

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA

FERNANDO MARTINS PEREIRA

USO DA MINERALOGIA PARA CORRELACIONAR SEQUÊNCIAS
FERROMANGANESÍFERAS NAS MINAS DO URUCUM E COMPREENDER OS
PROCESSOS MINERALIZADORES

CURITIBA
2014

FERNANDO MARTINS PEREIRA

USO DA MINERALOGIA PARA CORRELACIONAR SEQUÊNCIAS
FERROMANGANESÍFERAS NAS MINAS DO URUCUM E COMPREENDER OS
PROCESSOS MINERALIZADORES

Trabalho apresentado como requisito parcial à
obtenção do grau de Geólogo no curso de
graduação em Geologia, Setor de Ciências da
Terra da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. João Carlos Biondi

CURITIBA
2014

Aos meus pais, que tornaram esse sonho possível.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Carlos Biondi, que sempre me auxiliou quando solicitado. Sempre disponível e atencioso ao conversar sobre minhas dúvidas e problemas na execução deste trabalho.

Ao Departamento do curso de Geologia que ofertou a disciplina e atuou no sentido de regularizar a situação não só da disciplina quanto dos alunos e professores envolvidos.

À Comissão Orientadora do Trabalho de Conclusão de Curso, Prof. Dr. Fernando Farias Vesely, Prof. Msc. Fernando Mancini e Profa. Dra. Maria Cristina de Souza, que estabeleceram a ordem e sequência dos trabalhos tanto da disciplina TCC-1 quanto TCC-2.

Ao LAMIR – Laboratório de Análises de Minerais e Rochas, que permitiu meu acesso para realização das análises necessárias, bem como nas explicações dos métodos e uso dos equipamentos, especialmente às pessoas do Geólogo Rodrigo Secchi e da Técnica em Química Evelin Farias Silva Pereira, mas também a toda equipe LAMIR.

A todos os meus colegas e amigos que estiveram presente nesta caminhada, tão longa, mas que pareceu tão curta devido aos bons momentos vividos. Especialmente a Ana Paula Cezario, Bruno Macchioni, Guilherme Fedalto e Arthur Raboni, que são citados pela proximidade e companheirismo sem limites que tanto me dedicam.

Agradeço a Ronile Hoeflich, colega de turma a quem tenho a honra e o orgulho de chamar de namorada, pelas discussões geológicas, pelo apoio nos momentos em que o desânimo tentava me abater, por incentivar e cuidar de mim. Cito aqui também a sua família, que me receberam em sua casa de uma maneira tão alegre e feliz, e também me incentivaram nesta trajetória.

Aos meus pais, Seu Laert e Dona Iranilde, que me auxiliaram e continuam auxiliando, com tanto afinho e dedicação, em todas as etapas da minha formação, não só acadêmica, mas também como pessoa e cidadão. Agradecimento que estendo à minha irmã, Jane, pessoa com quem costumo conversar e ouvir suas experiências acadêmicas e profissionais a fim de absorver um pouco de seu conhecimento.

RESUMO

Em meio à planície do Pantanal, nas imediações da cidade de Corumbá - MS existe um conjunto de morros popularmente denominado de Morraria do Urucum. Essas elevações, constituídas por rochas Neoproterozoicas, encerram importantes depósitos de Ferro e Manganês, minerado há anos por diferentes companhias. Este depósito, situado na Formação Santa Cruz do Grupo Jacadigo, tem como embasamento o granito Urucum e os metassedimentos do Grupo Cuiabá. Configura-se por 4 camadas manganíferas em meio a rochas sedimentares cimentadas por hematita e por horizontes com jaspilitos que totalizam cerca de 400 metros de espessura. A gênese do depósito do Urucum é intrigante, pois os comportamentos geoquímicos do Fe e Mn são semelhantes, de modo que a formação dos horizontes manganíferos demandam processos que permitam a separação do Fe do Mn. Este trabalho apresenta um estudo mineralógico das sequências manganíferas através do levantamento de perfis associados a uma amostragem dos pontos de interesse. O estudo mineralógico se deu pelo reconhecimento das fases minerais por difratometria de raios X e por semi quantificação aplicada utilizando-se o método de Rietveld. Dessa forma, foi possível analisar e discutir a variação mineralógica vertical, consequência da sedimentação, e relacioná-la com as prováveis condições físico-químicas ativas no momento da deposição dessas rochas, bem como ter noção da variação granulométrica ao longo das seções, a fim de reconhecer detalhes deposicionais que contribuíssem para um maior entendimento da gênese desse depósito. Foi possível depreender que as principais variáveis que de algum modo segregaram o Fe e o Mn, foram as condições de Eh e pH da solução, que por sua vez devem estar relacionadas com a grande glaciação do Neoproterozoico. A capa de gelo formada em, pelo menos, 2 picos glaciais isolou a água marinha do contato com a atmosfera e quando o gelo regrediu, expondo novamente a água marinha ao contato com a atmosfera, o Fe^{2+} oxidou e precipitou, levando a formação de espessas camadas de hematita. No fim do pico de degelo, a água marinha estava empobrecida em Fe e enriquecida em Mn^{2+} , é nesse momento que ocorre a deposição do Mn contido tanto no horizonte Mn2 quanto no Mn3, como precipitados químicos e localmente como cimento de rochas clásticas finas. Porém, para a primeira camada de Mn, essa explicação não tem sentido, já que não há deposição de Fe abaixo de Mn1. Portanto, essa camada é explicada como depositada na oxiclina de encontro das zonas freáticas de água continental oxidante com a água marinha de caráter levemente redutor. A variação do nível da água na bacia moveu essa oxiclina de posição e fez com que a deposição de Mn avançasse sobre sedimentos clásticos sem Fe, culminando na formação dessa camada com características francamente detríticas.

Palavras chave: Depósito Fe-Mn Urucum, geoquímica Fe-Mn, difratometria de raios X, método de quantificação de Rietveld.

ABSTRACT

Amid the Pantanal, near the city of Corumbá - MS, there is a set of hills popularly called Morraria Urucum. These elevations, consisting of Neoproterozoic rocks, contain important deposits of iron and manganese, mined for years by different companies. This deposit, located in the Santa Cruz Formation of Jacadigo Group, has as its embasement the Urucum granite and metasedimentary rocks of the Cuiabá Group. It is configured by four manganese layers in the middle of sedimentary rocks cemented by hematite and horizons with jaspilites totaling about 400 meters thick. The genesis of the deposit of Urucum is intriguing because the geochemical behavior of Fe and Mn are similar, so that the formation of manganese horizons demand processes for the separation of Fe from Mn. This paper presents a mineralogical study of manganese sequences by surveying profiles associated with sampling of interest points. The mineralogical study was due to the recognition of mineral phases by X-ray diffraction and semi quantification applied using the Rietveld method. Thus, it was possible to analyze and discuss the vertical mineralogical variation, a result of sedimentation, and relate it to the probable active physicochemical conditions at the time of deposition of these rocks, as well as comprehending of granulometric variation along the sections in order to recognize depositional details that contribute to a greater understanding of the genesis of this deposit. It was possible to conclude that the main variables that somehow segregated Fe and Mn were the conditions of Eh and pH of the solution, which in turn must be related to the large Neoproterozoic glaciation. The ice layer formed on, at least two glacial peaks, isolated seawater from atmosphere, and when the ice receded, exposing sea water to the atmosphere again, the Fe^{2+} oxidized and precipitated, leading to the formation of thick hematite layers. At the end of the peak of melting, seawater was depleted in Fe and enriched in Mn^{2+} , that is the moment when Mn deposition occurs in both horizons as Mn² and Mn³ like chemical precipitates and locally as cement of fine clastic rocks. Although, for the first layer of Mn, this explanation does not make sense, considering that there is no deposition of Fe below Mn¹. Therefore, this layer is explained as deposited at the oxicline of encounter the phreatic zones of oxidant continental water with slightly reductive seawater. The variation of water level in the basin moved this position of oxicline and caused the deposition of Mn upon clastic sediments without Fe, culminating in the formation of this layer with detrital characteristics.

Keywords: Fe-Mn Urucum Deposit, Fe-Mn geochemistry, X-ray diffraction, quantification of Rietveld method.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. AS GRANDES FEIÇÕES COM RELEVO POSITIVO, QUE SE DESTACAM EM RELAÇÃO À PLANÍCIE DO PANTANAL, SÃO OS DEPÓSITOS DE FE E MN DO URUCUM.	19
FIGURA 2 - A RELAÇÃO DA POSIÇÃO NA BACIA SEDIMENTAR E O ESTADO DE OXIDAÇÃO DO MN.	22
FIGURA 3 - CAMPOS DE ESTABILIDADE DOS MINERAIS DE FE E DE MN.	23
FIGURA 4 - ESBOÇO GEOLÓGICO-ESTRATIGRÁFICO-ESTRUTURAL DA ÁREA EM ESTUDO.	25
FIGURA 5 – SEÇÃO 1 CONTENDO A CAMADA MANGANESÍFERA Mn1.	36
FIGURA 6 – SEÇÃO 2 MOSTRANDO A CAMADA Mn1 EM LOCAL PRÓXIMO A MINA FIGUEIRINHA.	38
FIGURA 7 – SEÇÃO 3 COM AS CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DE Mn1.	39
FIGURA 8 – SEÇÕES LEVANTADAS EM 3 GALERIAS DA MINA FIGUEIRINHA COM AS CARACTERÍSTICAS DE Mn1.	41
FIGURA 9 – SEÇÃO 5 COM A REPRESENTAÇÃO DO NÍVEL Mn2 NA MINA DA CIA VALE	43
FIGURA 10 – SEÇÃO DA CAMADA Mn2 NAS IMEDIAÇÕES DA ÁREA MINERADA PELA VALE.	44
FIGURA 11 – SEÇÃO QUE RETRATA AS CARACTERÍSTICAS DE Mn2.	46
FIGURA 12 – SEÇÃO Mn3 NAS IMEDIAÇÕES DA MINA DA VALE.	47
FIGURA 13 – SEÇÃO 9 E OS ASPECTOS DE Mn3.	49
FIGURA 14 - SEÇÃO 10 E AS CARACTERÍSTICAS DE Mn3.	50
FIGURA 15 – DETALHE DE Mn3 NA REGIÃO DA MINA DA VALE.	51

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - SÍNTESE DOS PRINCIPAIS MINERAIS DE FE E DE MN ENCONTRADOS NA NATUREZA	20
QUADRO 2 - ESTRATIGRAFIA DA ÁREA DE INTERESSE SEGUNDO DIFERENTES AUTORES.....	27
TABELA 3 - TABELA COM OS MINERAIS IDENTIFICADOS POR DRX NAS AMOSTRAS IDENTIFICADAS NA TERCEIRA COLUNA. ESSAS AMOSTRAS FORAM AGRUPADAS NOS HORIZONTES MINERALIZADOS DESCRITOS NESSE TRABALHO, IDENTIFICADOS NAS PRIMEIRA E SEGUNDA COLUNAS (X = MINERAIS IDENTIFICADOS MAS QUE NÃO TIVERAM SUAS CONCENTRAÇÕES DETERMINADAS)	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 LOCALIZAÇÃO	19
3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	20
4 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	24
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
5.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	30
5.2 MÉTODO	31
6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS DADOS	33
6.1 SEÇÃO 1- CAMADA Mn1 (FIGURA 5)	35
6.2 SEÇÃO 2 – CAMADA Mn1, MINA FIGUEIRINHA (FIGURA 6)	37
6.3 SEÇÃO 3 – CAMADA Mn1 – Mina São domingos (FIGURA 7).....	37
6.4 SEÇÃO 4 – CAMADA Mn1 – MINA FIGUEIRINHA (FIGURA 8).....	40
6.5 SEÇÃO 5 – CAMADA Mn2, MINA DA CIA VALE (FIGURA 9)	42
6.6 SEÇÃO 6 – CAMADA Mn2 – Mina da VALE (FIGURA 10)	42
6.7 SEÇÃO 7 – CAMADA Mn2 VALE(FIGURA 11).....	45
6.8 SEÇÃO 8 – CAMADA Mn3, MINA DA VALE (FIGURA 12).....	45
6.9 SEÇÃO 9 – CAMADA Mn3 (FIGURA 13)	47
6.10 SEÇÃO 10 – CAMADA Mn3 (FIGURA 14).....	48
6.11 SEÇÃO 11 – CAMADA Mn3 (DETALHE) – MINA DA VALE (FIGURA 15).....	51
7. CONCLUSÕES.....	52
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A morraria do Urucum está situada em Corumbá - MS, na região Centro Oeste do Brasil, e tem sua continuidade no sudeste da Bolívia, onde recebe o nome de Mutum. São formações ferríferas bandadas que hospedam três camadas de manganês (Mn-2, Mn-3 e Mn-4) que se superpõem a outra (Mn-1), hospedada em rochas clásticas com características arcoseanas.

No anuário mineral do DNPM (2005), as reservas de ferro do Urucum foram estimadas em 3,1 bilhões de toneladas, enquanto as de manganês eram de 11 milhões de toneladas. O depósito de Fe e Mn do Urucum chama a atenção particularmente por ser um depósito de classe mundial.

Dentre as empresas que lavram esse depósito, encontram-se a VALE, a Mineração Corumbaense Reunida (MCR) e a MMX.

A gênese desses depósitos de manganês, assim como os de ferro, lavrados há mais de 100 anos, não é claramente compreendida, havendo muitas discussões acerca do tema. Entre os vários problemas polêmicos, relacionados à gênese desses depósitos, junta-se o fato de serem depósitos neoproterozoicos, aparentemente relacionados a glaciações, diferentes das outras formações ferro-manganesíferas bandadas, que são paleoproterozoicas ou arqueanas.

Do ponto de vista geoquímico, o comportamento do Fe e do Mn são muito semelhantes, o que explica o fato de ser comum a ocorrência de minerais de Fe e de Mn em paragênese. No entanto, somente essa explicação não satisfaz o que é descrito nas minas do Urucum, onde ocorrem, pelo menos, 3 horizontes manganesíferos de espessuras métricas em meio a mais de 300 metros de formação ferrífera, e um horizonte, também métrico (Mn-1), dissociado de qualquer unidade ferrífera. Há necessidade de se entender em que condições a sedimentação de Fe cessou para iniciar a sedimentação de Mn em meio ao Fe, o que fez o minério variar lateralmente de fácies, e como foi possível precipitar o manganês de Mn-1 sem antes ter havido precipitação de ferro.

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é descrever as 4 sequências mineralizadas no tocante aos constituintes minerais, realçando os controles físico-químicos e deposicionais observados nas seções levantadas em campo. Com isso

espera-se compreender de forma ampla os processos formadores e tecer comentários a respeito do ambiente de deposição dessas unidades.

A descrição foi apoiada pela leitura de uma extensa bibliografia, não apenas regional, mas também de outros locais mineralizados similares conhecidos, nos quais há informações que podem auxiliar a interpretações das características verificadas no depósito de Fe e Mn do Urucum.

2 LOCALIZAÇÃO

A área em estudo está localizada no município de Corumbá, no estado de Mato Grosso do Sul, região Centro Oeste do Brasil, próximo à fronteira com a Bolívia.

Para se chegar até Corumbá existem acessos pela BR-359, BR-262, pela MS-454 e pela MS-228. Inclusive a BR-262 e a MS-228 cruzam a área de interesse, contornando os morros que encerram o depósito de Fe e Mn do Urucum. A cidade possui ainda um aeroporto, de modo que é possível fazer conexões diretas com diversas cidades do Brasil e outros países Sul Americanos.

O acesso à região de estudo se dá a partir de Corumbá, através da rodovia BR-262, em direção ao sul. A identificação dos locais de interesse é simples, já que toda a região é uma grande planície e as rochas objeto desse estudo sustentam as elevações que recebem o nome geral de Morrarias do Urucum, com vários outros nomes locais mostrados na FIGURA 1.

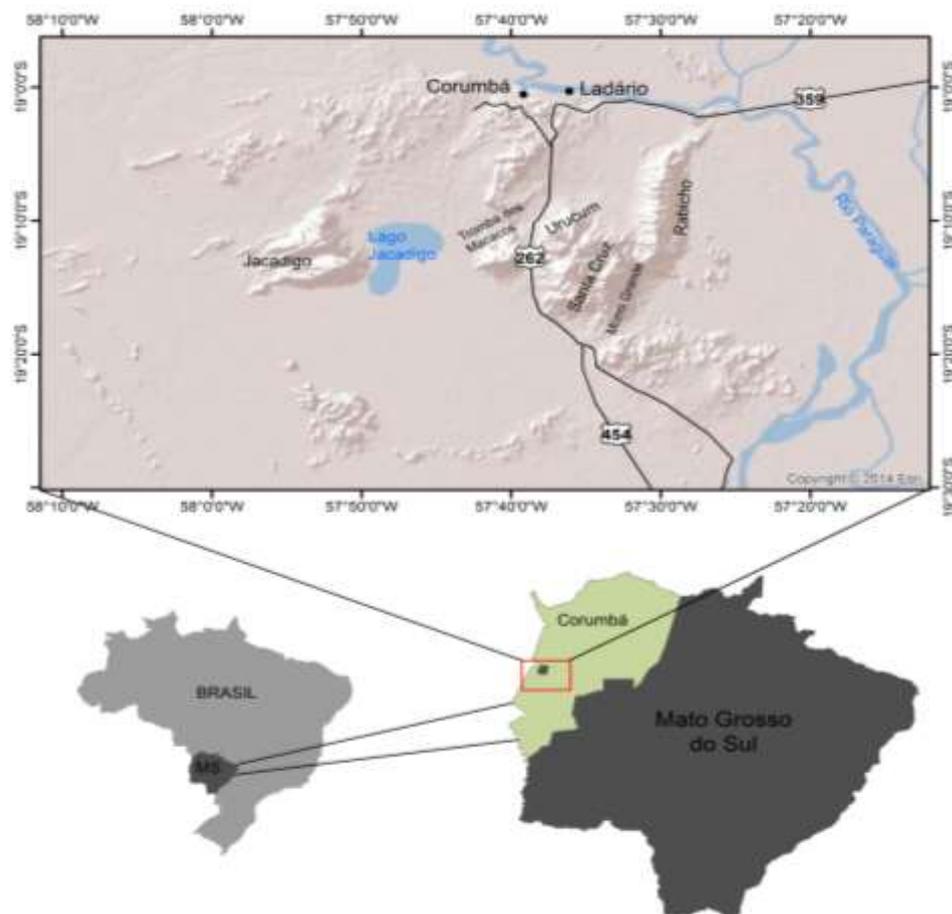


FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO. AS GRANDES FEIÇÕES COM RELEVO POSITIVO, QUE SE DESTACAM EM RELAÇÃO À PLANÍCIE DO PANTANAL, SÃO OS DEPÓSITOS DE FE E MN DO URUCUM.

3 REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

O manganês pode ocorrer na forma de óxidos, silicatos e carbonatos. A alabandita, o único sulfeto de manganês conhecido, é muito rara. A Tabela 1 sintetiza os principais minerais de manganês e de ferro encontrados na natureza e suas fórmulas químicas.

TABELA 1 - SÍNTESE DOS PRINCIPAIS MINERAIS DE FE E DE MN ENCONTRADOS NA NATUREZA

		Fórmula Química
Minerais de Mn	Alabandita	$Mn^{2+}S$
	Braunita	$Mn^{2+}Mn^{3+}_6SiO_{12}$
	Criptomelano	$KMn^{4+}_6Mn^{2+}_2O_{16}$
	Pirolusita	$Mn^{4+}O_2$
	Psilomelana	$Ba \cdot (H_2O)Mn^{3+}_5O_{10}$
	Holandita	$Ba_{0.8}Pb_{0.2}Na_{0.1}Mn^{4+}_{6.1}Fe^{3+}_{1.3}Mn^{2+}_{0.5}Al_{0.2}Si_{0.1}O_{16}$
	Hausmannita	$Mn^{3+}_3O_4$
	Manganita	$Mn^{3+}O(OH)$
	Rodocrosita	$Mn^{2+}(CO_3)$
Minerais de Fe	Hematita	$Fe^{3+}_2O_3$
	Magnetita	$Fe^{3+}_2Fe^{2+}O_4$
	Goethita	$Fe^{3+}O(OH)$
	Siderita	$Fe^{2+}(CO_3)$
	Chamosita	$Fe^{2+}_3Mg_{1.5}AlFe^{3+}_{0.5}Si_3AlO_{12}(OH)_6$

Para se determinar um tipo genético de depósito, Roy (1968) afirma que devem ser considerados aspectos mineralógicos, químicos, tectônicos e associações litológicas. Todas essas características, quando agrupadas e tratadas em conjunto, revelam semelhanças e diferenças genéticas culminando no estabelecimento de diferentes tipos de depósitos.

Park (1956) descreveu 5 tipos genéticos de depósitos de Mn: 1. Hidrotermal; 2. Depósitos sedimentares incluindo: (a) aqueles independentes de atividade vulcânica; (b) os associados a tufos e sedimentos clásticos de filiação vulcânica e; (c) os associados a formações ferríferas bandadas; 3. Depósitos compostos por silicatos de baixa temperatura e hausmanita, associados a fluxos submarinos; 4. Depósitos metamórficos; 5. Acumulações residuais.

Krauskopf (1956) relacionou processos ou causas que separam minerais de ferro e minerais de manganês naturalmente. Para ele, o que define quais minerais serão precipitados em uma solução é a quantidade de íons e as condições de Eh e pH a que a solução está sujeita, com Mn tendendo a precipitar em condições mais alcalinas que o Fe. No mesmo trabalho, ele relata que apesar das condições pouco favoráveis, é possível precipitar unicamente Mn, caso haja pouco Fe disponível. Com isso depreendemos que o Fe é um elemento mais solúvel e que se oxida mais facilmente que o Mn. Em um ambiente natural, as condições de Eh e pH favorecem que o Fe se precipite antes que o Mn e este precipite quando a taxa Mn/Fe for suficientemente alta.

Roy (1968) simplificou os tipos genéticos e reuniu os 5 tipos propostos por Park (1956) em apenas 3, sendo eles o hidrotermal, o sedimentar e os superficiais. Os depósitos hidrotermais são descritos como veios hipógenos formados principalmente por alabandita associada a cobre, ouro e prata, mas também aqueles com predominância de rodocrosita e acompanhados por sulfetos de zinco, prata, chumbo e cobre, com antimônio e arsênio. O mesmo autor cita a observação de uma zonação nos depósitos hidrotermais de Mn, na qual se forma uma assembleia de rodonita, rodocrosita e alabandita nas maiores profundidades, seguida de uma assembleia com hausmanita, braunita e bixbita em uma zona intermediária e, por fim, os minerais como psilomelano, pirolusita, criptomelano, manganita e holandita em uma paragênese formada próxima à superfície. Ele atribui essa variação à disponibilidade de oxigênio e temperatura, como condições de pequena oxigenação e altas temperaturas em grandes profundidades e grande disponibilidade de oxigênio associado a baixas temperaturas próximo da superfície.

Embora Strakhov & Shterenberg (1966) tenham defendido que as assembléias mineralógicas reconhecidas nos depósitos minerais sejam produtos de diagênese, Roy (1968) posiciona os minerais na bacia de sedimentação pretérita de acordo com condições físico químicas distintas, características da bacia de sedimentação (FIGURA 2).

Para os depósitos sedimentares, Roy (1968) apresenta modelos baseados em opiniões de duas escolas: a primeira defende fontes vulcanogênicas e a segunda, fontes não vulcanogênicas. A escola que demanda fontes vulcanogênicas para explicar os depósitos sedimentares de Mn sugere que esse elemento pode ser

concentrado ou por atividade vulcânica direta, ou por sedimentação exalativa de erupções vulcânicas submarinas.



FIGURA 2 - A RELAÇÃO DA POSIÇÃO NA BACIA SEDIMENTAR E O ESTADO DE OXIDAÇÃO DO MN.

Os controles físico químicos a que Roy (1968) se refere foram descritos primeiramente nos trabalhos de Krumbein & Garrels (1952), que mencionaram que tanto o Eh quanto o pH controlam a precipitação de manganês como óxidos, carbonatos e sulfetos. Merchandise (1956) foi além e através de cálculos termodinâmicos concluiu que o Eh e o pH definem se o manganês precipita na forma de MnO₂ (pirrolusita), Mn(OH)₂ (pirocroíta), MnCO₃ (rodocrosita) ou MnS (alabandita).

A figura 3, retirada de Biondi (2003), sintetiza de maneira gráfica o que Krauskopf (1956) descreve em seu trabalho. É notável que os minerais de Fe possuem um campo de estabilidade, no qual precipitam, mais amplo que os minerais de Mn, restando a esses uma faixa alcalina que é compartilhada com minerais de Fe estáveis. Mais uma vez fica claro que, em um meio natural, para sedimentar um horizonte manganífero é necessário empobrecer a solução (água do mar) em Fe. Isso pode ocorrer se, com o passar do tempo, as condições de Eh e pH da solução mudarem enquanto os cátions de Fe, nas suas diferentes valências, forem retirados da solução. Assim, quando as condições para precipitar minerais de Mn forem atingidas, o Fe já tenha todo precipitado.

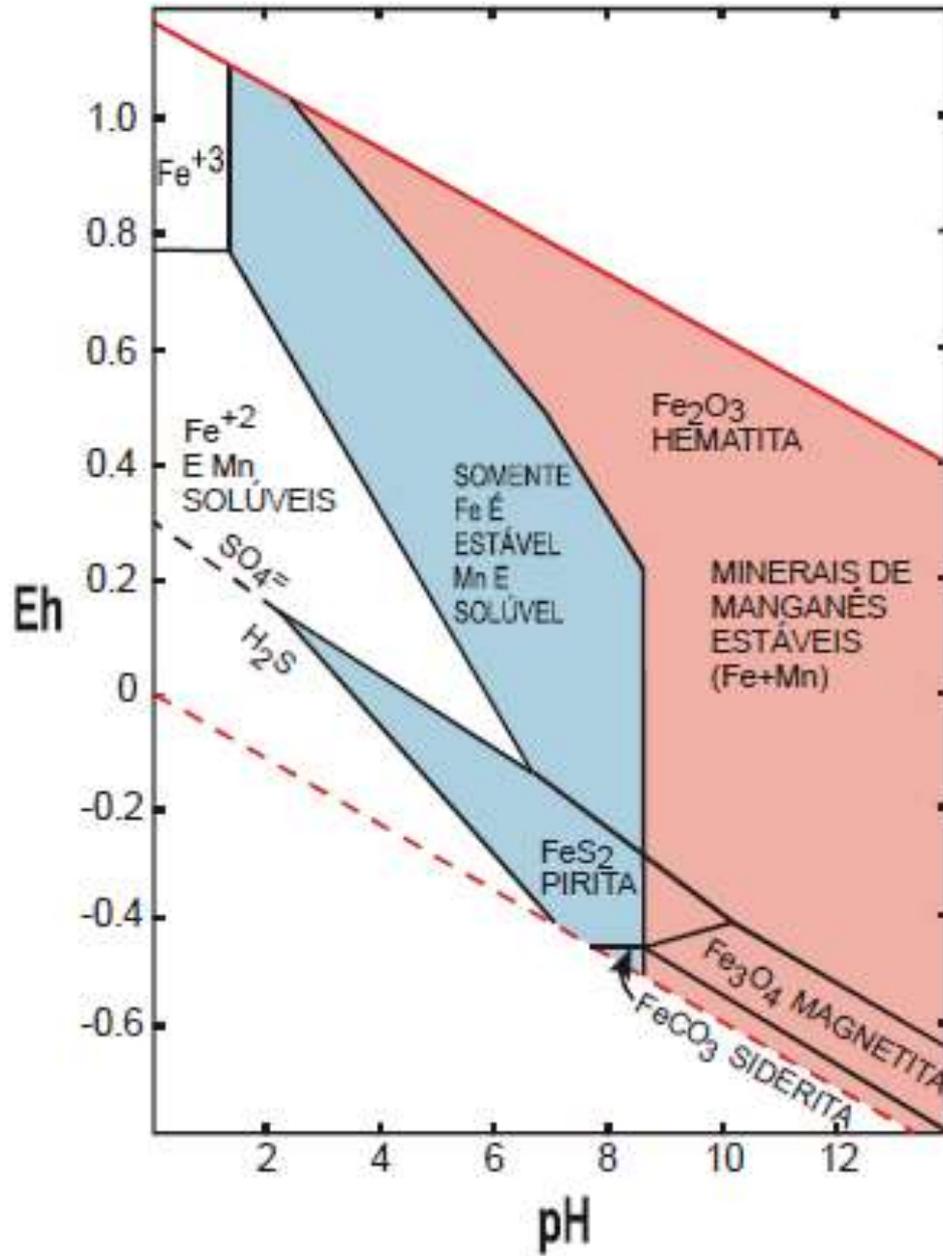


FIGURA 3 - CAMPOS DE ESTABILIDADE DOS MINERAIS DE FE E DE MN.
 FONTE: BIONDI (2003).

4 CONTEXTO GEOLÓGICO

O depósito de Fe e Mn do Urucum é reconhecido como um depósito sedimentar neoproterozoico, com rochas de atitudes sub-horizontais, que repousa sobre rochas metamórficas dobradas do Complexo Rio Apa, próximo ao limite sul do Cráton do Amazonas (WALDE & HAGEMANN, 2007) (FIGURA 4).

Haralyi & Walde (1986) descreveram que sobre o Grupo Jacadigo, repousa o Grupo Corumbá, subdividido nas Fm. Puga, Fm. Cerradinho e Fm. Araras. A Fm. Puga é constituída de paraconglomerados, com seixos de granito, quartzito, xisto e calcário, com cimento argilossiltoso, localmente arenoso. A Fm. Cerradinho expõe folhelhos, siltitos, arcósios e arenitos. Por fim, a Fm. Araras com calcários e dolomitos. Não há registro de metamorfismo para as rochas desse grupo.

A unidade mineralizada situa-se no Grupo Jacadigo, que tem como embasamento o granito Urucum e os metassedimentos do Grupo Cuiabá. É constituída pela Formação Taquaral, Formação Urucum e a Formação Santa Cruz (HARALYI & WALDE, 1986).

A Formação Taquaral é composta de rochas básicas intrusivas e básicas a intermediárias efusivas. A Formação Urucum, por sua vez, inicia-se com conglomerados polimíticos e grada para arcósios de cimento calcítico intercalados a lentes de calcário e siltitos (HARALYI & WALDE, 1986).

Para Haralyi & Walde (1986) a unidade mineralizada é a Fm. Santa Cruz que, devido sua importância econômica, foi dividida em dois membros, inferior e superior. O Mb. Inferior, chamado de Mb. Córrego das Pedras é formado por arcósios e conglomerados intraformacionais com cimento ferruginoso, lentes de jaspe ferruginoso, níveis de arcósios manganosos, hematita bandada e minério de manganês em lentes.

Há uma divisão de duas fácies para o Mb. Córrego das Pedras, marcando assim a transição da sedimentação clástica para a sedimentação química. A primeira fácies marca a sedimentação clástica na borda da bacia, com minério de manganês em nódulos e concreções em nível arcoseano ou mesmo conglomerático. Trata-se de minério de Mn com alto teor, com razão Fe/Mn igual a 1/7. A segunda fácies é transicional, passando de nódulos para níveis de arcósios manganíferos, em seguida lentes de criptomelano impura e, no centro, camadas de criptomelano

maciça de deposição química. À primeira fácies dá-se o nome de Fácies Rabicho, enquanto a segunda recebe o nome de Fácies Urucum (HARALYI & WALDE, 1986).

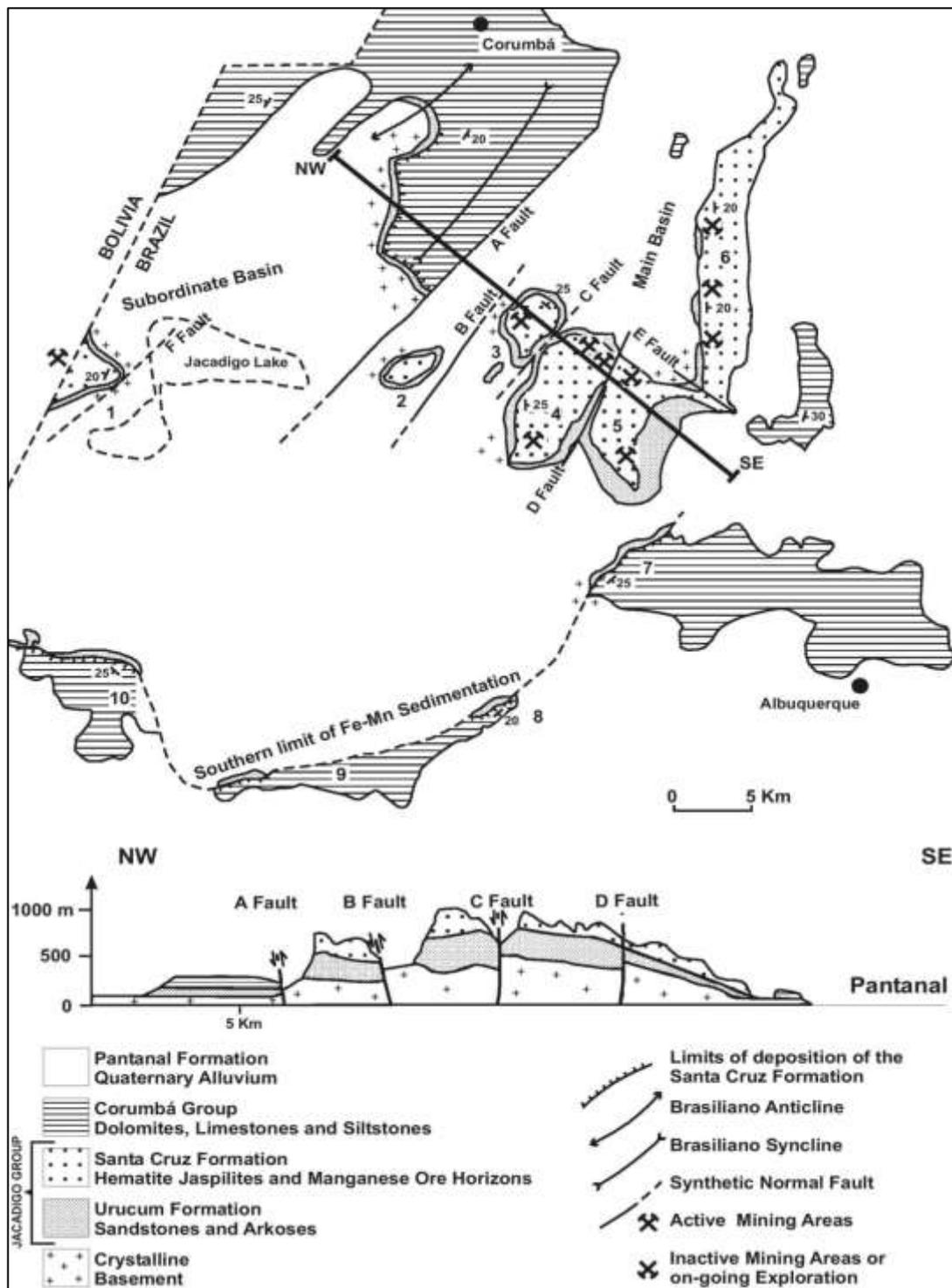


FIGURA 4 - ESBOÇO GEOLÓGICO-ESTRATIGRÁFICO-ESTRUTURAL DA ÁREA EM ESTUDO. FONTE: WALDE & HAGEMANN (2007).

O Membro Superior é constituído por rochas de deposição essencialmente química, com hematita fitada, que nada mais é do que um jaspilito com intercalações de arcósios, jaspe e camadas de minério de manganês. Esse Membro é conhecido como Banda Alta e foi dividido por Haralyi & Walde (1986) em 3 fácies. A primeira é a fácies Água Verde, com deposição de hematita com contribuição clástica. A segunda é a fácies Mucuru, a qual se constitui por sedimentação química estratificada. Fecha a sequência a Fácies Morro Grande, interpretada como estágio final de deposição com sílica coloidal, restando pouco Fe e Mn.

A explicação dada por Haralyi & Walde (1986) para essa sucessão de horizontes mineralizados em Mn seria o fim da glaciação. Esse evento traria o aporte de águas mais oxigenadas para a bacia, que elevaria a condição de Eh e passaria a depositar Mn em meio mais alcalino. Segue-se com redução do pH, fazendo a solução entrar apenas no campo de estabilidade dos minerais de Fe.

Urban et al. (1992), dividiram o Grupo Corumbá de outro modo, com apenas duas Formações, Cerradinho e Bocaina. No entanto os autores não deixam claro no que diferem essas Formações, já que descrevem rochas muito semelhantes nas duas unidades.

O Grupo Jacadigo foi dividido por Urban et al. (1992) em duas Formações, a Fm. Urucum e a Fm. Santa Cruz. Para esses autores a Fm. Urucum é formada de conglomerados e siltitos, seguido de 100 metros de folhelho negro e silito negro intercalados. No topo aparecem arenitos e siltitos com cimento carbonático. Já a Fm. Santa Cruz possui 80 metros de espessura e compõem-se de depósitos glaciomarinheiros e o primeiro dos quatro horizontes mineralizados em Mn com uma mudança do cimento carbonático da Fm. Urucum para óxidos de Fe e Mn na Fm. Santa Cruz. Os horizontes que se seguem, tem cada um suas características de tipo de minério e espessuras.

No mesmo trabalho, Urban et al. (1992) descreveram 3 tipos de minérios de Mn, relacionando cada tipo com os diferentes níveis mineralizados. O minério concrecionário compõe principalmente o horizonte Mn1. O minério detrítico marca o horizonte Mn1 e o topo dos horizontes Mn2 e Mn4. O minério maciço forma principalmente os horizontes Mn2, Mn3 e Mn4.

Walde & Hagemann (2007) usam outra separação para o Grupo Corumbá, com rochas dolomíticas na base, caracterizando a Formação Bocaina com siltitos e

argilitos encerrados na Formação Tamengo. Esta última é descrita com fósseis Ediacaranos nas proximidades de Corumbá.

Walde & Hagemann (2007) afirmam que o Grupo Jacadigo está em discordância angular sobre embasamento metamórfico Paleoproterozoico, constituído por xistos e gnaisses. Para esses autores, a divisão do Grupo Jacadigo se dá conforme descrito por Urban et al. (1992), embora não descrevam as unidades propostas da mesma maneira, colocando a Fm. Urucum na base, representada por sedimentação siliciclástica, com arcósios grossos e arenitos conglomeráticos. Para Walde & Hagemann (2007) a Fm. Santa Cruz recobre a Fm. Urucum de modo concordante, e é marcada por blocos de diferentes composições caídos em meio a extensos corpos de precipitados químicos e arcósios cimentados a Fe e Mn.

	Haralyi & Walde (1986)			Urban et al. (1992)			Walde & Hagemann (2007)				
N e o p r o t e r o z o i c o	Grupo Corumbá	Fm. Araras		Grupo Corumbá	Fm. Cerradinho		Grupo Corumbá	Fm. Tamengo			
		Fm. Cerradinho			Fm. Bocaina			Fm. Bocaina			
		Fm. Puga									
	Grupo Jacadigo	Fm. Santa Cruz	Mb. Banda Alta	Mn4 Mn3 Mn2	Grupo Jacadigo	Fm. Santa Cruz	Mb. Superior	Mn4 Mn3 Mn2	Grupo Jacadigo	Fm. Santa Cruz	Mn4 Mn3 Mn2
			Mb. Córrego das Pedras	Mn1			Mb. Inferior	Mn1			Mn1
		Fm. Urucum		Fm. Urucum		Fm. Urucum					
		Fm. Taquaral									
	Mais antigo	EMBASAMENTO									

QUADRO 2 - ESTRATIGRAFIA DA ÁREA DE INTERESSE SEGUNDO DIFERENTES AUTORES.

Em sua dissertação de mestrado, Freitas (2010) segue a mesma linha de raciocínio, usando entre outros argumentos os de Walde & Hagemann (2007) para situar a Fm. Urucum na base e a Fm. Santa Cruz no topo. Porém, Freitas (2010) não estuda a fundo a gênese dos depósitos, se atendo principalmente a um estudo sedimentar dessas unidades.

O Quadro 1 traz a síntese estratigráfica apresentada pelos diferentes autores citados. É notável que a evolução do pensamento geológico trouxe modificações para as propostas estratigráficas, muito mais na relação de descrição e nomes das unidades do que para as posições e idades que ocupam. Os horizontes manganíferos são marcados no quadro pelas posições relativas em que aparecem estratigraficamente, não sendo invertidos ou descritos de modos diferentes nos

trabalhos de referência, ou seja, a posição que esses horizontes ocupam são bem definidas.

Vários autores criaram modelos para explicar a gênese dos depósitos de manganês, porém todos os modelos têm deficiências ou mesmo necessitam de tantas variáveis que coincidam no tempo, que é difícil admitir que todas sejam satisfeitas ao mesmo tempo ou numa sequência lógica de eventos.

Segundo Haralyi & Walde (1986) os depósitos de manganês do Urucum são sedimentares, quase sempre associados a formações ferríferas bandadas (com exceção de Mn-1). Após sedimentados, geralmente foram concentrados residual e/ou supergenicamente por processos intempéricos. Os principais minerais de Mn dos depósitos da região do Urucum são a pirolusita, a criptomelano e a psilomelano.

Morfologicamente, os depósitos de ferro e manganês constituem platôs cujos topos, aplainados, estão entre 900 e 1000 m acima do nível do mar e cerca de 800 metros acima da planície do Pantanal. Formam um conjunto de morros que são nomeados individualmente, como Morraria do Rabicho, Morraria Morro Grande, Morraria Santa Cruz, Morraria do Urucum, Morraria da Tromba dos Macacos e Morraria do Jacadigo, localidades essas que são mineradas por diferentes companhias. Todos esses morros em conjunto são nomeados popularmente de morraria do Urucum.

Dorr (1945) chamou a atenção para 3 fatos que juntos tornavam esse depósito intrigante do ponto de vista genético: (a) Urucum ser um depósito de formação ferrífera bandada de classe mundial. (b) Essa formação ferrífera ser intercalada com depósitos de óxidos de manganês sedimentar e se tratar do maior já descoberto com essas características. (c) Essa formação ferrífera, de fácies óxido, ser Neoproterozoica. Decorrido muito tempo depois do trabalho do autor supracitado, são características que ainda não foram totalmente ou satisfatoriamente explicadas.

Urban et al. (1992) defendem um modelo baseado em dois estágios principais, um sinssedimentar e outro de enriquecimento supergênico. Para eles, o estágio sinssedimentar seria responsável por depositar as camadas Mn₂, Mn₃ e Mn₄, enquanto o enriquecimento supergênico levaria a formação de Mn₁ abaixo de toda a sequência.

O estágio sinssedimentar de Urban et al. (1992) seria explicado por uma bacia sedimentar com água em ambiente anóxico, isolada da atmosfera oxidante por

uma crosta de gelo, onde predominavam cátions Mn^{2+} e Fe^{2+} em solução, ambos mobilizados de material clástico já depositado em um momento de erosão glacial de regiões adjacentes. Quando as coberturas de gelo regrediram de modo rápido, o contato com a atmosfera faz com que as condições de Eh e pH fossem mudadas drasticamente. Esse seria o momento que a solução rica em Mn^{2+} , com pouco Fe^{2+} , oxidou-se, depositando tanto o Fe quanto o Mn em forma trivalente. Para esses autores, esse fenômeno se repetiu ao menos 3 vezes.

O estágio de enriquecimento supergênico, responsável pela formação de Mn1 situada na base da sequência mineralizada, é explicado por soluções meteóricas de lixiviação que adentram a unidade clástica inferior carregando ferro e manganês lixiviados das camadas sedimentares químicas situadas estratigraficamente em posições mais elevadas. O ferro, devido ao seu amplo campo de estabilidade, rapidamente precipita enquanto o manganês continua sua migração em direção as camadas mais inferiores. Quando a solução atinge a unidade sotoposta, com presença de carbonatos, vê as condições de pH serem drasticamente elevadas e assim precipita Mn como cimento (URBAN et al., 1992).

Outro modelo muito comentado, leva em consideração os aspectos tectono-estruturais que afetaram as rochas dessa região. A configuração de gráben, com diversas falhas normais cortando toda a região mineralizada é usada por diversos autores, entre eles Walde & Hagemann (2007), para justificar a entrada de fluidos hidrotermais enriquecidos preferencialmente em manganês, mas portando também ferro, que cimentariam as rochas ao seu redor, tornando-as, muitas vezes, com aspecto maciço. Justifica-se a aceitação dessa proposta pela presença de veios ricos em quartzo e turmalina e ainda pela presença de braunita, mineral de manganês que necessita de temperaturas mais elevadas para sua formação.

Uma forma mais simples de explicar a gênese do depósito de Fe e Mn do Urucum é assumir um modelo sedimentar exalativo e considerar que as variações dos conteúdos desses metais no registro estratigráfico é fruto de variações de Eh e pH, possivelmente relacionadas ao período *Snow Ball*, no qual grande parte da Terra esteve coberta de gelo, bem como as diferenças de concentrações de cátions ao longo de tempo. Modelo similar é defendido por Trompette et al. (1998).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Os dados usados para as descrições, interpretações e comentários acerca da gênese desse depósito foram os coletados em campo, como seções e perfis, associados a uma amostragem dos horizontes de interesse, fotografias das amostras para reconhecimento do tipo de minério e possíveis estruturas sedimentares presentes.

As informações de campo são sempre soberanas nos estudos de geologia, mas têm suas limitações. Surgem, então, outros métodos de estudos e observações que junto aos dados de campo tornam a análise mais robusta e amplia os horizontes de busca e interpretação.

Tendo isso em vista, o uso da mineralogia foi fundamental para atingir os objetivos traçados. O método analítico escolhido para acrescentar dados ao trabalho foi o da difratometria de raios x (DRX) pelo método do pó. Foram analisadas 82 amostras por esse método, culminando na construção de 82 difratogramas e a interpretação dos minerais contidos em cada amostra. Posteriormente foi feito novo conjunto de análises daquelas amostras que apresentavam algum tipo de zonamento composicional/textural, resultando em 10 novos difratogramas que complementaram a primeira fase de análises.

As amostras de mão foram serradas e lixadas a fim de mostrar o tipo de material amostrado e as estruturas sedimentares presentes. Depois foram fotografadas com escalas e suas imagens tratadas, para uso na correlação entre as composições das amostras.

As seções levantadas em campo foram digitalizadas por meio de programas de edição e construção de imagens e desenhos. Foram adicionados no mesmo arquivo as seções, os difratogramas, as fotos das amostras de mão e a síntese dos constituintes minerais das amostras. Os dados obtidos pela difratometria de raios x em cada amostra foram trasladados para as posições nas seções geológicas nas quais as amostras foram coletadas, em cada horizonte mineralizado. Cada ponto analisado também foi localizado nas amostras, possibilitando discutir o detalhe dos eventos geoquímicos mineralizadores.

Com esse material pronto, foi possível descrever as seções levando em consideração aspectos deposicionais, refletidos pela granulação das rochas

estudadas, e aspectos mineralógicos, com a composição de cada horizonte amostrado.

A união desses dois aspectos possibilitou tecer algumas considerações geoquímicas, sobretudo aquelas relacionadas à Eh e pH do ambiente, que apoiados sobre uma vasta literatura, possibilitam fazer alguns comentários quanto a gênese desse depósito.

5.2 MÉTODO

O método da DRX consiste na incidência de raios - X sobre uma pastilha de pó prensado que contém uma fração representativa da amostra coletada. Esses raios interagem com a estrutura cristalina do material analisado e difratam em diferentes ângulos. Um receptor fixo em um goniômetro, que se move em velocidade constante, captura as intensidades dos raios difratados e marca sua posição (ângulo 2θ) de captura. As posições desses raios são dispostas em um difratograma e junto com os picos de energia são comparados aos padrões de estruturas cristalográficas. Assim, a DRX é uma técnica analítica na qual os minerais constituintes de uma rocha são determinados com base em suas estruturas cristalinas.

Para que seja eficaz, essa técnica tem algumas condições a serem assumidas. Skoog et al. (2002) afirmam que a difração de raios X só ocorre se o espaçamento entre as camadas de átomos que constitui a amostra for igual ou muito próximo do comprimento de onda que incide sobre essa amostra e demanda (Lei de Bragg), ainda, que estejam distribuídos espacialmente num arranjo regular.

Os materiais cristalinos respeitam essa condição por apresentarem um ordenamento tridimensional dos átomos em células cujas dimensões são múltiplos dos comprimentos de onda dos raios X (SKOOG et al., 2002).

Para a análise DRX, foi necessário que as 82 amostras dos horizontes mineralizados fossem pulverizadas em painéis de carbetto de tungstênio. Normalmente a moagem dos materiais analisados por difratometria de raios X é feita em painéis de ferro, mas como se tratam de amostras de minério de Fe e Mn, o uso de tal equipamento poderia contaminar as amostras e comprometer os resultados.

Com as amostras pulverizadas, foram confeccionadas pastilhas de pó prensado, devidamente identificadas e posteriormente analisadas no difratômetro EMPYREAN, da marca Panalytical, que possui detector X'Ceerator. Com isso,

foram gerados os difratogramas de cada amostra, os quais foram interpretados sequencialmente no programa de análise *X'Pert Highscore Plus*, também da Panalytical, culminando na identificação dos minerais constituintes dessas rochas.

A análise de porções zonadas seguiu uma sequência diferente de preparo. As amostras foram selecionadas e o material foi coletado manualmente com o uso de um amostrador equipado com uma pequena broca rotativa. Essa forma de coleta de material já fornece o pó necessário para a análise, não sendo preciso fazer a pulverização. A quantidade utilizada para essas 10 análises foi menor devido à dificuldade de se amostrar as porções de interesse, que se apresentavam extremamente duras, fazendo com que, em alguns casos, a broca não conseguiu desgastar a amostra. Para esse tipo de amostragem, o recipiente onde o pó é armazenado e prensado é menor do que os porta amostras utilizados normalmente, mas o restante do processo igual.

Para estimar os volumes de cada espécie mineral em cada amostra, foi utilizado o método de quantificação de Rietveld. Esse método permite determinar semi-quantitativamente a presença de cada mineral na amostra, a partir da área total abrangida no difratograma por todas as raias dos picos de energia de cada fase mineral identificada, bem como a altura de cada pico. Esse método exige a aplicação de diversos filtros de modo a tornar a análise a mais fiel possível. Filtros de amplitude, comprimento de onda e também a comparação a padrões, modulam os gráficos e apresentam o resultado com uma porcentagem aproximada, semelhante a uma análise modal semi-quantitativa.

O preparo correto das amostras a serem analisadas influencia diretamente na qualidade dos difratogramas, bem como o modo de análise. Preparos corretos e precisos levam a difratogramas bem definidos, com picos nítidos, precisos e baixo *background*. No geral, foram observados gráficos representativos das amostras e a aplicação do método de quantificação de Rietveld foi simples e com resultados estimados confiáveis.

6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS DADOS

Neste capítulo serão apresentados os dados coletados e os comentários feitos partir dos resultados analíticos. A tabela 2 contém a síntese dos resultados analíticos e permite reconhecer padrões para as camadas mineralizadas a Mn.

A camada Mn1 apresenta a braunita e o criptomelano como principais minerais de Mn formados. A quantidade de Fe, sempre na forma de hematita e subordinadamente chamosita, é variável, fato esse observado, também, para o quartzo. Quando comparada a mineralogia dos diferentes locais onde essa camada é reconhecida, nota-se que a holandita está relacionada a processos intempéricos enquanto a braunita, por demandar maior temperatura no momento de sua formação, pode estar relacionada tanto à diagênese quanto a um metamorfismo que pouco é descrito na literatura.

Na camada Mn2 observa-se que o criptomelano é o mineral de Mn frequentemente encontrado, mas em pelo menos um ponto (COR-62) foi encontrado braunita. Sempre em paragênese com o criptomelano, a hematita ocorre em porcentagens que não ultrapassam 35% da rocha, porém há quartzo, descrito apenas localmente, geralmente nos trechos com pouco ou nenhum manganês. A holandita é descrita apenas no Morro do Urucum, na mina da Cia. VALE, não sendo encontrada na área da mina da Cia. MMX, motivo pelo qual foi considerada um produto de intemperismo.

A camada Mn3 registra o criptomelano como principal mineral de Mn formado, porém a frequência e quantidade de hematita encontrada nessa camada é tal que reproduz a abundância de Fe disponível na solução quando da precipitação. O quartzo é descrito subordinadamente e em quantidades pequenas. A ausência de quantificação para algumas amostras não permitem a generalização para todas as posições na camada, mas é possível dizer que o quartzo ocorre em Mn-3 mais frequentemente e em maiores quantidades quando comparados à Mn2.

A seguir serão apresentadas as seções com os dados observados em campo associados aos resultados analíticos e às imagens das amostras, a partir das quais são descritas a sucessão deposicional e mineralógica observada. Todas as seções possuem aspectos mineralógicos e deposicionais bastante marcantes e com implicações genéticas.

6.1 SEÇÃO 1- CAMADA Mn1 (FIGURA 5)

A seção inicia com sedimentação clástica a clastoquímica, passando de uma paragênese com quartzo + microclínio + hematita + albita para uma paragênese de hematita + quartzo apenas (FIGURA 5).

Após a sedimentação de ferro, em pouca quantidade, na forma de hematita, inicia-se a sedimentação química de manganês na forma silicática, representada pela braunita, passando a criptomelano e retornando à paragênese na qual a braunita predomina.

Fecha a seção uma sedimentação química que avança sobre uma sedimentação clástica cimentada por hematita, com *dropstones* e composições arcossianas.

É notável nesta seção a mudança no ambiente deposicional, passando de uma situação onde predominam os sedimentos clásticos para uma situação onde a sedimentação química prevalece. Essa mudança pode estar relacionada a uma elevação do nível de água da bacia e a separação do Fe e do Mn pode ter ocorrido na oxiclina, situada no encontro das zonas freáticas da água oceânica com o da água continental, oxidante.

Seção 1

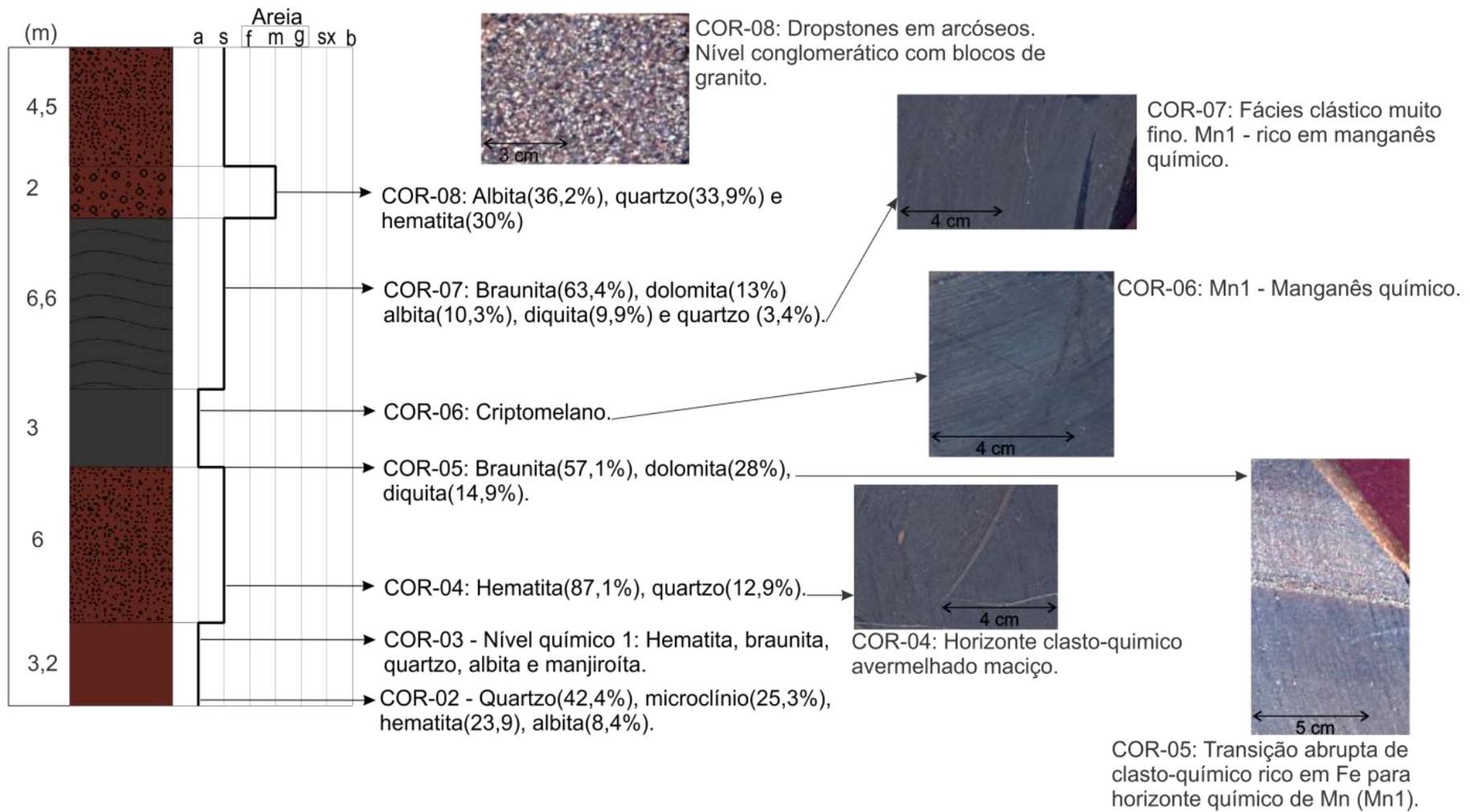


FIGURA 5 – SEÇÃO 1 CONTENDO A CAMADA MANGANESÍFERA Mn1.

6.2 SEÇÃO 2 – CAMADA Mn1, MINA FIGUEIRINHA (FIGURA 6)

Esta seção, mostrada na figura 6, inicia com arcósios compostos de quartzo, braunita, albita, cancrinita e ankerita. Seria um ambiente de sedimentação clástica que, pouco acima, passa a ser principalmente química, com a deposição de criptomelano e braunita separadas. Essa separação pode ser entendida por diferentes condições de Eh e pH da solução mineralizada, uma vez que a braunita é mais oxidada que o criptomelano.

Sobre Mn1 houve um fluxo de clastos graníticos e fragmentos de rochas sedimentares químicas que são cimentados por ferro. Essa alternância de sedimentação química e clástica grossa pode ser relacionada com a evolução da bacia sedimentar em seus estágios iniciais, quando durante períodos de tectonismo houve sedimentação grossa, mas com contribuição química em momentos quiescentes.

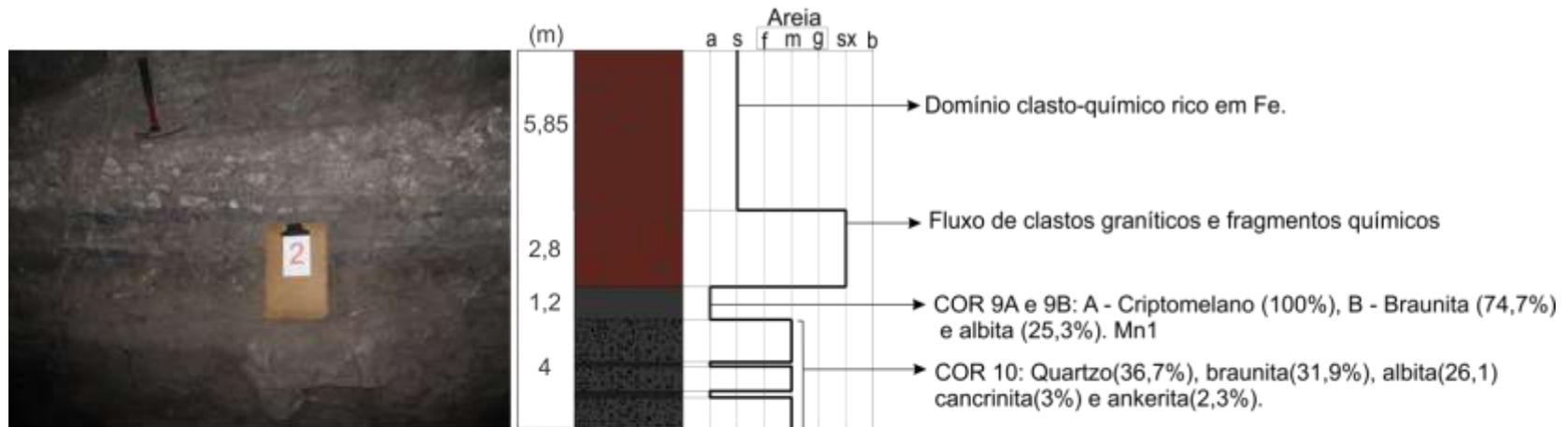
6.3 SEÇÃO 3 – CAMADA Mn1 – Mina São domingos (FIGURA 7)

Esta seção contém os 3 níveis de Mn que constituem a camada Mn1 na mina São Domingos, da Cia VALE. A base é marcada por uma sedimentação clastoquímica que precipita Mn, elemento representado na forma de holandita, mas com pequena participação de hematita, formando um nível laminado (FIGURA 7). Segue-se uma sedimentação clástica na qual arcósios são formados sob a cimentação de hematita, pirolusita e chamosita.

Após essa sedimentação clástica, é retomada a precipitação química de Mn, principalmente na forma de holandita, mas também como criptomelano no topo e criptomelano + braunita na base. Toda essa seção tem participação de Fe subordinada, com início e fim clástico arcoseano. A seção termina com uma espessa camada de Fe e Mn, mas aqui a hematita predomina sobre a chamosita.

A grande variação mineralógica dessa seção pode ser relacionada a diferentes condições de Eh/pH associados à quantidade de íons disponíveis no sistema, maior aporte de águas oxigenadas e eventos de sedimentação grossa que perturbam o meio. Mn1, com seus 3 níveis, se formaria assim, no limite da oxiclina que se forma no contato da água oxidante continental com a água marinha.

Seção 2 - Mn1 - Mina Figueirinha



COR-10: Mn1 - Minério detritico, friável, de granulação silte. No intervalo da amostra ocorre dois horizontes de 25cm de minério maciço.



COR-9A: Mn1 - Minério maciço



COR-9B: Mn1 - Transição do minério maciço (COR-9A) para arcóseo manganêsífero

FIGURA 6 – SEÇÃO 2 MOSTRANDO A CAMADA Mn1 EM LOCAL PRÓXIMO A MINA FIGUEIRINHA.

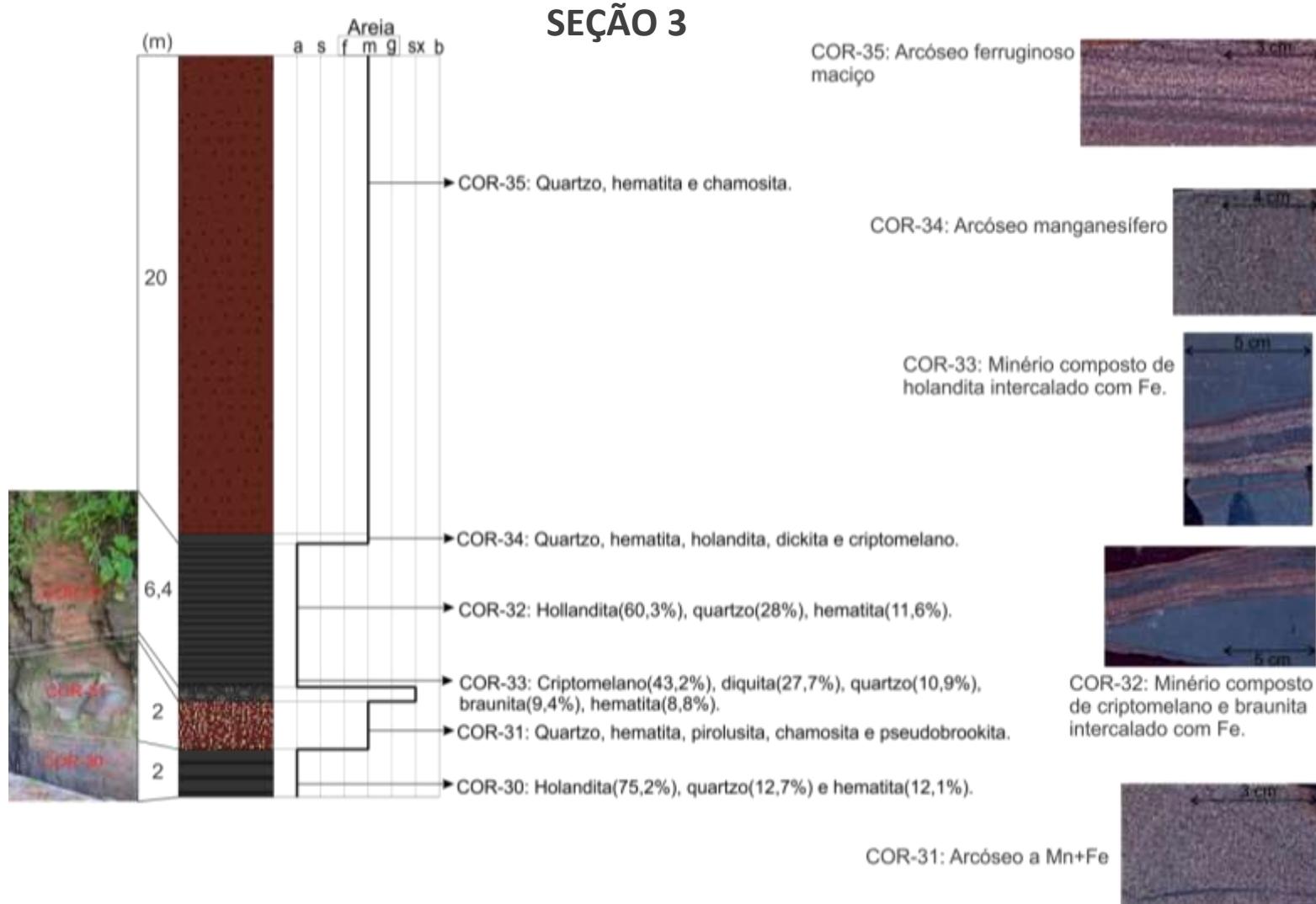


FIGURA 7 – SEÇÃO 3 COM AS CARACTERÍSTICAS MINERALÓGICAS DE Mn1.

6.4 SEÇÃO 4 – CAMADA Mn1 – MINA FIGUEIRINHA (FIGURA 8)

Essa seção foi montada a partir da descrição das rochas de 3 galerias da mina Figueirinha, todas abertas no horizonte manganésífero Mn1 (FIGURA 8).

Na galeria 1 a base do horizonte mineralizado inicia com contribuição de Fe e Mn à sedimentação clástica, porém em quantidade não maior que 25% para Fe e 20% para Mn. Já a porção intermediária é o nível manganésífero propriamente dito, com dolomita presente, indicando condições físico químicas levemente alcalinas. Os minerais de Mn encontrados foram a braunita e o criptomelano, que fazem paragênese com a dolomita. Cabe salientar que a granulação do minério aqui é mais grossa que nas demais seções, com porções de silte e até areia, localmente.

A seção termina quando houve sedimentação grossa de arcósios conglomeráticos cimentados por Fe.

A galeria 2 traz uma seção pequena, mas que revela importantes detalhes quanto a Mn1. Da porção basal até a porção intermediária da seção predomina a sedimentação química, culminando em minério maciço constituído de criptomelano. Nessa posição, foi encontrado ankerita, carbonato de Fe, que traz aqui a possibilidade dessa camada manganésífero ser formada na oxiclina de encontro da água continental oxidante com a água marinha levemente redutora, depositando Mn nessa interface. O topo da seção é marcado por sedimentação grossa de arcósios ferruginosos.

A galeria 3 reflete uma sedimentação clastoquímica onde quartzo e hematita figuram em todas as paragêneses. Na base a rocha é grossa, com aspecto brechado, mas afina para o topo até atingir uma sedimentação química resultando em jaspilites maciços com bandas e nódulos de sílica.

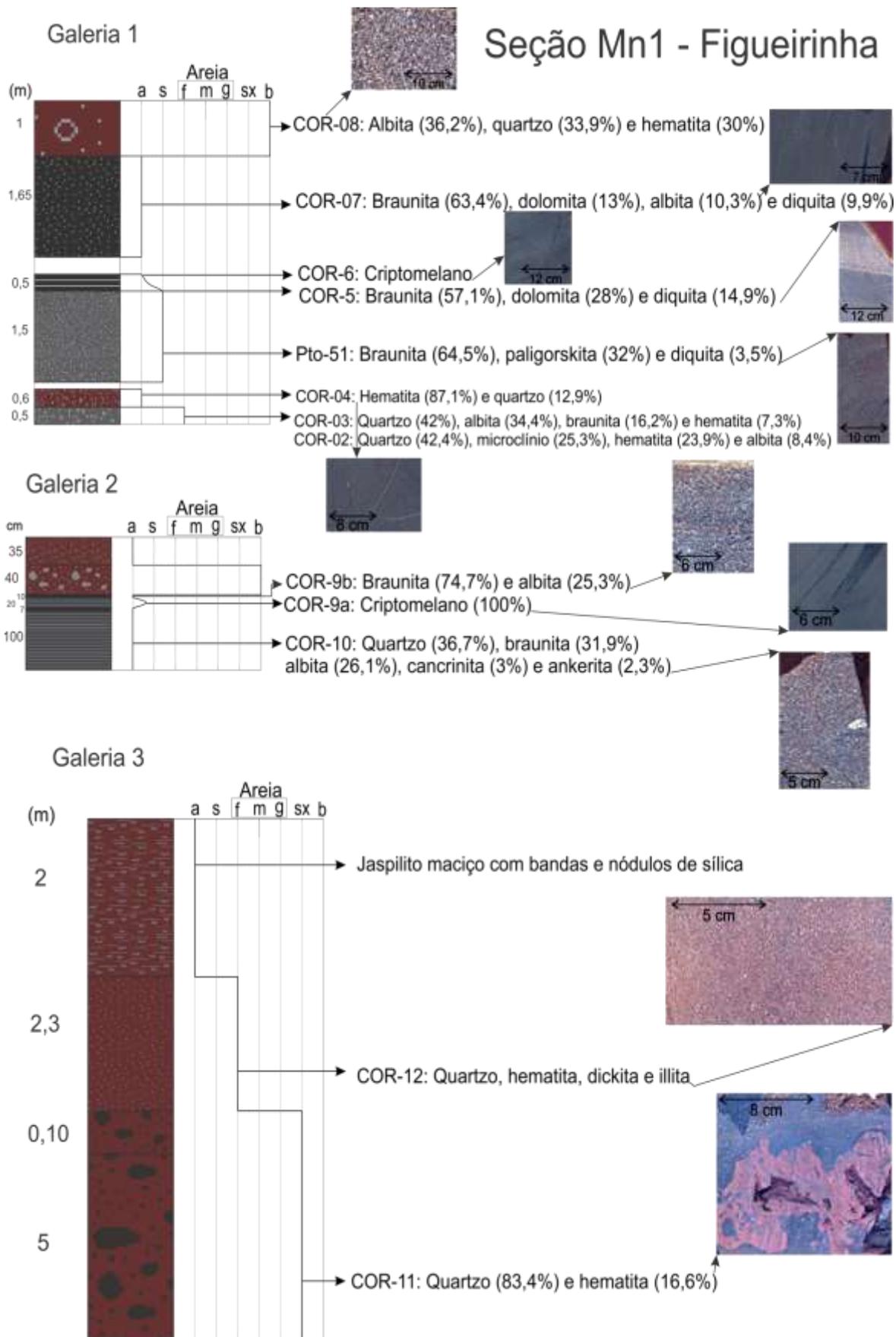


FIGURA 8 – SEÇÕES LEVANTADAS EM 3 GALERIAS DA MINA FIGUEIRINHA COM AS CARACTERÍSTICAS DE Mn1.

6.5 SEÇÃO 5 – CAMADA Mn₂, MINA DA CIA VALE (FIGURA 9)

Esta seção é característica do nível manganífero Mn₂ na mina da Cia VALE. A base é marcada por arcósio ferromanganífero seguido por arcósio com maior concentração de criptomelano sobre hematita (FIGURA 9).

A camada Mn₂ propriamente dita é uma camada de precipitado químico com criptomelano, hematita e braunita. Aqui a camada manganífera também se forma após a precipitação de grande quantidade de Fe, tornando a solução enriquecida em Mn. Por sua vez o Mn precipita junto a algum ferro, já que o seu amplo campo de estabilidade permite esse comportamento. Acima de Mn₂, volta o arcósio cimentado por Fe, de granulação que chega até areia média.

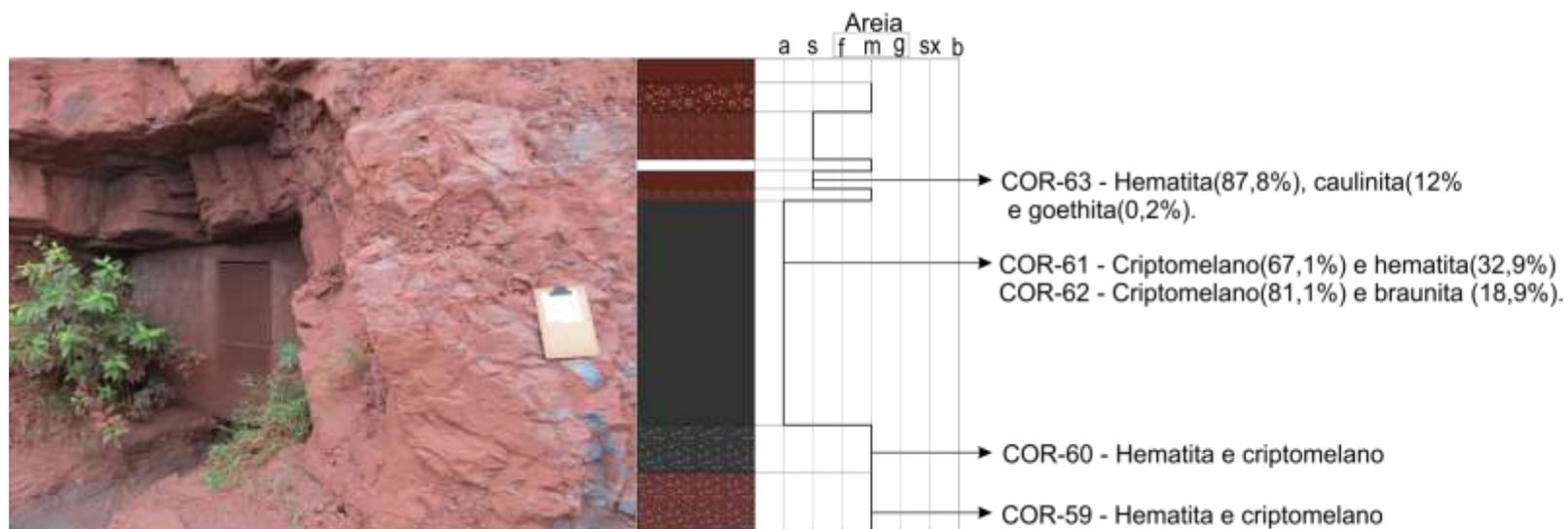
6.6 SEÇÃO 6 – CAMADA Mn₂ – Mina da VALE (FIGURA 10)

Esta seção representa também o horizonte manganífero Mn₂, com uma variação lateral dos minerais de Mn que o compõem (FIGURA 10).

A seção inicia com a precipitação de holandita e hematita, com a primeira em porcentagem muito maior que a segunda. Já na porção intermediária e superior de Mn₂, o criptomelano é o principal mineral, o que torna o horizonte com teores elevados de Mn quando comparadas aos de Fe. Tal variação da concentração de Mn representa uma mudança de Eh e pH no momento de deposição, bem como a disponibilidade de outros elementos como bário na holandita e potássio no criptomelano.

A seção termina com a retomada da sedimentação clástica, com hematita, quartzo e caulinita, que pode representar um aporte de sedimentos grossos simultâneo à cimentação química.

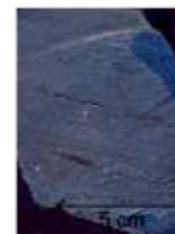
SEÇÃO 5



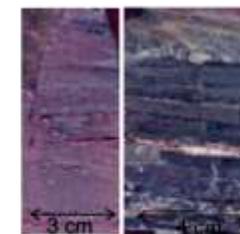
COR-59: Arcóseo ferromanganesífero muito duro



COR-60: Mn2a arcóseo manganesífero duro



COR-62: Mn2b manganês maciço com laminação discreta e esparsas estruturas em amêndoas



COR-63: Jaspilito duro

FIGURA 9 – SEÇÃO 5 COM A REPRESENTAÇÃO DO NÍVEL Mn2 NA MINA DA CIA VALE

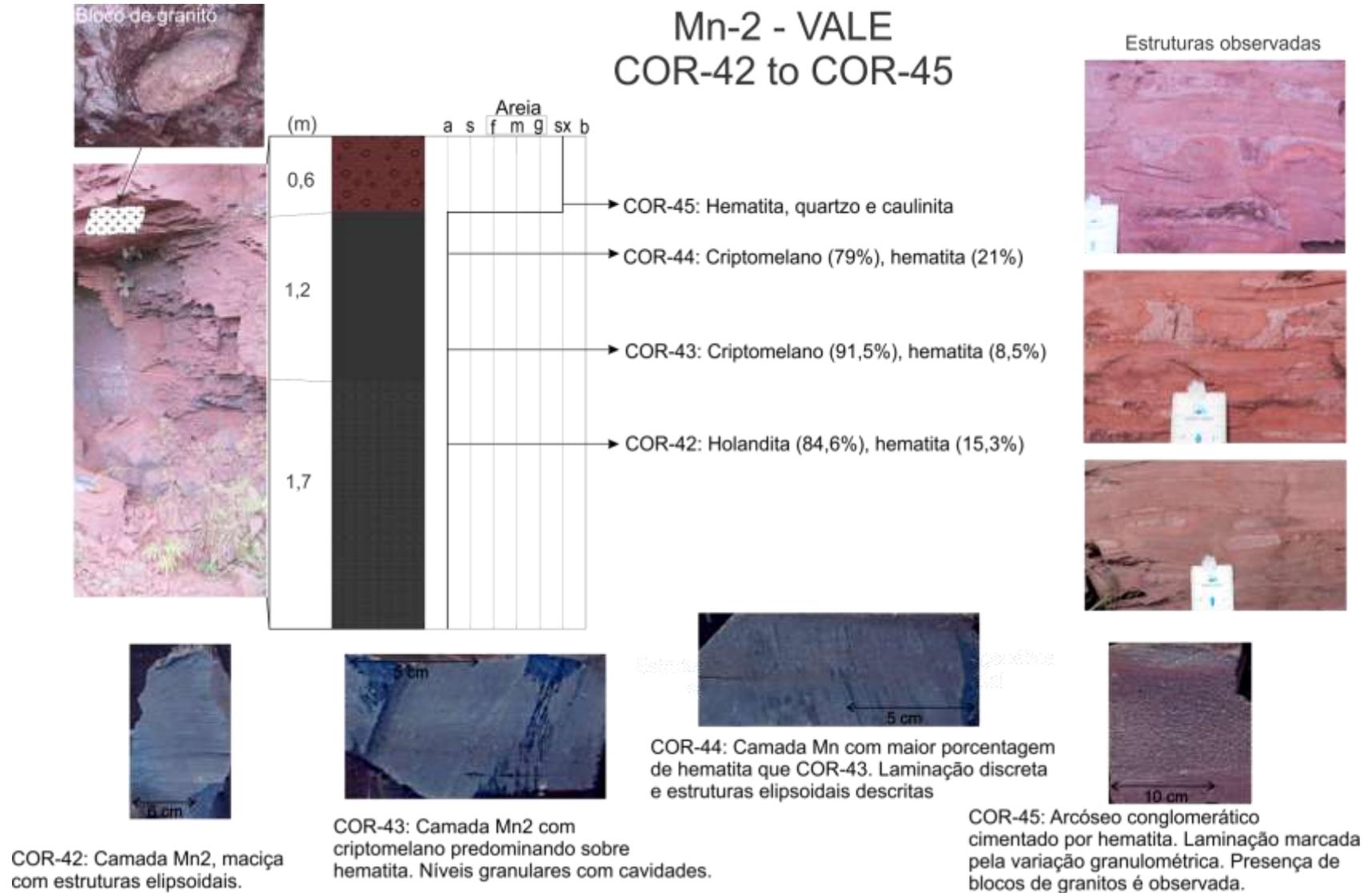


FIGURA 10 – SEÇÃO DA CAMADA Mn₂ NAS IMEDIAÇÕES DA ÁREA MINERADA PELA VALE

6.7 SEÇÃO 7 – CAMADA Mn2 VALE(FIGURA 11)

A base da seção é marcada por arenitos e arenitos arcoseanos ricos em Fe que gradam para nível químico onde inicia a precipitação de Mn como criptomelano, holandita e chamosita (FIGURA 11).

Esse nível químico tem participação de Fe somente em sua base, pois logo acima não foi identificado nenhum mineral de Fe. Sobre isso pode ser dito que o Fe foi retirado da solução até que houvesse condições para precipitação de Mn. Quando essas condições foram satisfeitas, havia pouco Fe e assim a camada Mn₂ pode se formar com estrutura maciça a suavemente laminada com algumas feições nodulares, com alguma hematita na base, que se torna cada vez mais rara até que a camada se apresente apenas como manganês.

Fecha a seção o retorno da contribuição clástica com a sedimentação que gerou arenitos arcoseanos cimentados por Fe, o que indica a entrada de Fe no sistema, bem como maior aporte de clásticos.

6.8 SEÇÃO 8 – CAMADA Mn3, MINA DA VALE (FIGURA 12)

Esta seção traz as características da camada Mn₃ (FIGURA 12). A base apresenta arenitos cimentados por ferro e à medida que se tornam mais finos aumenta a quantidade de Mn precipitado. Esse elemento precipita na forma de criptomelano até atingir um nível essencialmente químico, onde Fe e Mn precipitam quase na mesma proporção, com Fe na forma de hematita e Mn na forma de criptomelano.

Após essa camada essencialmente química, abruptamente ocorre uma camada clástica conglomerática com matacões de granito. Essa camada tem como principais minerais a hematita e o quartzo.

No topo da seção retorna a sedimentação química, mas agora apenas de Fe e sílica, sem contribuição de Mn, com desenvolvimento de bandas silicosas e nódulos de sílica que atestam seu caráter essencialmente químico. A ausência de Mn deve-se ou ao empobrecimento da solução nesse elemento, ou a condições de Eh e pH não favoráveis à deposição de Mn.

Seção Mn-2 - VALE COR-36 a COR-40

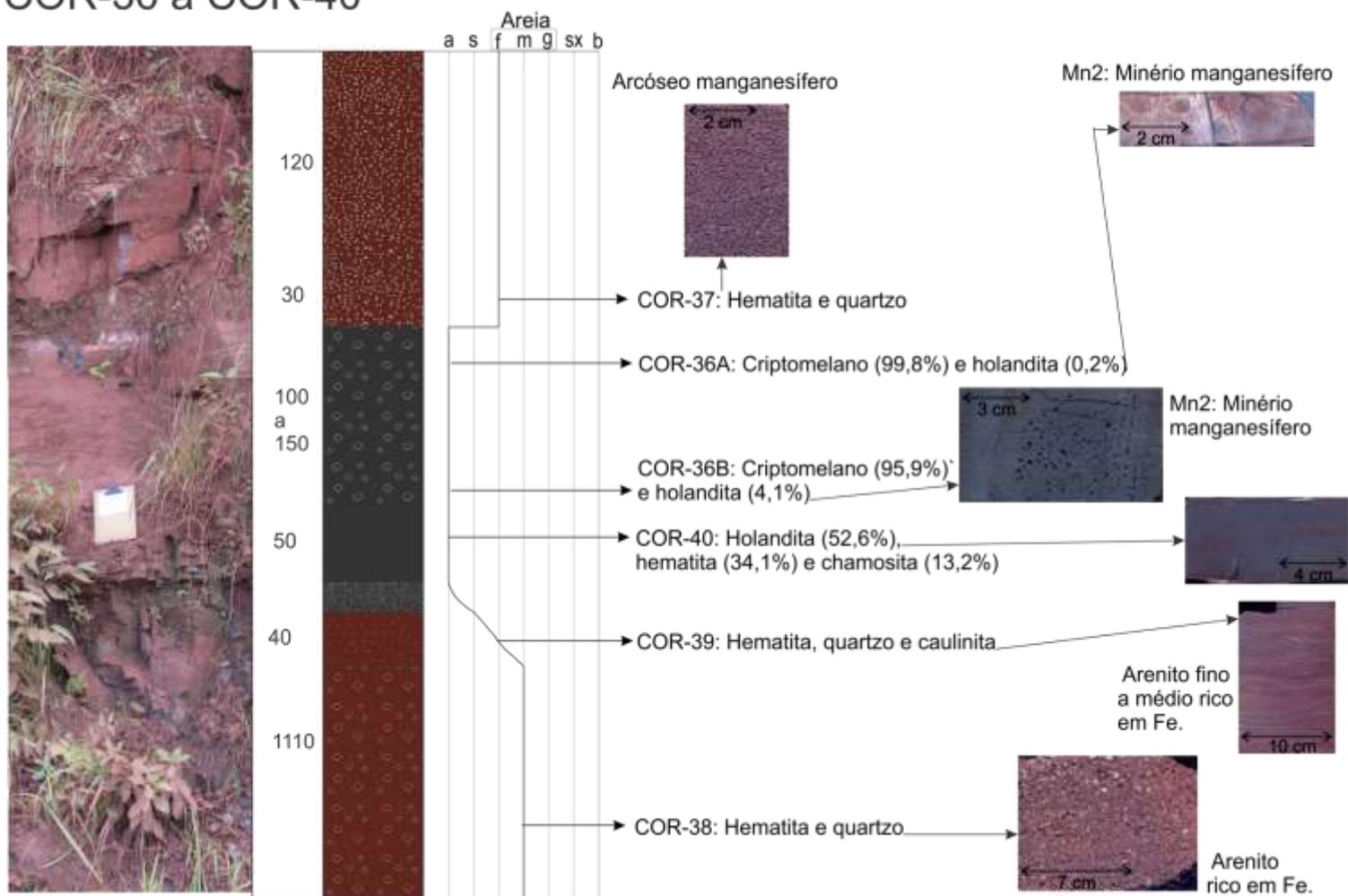


FIGURA 11 – SEÇÃO QUE RETRATA AS CARACTERÍSTICAS DE Mn2.

Seção Mn-3 VALE

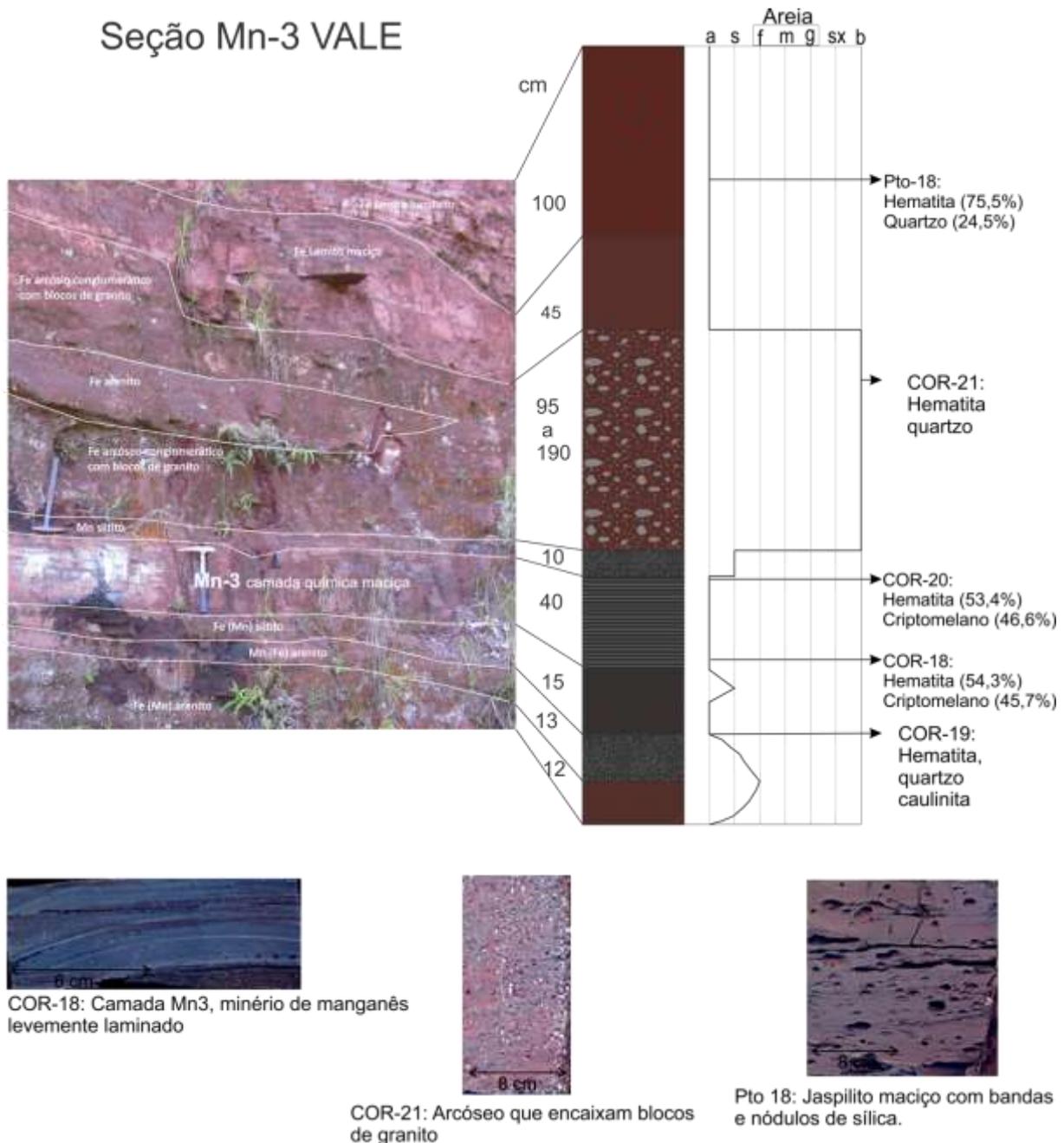


FIGURA 12 – SEÇÃO Mn3 NAS IMEDIAÇÕES DA MINA DA VALE

6.9 SEÇÃO 9 – CAMADA Mn3 (FIGURA 13)

Apesar da variação granulométrica marcada nesta seção, a sedimentação química tem papel importante quando se consideram os minerais de cada nível. A base da seção é marcada por jaspilites e arenitos hematíticos com lentes e nódulos de sílica, rochas essas que são laminadas, com estrutura marcada pela variação granulométrica das lâminas e pela maior ou menor contribuição química. Localmente

essas rochas são maciças e marcam uma deposição química proeminente (FIGURA 13).

A porção intermediária da seção apresenta o nível manganésífero Mn₃, com um fino horizonte granuloso no início da camada, seguido por sedimentação de criptomelano e hematita de modo laminado. Essa descrição denota a grande quantidade de Mn disponível na solução e a mudança da relação de Eh/pH mais favorável para a sedimentação de Mn, que antes não era possível. É importante ressaltar a grande quantidade de hematita, por volta de 90%, imediatamente antes de entrar no horizonte manganésífero. É essa intensa retirada de Fe da solução, e o conseqüente enriquecimento residual em Mn, que saturou a água e pode ter criado condições para a deposição do Mn.

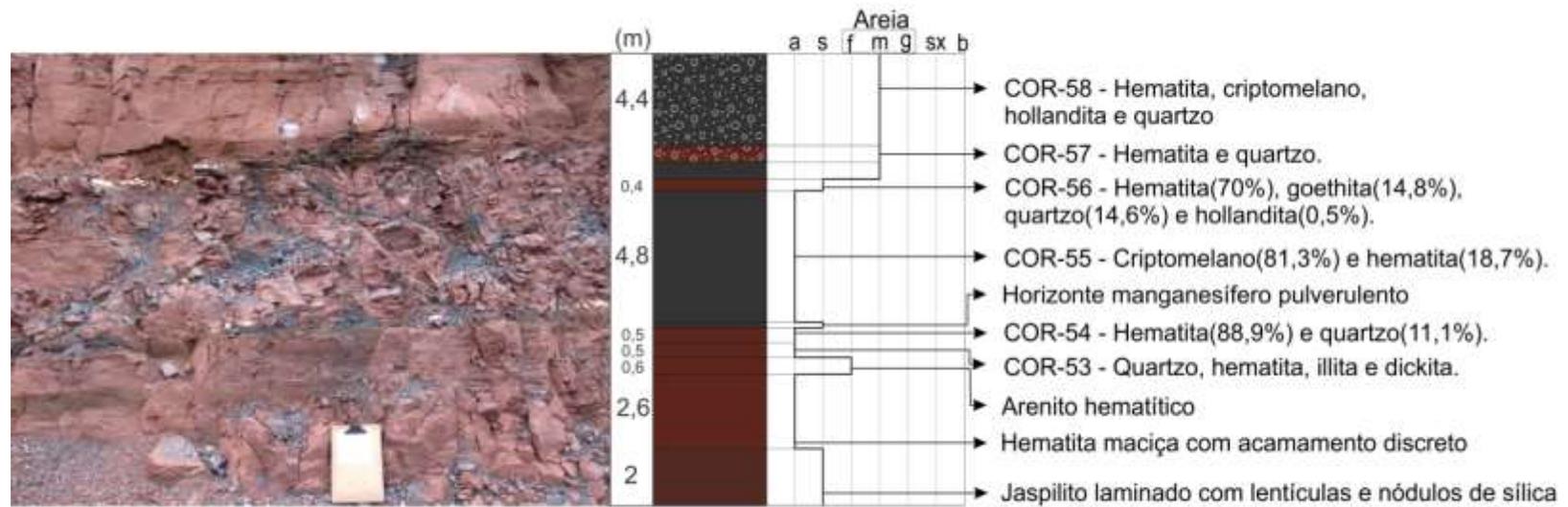
A partir de Mn₃, volta uma sedimentação com predomínio de Fe e pouco Mn, relacionada a um maior aporte de sedimentos clásticos com granulação na faixa da areia média. Isso pode ser explicado por um evento regressivo que levaria sedimentos mais grossos para porções mais distais na bacia.

6.10 SEÇÃO 10 – CAMADA Mn₃ (FIGURA 14)

A figura 14 mostra horizontes de sedimentação clastoquímica com dois horizontes puramente químicos. A base da seção mostra uma contribuição clástica maior, enquanto no topo, apesar da granulação da rocha ser areia média, o cimento hematítico evidencia uma contribuição química bem marcada.

No meio a essa unidade eminentemente ferruginosa situa-se a camada Mn₃, constituída de hematita e criptomelano. Essa variação pode ser explicada pela abundância desses elementos na solução e a ausência de um mecanismo que segregasse Fe e Mn de maneira mais eficiente.

Seção 9



COR-53: Hematita laminada



COR-54: Chert hematítico vermelho

COR-55: Mn₃, Mn metálico, maciço, com amêndoas envolvidas pela laminação

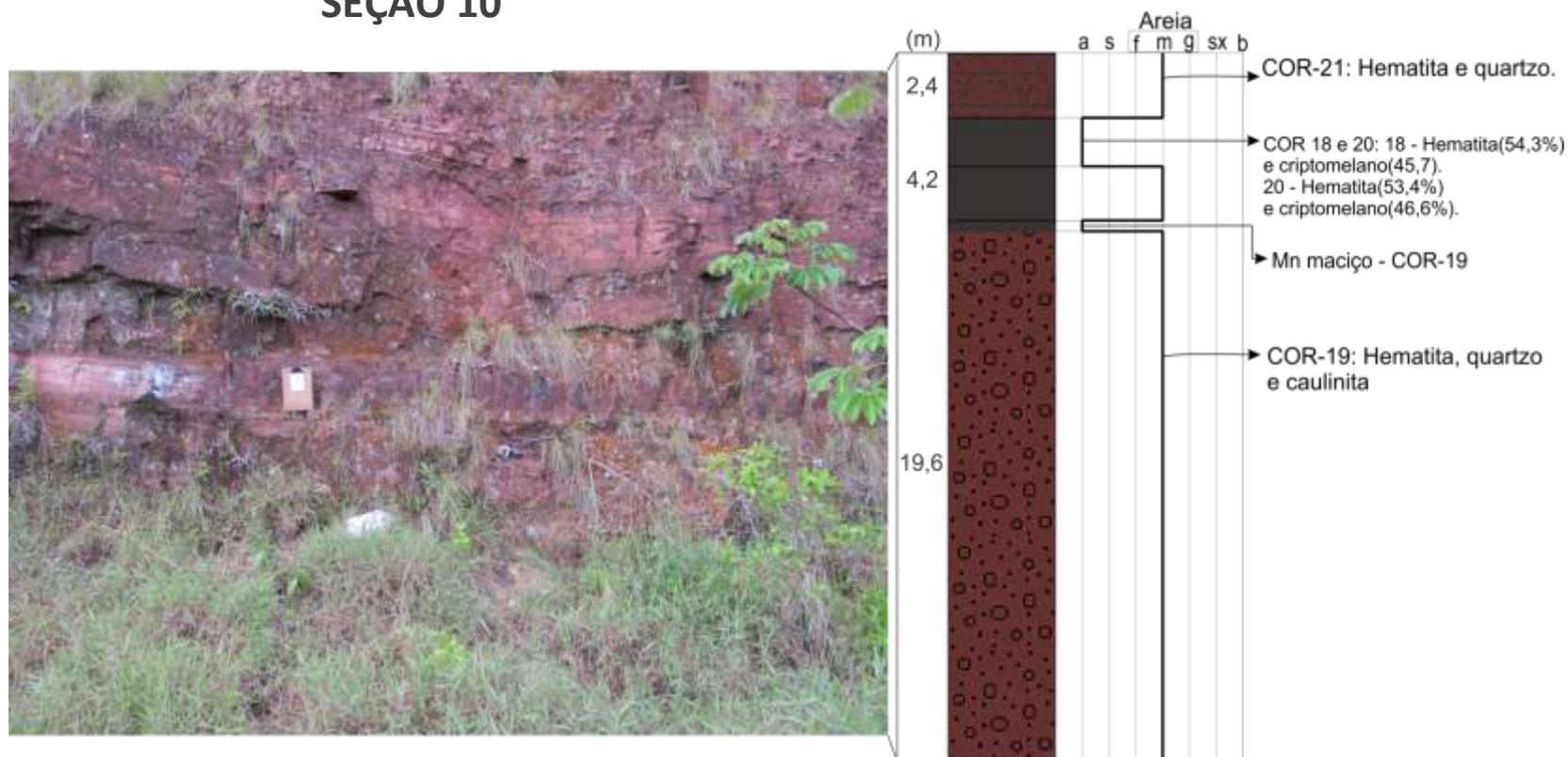
COR-57: Arcóseo duro com lâminas de chert ferruginoso em matriz preta



COR-58: Arcóseo preto, manganífero, cimentado por Mn metálico.

FIGURA 13 – SEÇÃO 9 E OS ASPECTOS DE Mn₃.

SEÇÃO 10



COR-21: Dropstones
em meio arcóseo laminado



COR-18: Camada Mn3

FIGURA 14 - SEÇÃO 10 E AS CARACTERÍSTICAS DE Mn3.

6.11 SEÇÃO 11 – CAMADA Mn3 (DETALHE) – MINA DA VALE (FIGURA 15)

Nesta seção são retratados detalhes de Mn3, com uma amostragem menos espaçada (FIGURA 15). Embora essa menor distância entre as amostras pudesse mostrar rochas de características semelhantes, não é isso que se observa. Na realidade foi descrita uma rica variação mineralógica em relação às proporções de Fe e Mn.

Na base aparecem jaspilitos com bandas e nódulos de sílica que englobam camadas milimétricas de Mn maciço. Segue-se uma camada de pouco mais de 1 cm de hematita, quartzo e goethita em quantidades semelhantes.

Logo acima o Mn se faz presente na forma de criptomelano e a seguir holandita. Nesses níveis com Mn a quantidade de goethita é sempre maior que a de hematita, fato esse que deve estar relacionado ao intemperismo dessas rochas.

Antes de atingir a camada onde há apenas Mn, há um nível de 1 a 2 cm de hematita. Na camada Mn3 propriamente dita foram observadas criptomelano e braunita, numa estrutura maciça com nódulos elipsoidais centi- a decimétricos disseminados em toda a camada.



FIGURA 15 – DETALHE DE Mn3 NA REGIÃO DA MINA DA VALE

7. CONCLUSÕES

A descrição das seções, associadas aos resultados de difratometria de raios x das amostras dos horizontes mineralizados permitiu a observação das características mineralógicas e deposicionais. Com base nas características mineralógicas é possível tecer diversos comentários com relação às condições físico-químicas ambientais no momento da deposição. Por sua vez, as características deposicionais descritas trazem mais um parâmetro de grande importância para a discussão, de modo a contribuir com as explicações para as variações mineralógicas.

De modo amplo, todos os horizontes manganésíferos são essencialmente químicos, com as camadas sotoposta e sobreposta sempre de granulação maior. Tal fato pode estar relacionado a episódios tectônicos que promovem a chegada de material clástico grosso a posições distais na bacia, bem como atividades hidrotermais responsáveis por repor as quantidades de Fe e Mn na água oceânica.

A camada Mn1 possui variações laterais, já que na mina Figueirinha é descrita uma passagem de minério com granulação fina composto predominantemente de criptomelano para minério clástico fino no qual a braunita se apresenta em maior quantidade (Seção 1 - FIGURA 5). Em outra porção da mina Figueirinha, as características descritas foram diferentes, com minério detrítico e filmes de precipitação química, compostos de criptomelano e braunita (Seção 10 - FIGURA 10). Quando comparados ao depósito de São Domingos, as características mineralógicas são distintas, pois nesse local a holandita, produto de intemperismo, ocorre em maior quantidade e a deposição foi principalmente química (Seção 4 - FIGURA 8).

Analisando a camada Mn2, primeiramente na mina da Cia. MMX, esta foi descrita como um precipitado químico rico em criptomelano, braunita e hematita, em uma estrutura maciça com estruturas amendoadas esparsas (Seção 10 - FIGURA 10). A camada Mn2 observada na mina da Cia. VALE difere da anterior por apresentar níveis granulares, clásticos, em meio a um grande horizonte composto por precipitado químico, onde apenas criptomelano e hematita foram descritos (Seção Mn2 - VALE - FIGURA 11).

Passando à camada Mn3, na mina da Cia. MCR - Santa Cruz (FIGURA 7), essa camada é descrita como uma intercalação de material químico envolvendo um

nível de material clástico, semelhante a Mn2 não só deposicionalmente, mas também quando comparado a mineralogia, com criptomelano e hematita como principais minerais dessa camada. Assim como observado em Mn2, a variação lateral de Mn3 passa de uma precipitação química com contribuição clástica para uma precipitação essencialmente química. , A Seção 9, da Cia. MMX (FIGURA 9) apresenta esse nível químico, com criptomelano e hematita. Na mina da Cia. VALE (FIGURA 12), as descrições feitas são semelhantes às feitas para a mina da Cia. MCR - Santa Cruz, com precipitação química e contribuição de níveis clásticos, onde hematita e criptomelano predominam.

A comparação dos níveis Mn1, Mn2 e Mn3, deixam claro o caráter detrítico de Mn1 e químico de Mn2 e Mn3. , Para justificar essas diferenças, é preciso relacionar processos genéticos diferentes para essas camadas. As camadas Mn2 e Mn3, por sua vez, tiveram gênese muito semelhante entre si, com diferenças locais de estrutura, com estruturas amendoadas e elipsoidais mais marcadas em Mn2 e laminações bem desenvolvidas em Mn3. Do ponto de vista mineralógico, são semelhantes, exceto pela presença local de braunita.

De posse de todos os dados aqui apresentados, apoiados pelas informações procedentes da bibliografia regional e específica para os comportamentos do Fe e do Mn, é possível dizer que um dos principais mecanismos que permitiram a gênese desse depósito como descrito atualmente, com camadas de manganês depositadas em meio a rochas cimentadas por ferro ou mesmo jaspilitos, é a constante variação das condições de Eh e pH da solução que continham esses elementos, relacionado com a posição em que foram depositados na bacia.

Essa variação pode estar relacionada com as inconstâncias ambientais admitidas para essa região, sujeita a movimentações tectônicas que promoviam variações da profundidade da lâmina d'água, maior ou menor aporte de material siliciclástico e a constante atividade vulcânica responsável por repor as quantidades de Fe e Mn já precipitados possibilitando, assim, a deposição de novas camadas mineralizadas.

A variação textural das rochas observadas em cada nível mineralizado, está vinculada à sua posição na bacia, com as porções detríticas e granulares nas bordas e os níveis principalmente químicos em um ambiente distal, no centro, no qual seixos e grânulos são encontrados graças apenas à influência glacial.

É importante ressaltar aqui que a variação climática a que essa região esteve submetida, com ao menos dois episódios de degelo, foi responsável por tornar a água do mar oxidante. O descongelamento da superfície foi responsável por desfazer o isolamento da água do contato com a atmosfera. Foi o degelo episódico e o contato com a atmosfera que oxidou Fe^{2+} para Fe^{3+} e levou à intensa deposição de ferro, seja como cimento de rochas clásticas, seja como jaspilites que hospedaram as camadas manganésíferas. Esse fato levou ao empobrecimento da solução em Fe e concentrou Mn. Em seguida, a regressão do gelo de maneira rápida expôs a solução enriquecida em Mn à atmosfera oxidante e levou à precipitação das camadas de Mn, que se dão, geralmente, como precipitados químicos maciços e localmente como cimento de rochas siliciclásticas finas. Esse processo pode ser admitido para a gênese tanto de Mn2 quanto de Mn3.

O mesmo processo não explica a deposição de Mn1, pois este nível ocorre em meio a rochas siliciclásticas sem vestígios da participação de Fe. Desse modo, para o horizonte Mn1 é admitido que a água da zona freática marinha, rica em Mn, avance até que ocorra o encontro com água da zona freática continental, oxidante. Neste ponto, o contraste físico químico das duas soluções leva à precipitação de Mn em meio a rochas clásticas grossas. Lateralmente essa camada tem variações granulométricas, mas que deve ser entendida como o avanço da oxiclina para porções mais distais da bacia. A maior ocorrência de braunita nessa camada pode ser explicada pelo processo de diagênese, suficiente para atingir temperatura na qual a braunita ocorra, graças à coluna de sedimentos sobreposta a Mn1.

As condições favoráveis à deposição de Mn terminam sempre com um evento de alta energia que traz sedimentos mais grossos, geralmente areia média, mas chegando até a seixos e blocos em alguns pontos, sobre os precipitados químicos. Essa característica pode estar relacionada com um intenso degelo ou mesmo a uma simples variação do nível d'água da bacia.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biondi, J.C. 2003. Processos metalogenéticos e os depósitos minerais brasileiros. São Paulo: Oficina de Textos, 528p.
- Departamento Nacional de Produção Mineral. 2005. Anuário Mineral Brasileiro 2005. Brasília, 512 p.
- Dorr, J.V.N. 1945. Manganese and iron deposits of Morro do Urucum, Mato Grosso, Brazil. U.S. Geol. Surv. Bull., 946-A: 47 p.
- Freitas, B. T. 2010. Tectônica e sedimentação do Grupo Jacadigo (Neoproterozoico, MS). Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo. 144p.
- Haralyi, N.L.E. & Walde, D.H.G. 1986. Os minerais de ferro e manganês da região de Urucum, Corumbá, Mato Grosso do Sul. In: Schobbenhaus, C. & Coelho. Principais Depósitos Minerais do Brasil. Brasília, v.2, 127–144.
- Krauskopf, K. B. 1956. Separation of manganese from iron in sedimentary processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, V.12, 61-84.
- Krumbein, W. C. & Garrels, R. M. 1952. Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation-reduction potentials: *J. Geol.* 60, 1-33.
- Merchandise, H. 1956. Contribution à l'étude des gisements on the name bixbyite, sitaparite, partridgeite: *Amer. Mineral.*, v.29, 66-69.
- Park, C. F. Jr., 1956. On the Origin of Manganese: 20th Int. Geol. Congr., Symposium on Manganese, v.2, 75-98.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., Nieman, T. A. 2002. Princípios de análise instrumental. 5. Ed. São Paulo: Bookman, 836p.
- Roy, S. 1968. Mineralogy of the Different Genetic Types of Manganese Deposits. *Economic Geology*, v.63, 760-786.
- Strakhov, N.M., Shterenberg, L.Y., 1966. Problems of genetic type of Chiatura deposit. *International Geology Review* 8, 549– 558.
- Trompette, R., Alvarenga, C.J.S. de, Walde, D. 1998. Geological evolution of the Neoproterozoic Corumbá graben system (Brazil). Depositional context of the stratified Fe and Mn ores of the Jacadigo Group. *Journal of South America Earth Sciences*, 11: 587-597.
- Urban, H., Stribny, B. & Lippolt, H.J. 1992. Iron and manganese deposits of the Urucum District, Mato Grosso do Sul, Brazil. *Economic Geology*, 87: 1375–1392.
- Walde, D.H.G. & Hagemann, S.G. 2007. The Neoproterozoic Urucum/Mutun Fe and Mn deposits in W-Brazil - SE-Bolivia: assessment of ore deposit models. In W-Brasilien/SE-Bolivien. *Stuttgart. Z. dt. Ges. Geowiss.*, 158: 45–55.