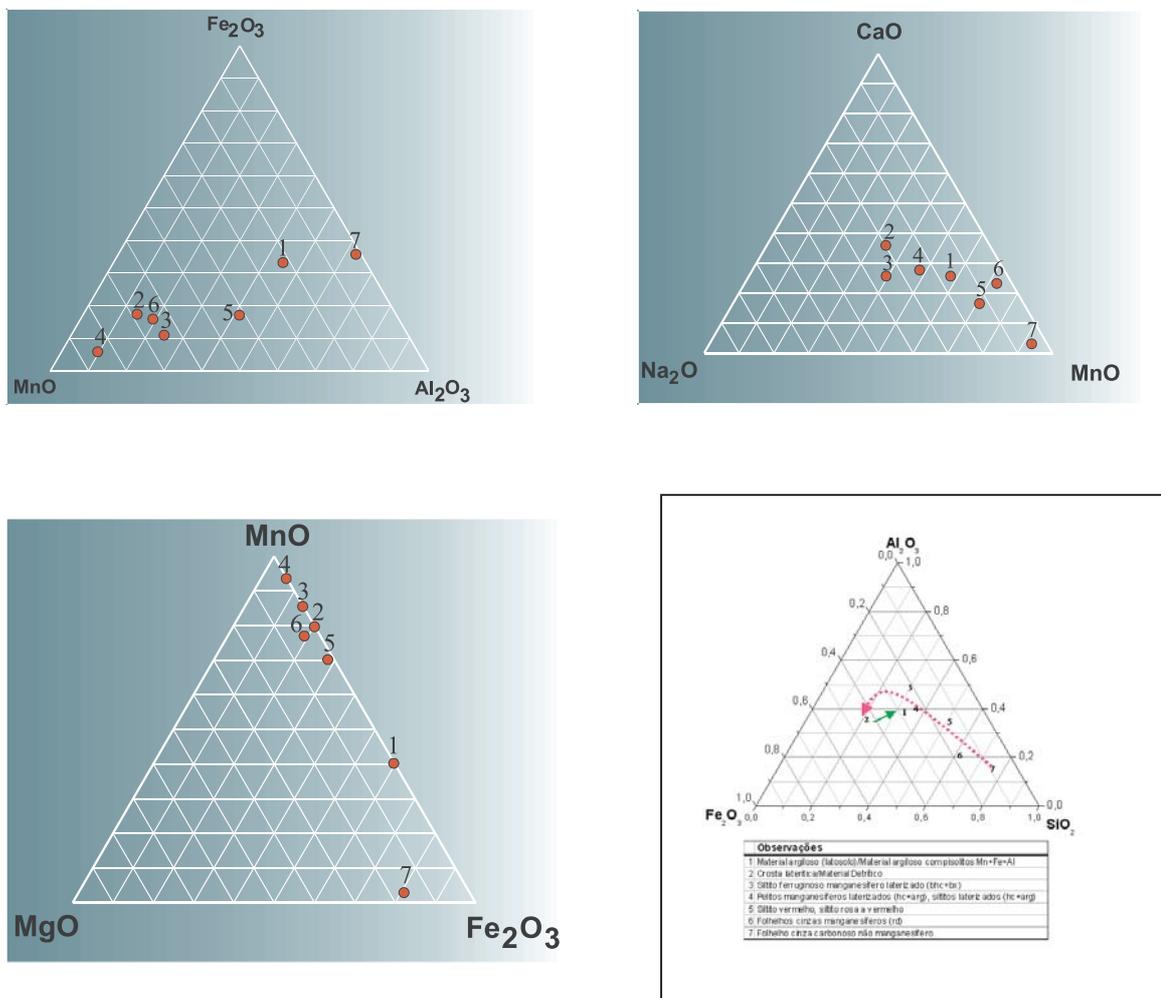


Figura 5.4 – Diagramas geoquímicos retratando a evolução do perfil laterítico composto a partir das concentrações médias dos seus principais componentes químicos.

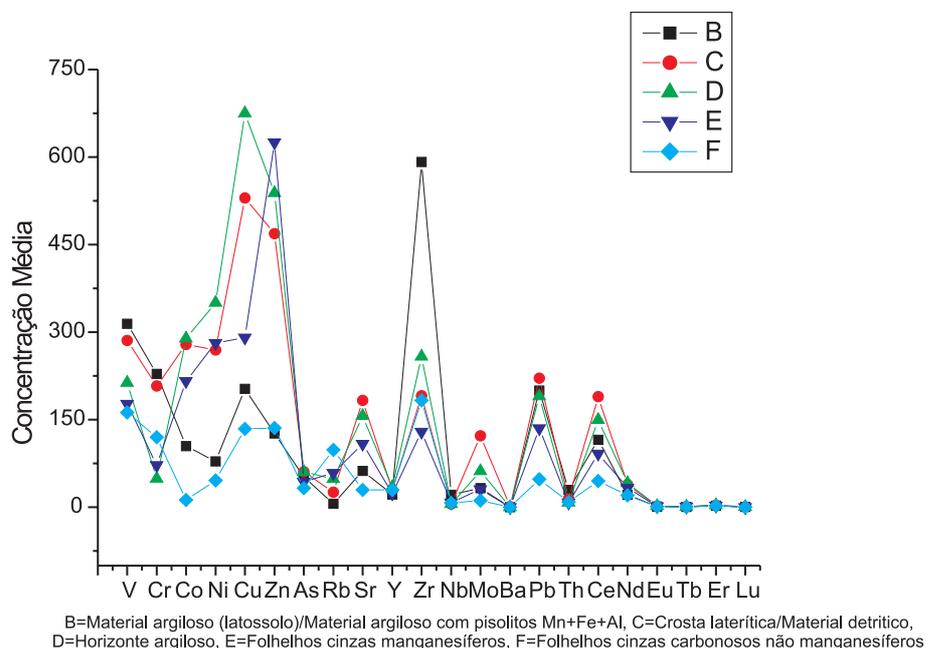


Figura 5.5 – Variações das concentrações dos elementos-traço desde as rochas-sãs (rochas-mãe), passando pelo horizonte argiloso, a crosta laterítica/material detritico até o material argiloso com esferolitos, em encadeamento indicativo de perfil laterítico.

tam uma linhagem de contínua diminuição de teores da rocha-sã a crosta, retratando claramente a decomposição continuada das micas.

Os elementos terras raras, que se apresentam com valores relativamente elevados e concentrados principalmente no horizonte argiloso e em parte nas crostas/materiais detríticos, apresentam padrão de distribuição também distinto segundo os horizontes, mas sempre com enriquecimento dos ETRL, embora em direção do topo, os ETRP aumentem em proporção maior. As curvas de distribuição delineiam a anomalia positiva de Ce tipicamente na crosta/material detrítico e já no topo do horizonte argiloso (Figura 5.6), que constitui uma característica comum do elemento em perfis lateríticos. A anomalia não é apresentada pelas rochas-sãs, o que demonstra que de fato houve redistribuição e concentração dos ETR, em especial do Ce, no perfil laterítico.

Os diagramas de dispersão geoquímica de pares de elementos químicos selecionados ao longo do perfil, contemplando apenas os conjuntos rochas-sãs (3), horizonte argiloso (2) e crosta laterítica + materiais argilosos com esferolitos (1), permitem avaliar a preservação das afinidades químicas ou não e constatar a evolução laterítica (Figuras 5.7.1, 5.7.2 e 5.7.3). O par $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, que nas rochas-sãs discrimina os dois agrupamentos, no horizonte argiloso ressalta ao mesmo tempo o comportamento inverso laterítico e a sua preservação nas micas e caulinita herdadas, ou seja, duas populações. O par $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ mantém a correlação positiva primária em todo perfil, insurgindo-se parcialmente na crosta e material argiloso, quando ocorre gibbsita, e a neoformação de caulinita tardia. O par $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-MnO}$ comporta-se de forma linear inversa, pois se contrapõe, um fato normal em perfis lateríticos, em que Fe se concentra em direção ao topo e Mn rumo à base. A correlação Mg-Mn destaca a natureza altamente lixiviada de Mg no perfil. O par Rb-K₂O se

apresenta como um clássico e sua correlação positiva herdada da rocha-sã se preserva em todo perfil, indistintamente, mostrando sua forte intimidade com as micas, mesmo em pequenas quantidades. Mn-K, preferencialmente com comportamento inverso nas rochas-sãs, tende a correlação positiva nos horizontes lateríticos, em decorrência da fixação e neoformação de criptomelana e decomposição dos feldspatos e parcial das micas-illitas. Ba e Mn, que descrevem duas populações nas rochas, vão se correlacionar positivamente apenas nas crostas, quando da presença maior de hollandita. Por sua vez, Zn-Mn, que embora estejam associados nas rochas-sãs, somente se correlacionam no horizonte argiloso, quando possivelmente passam a ser incorporados nos OH-Mn, neoformados, ao lado de Co, Ni e em parte Cu. Já Ni e Mn, que guardam forte afinidade correlativa positiva nas rochas-sãs, preservam a afinidade em todo perfil, embora mostrem expressiva dispersão no horizonte argiloso, onde provavelmente começam a participar também das estruturas dos OH-Fe, ao serem liberados dos sulfetos de Fe e outros encontrados nas rochas-sãs. ETR e Mn tendem a mostrar correlação positiva, embora indiquem duas populações nas rochas-sãs e horizonte argiloso, e apenas nas crostas e materiais argilosos essa correlação seja de fato linear positiva, mostrando que somente nesta parte do perfil houve a maior formação de minerais de manganês, como hollandita. É nesta zona que se observa a maior afinidade também entre Sr, Ba, ETR e Mn e ainda K, e com destaque maior para Ce entre os ETR. Os pares de dispersão geoquímica mostram, assim, que o horizonte argiloso em grande parte preserva assinatura das rochas-sãs, e que, portanto, não constitui horizonte de grandes transformações mineralógicas e geoquímicas, sugerindo que seus minerais de manganês em grande proporção devem ser herdados e não neoformados.

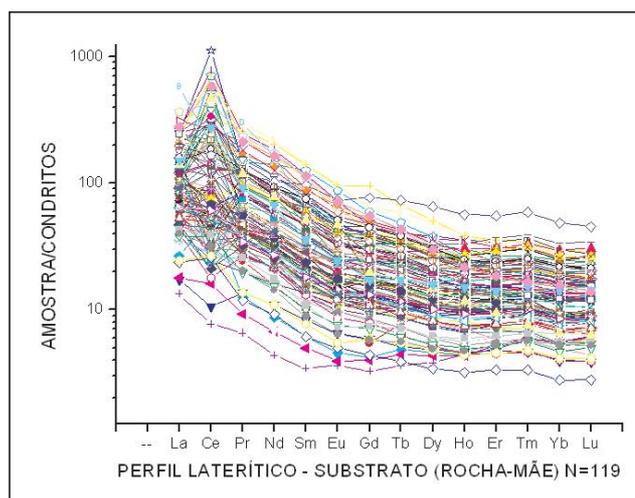
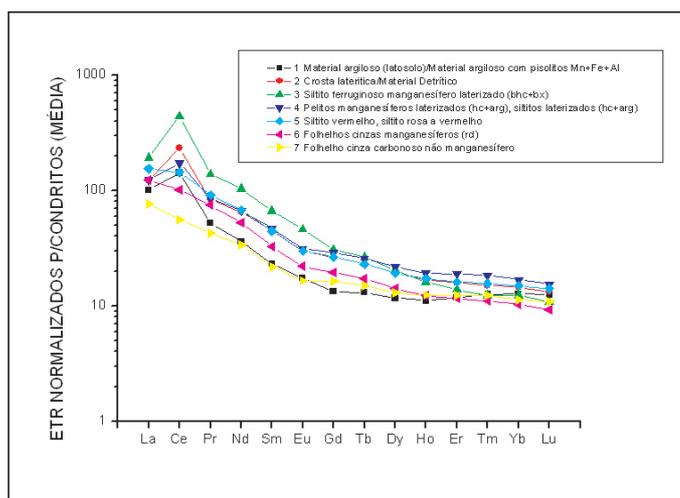


Figura 5.6 – Distribuição dos elementos terras raras normalizados aos condritos ao longo do perfil laterítico. À esquerda os valores médios para cada horizonte e à direita todas amostras do perfil até as rochas-sãs.

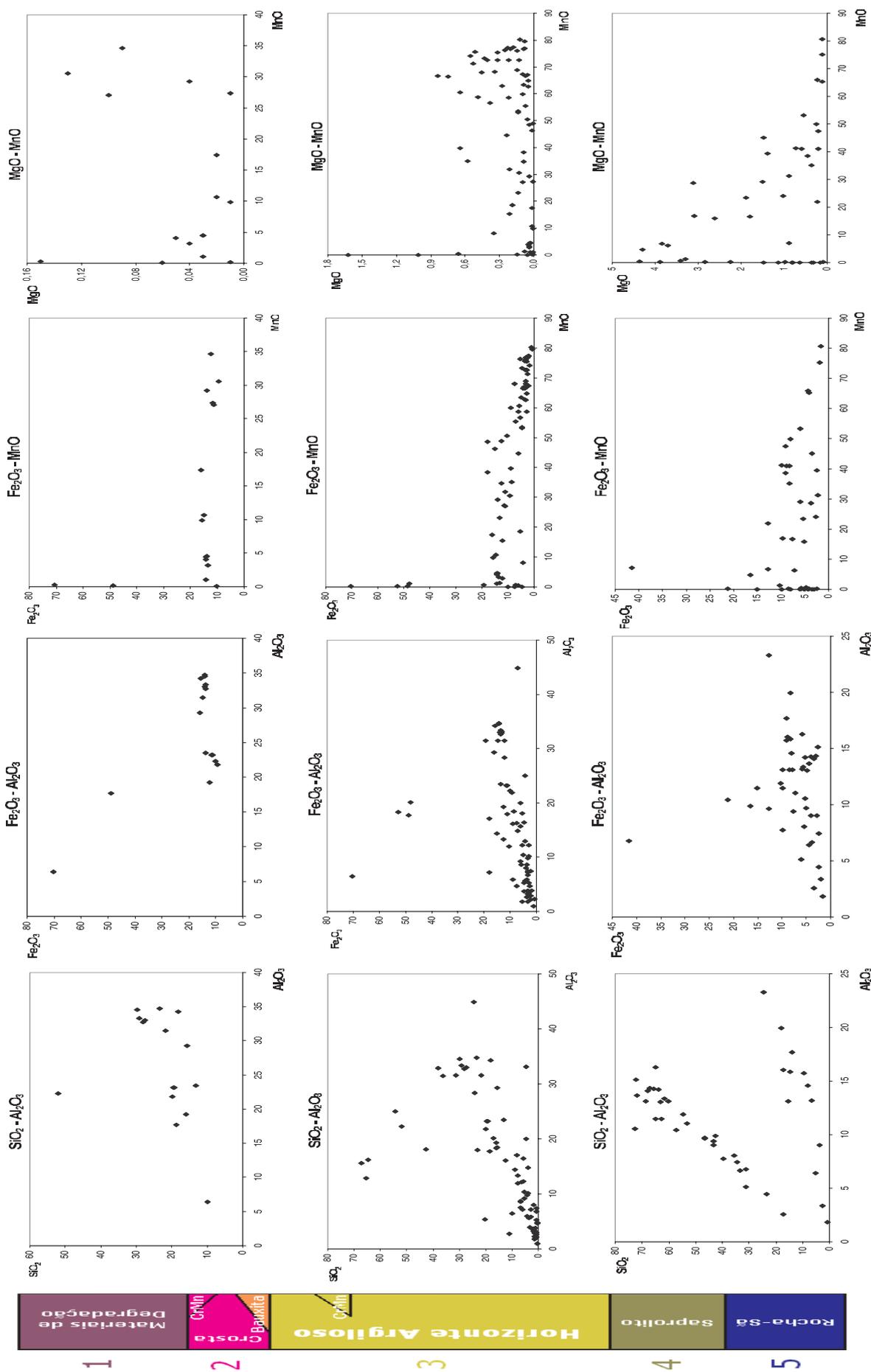


Figura 5.7.1 – Diagramas de dispersão geoquímica de pares de elementos selecionados ao longo do perfil laterítico composto nas minas de manganês do Azul, Carajás, contemplando as rochas-sãs, horizonte argiloso e crosta laterítica + materiais argilosos com esferolitos (Continua).

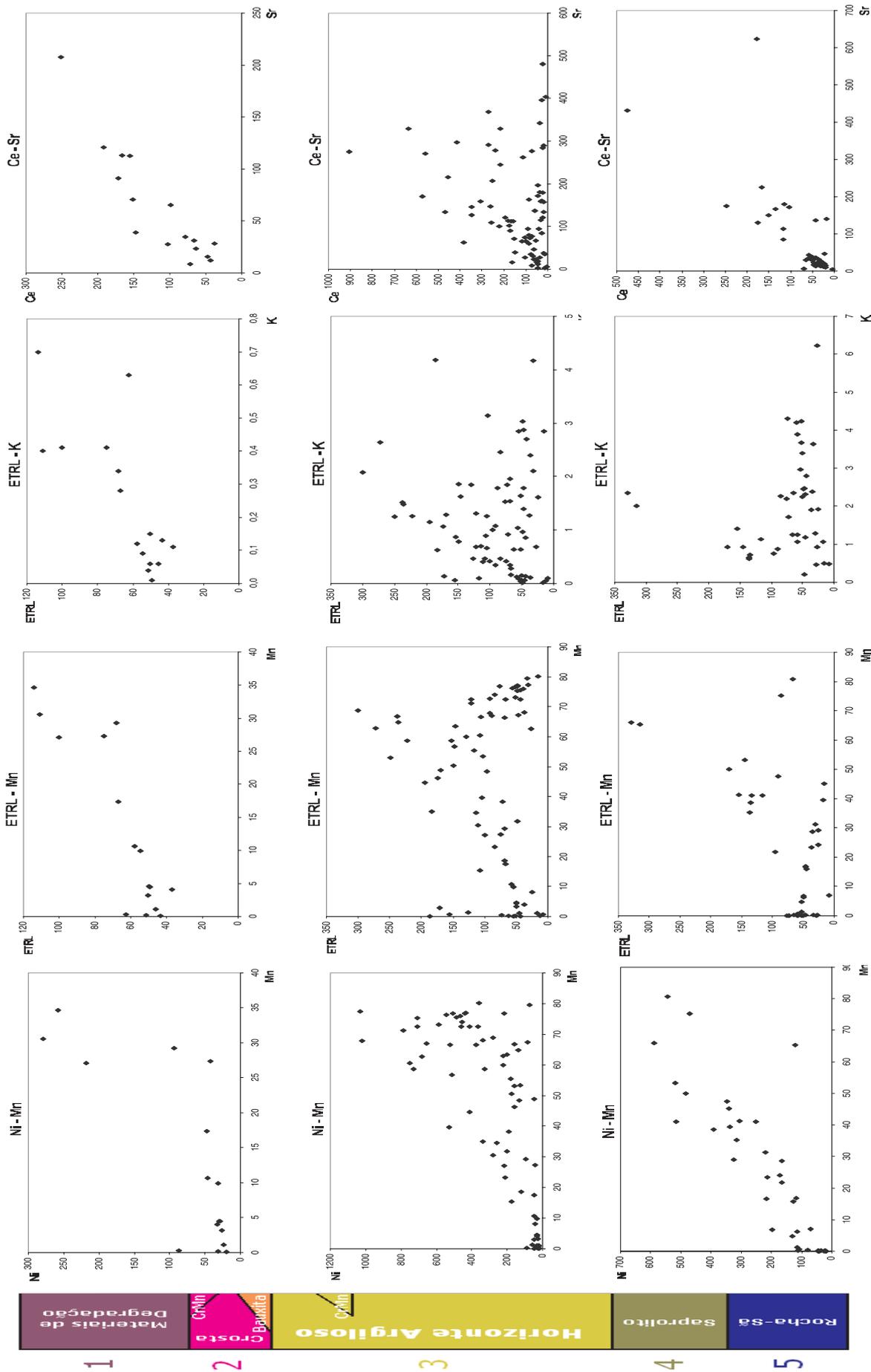


Figura 5.7.2 – (Continuação). Diagramas de dispersão geoquímica de pares de elementos selecionados ao longo do perfil laterítico composto nas minas de manganês do Azul, Carajás, contemplando as rochas-sãs, horizonte argiloso e crosta laterítica + materiais argilosos com esferolitos (Continua).

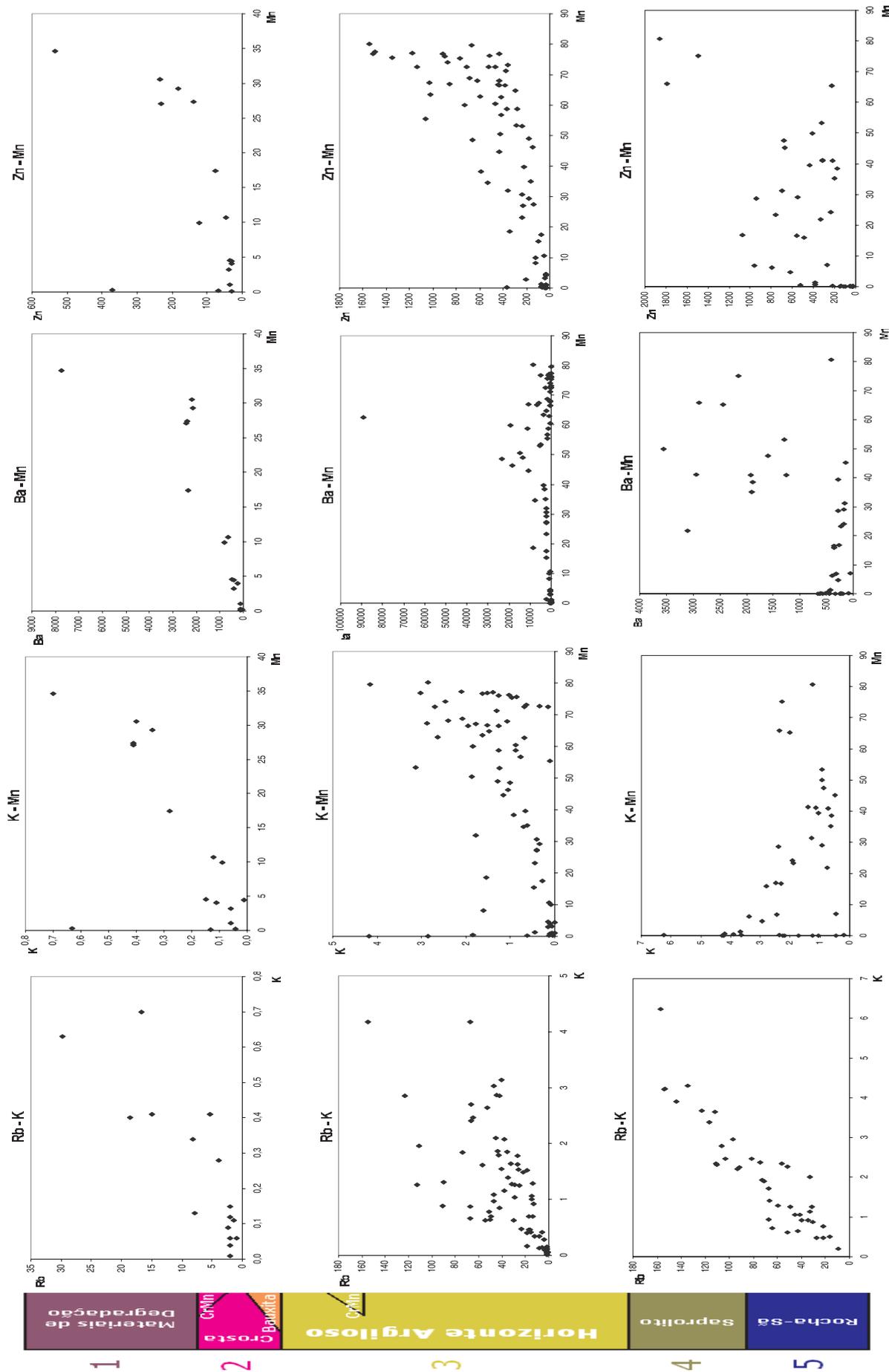


Figura 5.7.3 – (Continuação). Diagramas de dispersão geoquímica de pares de elementos selecionados ao longo do perfil laterítico composto nas minas de manganês do Azul, Carajás, contemplando as rochas-sãs, horizonte argiloso e crosta laterítica + materiais argilosos com esferolitos.

VI. OS ESFEROLITOS E SUA MATRIZ ARGILOSA

Modo de Ocorrência

Os esferolitos são materiais superficiais a subsuperficiais, em parte manganíferos, constituídos por OH-Mn, OH-Fe e gibbsita em matriz argilosa ou não, e que ainda não tem aplicação econômica. Mas sem dúvida tem grande importância para o entendimento global dos processos de formação das jazidas supergênicas de manganês. Os esferolitos ocorrem como material superficial, recobrimdo encostas de morros e superfícies arrasadas junto à encosta do platô do Igarapé Azul. São pacotes que alcançam até 80m de espessura (Figura 6.1). A coloração geral do pacote varia de amarela-avermelhada a marrom-alaranjada e assume aspecto de material argiloso, tipo latossolos amarelos, quando a matriz é dominante. Com base na abundância da matriz argilosa, os esferolitos foram classificados em três tipos:

a) Aglomerados com matriz francamente argilosa, amarelo-avermelhados, com os esferolitos dispersos na matriz, em formas arredondadas a sub-arredondadas e tamanhos que alcançam até 4 mm;

b) Aglomerados com matriz pouco argilosa, com mesma coloração e massa, desagregada facilmente ao contato com a mão. O tamanho dos esferolitos é variável, até 8mm, os quais têm formas arredondadas, sub-arredondadas e mesmo angulosas;

c) Aglomerados de esferolitos sem matriz argilosa, de cor amarela a marrom avermelhada e marrom, compactos e duros, formando verdadeiras crostas. A coesão entre os esferolitos é feita pelo contato entre os mesmos.

Distribuição Granulométrica

A distribuição granulométrica dos esferolitos, que compreende pisolitos a oolitos e nódulos, foi avaliada por meio das retenções nas peneiras + 4,0mm, 4,0 a 3,2mm, 3,2 a 2,0mm, 2,0 a 1,0mm e 1,0 a 0,5mm e a fração – 0,5mm, esta última considerada como a matriz dos esferolitos (Tabela 6.1 e Figura 6.2).

Os resultados obtidos mostram a predominância da fração < 0,5 mm, a matriz propriamente dita, sobre os esferolitos em termos gerais, pois localmente ocorrem pacotes de esferolitos praticamente desprovidos de matriz. Considerando simplesmente as frações retidas maiores que 0,5 mm e o limite pisolitos – oolitos em 2 mm, observa-se predominância dos pisolitos (frações + 2 mm) sobre oolitos (Tabela 6.1 e Figuras 6.3 e 6.4).

Embora o número de amostras estudadas seja pequeno, verifica-se grande heterogeneidade na distribuição dos

tamanhos dos esferolitos. Não há padrão de distribuição do tamanho dos grãos, de maneira que na amostra Azul 51, quanto maior o tamanho de grão, maior a abundância dos pisolitos; entretanto, na amostra Azul 69B, quanto maior o tamanho de grão dos pisolitos, menor a abundância destes.

Morfologia e Mineralogia

Os esferolitos apresentam formas sub-esféricas, são constituídos em geral por um núcleo e em torno deste um córtex em camadas concêntricas. Os mesmos correspondem a pisolitos e/ou oolitos, com diâmetro variando de 0,5 a 8,0 mm. A maioria, no entanto, tem diâmetro entre 0,5 a 4,0 mm, com tendência ao intervalo 2,0 – 3,2 mm (Figuras 6.2 e 6.3).

Os núcleos dos esferolitos podem ser maciços a aciculares, esferoidais, brechóides, coliformes e de cor negra ou mesmo de quartzo monocristalino ou policristalino, e até mesmo de litorelictos (Tabela 6.2). Os contornos variam de esferoidal a anguloso. Os núcleos podem perfazer de 10 a 80 % do volume total de cada esferolito. Seus principais minerais são criptomelana, pirolusita e litioforita, ocorrendo ainda gibbsita, caulinita e anatásio em quantidades variáveis (Tabelas 6.2 e 6.3 e Figuras 6.4 a 6.7). Às vezes os núcleos estão constituídos integralmente por quartzo ou mesmo quartzo com estágios iniciais de pisolitização por óxidos de manganês. Alguns núcleos podem apresentar microcavidades, preenchidas por cristais de pirolusita. Vênulas de litioforita seccionam os núcleos ou bordejam suas microcavidades, sugerindo formação posterior a criptomelana. Partes das microcavidades podem estar preenchidas por goethita aluminosa e caulinita.

As camadas são delgadas, de cor amarela a marrom, terrosas a coesas, duras a semiduras, alternando-se com camadas de cor negra e marrom, respectivamente de OH-Mn e OH-Fe (Tabelas 6.2 e 6.3). As camadas concêntricas dos esferolitos apresentam espessura variável, com espessura submilimétrica (Figuras 6.5, 6.6.1 e 6.6.2). Alguns esferolitos podem ter aspecto maciço, ou seja, são desprovidos de camadas. Microcristais de gibbsita alojam-se nos contatos entre as camadas. Alguns esferolitos não apresentam qualquer distinção entre núcleo e camadas externas, ou seja, não são diferenciados. Por outro lado, a composição mineralógica diverge em parte daquela dos seus núcleos. Predominam goethita aluminosa, gibbsita e caulinita, intercrescidas com concentrações menores de criptomelana e litioforita. Às vezes as camadas mostram diversos estágios de formação de oxi-hidróxidos de ferro (Figuras 6.5, 6.6.1 e 6.6.2).

Aparentemente núcleos e camadas concêntricas ou os próprios esferolitos não diferenciados são formados

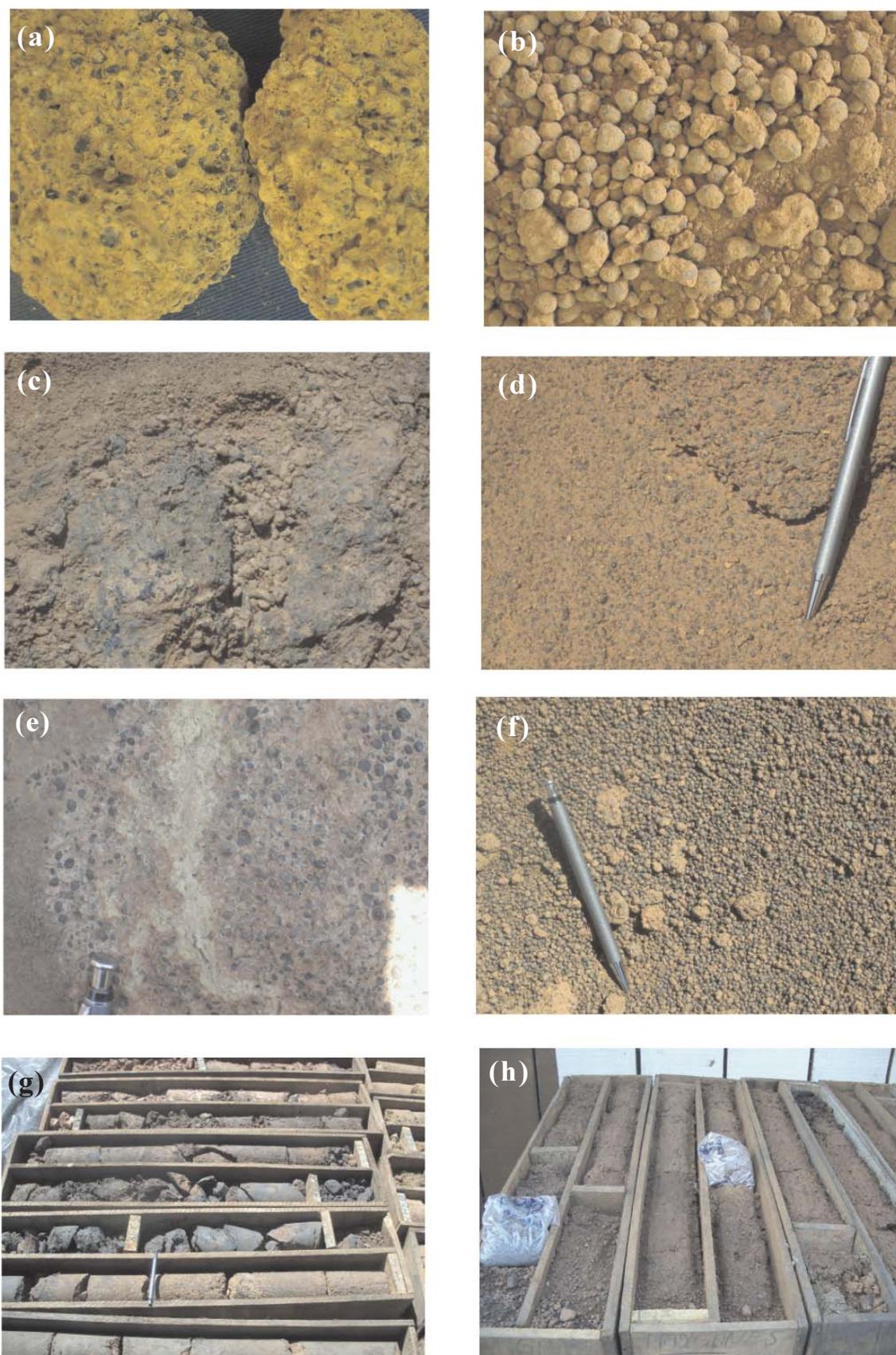


Figura 6.1 – Formações esferolíticas: (a) e (b) Esferolitos em material amarelo argiloso; (c) Contato erosivo de crosta com material esferolítico; (d) Detalhe do material esferolítico; (e) Material esferolítico coeso com marcas de atividade radicular pretérita; (f) Esferolitos soltos e acumulados na superfície atual do terreno; (g) Testemunho de furo de sondagem mostrando esferolitos sobre crosta manganésifera; (h) Testemunhos de sondagem com material argiloso esferolítico no topo.

Tabela 6.1 – Distribuição granulométrica dos esferolitos em quatro amostras investigadas.

| Amostra | Tamanho de grão (mm) | | | | | | Total |
|---------|----------------------|----------|----------|----------|----------|------|-------|
| | +4,0 | -4,0+3,2 | -3,2+2,0 | -2,0+1,0 | -1,0+0,5 | -0,5 | |
| Azul51 | 25,3 | 12,0 | 14,2 | 2,5 | 4,0 | 42,0 | 100,0 |
| Azul52 | 1,0 | 2,5 | 10,4 | 7,0 | 0,5 | 78,7 | 100,0 |
| Azul54 | 1,0 | 2,5 | 10,4 | 7,0 | 0,5 | 78,7 | 100,0 |
| Azul69b | 2,8 | 8,2 | 33,5 | 12,0 | 6,6 | 36,9 | 100,0 |

dos mesmos minerais, predominantemente de natureza laterítica, como caulinita, gibbsita, hematita, goethita e anatásio (Tabela 6.3). Os OH-Mn estão representados por criptomelana, que é mais típica nos núcleos quando constituídos de material negro metálico, além de litioforita, que é por sua vez mais característica nas camadas dos esferolitos. Às vezes os materiais do núcleo podem ser constituídos por intercrescimento criptocristalino de criptomelana, pirolusita e litioforita. Em alguns núcleos e nas camadas há evidências de esmectita, que pode corresponder a mineral herdado de horizontes inferiores como fragmento ou mesmo da crosta manganésifera. Isto significa que camadas mais inferiores da seqüência e do perfil laterítico foram expostas às intempéries físicas e químicas. A composição mineralógica em geral mostra que os esferolitos de fato se sucederam a uma generalizada ambiência laterítica e inclusive foram afetados por várias fases lateríticas recorrentes, e que seus núcleos representam materiais desagregados tanto de crostas como dos horizontes subjacentes, sugerindo diferenciado nível de truncamento dos perfis lateríticos.

Composição Química e Elementos-Traço

A composição química dos esferolitos é muito heterogênea (Tabela 6.4), com valores significativos de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 e ainda MnO , refletindo claramente a composição mineralógica em termos de valores de caulinita, quartzo, goethita e OH-Mn. Os valores de TiO_2 são mais altos do que nas demais zonas do perfil laterítico. Os metais alcalinos e alcalino-terrosos estão em concentrações muito baixas, mostrando a quase ausência da criptomelana, mesmo com K_2O sendo abundante em todo o perfil. O material argiloso pobre em esferolitos é por sua vez mais pobre em Mn e mais rico em Fe, em contraposição com o material argiloso com esferolitos, mostrando, assim, que manganês está concentrado de fato no núcleo dos esferolitos. Em termos de elementos-traço também se verifica grande heterogeneidade de teores (Tabelas 6.5.1 e 6.5.2). Verifica-se, no entanto, que estes também distinguem os dois sub-grupos de materiais, aparentemente controlados pelos minerais de ferro e de manganês. Assim, nos materiais mais ricos em Mn, sob a forma de esferolitos, estão mais concentrados Co, Ni, Zn, Mo, Ag, (Sn), Sr, Ba, ETRL (+ Gd, Tb, Dy e Ho), Pb e Bi. Esta é

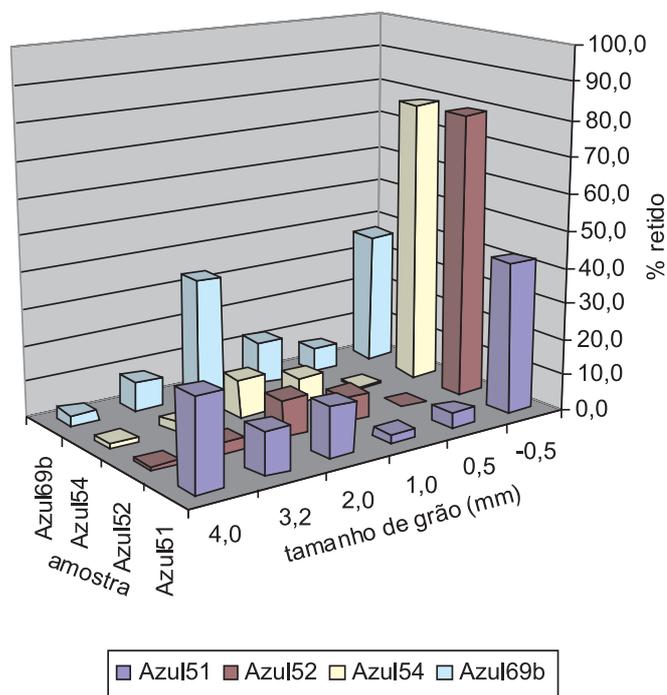


Figura 6.2 – Histogramas de distribuição granulométrica dos esferolitos nas quatro amostras investigadas.

a assinatura geoquímica dos OH-Mn com ou sem MOC. Já o material terroso a argiloso desprovido de esferolitos, dominado por OH-Fe e caulinita, destaca-se apenas pelos valores mais altos de V, Cr, Cu, As, Zr, Hf, Nb, Ta, W, Sn, U, Yb e Lu, elementos estes fixados em goethita e hematita (V, Cr, Cu, As) e como minerais resistatos (Zr, Hf, Mn, Ta, W, Sn, U, Yb e Lu), característico de evolução laterítica intensa.

Química Mineral

Análises químicas pontuais realizadas por MSE na tentativa de delimitar fases minerais isoladas, o que não foi possível, demonstrando, assim, a natureza criptocristalina dos materiais. Os resultados obtidos (Tabela 6.6.1 e 6.6.2) tanto para os núcleos como para as camadas revelam a mesma heterogeneidade química demonstrada nas análises químicas de rocha total. Ressaltam-se os núcleos, como já demonstrado nas análises micromorfológicas, com domínio de OH-Mn, destacando-se composição química de criptomelana, hollandita, seguida por pirolusita e em parte de litioforita, além de hematita, goethita e mesmo gibbsita. Por sua vez, as camadas tendem ao domínio de caulinita, pirolusita, mas também com a presença de litioforita, bem como gibbsita restrita. Criptomelana e, em parte, hollandita constituem os núcleos. São minerais herdados, aparentemente por todo o perfil laterítico, transferindo-se para os materiais argilosos como esferolitos.

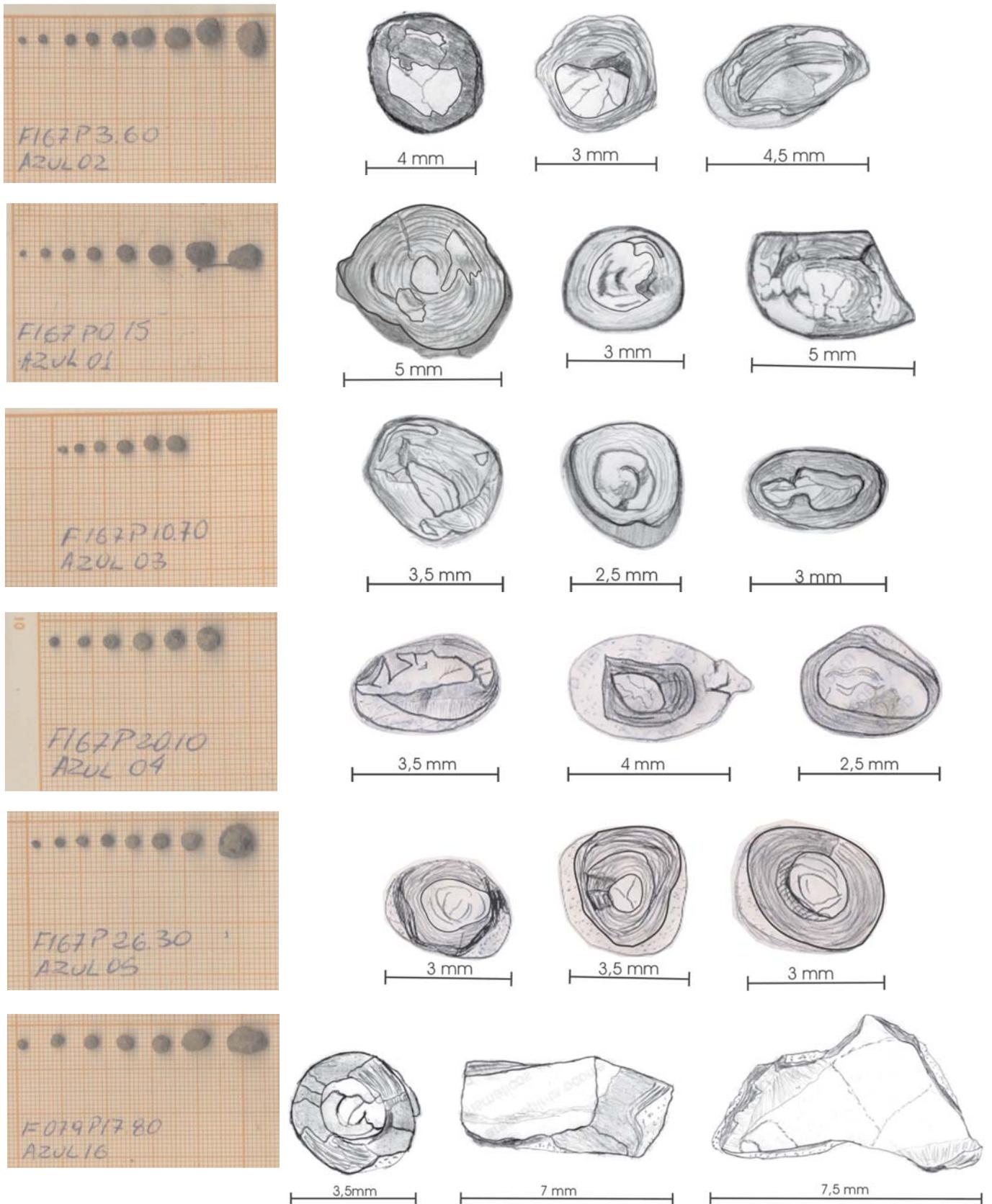


Figura 6.3 – Tamanho e morfologia de esferulitos em seus aspectos externos e em grãos quebrados, mostrando seu interior.

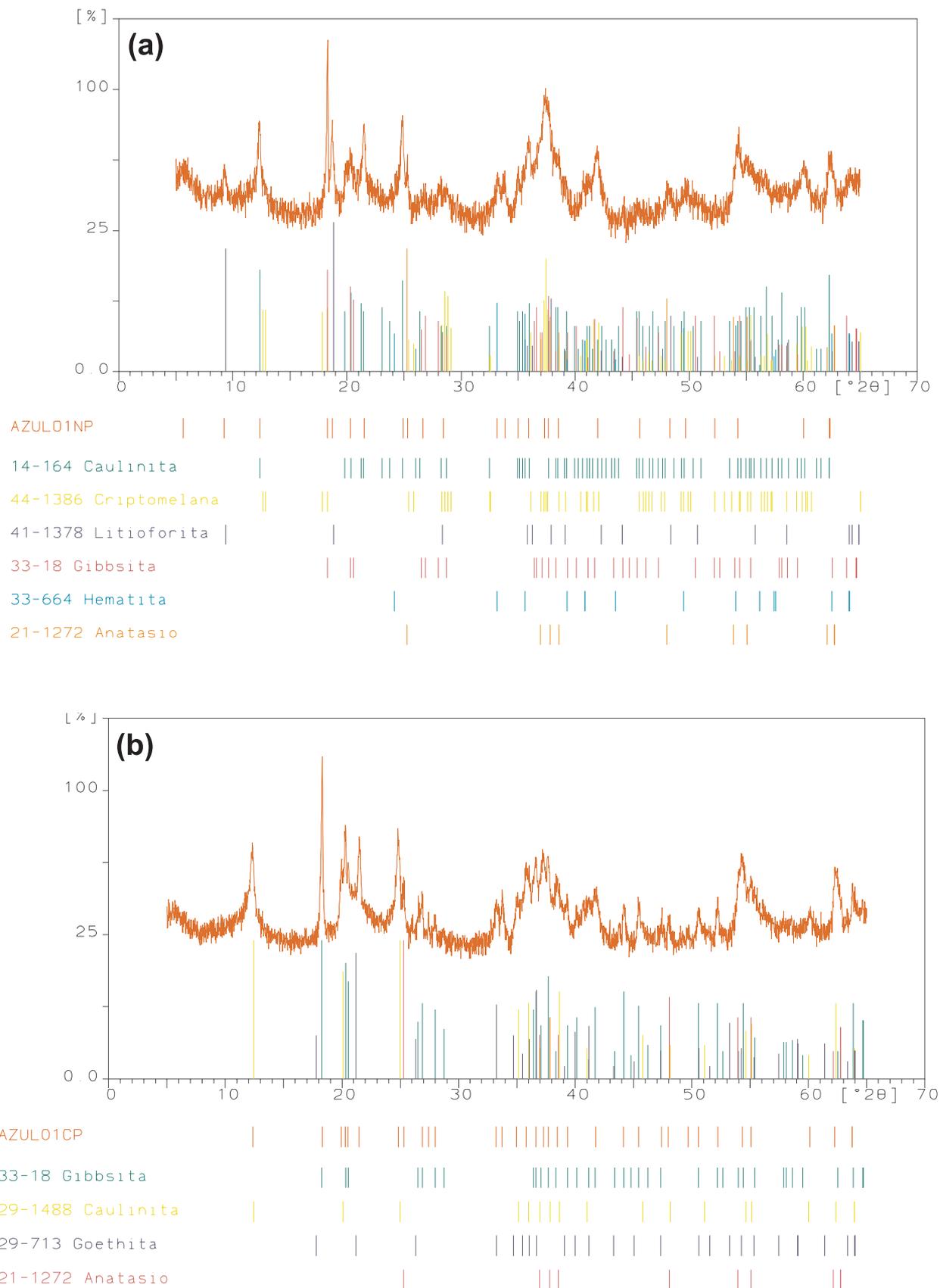


Figura 6.4 – Difratogramas de raios x de amostras de esferulitos. (a) Espectro de DRX de um núcleo de esferulito (NP) mostrando caulinita, criptomelana, lioforita, gibbsita, hematita e anatásio; (b) Espectro de DRX de uma camada de esferulito (CP) mostrando gibbsita, caulinita, goethita e anatásio (Azul01).

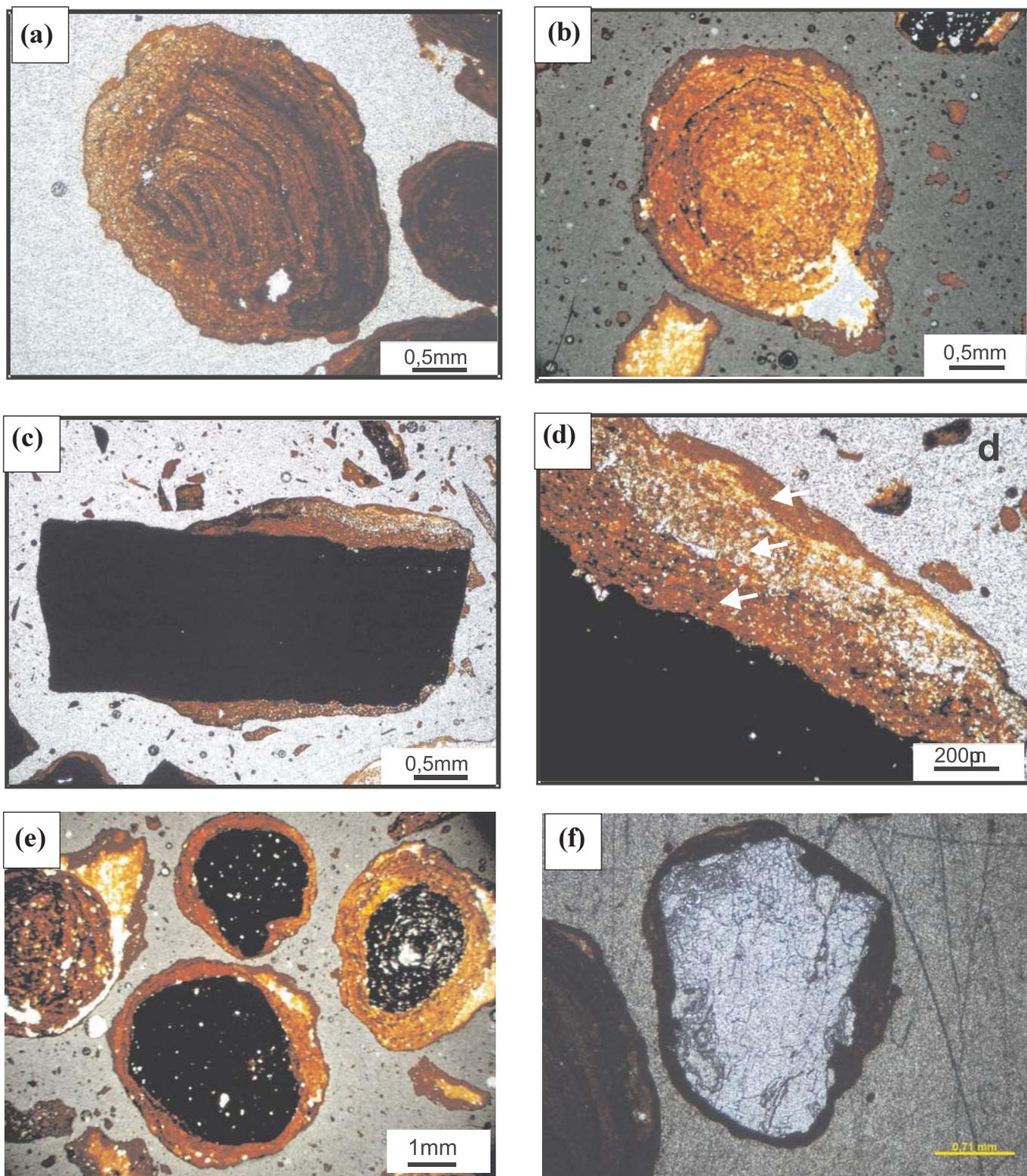


Figura 6.5 – (a) Esferolito com núcleo de fragmento pisolítico; (b) Esferolito formado por OH-Fe mostrando camadas concêntricas; (c) Fragmento OH-Mn envolvido parcialmente por OH-Fe; (d) Detalhe da borda do grão da figura anterior, mostrando 3 estágios de formação de OH-Fe (setas); (e) Esferolitos com núcleos de OH-Mn envolvidos por camadas de OH-Fe, gibbsita e caulinita; (f) Grão de quartzo como núcleo inicial de esferolito envolto por película de OH-Mn. Imagens de microscopia óptica, luz transmitida.

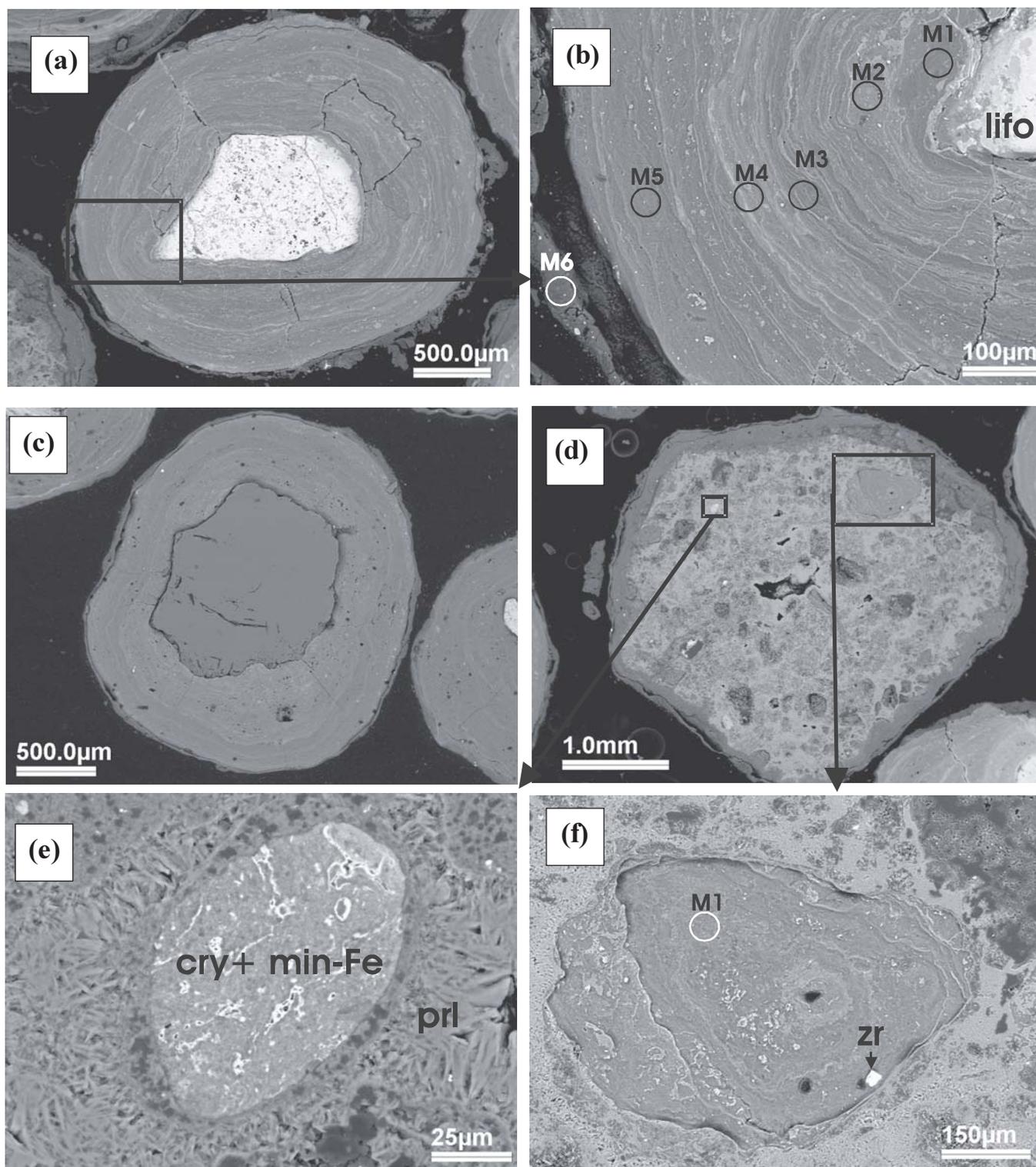


Figura 6.6.1 – (a) Pisolito sub-esférico com núcleo angular de criptomelana e camadas concêntricas; (b) Detalhe das camadas concêntricas, mostrando alternâncias e espessura variável, constituídas por mistura microcristalina de caulinita, gibbsita, anatásio, goethita e OH-Mn (cor cinza: M1 a M6). Esta área do núcleo é constituída de litioforita (lifo) (Azul 16); (c) Pisolito sub-esférico com núcleo de quartzo (qz) e camadas alternadas formadas por intercrescimento de caulinita, gibbsita, goethita e anatásio (Azul 02); (d) Esferolito sub-angular com domínio do núcleo rico em microcavidades e formado por OH-Mn, gibbsita, caulinita e anatásio em quantidades variáveis; (e) Detalhe de uma área da imagem d, mostrando micronódulo também microcavernoso formado de criptomelana (cry) e OH-Fe e bordejado por cristais aciculares de pirolusita (prl); (f) Detalhe do núcleo da imagem d com caulinita, OH-Mn (M1) e zircão, cimentados por criptomelana (Azul 16). Imagens de elétrons retroespalhados (MEV). (Continua).

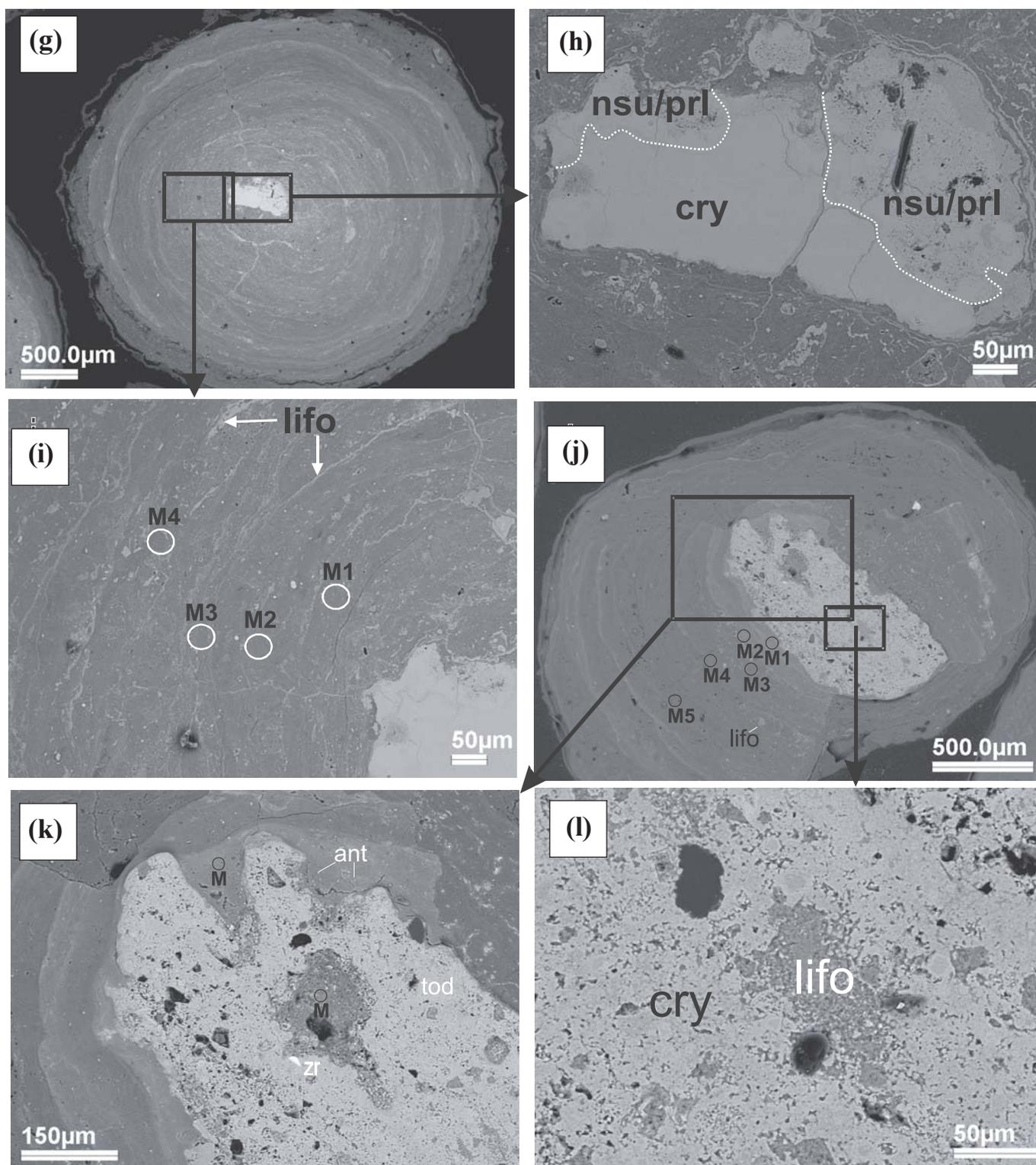


Figura 6.6.2 – (Continuação). (g) Esferolito esférico com núcleo de criptomelana e pirolusita e camadas concêntricas de OH-Mn, gibbsita, caulinita e anatásio; (h) Detalhe do núcleo com criptomelana (cry) e nsutita/pirolusita (nsu/prl); (i) Detalhe das camadas concêntricas, mostrando alternâncias e espessura variável das camadas, constituídas por caulinita, gibbsita, anatásio, goethita e OH-Mn (cor cinza: M1 a M4) (Azul 16); (j) Esferolito sub-esférico com núcleo irregular e camadas concêntricas, constituídas de gibbsita, caulinita e anatásio (M1 a M5); (k) e (l) Detalhe do núcleo composto por agregados de microcristais de criptomelana (cry), litioforita (lifo) e todorokita (tod), além de mistura de caulinita, gibbsita, anatásio (M) e zircão (Zr) (Azul 02). Imagens de elétrons retroespalhados (MEV).

Tabela 6.2 – Descrição micromorfológica e principais minerais dos esferolitos segundo núcleos e camadas.

| | Núcleos e camadas diferenciadas | | Núcleos e camadas não diferenciadas |
|-----------------------|---|---|---|
| | Núcleos: | Camadas: | |
| Ocorrência/ Formas | Maçiços, compactos, às vezes com cristais aciculares e massas irregulares, esferoidais e concêntricas, coliformes; contorno arredondado a alongado e irregular. | Maçiços, compactos, delgadas, concêntricas; contínuas a descontínuas. | Constituem um único coro indiferenciado; compactos com disseminações de cristalitos cinzentos de OH-Mn, OH-Fe ou mesmo caulinita, gibbsita, anatásio e quartzo; Contornos angulosos a arredondados. |
| Distribuição | de 10 % até 80 % dos esferolitos | A maioria não diferencia | 100 % sem diferenciação |
| Cor | Cinza clara a escura, marrom cinzenta, avermelhada (quando alterados e em esferolitos menores) | Marrom avermelhada (OH-Fe), cinza clara e em partes cinza escura (OH-Mn). | Marrom escura, avermelhada (hematita), amarelada (goethita), cinza (OH-Mn). |
| Brilho | metálico, às vezes betuminoso | Mate | Mate |
| Fases minerais | Intercrescimento de criptomelana, e/ou litioforita, e/ou pirolusita (em microcavidades), com OH- Fe e caulinita; criptomelana com vênulas litioforita; quartzo mono-cristalino. | OH-Fe (hematita e goethita) caulinita concêntrica intercrescidos com camadas delgadas e lentes de OH-Mn (litioforita, criptomelana), OH-Fe e gibbsita; vênulas de litioforita cortam as camadas concêntricas. | Goethita, caulinita, quartzo e gibbsita, com microcristais cinzentos OH-Mn (litioforita) como disseminações e intercrescimentos, como formas botroidais, preenchendo fraturas e outras cavidades. |
| Dureza | Duro a semiduro | Duro a semiduro | Duros |

Tabela 6.3 – Composição mineralógica obtida por DRX em esferolitos segundo as suas distintas partes morfológicas.

| Amostra | Detalhe | Fases minerais |
|-------------------------------|--|---|
| ESFEROLITOS | | |
| Azul51A | Núcleo de esferolitos com 4mm | caulinita, criptomelana, anatásio, gibbsita e goethita. |
| Azul51B | Esferolito irregular com 4mm | gibbsita, hematita, caulinita. |
| Azul51C | Camadas do esferolito com 4mm. | caulinita, gibbsita, anatásio, e criptomelana. |
| Azul 51D | Núcleo compacto e duro. 3,15mm. | gibbsita, caulinita, criptomelana, litioforita. |
| Azul 51E | Camada de esferolito 3,15mm. | caulinita, litioforita, criptomelana. |
| | Camada e núcleo vermelho 2mm). | caulinita, anatásio, gibbsita, hematita e criptomelana. |
| Azul 51G | Núcleo duro com 2mm. | caulinita, gibbsita, litioforita, hematita e esmectita. |
| Azul 51H | Camada e núcleo cinza avermelhado com 2mm. | caulinita, gibbsita, anatásio, criptomelana, goethita, esmectita. |
| Azul 51K | Camadas cinzas a vermelhas, com 1mm. | caulinita, anatásio, criptomelana, gibbsita e goethita. |
| Azul 51M | Oolito maciço e negro , 0,5mm. | hematita, caulinita, criptomelana e gibbsita. |
| Azul 51N | Oolito maciço e vermelho com 0,5mm. | hematita, gibbsita e caulinita. |
| Azul 52 ^A | Núcleo de pisolito com 4mm. | caulinita, gibbsita, litioforita e goethita. |
| Azul 52 A 1 | Núcleo de pisolito com 4mm. | caulinita, gibbsita, anatásio, criptomelana e litioforita. |
| Azul 52B | Camadas de pisolito com 4mm. | gibbsita, caulinita, anatásio e criptomelana. |
| Azul 52C | Pisolito maciço, indiferenciado, com 4mm. | gibbsita, caulinita, anatásio, criptomelana e esmectita. |
| Azul 52D | Pisolito maciço, indiferenciado, com 4mm. | caulinita, gibbsita, hematita, anatásio, criptomelana e litioforita. |
| Azul 52E | Núcleo compacto cinza , 3,5mm. | caulinita, hematita, esmectita, criptomelana, litioforita e gibbsita. |
| Azul52F | Camadas de pisolito ,3,15mm. | gibbsita, caulinita, anatásio, criptomelana e goethita. |
| Azul52G | Camadas de pisolito , 3,15mm. | caulinita, gibbsita, litioforita, hematita e esmectita |
| MATRIZ DOS ESFEROLITOS | | |
| Azul 51M1 | Matriz (-0,5mm) | gibbsita, caulinita, anatásio, esmectita e criptomelana. |
| Azul 51MA | Matriz (-0,5mm) | gibbsita, caulinita, anatásio, esmectita, goethita e criptomelana. |
| Azul52M1 | Matriz (-0,5mm) | gibbsita, caulinita, anatásio, hematita, criptomelana e goethita. |
| Azul52MA | Matriz (-0,5mm) | gibbsita, caulinita, anatásio, goethita, criptomelana e hematita. |

Tabela 6.4 – Composição química total dos materiais argilosos com esferolitos ou com raros esferolitos.

| (a) Material argiloso com esferolitos | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|--------------|--|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | PF | |
| | 23,44 | 34,71 | 14,19 | 4,03 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,11 | 2,12 | 0,09 | 20,12 | |
| | 29,83 | 34,54 | 14,18 | 1,08 | 0,03 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 2,17 | 0,08 | 16,98 | |
| | 13,24 | 23,44 | 13,76 | 29,27 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,34 | 1,24 | 0,08 | 18,33 | |
| | 21,67 | 31,49 | 14,73 | 10,66 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,12 | 1,75 | 0,07 | 19,63 | |
| | 27,53 | 33,01 | 14,13 | 4,47 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 1,95 | 0,07 | 17,71 | |
| | 15,90 | 19,23 | 12,42 | 34,64 | 0,09 | 0,06 | 0,02 | 0,70 | 0,86 | 0,15 | 15,89 | |
| | 19,57 | 23,20 | 11,10 | 27,09 | 0,10 | 0,06 | 0,01 | 0,41 | 0,98 | 0,15 | 16,88 | |
| | 19,79 | 21,84 | 9,29 | 30,54 | 0,13 | 0,05 | 0,01 | 0,40 | 0,91 | 0,11 | 16,92 | |
| | 18,17 | 34,24 | 15,63 | 9,90 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,09 | 1,70 | 0,06 | 18,81 | |
| | 19,21 | 23,20 | 11,50 | 27,34 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,41 | 1,01 | 0,05 | 16,10 | |
| Média | 20,84 | 27,89 | 13,09 | 17,90 | 0,05 | 0,03 | 0,01 | 0,27 | 1,47 | 0,09 | 17,74 | |

| (b) Material argiloso com raros esferolitos | | | | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------|--------------|--|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | PF | |
| | 9,85 | 6,41 | 70,38 | 0,29 | 0,15 | 0,01 | 0,01 | 0,63 | 0,29 | 0,64 | 11,49 | |
| | 29,16 | 33,32 | 13,62 | 3,21 | 0,04 | 0,03 | 0,01 | 0,06 | 2,10 | 0,10 | 17,12 | |
| | 28,10 | 32,71 | 13,77 | 4,52 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,15 | 2,05 | 0,06 | 17,51 | |
| | 15,63 | 29,28 | 16,02 | 17,42 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,28 | 1,61 | 0,08 | 19,47 | |
| | 18,60 | 17,71 | 48,71 | 0,18 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 1,39 | 0,11 | 11,84 | |
| | 51,96 | 22,27 | 10,01 | 0,11 | 0,06 | 0,01 | 0,05 | 0,13 | 2,49 | 0,06 | 11,86 | |
| Média | 25,55 | 23,62 | 28,75 | 4,29 | 0,05 | 0,01 | 0,02 | 0,22 | 1,65 | 0,18 | 14,88 | |

Tabela 6.5.1 – Concentração dos elementos-traço em amostra total dos materiais argilosos com esferolitos ou com raros esferolitos (Continua).

| Material argiloso com esferolitos | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Rb | Sr | Y |
| | 275,27 | 141,66 | 34,15 | 32,52 | 28,27 | 30,00 | 45,70 | 1,19 | 20,74 | 1,48 | 23,27 | 24,98 |
| | 292,51 | 131,46 | 9,45 | 23,72 | 39,17 | 36,35 | 46,66 | 1,67 | 43,85 | 1,00 | 28,20 | 26,77 |
| | 383,92 | 133,71 | 221,31 | 94,14 | 270,41 | 182,58 | 47,33 | 0,91 | 17,55 | 8,16 | 112,25 | 20,80 |
| | 301,51 | 121,58 | 102,33 | 46,57 | 79,28 | 45,62 | 42,50 | 1,28 | 73,83 | 2,00 | 38,61 | 18,48 |
| | 264,09 | 121,11 | 58,13 | 30,47 | 36,96 | 30,00 | 45,90 | 1,41 | 37,51 | 2,00 | 27,32 | 20,21 |
| | 269,33 | 189,37 | 290,25 | 258,23 | 364,30 | 535,22 | 49,25 | 1,62 | 58,37 | 16,73 | 120,65 | 31,58 |
| | 198,44 | 92,54 | 208,89 | 217,58 | 290,22 | 231,43 | 47,21 | 1,55 | 26,21 | 15,01 | 90,95 | 25,87 |
| | 235,58 | 48,34 | 393,42 | 279,13 | 370,20 | 234,43 | 45,37 | 1,30 | 24,65 | 18,68 | 70,73 | 22,51 |
| | 354,32 | 111,74 | 54,22 | 31,32 | 204,35 | 123,57 | 46,31 | 1,00 | 60,17 | 2,42 | 65,42 | 18,12 |
| | 259,08 | 60,10 | 57,83 | 41,80 | 148,27 | 138,22 | 43,33 | 1,00 | 80,37 | 5,36 | 207,38 | 12,91 |
| Média | 283,40 | 115,16 | 143,00 | 105,55 | 183,14 | 158,74 | 45,96 | 1,29 | 44,33 | 7,28 | 78,48 | 22,22 |

| | Zr | Nb | Mo | Ag | In | Sn | Sb | Cs | Ba | Hf | Ta | W | Tl |
|--------------|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | 766,08 | 24,47 | 2,57 | 0,50 | 0,10 | 8,09 | 3,15 | 0,17 | 256,78 | 20,10 | 2,69 | 7,14 | 0,85 |
| | 829,20 | 27,41 | 4,13 | 0,50 | 0,10 | 9,07 | 4,79 | 0,10 | 136,10 | 20,57 | 2,71 | 7,83 | 0,70 |
| | 419,21 | 15,52 | 06,79 | 30,27 | 0,18 | 4,91 | 3,80 | 0,55 | 2160,00 | 11,23 | 1,40 | 7,65 | 4,77 |
| | 588,28 | 28,58 | 8,28 | 0,78 | 0,20 | 25,19 | 5,84 | 0,50 | 664,61 | 16,59 | 2,38 | 7,09 | 3,29 |
| | 819,89 | 34,88 | 25,25 | 0,95 | 0,20 | 9,92 | 3,59 | 0,50 | 386,41 | 22,81 | 3,25 | 6,40 | 1,84 |
| | 288,17 | 12,70 | 27,05 | 0,66 | 0,20 | 5,69 | 3,70 | 1,06 | 7750,00 | 9,62 | 1,18 | 4,32 | 7,59 |
| | 344,58 | 14,36 | 20,15 | 1,61 | 0,20 | 4,74 | 2,70 | 0,99 | 2450,00 | 10,62 | 1,27 | 3,99 | 4,57 |
| | 321,11 | 13,09 | 26,54 | 1,57 | 0,20 | 4,98 | 3,14 | 1,78 | 2170,00 | 9,93 | 1,09 | 15,65 | 3,32 |
| | 543,06 | 18,39 | 50,57 | 0,61 | 0,20 | 6,42 | 4,60 | 0,50 | 827,54 | 14,35 | 1,89 | 8,90 | 3,13 |
| | 254,39 | 12,62 | 59,29 | 6,90 | 0,20 | 3,42 | 4,82 | 0,50 | 2410,00 | 7,73 | 1,14 | 5,27 | 4,63 |
| Média | 517,40 | 20,20 | 38,06 | 4,43 | 0,18 | 8,24 | 4,01 | 0,66 | 1921,14 | 14,35 | 1,90 | 7,42 | 3,47 |

| | Pb | Bi | Th | U | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 66,30 | 0,27 | 30,14 | 4,93 | 18,49 | 63,92 | 3,48 | 12,10 | 2,38 | 0,70 | 2,36 | 0,51 | 3,45 | 0,82 | 2,51 | 0,43 | 2,90 | 0,44 |
| | 121,26 | 1,03 | 28,41 | 4,75 | 23,91 | 37,33 | 4,16 | 14,40 | 2,56 | 0,77 | 2,62 | 0,52 | 3,44 | 0,80 | 2,48 | 0,43 | 2,90 | 0,44 |
| | 446,90 | 0,30 | 38,08 | 3,28 | 33,18 | 155,67 | 6,53 | 22,50 | 4,47 | 1,22 | 3,36 | 0,61 | 3,60 | 0,77 | 2,20 | 0,36 | 2,26 | 0,34 |
| | 279,73 | 1,51 | 37,36 | 3,75 | 29,82 | 147,06 | 4,93 | 18,45 | 3,63 | 0,95 | 2,64 | 0,57 | 3,35 | 0,65 | 2,29 | 0,37 | 2,42 | 0,37 |
| | 120,85 | 1,07 | 34,72 | 4,15 | 26,16 | 102,91 | 4,10 | 15,23 | 3,00 | 0,83 | 2,51 | 0,55 | 3,42 | 0,71 | 2,52 | 0,43 | 2,78 | 0,44 |
| | 194,74 | 3,71 | 30,01 | 4,56 | 50,64 | 191,94 | 11,31 | 41,42 | 8,65 | 1,83 | 5,86 | 1,09 | 6,30 | 1,20 | 3,67 | 0,55 | 3,14 | 0,44 |
| | 133,73 | 1,55 | 29,02 | 4,25 | 44,25 | 171,68 | 9,99 | 36,84 | 7,53 | 1,64 | 4,88 | 0,89 | 5,13 | 0,96 | 2,79 | 0,42 | 2,64 | 0,38 |
| | 169,45 | 1,72 | 22,76 | 4,50 | 48,14 | 151,92 | 11,08 | 41,15 | 8,83 | 1,96 | 5,88 | 0,95 | 5,20 | 0,97 | 2,78 | 0,43 | 2,73 | 0,37 |
| | 299,44 | 0,99 | 31,41 | 4,14 | 29,19 | 99,20 | 4,64 | 16,73 | 3,14 | 0,84 | 2,89 | 0,53 | 3,11 | 0,64 | 2,15 | 0,35 | 2,48 | 0,35 |
| | 258,71 | 2,61 | 26,59 | 2,94 | 38,68 | 251,30 | 6,48 | 23,63 | 5,08 | 1,15 | 3,33 | 0,58 | 3,08 | 0,56 | 1,79 | 0,28 | 1,81 | 0,25 |
| Média | 209,11 | 1,48 | 30,85 | 4,12 | 34,25 | 137,29 | 6,67 | 24,25 | 4,93 | 1,19 | 3,63 | 0,68 | 4,01 | 0,81 | 2,52 | 0,40 | 2,61 | 0,38 |

Tabela 6.5.2 – (Continuação). Concentração dos elementos-traço em amostra total dos materiais argilosos com esferolitos ou com raros esferolitos.

| Material argiloso com raros esferolitos | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| | V | Cr | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Rb | Sr | Y |
| | 240,98 | 1400,00 | 49,72 | 87,86 | 910,80 | 369,99 | 16,05 | 1,42 | 120,70 | 29,75 | 11,74 | 31,86 |
| | 285,00 | 123,63 | 32,04 | 27,08 | 38,81 | 37,32 | 43,97 | 1,63 | 72,29 | 2,00 | 31,17 | 23,52 |
| | 294,03 | 127,17 | 42,24 | 29,65 | 39,21 | 35,31 | 46,16 | 1,55 | 66,72 | 2,00 | 34,41 | 22,54 |
| | 367,92 | 141,65 | 111,19 | 47,65 | 119,69 | 75,27 | 51,68 | 1,00 | 67,68 | 3,97 | 112,81 | 19,12 |
| | 781,58 | 513,69 | 9,85 | 32,16 | 243,58 | 69,47 | 46,24 | 3,05 | 52,80 | 2,00 | 8,63 | 11,18 |
| | 228,67 | 199,93 | 4,49 | 20,00 | 66,10 | 30,00 | 29,35 | 1,43 | 8,35 | 7,81 | 15,47 | 20,72 |
| Média | 366,36 | 417,68 | 41,59 | 40,73 | 236,36 | 102,89 | 38,91 | 1,68 | 64,76 | 7,92 | 35,70 | 21,49 |

| | Zr | Nb | Mo | Ag | In | Sn | Sb | Cs | Ba | Hf | Ta | W | Tl |
|--------------|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | 263,13 | 4,33 | 31,56 | 0,56 | 0,29 | 6,13 | 4,28 | 0,35 | 105,26 | 6,96 | 0,39 | 24,44 | 0,29 |
| | 822,95 | 34,50 | 23,87 | 0,90 | 0,20 | 9,13 | 6,23 | 0,50 | 409,21 | 22,84 | 3,26 | 8,17 | 2,51 |
| | 848,41 | 35,45 | 25,50 | 0,89 | 0,20 | 8,56 | 5,87 | 0,50 | 484,93 | 23,01 | 3,33 | 7,41 | 2,79 |
| | 552,18 | 19,78 | 44,96 | 2,60 | 0,20 | 5,57 | 6,46 | 0,50 | 2370,00 | 14,15 | 2,05 | 8,31 | 5,95 |
| | 379,50 | 14,83 | 9,85 | 0,97 | 0,20 | 4,18 | 3,51 | 0,50 | 31,44 | 10,21 | 1,29 | 2,73 | 0,10 |
| | 1430,00 | 32,83 | 3,23 | 0,50 | 0,20 | 6,56 | 1,74 | 0,99 | 136,10 | 35,56 | 3,15 | 4,66 | 0,25 |
| Média | 716,03 | 23,62 | 23,16 | 1,07 | 0,21 | 6,69 | 4,68 | 0,56 | 589,49 | 18,79 | 2,24 | 9,29 | 1,98 |

| | Pb | Bi | Th | U | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 30,32 | 0,21 | 12,23 | 11,32 | 29,88 | 43,52 | 4,97 | 19,38 | 4,75 | 3,53 | 4,23 | 0,67 | 3,97 | 0,99 | 3,16 | 0,50 | 3,34 | 0,50 |
| | 307,53 | 1,80 | 32,95 | 4,11 | 26,97 | 66,09 | 4,12 | 15,48 | 3,05 | 0,85 | 2,73 | 0,56 | 3,56 | 0,73 | 2,67 | 0,43 | 2,93 | 0,47 |
| | 249,26 | 1,47 | 34,20 | 4,08 | 26,43 | 78,60 | 4,13 | 15,46 | 3,15 | 0,88 | 2,89 | 0,57 | 3,65 | 0,74 | 2,64 | 0,43 | 2,92 | 0,48 |
| | 445,49 | 1,09 | 43,23 | 3,91 | 35,75 | 166,35 | 5,34 | 20,40 | 4,33 | 1,14 | 3,39 | 0,62 | 3,52 | 0,71 | 2,33 | 0,36 | 2,35 | 0,37 |
| | 65,29 | 0,88 | 22,92 | 4,86 | 27,49 | 71,04 | 4,24 | 15,69 | 3,12 | 0,80 | 2,49 | 0,43 | 2,48 | 0,48 | 1,61 | 0,25 | 1,69 | 0,26 |
| | 13,19 | 0,40 | 21,68 | 3,90 | 20,66 | 47,76 | 3,66 | 14,99 | 3,24 | 0,94 | 3,03 | 0,57 | 3,37 | 0,74 | 2,61 | 0,44 | 3,01 | 0,52 |
| Média | 185,18 | 0,97 | 27,87 | 5,37 | 27,86 | 78,89 | 4,41 | 16,90 | 3,61 | 1,36 | 3,13 | 0,57 | 3,42 | 0,73 | 2,50 | 0,40 | 2,71 | 0,43 |

Tabela 6.6.1 – Composição química pontual de componentes dos esferolitos obtida por microsonda eletrônica (amostras Azul 119, Azul 16 e Azul 51) (Continua).

| Material Argiloso com Esferolitos, Azul 119 | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | total |
|---|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|-------|------|------------------|-------|
| CRIPOTOMELANA, hollandita | 0,24 | 0,38 | 8,60 | 0,04 | 3,81 | 60,70 | 0,10 | 0,16 | 0,14 | 0,03 | 0,00 | 1,09 | 3,51 | 1,82 | 80,62 |
| CRIPOTOMELANA, Hollandita | 0,09 | 0,47 | 10,31 | 0,06 | 3,40 | 60,13 | 0,36 | 0,26 | 0,10 | 0,00 | 0,02 | 1,64 | 3,69 | 1,89 | 82,41 |
| HOLLANDITA, criptomelana, caulinita, goethita, | 0,06 | 2,61 | 8,57 | 0,02 | 1,37 | 47,61 | 0,27 | 0,00 | 0,86 | 0,00 | 0,02 | 8,44 | 5,26 | 1,80 | 76,89 |
| CAULINITA, litioforita, goethita ou hematita | 0,06 | 19,67 | 27,65 | 0,02 | 0,08 | 16,46 | 0,13 | 0,06 | 0,39 | 0,28 | 0,02 | 13,57 | 0,09 | 2,87 | 81,35 |
| CAULINITA, litioforita, goethita ou hematita | 0,03 | 28,20 | 31,63 | 0,03 | 0,05 | 9,67 | 0,00 | 0,05 | 0,64 | 0,19 | 0,03 | 13,14 | 0,04 | 3,32 | 87,00 |
| GIBBSITA, criptomelana, hollandita | 0,14 | 0,37 | 35,32 | 0,03 | 2,97 | 37,17 | 0,16 | 0,26 | 0,27 | 0,09 | 0,01 | 1,90 | 1,99 | 2,50 | 83,17 |
| hollandita, criptomelana?, caulinita, goethita, | 0,00 | 7,63 | 12,42 | 0,03 | 0,68 | 29,91 | 0,54 | 0,05 | 0,22 | 0,06 | 0,02 | 21,26 | 3,41 | 2,07 | 78,30 |
| HOLLANDITA, criptomelana, gibbsita | 0,13 | 0,51 | 14,83 | 0,01 | 2,32 | 56,36 | 0,43 | 0,19 | 0,14 | 0,10 | 0,01 | 1,18 | 5,41 | 2,01 | 83,64 |
| GIBBSITA, hollandita, criptomelana | 0,01 | 0,15 | 71,88 | 0,02 | 0,36 | 9,44 | 0,04 | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,00 | 0,34 | 0,57 | 3,41 | 86,34 |

Tabela 6.6.2 – (Continuação). Composição química pontual de componentes dos esferolitos obtida por microsonda eletrônica (amostras Azul 119, Azul 16 e Azul 51).

| Núcleo dos Esferolitos, Azul 16, | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | total |
|---|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|-------|------|------------------|-------|
| pirolusita, ou manganita ou nsutita, tem manganês em excesso | 0,18 | 0,18 | 2,22 | 0,06 | 0,42 | 71,53 | 0,06 | 0,12 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,37 | 1,64 | 76,80 |
| pirolusita, ou manganita ou nsutita, tem manganês em excesso | 0,05 | 0,27 | 2,18 | 0,03 | 0,34 | 69,68 | 0,25 | 0,21 | 0,06 | 0,05 | 0,00 | 0,84 | 0,14 | 1,62 | 75,71 |
| pirolusita, ou manganita ou nsutita, hollandita ou criptomelana | 0,08 | 0,34 | 4,53 | 0,02 | 0,89 | 66,99 | 0,23 | 0,13 | 0,10 | 0,09 | 0,00 | 1,18 | 0,66 | 1,70 | 76,95 |
| pirolusita, ou manganita ou nsutita, criptomelana | 0,03 | 0,35 | 6,11 | 0,03 | 0,55 | 66,17 | 0,17 | 0,19 | 0,11 | 0,01 | 0,00 | 2,13 | 0,51 | 1,76 | 78,13 |
| cavidade: criptomelana, nsutita ou hollandita, goethita | 0,07 | 0,42 | 4,98 | 0,03 | 0,55 | 64,40 | 0,20 | 0,13 | 0,07 | 0,07 | 0,02 | 2,43 | 0,48 | 1,68 | 75,52 |
| pirolusita, goethita ou hematita | 0,04 | 0,82 | 4,88 | 0,00 | 0,20 | 49,08 | 0,31 | 0,09 | 0,12 | 0,14 | 0,02 | 23,23 | 0,22 | 1,80 | 80,94 |
| pirolusita ou nsutita ou manganita, goethita, hematita | 0,00 | 1,19 | 4,86 | 0,01 | 0,18 | 42,76 | 0,00 | 0,09 | 0,15 | 0,12 | 0,00 | 30,37 | 0,00 | 1,83 | 81,56 |
| pirolusita, goethita ou hematita | 0,01 | 1,37 | 4,81 | 0,00 | 0,14 | 41,32 | 0,00 | 0,05 | 0,12 | 0,17 | 0,01 | 31,92 | 0,07 | 1,84 | 81,82 |
| caulinita, criptomelana | 0,07 | 13,62 | 18,16 | 0,04 | 1,66 | 38,56 | 0,16 | 0,12 | 0,46 | 0,03 | 0,00 | 5,04 | 0,86 | 2,47 | 81,25 |
| caulinita, pirolusita ou manganita e/ou litioforita, goethita | 0,01 | 18,33 | 24,45 | 0,00 | 0,05 | 21,44 | 0,06 | 0,04 | 0,70 | 0,23 | 0,01 | 19,21 | 0,05 | 2,89 | 87,47 |
| camada: caulinita, gibbsita ?, litioforita ?, pirolusita ou ?, goethita | 0,00 | 19,47 | 26,79 | 0,01 | 0,07 | 21,41 | 0,21 | 0,08 | 0,96 | 0,31 | 0,01 | 16,74 | 0,10 | 3,02 | 89,17 |
| múcleo: caulinita, pirolusita | 0,00 | 22,67 | 25,01 | 0,03 | 0,21 | 20,59 | 0,09 | 0,02 | 1,59 | 0,08 | 0,01 | 10,99 | 0,30 | 2,97 | 84,55 |
| camada: caulinita, pirolusita | 0,00 | 20,76 | 27,90 | 0,00 | 0,06 | 17,73 | 0,02 | 0,04 | 1,42 | 0,31 | 0,00 | 15,44 | 0,10 | 3,04 | 86,80 |

| Esferolitos, Azul 51 | Na ₂ O | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | K ₂ O | MnO | PbO ₂ | CaO | TiO ₂ | SO ₃ | Cl | FeO | BaO | H ₂ O | total |
|--|-------------------|------------------|--------------------------------|------|------------------|-------|------------------|------|------------------|-----------------|------|------|------|------------------|-------|
| Núcleo: criptomelana, todorokita, hollandita | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 2,42 | 57,16 | 0,12 | 0,04 | 0,54 | 0,09 | 0,00 | 2,91 | 2,18 | 1,36 | 66,82 |
| Núcleo: gibbsita e/ou litioforita | 0,01 | 0,09 | 25,79 | 0,00 | 0,01 | 44,85 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,08 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 2,09 | 72,94 |
| Núcleo: gibbsita | 0,02 | 0,02 | 84,10 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,07 | 0,13 | 3,72 | 88,09 |

Conclusões

Os esferolitos são formações típicas das mineralizações de manganês do Azul em Carajás e de outras jazidas de origem supergênica. São encontrados em morros e encostas. Seu modo de ocorrência lembra os corpos de latossolos da região. Os esferolitos estão na dimensão de oolitos e pisolitos, sendo geralmente formados por núcleo envolto por camadas concêntricas. Os núcleos são constituídos principalmente de OH-Mn, os minerais do minério de manganês subjacente, enquanto as camadas se compõem de caulinita, OH-Fe e OH-Al, mineralogia típica dos perfis lateríticos maduros, que se sobrepõem ao minério principal. Análises químicas totais e as concentrações dos elementos-traço, bem como química pontual, demonstram a diferenciação entre núcleo e camadas, mas também reforçam sua heterogeneidade química e reafirmam sua filiação química e mineral ao perfil subjacente e adjacente, e, por conseguinte, às rochas do substrato e às rochas-mãe, preserva-

das principalmente nos núcleos dos esferolitos. Esses dados demonstram que os núcleos dos esferolitos representam a desagregação física dos materiais subjacentes e adjacentes, principalmente da mineralização manganesífera, sendo suas camadas a representação da agregação dos materiais do perfil laterítico sobreposto, que deslizaram ou foram carregados por gravidade e *run-off* meia-encosta abaixo. Os esferolitos se apresentam, assim, como excelente meio de amostragem para prospecção de mineralizações manganesíferas.

VII. GEOCROLOGIA DO PERFIL

Tendo em vista que os OH-Mn do Azul já tinham sido objeto de análises geocronológicas por Ar⁴⁰/Ar³⁹ (Vasconcelos *et al.*, 1994 e Ruffet *et al.*, 1996) e considerando a perspectiva de campo de que parte dos OH-Mn possa ser de origem sedimentar, portanto muito antiga, e considerando ainda a perspectiva de que houve também cla-

ra remobilização em vênulas e veios, que aparentemente se anteciparam aos processos intempéricos lateritizantes, foi que se optou por nova tentativa de datação destes materiais. As rochas investigadas e parte dos ideogramas obtidos estão apresentadas nas figuras 7.1 e 7.2. Os resultados finais estão sumarizados na tabela 7.1.

As crostas manganésíferas (amostra 2938 Azul X, crosta laterítica brechóide ou fragmentada) indicaram a possibilidade de serem muito antigas, > 80 Ma (Figura 7.1) ou então terem sido contaminadas ou terem perdido Ar^{39} por *recoil*. Os resultados, por sua vez, sugerem recristalização a 40 Ma. Sua idade integrada seria de $66,67 \pm 0,15$ Ma. Outra idade média ponderada de 68 ± 4 Ma (amostra 2948 Azul X) foi obtida com outros grãos. Novos grãos (amostra 2949 da rocha Azul X) forneceram platô de $67,7 \pm 0,2$ Ma, que é a melhor estimativa. Portanto a idade das crostas poderia estar ao redor de 66 a 68 Ma (Tabela 7.1).

OH-Mn derivados ou na forma de pelitos (amostra 2939 da rocha Azul 37, folhelho a siltito manganésífero

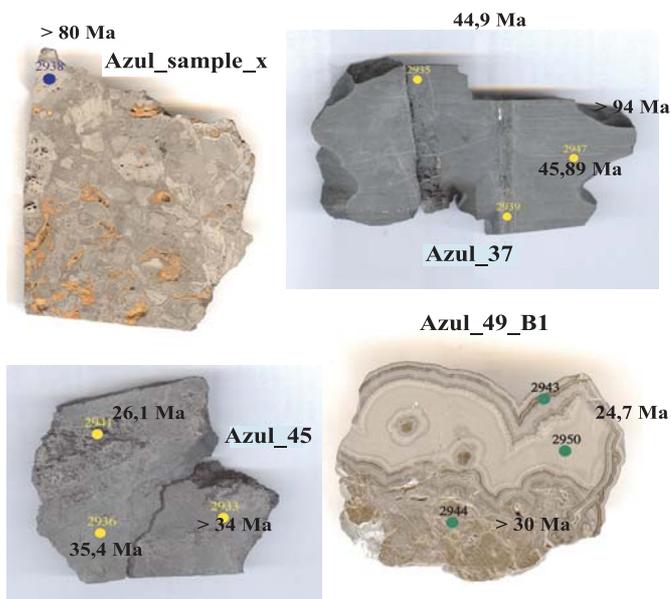


Figura 7.1 – Imagens das amostras principais submetidas a análises geocronológicas $^{40}Ar/^{39}Ar$, com indicação de idades e cujos resultados se encontram na tabela 7.1.

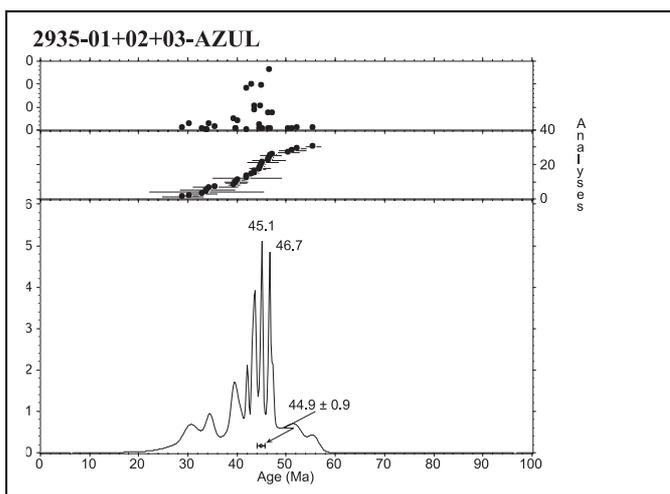
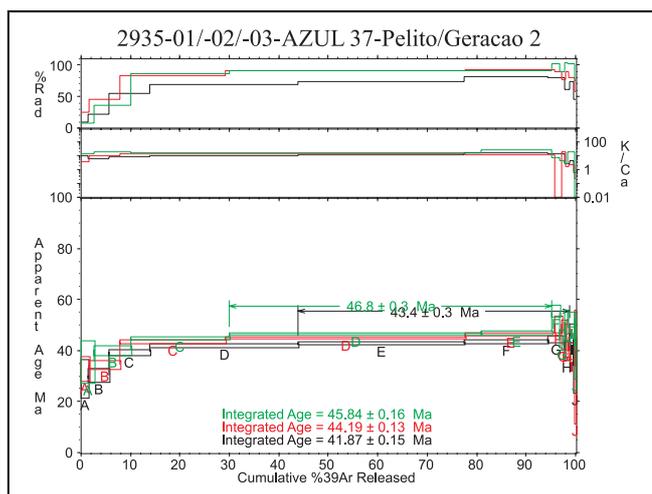
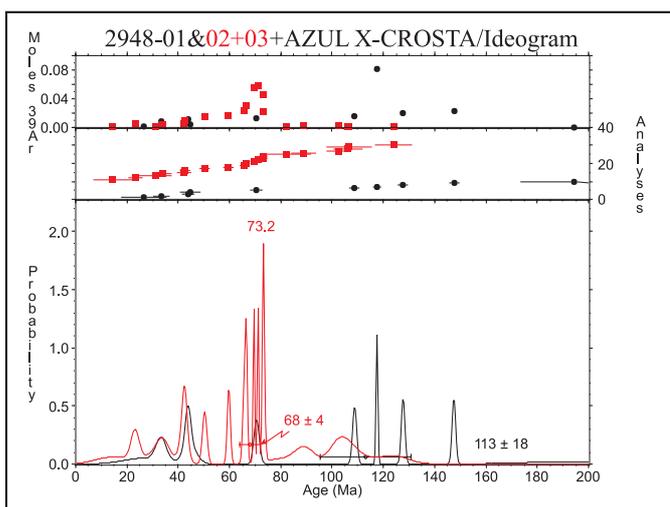
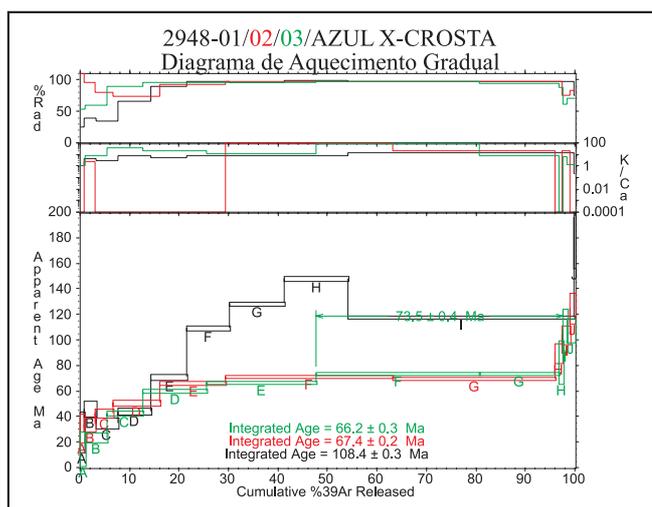


Figura 7.2 – Alguns ideogramas geocronológicos $^{40}Ar/^{39}Ar$ obtidos em amostras de OH-Mn do Azul. Para maiores detalhes vide anexo.

parcialmente lateritizado) apresentaram idade de platô bem definida de $45,89 \pm 0,16$ Ma, mas outros grãos forneceram apenas a média ponderada de $43,9 \pm 1,3$ Ma. Grãos de material similar da amostra 2935 da rocha Azul 45 (folhelho a siltito manganêsífero lateritizado) geraram idades de platô de $43,4 \pm 0,3$ Ma e $46,8 \pm 0,3$ Ma, com idade ponderada de $44,9 \pm 0,9$ Ma, similar à anterior. Um grão da amostra 2941 (rocha Azul 45) forneceu $35,4 \pm 0,6$ Ma, e outros grãos sugerem recristalização parcial há cerca de 11 Ma. Outros grãos da amostra 2936 (Azul 45) geraram idade de platô de $27,4 \pm 0,4$; $26,5 \pm 0,7$ e $28,6 \pm 0,3$ Ma, cuja melhor estimativa de idade média ponderada é de $26,1 \pm 1,1$ Ma. Como será mostrada mais adiante, esta seria a idade de formação dos materiais argilosos com esferolitos.

A crosta manganêsífera colofórmica e brechóide (rocha Azul 49 da figura 7.1) apresentou idade de 24,7 Ma para a zona colofórmica e superior a 30 Ma para a brechóide. Assim, a remobilização dos OH-Mn com formação de minerais colofórmicos ocorreu durante a alteração intensiva do perfil laterítico, quando da formação de material argiloso com esferolitos.

As amostras de OH-Mn de veios (amostra 2947 da rocha Azul 37 geração 1) não geraram platô ascendente, interpretado como indicativo da presença de contaminantes mais antigos e termicamente estáveis (micas). Acredita-se também que esteja indicando uma geração bem mais antiga de OH-Mn, como mostraram as relações de campo. As idades integradas forneceram números como $94,27 \pm 0,19$ Ma, $104,6 \pm 0,3$ Ma, $100,8 \pm 0,2$ Ma.

Os OH-Mn das bandas externas dos pisolitos geraram, por exemplo, idades de platô de $24,71 \pm 0,08$ Ma e $24,38 \pm 0,11$ Ma, cuja melhor idade média ponderada é de $24,7 \pm 0,3$ Ma (amostra 2943 Azul 49), igualmente obtida na amostra 2950. Esta idade em torno de 24 Ma parece a mais compatível com a formação do material argiloso nas rochas-sãs e horizonte argiloso manganêsífero com esferolitos, por exemplo.

Os dados acima e sumarizados na tabela 7.1 mostram que os OH-Mn do perfil laterítico do Azul começaram a se formar de fato no limiar do Cretáceo-Terciário, entre 64 e 68 Ma, com a formação das crostas manganêsíferas, e, por conseguinte, talvez as crostas ferro-aluminosas lateríticas, sendo que o principal do perfil, o horizonte argiloso com OH-Mn preservando a estrutura pelítica, parece ter se estabelecido apenas há 44-45 Ma, no Eoceno, portanto mais novo, como já proposto por Costa (1991), que considera as crostas como o evento mais precoce da evolução laterítica. Já o desmantelamento do perfil como um todo, com conseqüente formação dos esferolitos (pisolitos) iniciou-se por volta de 24 a 26 Ma, portanto ainda no limiar Oligoceno-Mioceno. Essa fase não foi

Tabela 7.1 – Resultados geocronológicos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtidos em amostras de OH-Mn do Azul comparados com os obtidos por Vasconcelos *et al.* (1994) e Ruffet *et al.* (1996).

| | Vasconcelos et al. 1994 | Ruffet et al. 1996 | Presente Estudo |
|-------|-------------------------|----------------------------------|---|
| OH-Mn | - | - | > 80 Ma |
| | 65-69 Ma | 60-70 Ma | 64-68 Ma Crosta manganêsífera |
| | - | 55,6 Ma | - |
| | 51-56 Ma | - | - |
| | - | 46,7-48,1 Ma | 44-45 Ma Horizonte argiloso |
| | 40-43 Ma | - | - |
| | - | 37 Ma | 34-36 Ma |
| | - | - | 24-26 Ma Material argiloso esferolítico |
| | | 2,1 Ga Rochas sedimentares | |

delineada pelos trabalhos anteriores, e está altamente compatível com as observações de campo tanto no Azul, como em Carajás e em várias regiões da Amazônia, principalmente em aquelas regiões com cobertura tipo *Argila de Belterra*. Por outro lado, alguns resultados mostram que amostras de OH-Mn podem ter idades muito antigas, cuja explicação aventada seria a contaminação com minerais como micas, presentes, mas que poderiam representar OH-Mn, mais antigos, como demonstrado pelas relações de campo.

VIII. CONCLUSÕES

Os dados de campo demonstram que os depósitos de manganês do Azul na Província Mineral de Carajás estão intimamente associados à espessa seqüência sedimentar arenítica fina a pelítica (siltitos e folhelhos) de cor vermelha a cinza negra e a espesso perfil laterítico maduro desenvolvido a partir da mesma.

A seqüência sedimentar se apresenta como cobertura antiga, proterozóica, cujas idades preliminares mínimas remontam a 1,8 Ga, a idade K/Ar dos granitos Serra dos Carajás intrusivos na mesma (Gomes *et al.*, 1971). Sucedeu, assim, aos sedimentos arqueanos representados principalmente pelas formações ferríferas bandadas da Formação Carajás, Grupo Grão Pará. Essa cobertura corresponderia à Formação Águas Claras (Araújo *et al.*, 1988; Araújo & Maia, 1991; Nogueira *et al.*, 1995). Isto de um lado parece estar em contradição com a idade de 2,6 Ga obtida para esta Formação (Trendall *et al.*, 1998), sugerindo que provavelmente a seqüência sedimentar do Azul não pertença a Formação Águas Claras de Araújo *et al.* (1988), Araújo & Maia (1991) e Nogueira *et al.* (1995).

Na área das minas a seqüência sedimentar encaixante da mineralização manganésifera se destaca pelo domínio de arenitos finos a siltitos de cor marrom a vermelha, por vezes branca, caulínicos, maciços a bandados, cujo bandamento ou estratificação é descrito pela alternância de camadas claras e vermelhas ou marrons, em espessuras centimétricas a decimétricas. Os sedimentos encerram camadas lenticulares, de dezenas de metros de extensão e vários metros de espessura, constituídas de siltitos e folhelhos cinzas a negros, ricos em matéria orgânica carbonosa (MOC) cinza e/ou OH-Mn ou ainda carbonatos de Mn (Figura 8.1). O contato entre os sedimentos encaixantes e as lentes é gradual, tanto lateralmente como na vertical. A gradação se dá tanto na diminuição da granulometria como no surgimento da MOC no sentido da mineralização. As rochas ricas em MOC e/ou mineralizadas tendem a ser laminadas, principalmente se ricas em hidróxidos e MOC, quando não tendem a lâminas maciças mais espessas. Aparentemente as camadas mais profundas tendem a ser mais ricas em rodocrosita, caso em que a MOC é menos freqüente. Os dados de campo mostram, assim, que as camadas ou lentes ricas em criptomelana são possivelmente de origem sedimentar diagenética, resultando daí sua grande expressão nas minas. Esse quadro mostra um ambiente de sedimentação terrígena a química, com várias sub-bacias restritas, em direção das quais diminuía o nível energético, aumentava a atividade orgânica carbonosa, principalmente de microorganismos, promovendo a acumulação de sedimentos muito finos, como os OH-Mn, neoformação de argilominerais e acúmulo de MOC. As microbacias ou os

microambientes foram cronocorrelatos e cronosucedivos. Os valores elevados de Ni, Co, Cu, Zn, Mo, As, S e mesmo ETR, parecem refletir a grande participação da MOC, mas principalmente a área fonte (inúmeros corpos máficos alojados nas BIF) com muitas manifestações máficas, embora V e Cr não sejam tão expressivos, mas seus valores isolados reforçam essa contribuição.

Os arenitos finos e siltitos coloridos são constituídos de quartzo com cimento de caulinita, illita-muscovita, K-feldspato e hematita, além de nódulos isolados de OH-Mn, caulim; vênulas de caulim e OH-Mn. Já os siltitos e folhelhos cinza a negro, além de quartzo, bastante illita-muscovita e esmectita, podem conter clorita, (estilpnomelana), pirita, em geral MOC, OH-Mn, em geral a criptomelana, e ainda e/ou rodocrosita. Rodocrosita ocorre quando as rochas são de tonalidade cinza esverdeada, desprovidas de MOC. As camadas lenticulares são ricas em SiO₂, Al₂O₃, MgO, FeO e K₂O e/ou MnO. As lentes mineralizadas principalmente a OH-Mn (criptomelana) são discriminadas pela associação geoquímica Mn-Ni-Co-Cu-(Zn)-(Mo-As)-Sr-Ba-(Pb)-ETR, com teores anômalos, sendo que Zn mostra forte correlação com a presença de rodocrosita. As lentes não mineralizadas se destacam pela associação K-Rb-Cs-Ag-Mo-As. Zr-Hf-Nb-Ta-Y-Ga-U-Th-V formam associação independente, comum a toda seqüência e indicadora da contribuição terrígena. Essas características mineralógicas e químicas dos sedimentos mineralizados do Azul, bem como seus aspectos geológicos gerais, inclusive a idade geológica, permitem correlacioná-los muito bem com a seqüência sedimentar do Moanda e Franceville no Gabão.

EVOLUÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DO DEPÓSITO DE MANGANÊS DO AZUL – CARAJÁS



Figura 8.1 – Evolução geológica esquemática do depósito de manganês do Azul, Carajás.

Por outro lado, são correlacionáveis apenas parcialmente com outros depósitos. Por exemplo, apenas em termos de Mn-Ni-Co-Cu-(Zn)-(Mo-As)-Sr-Ba-(Pb)-ETR são comparáveis aos depósitos hidrotermais modernos do Pacífico e, pelo conteúdo de ETR, com os sedimentos proterozóicos da China, mas de nenhuma forma com os da África do Sul e de Urucum no Brasil.

Desta forma, os depósitos de Mn primários do Azul, sejam a OH-Mn ou rodocrosita, depositaram-se em ambiente de plataforma marinha proterozóica equivalente aos depósitos de Moanda-Franceville (Weber, 1997; Figura 8.2), correspondendo ao modelo *Sc Marine Sedimentary (Non-Volcanic), Carbonate* de Laznicka (1992), em condições de alta produtividade de matéria orgânica, favoráveis à deposição de OH-Mn (criptomelana) e diagênese para rodocrosita, conforme o diagrama da Figura 8.3. A área fonte pode ter sido as formações ferríferas bandadas arqueanas do Grupo Grão Pará e suas rochas vulcânicas máficas, ambas ricas em manganês, que, sob condições oxidantes, formaram OH-Mn que se depositaram em plataforma marinha. Neste ambiente de plataforma, inicialmente altamente oxidante, por conta da riqueza em MOC, os OH-Mn foram fortemente reduzidos e, em presença do íon carbonato resultante da oxidação da MOC formou-se rodocrosita (Figura 8.4). Podem ser desta fase a formação parcial dos sulfetos, principalmente de ferro, quando da redução de sulfatos e OH-Fe pela atividade bacteriana. Durante os eventos de deformação tectônica da região de Carajás, quando do estabelecimento dos dobramentos e grandes falhamentos, formaram-se inúmeras vênulas de pirita + calcopirita, ou de OH-Mn, quartzo + rodocrosita e ainda caulim.

O perfil laterítico desenvolveu-se sobre a seqüência sedimentar, alcançando principalmente uma grande camada a OH-Mn no topo e várias as lentes OH-Mn na base enquanto camadas rodocrosíticas se encontravam principalmente a maior distância da frente intempérico, ou seja, em níveis mais profundos. Trata-se de perfil laterítico maduro, completo para o topo do platô e altamente truncado e intemperizado para as encostas. Ele iniciou o seu estabelecimento no limiar Cretáceo-Eoceno, há 68 Ma (Figura 8.1). É um perfil comparável com aqueles amplamente distribuídos na Amazônia, mineralizados em Fe, Al, Ni, Fosfatos, etc., que estão bem representados em Carajás, constituindo em grande parte a paisagem dos seus platôs. Isto se faz confirmar pelas datações geocronológicas obtidas, que estão de acordo com dados pré-existent s (Vasconcelos *et al.*, 1994; Ruffet *et al.*, 1996) e com o modelo geológico da lateritização na região. As datações inclusive permitiram identificar a época em que começou a grande modificação dos perfis lateríticos estabelecidos, com a ampla formação de ma-

teriais argilosos com esferolitos diversos, inclusive de Mn. Esse material se correlaciona com o que ainda se costuma denominar de *Argila de Belterra*.

O perfil laterítico contempla um espesso horizonte argiloso, estabelecido sobre os siltitos vermelhos com as lentes de siltitos cinzas a folhelhos cinzas a negros, mineralizados ou não. Esta fase, uma das mais expressivas, estabeleceu-se há 44 - 45 Ma, retomada a 34 - 36 Ma (Tabela 7.1). Aqui se encontram os principais tipos de minérios de Mn das minas, das plaquetas, pelíticos, maciços, cavernosos, etc., formados principalmente por criptomelana, mas ocorrendo ainda todorokita, pirolusita, nsutita e hollandita. Pseudomorfos de rodocrosita são raros. Além destes ocorrem caulinita, quartzo, mica, goethita e hematita. As cloritas, sulfetos e carbonatos estão ausentes.

Sobre o horizonte argiloso destaca-se a crosta laterítica no topo do platô, estabelecida há 68 Ma (Tabela 7.1 e Figura 8.1) que converge para crosta desmatelada nas encostas, por vezes com crostas manganesíferas na meia encosta *in situ* ou detrítica. Ela contém bolsões de bauxita. Caracteriza-se pelo domínio de OH-Fe (hematita e goethita), gibbsita e caulinita, e ainda os OH-Mn, sempre com criptomelana, sendo que litioforita, hollandita e pirolusita se fazem muito freqüente.

As crostas bem como parte do horizonte argiloso foi palco de intensa alteração química e dismantelamento físico, a partir de 26 Ma (Figura 8.1), possivelmente em

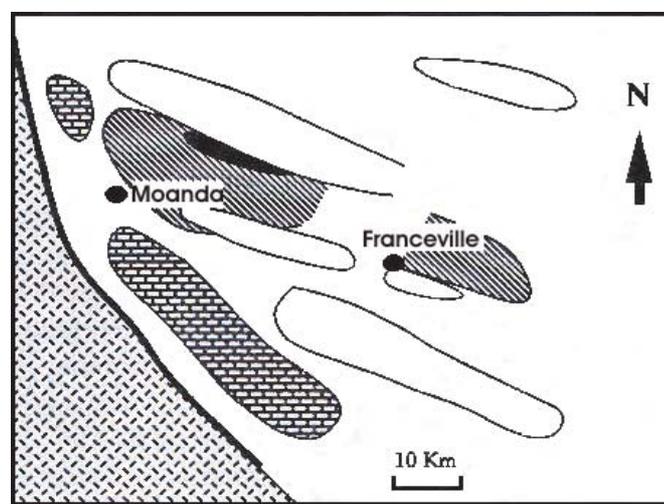


Figura 8.2 – Esboço paleogeográfico da bacia de Franceville, Gabão, ao tempo da deposição de manganês. Modificado de Weber (1997). Apresenta-se como possível modelo para os depósitos do Azul, em Carajás, embora Azul seja pobre em cálcio e fósforo. 1. Terrenos continentais emersos; 2. Linha de costa; 3. Barras de areia; 4. Depósitos manganesíferos; 5. Depósitos de ferro; 6. Formações estromatolíticas, dolomíticas e silicosas.

várias fases, com conseqüente formação dos materiais argilosos amarelos a marrons com esferolitos de OH-Fe, OH-Mn e OH-Al, acumulados em paleodepressões e paleovales, alguns muito profundos, até 80 metros, representando ambiente de alta energia e/ou de longo tempo e duração, em condições paleoclimáticas semi-áridas, seguidas por muito úmidas. Esses materiais são formados de minerais lateríticos herdados e neoformados, dominando a caulinita, gibbsita e goethita, e entre os OH-Mn a litioforita, com criptomelana herdada e mesmo neoformada.

O perfil laterítico em toda sua extensão herdou assinaturas geológicas, mineralógicas e geoquímicas das rochas sedimentares como um todo, tanto mineralizadas como não em Mn, a exemplo da laminação, das vênulações, microfalhas, microdobramentos, morfologia dos cristais, bem como minerais primários, como muscovita, criptomelana, quartzo e hematita, além dos minerais acessórios como zircão, rutilo, ilmenita e turmalina. Marcante é também a herança geoquímica, mesmo nos horizontes mais alterados, como os materiais argilosos com esferolitos. Entre os elementos maiores herdados característicos destacam-se K e Mn. K-Rb-Cs caracterizam a seqüência sedimentar como um todo. A associação geoquímica típica da mineralização primária, Ni-Co-Cu-Zn-Mo-As-Sr-Ba-Pb-ETR, praticamente se faz presente até mesmo nos materiais argilosos com esferolitos. Provavelmente a persistência de criptomelana e, em parte, hollandita, favoreceu a continuidade da herança geoquímica.

Os minérios de manganês do Azul, à base de óxidos e hidróxidos, são tanto de origem sedimentar quanto laterítica. A lateritização foi evento muito importante porque promoveu a neoformação de OH-Mn a partir de rodocrosita, cloritas e illita, minerais portadores de Mn^{2+} , relativamente propensos ao intemperismo, embora grande parte da rodocrosita não tenha sido exposta a frente de intemperismo. A lateritização também remobilizou os OH-Mn pré-existentes, neoformando criptomelana, hollandita, todorokita, nsutita, pirolusita e principalmente litioforita. Além disso, ao eliminar MOC, parte do quartzo e de argilominerais, promoveu maior enriquecimento em Mn e, conseqüentemente, de outros elementos.

Portanto, estudos visando a ampliação das reservas do Azul ou a descoberta de novos depósitos nos arredores do Azul devem ter como premissa fundamental a análise detalhada da bacia sedimentar do Azul, centrada em sua mineralogia e composição química, procurando encontrar as condições favoráveis à sedimentação de Mn: pelitos, MOC e assinatura geoquímica Ni-Co-Cu-Zn-Mo-As-Ba-Sr-ETR-Tl-(K-Rb-Cs). Em ambiente laterítico a presença de criptomelana e/ou valores anômalos de ele-

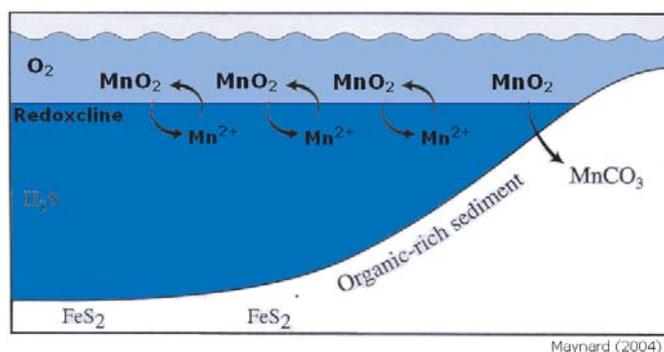


Figura 8.3 – Modelo geral para formação de mineralizações de manganês em bacias euxínicas. Modificado de Maynard (2004).

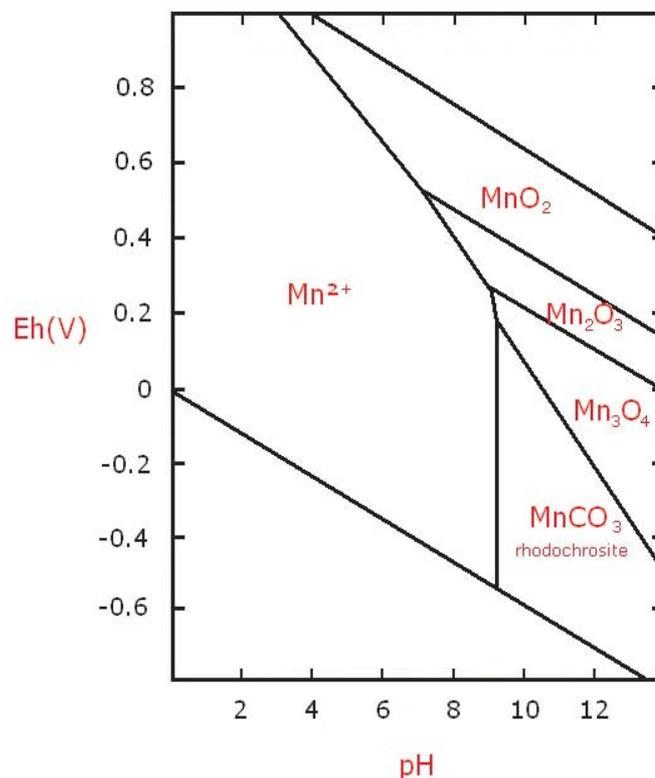


Figura 8.4 – Diagrama de estabilidade pH-Eh para óxidos e carbonatos de Mn. Modificado de Maynard (2004).

mentos da associação acima podem ser de grande importância para novas investigações de horizontes lateríticos argilosos e quiçá das rochas-mãe. Condições geológicas similares àquelas de Moanda-Franceville no Gabão e Azul em Carajás podem levar à descoberta de novos depósitos, sejam sedimentares ou lateríticos, ou ambos. É altamente recomendável a realização de estudos comparativos mais aprofundados entre estes dois grandes depósitos de Mn. Iniciativa como essa foi tomada por Beauvais (1984), que identificou várias similaridades entre ambos: mineralização associada com *black shales*, correlação entre Mn e os metais base (Ni, Co, Cu e Zn, inclusive Pb).

Agradecimentos

À FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, ao CNPq – Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico, ao DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral, em especial Emanuel Teixeira de Queiroz, e a CVRD – Companhia Vale do Rio Doce pelo apoio financeiro, e em especial aos geólogos e engenheiros da Mina de Manganês do Azul, Lilian Grabellos de Moura, Celso Antônio Henning Jr. e Cristiano Soares de

Souza pela camaradagem nos trabalhos de campo e discussões geológicas, ao prof. Dr. Reinhard Fuck pela leitura criteriosa e correções valiosas feitas no manuscrito e a ADIMB pelo prestativo suporte administrativo do prof. Onildo João Marini, do prof. Dr. Hardy Jost e Benedito Waldir Ramos, bem como a todos colegas do projeto “Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia” pelas discussões valiosas ocorridas durante as várias reuniões de trabalho.

REFERÊNCIAS

- Anderson W.L., Dyer R.C. & Torres D.D. 1974. Ocorrências de manganês na bacia do rio Itacaiúnas, Centro-Leste do estado do Pará. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 28. Porto Alegre, Anais, pp.: 149-164.
- Araújo E.S. 1994. Geoquímica multi-elementar de crostas e solos lateríticos da Amazônia Oriental. Belém, Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Tese de Doutorado em Geoquímica. 360 p.
- Araújo O.J.B. & Maia R.G.N. 1991. Serra dos Carajás – Folha SB 22-Z-A, Estado do Pará. Texto explicativo (Programa de levantamentos geológicos básicos do Brasil). Brasília, DNPM/CPRM. 164 p.
- Araújo O.J.B., Jorge João X.S., Costa J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da Folha Serra do Carajás. *In: SBG, Cong. Latino Amer. Geol.*, 7, Belém, Anais, pp.: 324-333.
- Avelar V.G., Lafon J.M., Correia Jr. F.C., Macambira E.M.B. 1999. O magmatismo arqueano da região de Tucumã – Província Mineral de Carajás: Novos Resultados Geocronológicos. *Revista Brasileira de Geociências*, 29:452-460.
- Barbosa O., Ramos J.R.A., Gomes F.A., Hembold R. 1966. Geologia estratigráfica estrutural e econômica da área do “Projeto Araguaia”. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, 94p. il. (Monografia, 19)
- Beauvais A. 1984. Concentrations manganésifères lateritiques. Étude pétrologique de deux gîtes sur roches sédimentaires précambriennes. Gisements de Moanda (Gabon) et Azul (Brésil). Thèse, Univ. Poitiers, 155p.
- Beauvais A., Melfi A., Nahon D. & Trescases J.J. 1987. Pétrologie du gisement latéritique manganésifère d’Azul (Brésil). *Mineralium Deposita*, 22:124-134.
- Beisiegel V.R., Bernardelli A.L., Drummond H.F., Ruff A.W., Tremaine J.W., 1973. Geologia e recursos mineraiis da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 3(4):215-242.
- Bernardelli A.L. 1982. Jazida de Manganês do Azul. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1. Belém, 1982. Anexo dos Anais de Belém, 1982, pp.: 47-60.
- Bernardelli A.L. & Beisiegel V.R. 1978. Geologia econômica da jazida de Manganês do Azul. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife, 1978. Anais do... Recife, SBG, 1978, v.4, pp.: 1431-1444.
- Bonhomme M.G., Cordani U.G., Kawashita K., Macedo H.F., Thomaz Filho A. 1982. Radio chronological age and correlation of Proterozoic sediments in Brazil. *Precambrian Research*, 18(1/2):103-118.
- Coelho C.E.S & Rodrigues O.B. 1986. Jazida de Manganês do Azul, Serra dos Carajás, Pará. Principais depósitos Mineraiis do Brasil. DNPM/CVRD, v.2, pp.: 145-152.
- Cordani V.G., Tassinari C.G., Kawashita K. 1984. A Serra dos Carajás como região limítrofe entre províncias tectônicas. *Ciências da Terra*. 9: 6-11.
- Costa L.C.G. 2002. Mina de Manganês do Azul - Mina 1- Serra dos Carajás-Pa. Relatório interno CVRD. 35p.
- Costa M.L. da. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(2): 146-160.
- Costa M.L. da, Carmo M.S., Behling H. 2005. Mineralogia e geoquímica de sedimentos lacustres com substrato laterítico na Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(2) (no prelo).
- Costa J.B.S., Araújo O.J.B., Santos A., Jorge João X.S., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 1995. A Província Mineral de Carajás: Aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 7:199-235.
- Cunha B.C.C. da, Santos D.B. dos, Prado P. 1984. Contribuição ao estudo da estratigrafia da região dos Gradaús com ênfase no Grupo Rio Fresco. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, Rio de Janeiro. SBG, Anais, v.2, pp. 873-885.
- Dardenne M.A. & Schobbenhaus C. 2001. Metalogênese do Brasil. Brasília, Editora Universidade de Brasília, 392 p.
- Dias G.S., Macambira M.J.B., Dall’agnol R., Soares A.D.V., Barros C.E. de. 1996. A Datação de zircões de sill de metagabro: comprovação da idade arqueana da Formação Águas Claras, Carajás-Pará. *V Simpósio de Geologia da Amazônia*, SBG-NO, Boletim de Resumos Expandidos, Belém, pp.: 376-379.
- DOCEGEO. 1988. Revisão lito-estratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 35. Belém, 1988. Província Mineral de Carajás; lito-estratigrafia e principais depósitos mineraiis. Anexo aos Anais. Belém, SBG, 165 p.
- Dall’Agnol R., Souza Z.S., Althoff F.J., Barros C.E.M., Leite A.A.S., Jorge João X.S. 1997. General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province. *In: Inter.Symp.Granites and Assoc. Mineralizations*, 2, SBG Salvador, Excursion Guide, pp.: 135-161.

- EMBRAPA. 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos, 01).
- Faraco L.M.T., Carvalho A.J.M., Klein L.E. 1996. Carta Metalogenética da Província de Carajás-SE do Pará. Folha Araguaia (SB.22). Nota explicativa, Belém, CPRM, 33 p.
- Figueiras A.J.M., Macambira J.B., Villas, R.N.N. 1987. Contribuição ao estudo paleoambiental da Formação Rio Fresco na região de Carajás-PA. In: *Simpósio sobre Sistemas Depositionais no Pré-Cambriano*, 1, Ouro Preto, 1987. Anais. Ouro Preto, SBG. pp.: 17-31.
- Figueiras A.J.M. & Villas R.N.N. 1984. Estudo petrológico e sedimentológico da seqüência clástica (pós-Grupo Grão Pará) da Serra dos Carajás, Estado do Pará. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 33. Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, SBG, v.2. pp.: 832-846.
- Gibbs A.K., Wirth K. R., Hirata W. K., Olszewski Jr. W.J. 1986. Age and composition of the Grão Pará Group Volcanic, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo. **16**(2): 201-211.
- Gomes C.B., Amaral G., Kawashita K., Giancuri F. 1971. Geocronologia da área dos Carajás-PA. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 25, São Paulo, SBG, pp.: 162-163.
- Gomes C.B., Cordani U.G., Basei M.A.S. 1975. Radiometric ages from the Serra dos Carajás, northern Brazil. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **86**(7):939-945.
- Hirata W.K., Rigon J.C., Kadekaru K., Cordeiro A.A.C., Meireles E.M. 1982. Geologia da Província Mineral de Carajás. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1. Belém, 1982. Anais. Belém, SBG, v.1. pp.: 100-108.
- Huhn S.R.B., Santos A.B.S., Amaral A.F., Ledshan E.J., Gouveia J.L., Martins L.P.B., Montalvão R.M.G., Costa V.G. 1988. O terreno "granito-greenstone" da região de Rio Maria – sul do Pará. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 35. Belém, 1988. Anais, **3**:1438-1452.
- King L. 1956. A geomorfologia do Brasil Oriental. *Rev. Bras. Geogr.*, 2, ano XVIII, pp.: 147-265.
- Krup P.E. 1971. Reconhecimento geológico na região dos rios Itacaiúnas e Tocantins, Estado do Pará. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 25. São Paulo 1971. Resumos das comunicações, São Paulo, SBG, pp.: 61-62.
- Laznicka P. 1992. Manganese deposits in the global lithogenic system: Quantitative approach. *Ore Geology Reviews*, **7**: 279-356.
- Leite A.A.S. 2001. Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cratón Amazônico. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Tese de Doutorado, 330 p.
- Levison A.A. 1974. Introduction to exploration geochemistry. Applied Publishing Ltd. Maywood, Illinois, 614 p.
- Lindenmayer Z.G. 1990. Salobo Sequence, Carajás, Brazil: geology, geochemistry and metamorphism. Department of Geology, University of Western Ontário, Ontário, Canadá 407 p. (PhD Thesis).
- Lindenmayer Z.G., Faccini U., Guimarães Netto. 1993. Encontrada a mais antiga forma de vida da América. *Revista Unisinos*, **58**:16-18.
- Macambira J.B. 2003. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. Tese de Doutorado – Unicamp, IG SP, 215 p.
- Macambira J.B., Macambira M.J.B., Scheller T., Gomes A.C.B. 1996. Geocronologia Pb/Pb e tipologia de zircões de rochas vulcânicas da Formação Carajás – Pará: Indicador da idade dos BIFs. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 39, Salvador, 1996, Anais, **6**: 516-518.
- Macambira M.J.B. & Lancelot J.R. 1996. Time constraints for the formation on the Archean Rio Maria crust, southeastern Amazonian Cráton, Brazil. *International Geology Review*, **38**:1134-1142.
- Machado N., Lindenmayer Z., Krogh T.E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, **49**:329-354.
- Maynard J.B. 2004. Manganiferous sediments, rocks, and ores. In: *Treatise on Geochemistry: sediments, diagenesis and sedimentary rocks*, **7**:289-308.
- Meireles E.M., Hirata W.K., Amaral A.F., Medeiros Filho C.A., Gato W.C. 1984. Geologia das Folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral de Carajás, estado do Pará. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, SBG, v.5, pp.: 2164-2174.
- Nogueira A.C.R. 1995. Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, Região Central da Serra dos Carajás – PA. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Dissertação de Mestrado. 168 p.
- Nogueira A.C.R., Truckenbrodt W., Pinheiro R.V.L. 1995. Formação Águas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás: Redescrição e Redefinição Litoestratigráfica. *Boletim Museu Paraense Emilio Goeldi*, **7**:177-197.
- Pidgeon R.T., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 2000. Th-U-Pb isotopic systems and internal structures of complex zircons from an enderbite from the Pium Complex, Carajás Province, Brazil: evidence for the ages of granulite facies metamorphism and the protolith of the enderbite, *Chemical Geology*, **166**:159-171.
- Pimentel M.M. & Machado N. 1994. Geocronologia U-Pb dos terrenos granito-greenstone de Rio Maria, Pará. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 38 Camboriú, Anais, 1994, **2**:390-391.
- Pinheiro R.V.L. 1997. Reactivation history of the Carajás and Cinzento strike-slip systems, Amazon, Brazil. University of Durham. Department of Geological Sciences. Tese de doutorado (parcial).
- Quinby H., Wilde P., Orth C.J., Berry W.B.N. 1997. Elemental geochemistry of black shales - statistical comparison of low-calcic shales with other shales. In: <http://www.marscigrp.org/usgs89.html>, pp. 8-15.
- Ramos J.F.F., Moura C.A.V., Melo C.F., Pereira J.L., Serique J.S.B., Rodrigues R.M. 1984. Uma discussão sobre seqüências sedimentares tidas como Formação Rio Fresco, sudeste do Pará. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, SBG, **2**:862-872.
- Ruffet G., Innocent C., Michard A., Féraud G., Beauvais A., Nahon D., Hamelin B. 1996. A geochronological ⁴⁰Ar/³⁹Ar and ⁸⁷Rb/⁸⁷Sr study of K-Mn oxides from the weathering sequence of Azul, Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**(12):2219-2232.
- Silva G.G., Lima M.I.C, Andrade A.R.F., Issler R.S., Guimarães G. 1974. Geologia, geocronologia, solo, vegetação, uso potencial da terra. In: *BRASIL, Projeto RADAM*. Geologia

- das folhas SB. 22, Araguaia e parte da folha SC. 22. Tocantins. Rio de Janeiro, DNPM. Cap. 1, pp.: 1-123.
- Silva J.L. da. 1988. Mina de Manganês do Azul. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 35, Belém, 1988. Província Mineral do Carajás, Litoestratigrafia e principais depósitos minerai s; Anexo dos Anais, Belém, pp.: 73-94.
- Tassinari C.C.G., Teixeira W., Kawashita K. 1982. Geologic evolution of the Serra dos Carajás, Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **12**(1-3):263-267.
- Taylor S.R.; McLennan S.M. 1985. The continental crust: its composition and evolution, Victoria, Blackwell. pp.: 28-29
- Teixeira W. 1978. Significação tectônica do magmatismo anorogênico pré-cambriano básico e alcalino na região amazônica. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife. SBG, Anais, v.1, pp.: 491-505.
- Trendall A.F., Basei M.A.S., Laeter Jr., Nelson D.R. 1998. SHRIMP zircon U-Pb constraints on the age of the Carajás Formation, Grão Pará Group, Amazon Cráton. *Journal South American Earth Sciences*, 11:265-277.
- Turekian K.K. & Wedepohl K.H. 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust *In: Faure G.P. (Ed.) 1998. Principles and applications of geochemistry. Second edition. Prentice Hall, New Jersey. p. 50-51*
- Valarelli J.V., Bernardelli A.L. & Beisiegel V.R. 1978. Aspectos genéticos do minério de Manganês do Azul. *In: Congresso Brasileiro de Geologia*, 30, Recife, 1978. Anais. Recife, SBG, 1978, v.4, pp.: 1670-1979.
- Vasconcelos P.M. 1999. K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Weathering Processes. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* **27**:183-229.
- Vasconcelos P.M., Onoe A.T., Kawashita K., Soares A.J. & Teixeira W. 2002. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology at the Instituto de Geociências, USP: instrumentation, analytical 7 procedures and calibration. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, **74**(2): 297-342.
- Vasconcelos P.M., Renne P.R., Brimhall G.H. & Becker T.A. 1994. Direct dating of weathering phenomena by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K-Ar analysis of supergene K-Mn oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58** (6):1635-1665.
- Weber F. 1997. Evolution of lateritic manganese deposits. *In Paquet H., Clauer N. Soils and sediments-mineralogy and geochemistry. Springer-Verlag, eds. pp.: 97-124.*
- webmineral.com. 12/08/2005
- Wirth K.R., Gibbs A.K., Olszewski W.J. 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará group and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **16**:195-200.