

LOCAÇÃO DE POÇOS DE REBAIXAMENTO DE NÍVEL D'ÁGUA UTILIZANDO GEOLOGIA E O MÉTODO GEOFÍSICO DE IMAGEAMENTO ELÉTRICO BIDIMENSIONAL NA MINA DE MANGANÊS DO AZUL – PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS - PA

***Cristiano Soares de Souza,*Lilian Grabellos de Barros**Antônio Flávio Uberti Costa,
Rodrigo Tusi Costa, *Paulo Henrique Daniel**

Resumo

A locação de poços profundos na Mina de Manganês do Azul-Província Mineral de Carajás - Pará é complexa devido à característica semiconfinada do seu aquífero. Encaixado em rochas impermeáveis a pouco permeáveis ($K_x < 1$), ocorrem os minérios de manganês com propriedades hidrodinâmicas características de materiais muito permeáveis (K_x entre 24 e 60). Em 2004 foi testada uma nova técnica de geofísica para detecção de áreas mineralizadas e aquíferos de alta vazão de produção. Utilizando o método geofísico de imageamento elétrico bidimensional foram levantados 50 km lineares ao longo de toda a Mina e adjacências. Após a medição da resistividade em amostras de campo verificou-se que os minérios manganésíferos da Mina do Azul se diferenciam das encaixantes por sua baixa resistividade ($< 20 \text{ ohm.m}$). O contraste entre as zonas mineralizadas e suas encaixantes permitiu a correlação GEOLÓGICAXGEOFÍSICA da estruturação das camadas e, por consequência, dos aquíferos. Baseando as locações nessa correlação, foram locados e perfurados poços em zonas de baixa resistividade. As vazões desses poços variaram entre 20 a 100,9 m³/h, o que supera a média das vazões dos demais poços da Mina do Azul. Além disso, baseados nesse método, foram detectados outras anomalias geofísicas não detectadas pela pesquisa mineral.

Palavras-chave: poços, geofísica, resistividade.

Abstract

The aquifer in Azul Manganese Mine- Carajás Mineral Province – Pará is semi-confined to ore. This feature makes the location of deep water wells difficult. The permeable (K_x between 24 and 64) ore is hosted by impermeable rocks ($K_x < 1$). In 2004, a new geophysical technique to find new ore bodies and good water reservoir was tested. The two-dimension electric imaging method covered 50 Km of lines in all the mine. Using local sampling measurement, the method indicated the low resistivity ($< 20 \text{ ohm.m}$) feature of the ore and the highest resistivity of the hosted rocks. The contrast between the two features showed the Geology and Geophysics correlation. Based on it some locations were showed and wells dug in low resistivity areas. Good water reservoir with discharges between 20 to 100, 9 m³/h, was found in the majority of the water wells located by using this relationship which is more, in average, than the other Azul Mine water wells' discharges.

Keywords: water wells, geophysics, resistivity

* Companhia Vale do Rio Doce S. A – Mina de Manganês do Azul – Rodovia Raimundo Mascaradas s/n, 68516-000, – Parauapebas-PA-Brasil. Tel. (094)-3327 4954; e-mail: cristiano.souza@cprd.com.br

* Companhia Vale do Rio Doce S. A – Mina de Manganês do Azul – Rodovia Raimundo Mascaradas s/n, 68516-000, – Parauapebas-PA-Brasil. Tel. (094)-3327 4911; e-mail: lilian.grabellos@cprd.com.br.

** AFC Geofísica Ltda. Rua Gonçalves Dias, 82; 90.130-060 -Bairro Menino Deus,Porto Alegre RS Brasil
+55 51 3235 3830 (telefone) - afcgeofisica@terra.com.br

*** GEOMINAS – Hidrogeologia e Geotecnia - Rua I, n. 33 – Parauapebas – PA, Tel. (094) 3346-2465 – geominas@cksonline.net

1. INTRODUÇÃO

A Mina de Manganês do Azul está localizada na porção centro-oeste da Província Mineral de Carajás, no interior da Floresta Nacional de Carajás, Município de Parauapebas, no sudeste do estado do Pará. O empreendimento situa-se a aproximadamente 37km do Núcleo Urbano de Carajás e a 62km do Município de Parauapebas entre as coordenadas 6°03' de latitude sul e 50°21' de longitude oeste.

A Mina do Azul constitui a maior mina de manganês do Brasil em operação com 5 km de extensão, com 1 km de largura máxima, cuja cava final apresenta 280 ha de área empacada. Ela pode ser subdividida em 3 minas, onde a maior delas é a mina 1, seguida da mina 2 e mina 3 (**Figura 1**).

A mineralização manganésifera foi formada pela alteração supergênica de metassedimentos plataformais da Formação Águas Claras, que se depositaram sobre a seqüência metavulcânica sedimentar do Supergrupo Itacaiúnas. São reconhecidos dois tipos de depósitos manganésiferos: superficiais e subsuperficiais. O depósito de minério superficial é formado por minério detrítico e os subsuperficiais são formados por minério manganésifero maciço, pelito rico e pelito tabular encaixados em metassedimentos sílticos e pelitos siltitos.

A lavra é a céu aberto e os minérios provenientes dessas minas são desmontados por meio de tratores de esteira e carregados em caminhões fora de estrada (com capacidade variando entre 100 a 190 t) por meio de carregadeiras de caçamba frontal e, posteriormente, é transportado para usina de beneficiamento. O estéril é, lavrado e transportado para as pilhas de estéril.

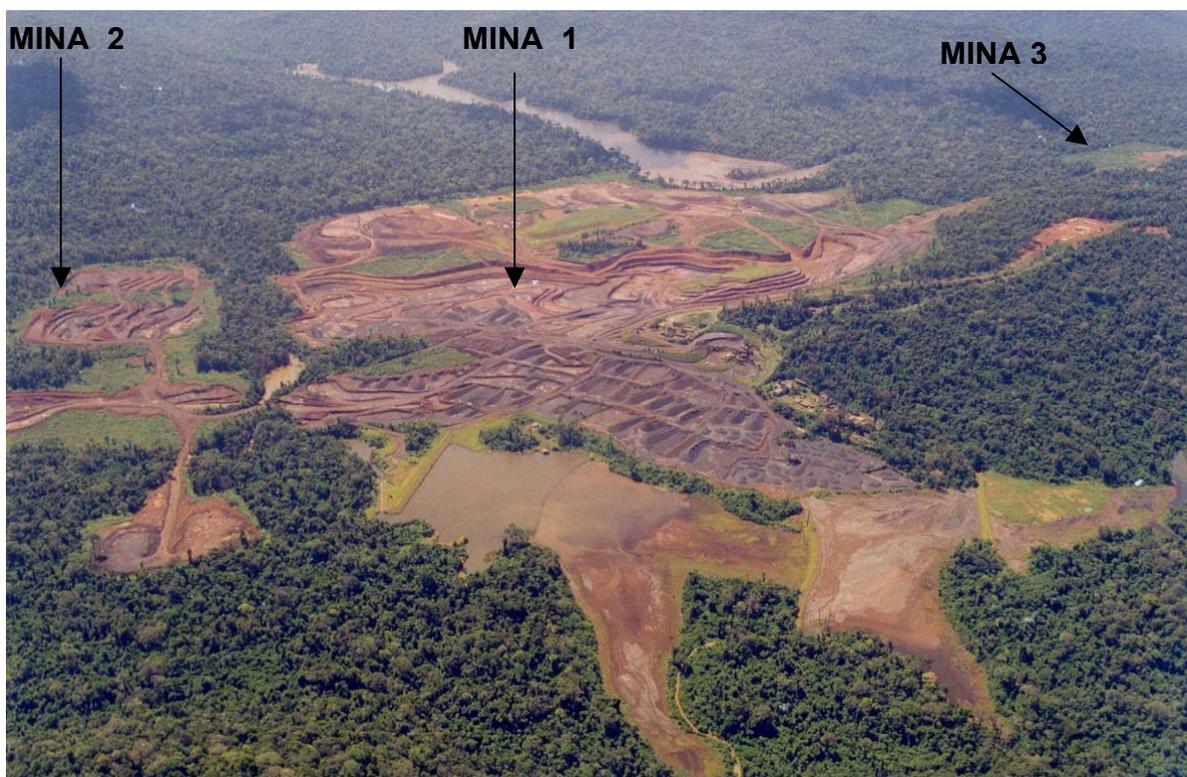


Figura 1 – vista aérea da mina do Manganês do Azul

A medida que grandes massas de minério são lavradas ocorre o aprofundamento da Mina e conseqüente interceptação do nível d'água subterrânea. Para manter a lavra em condições secas de operação, é necessária a extração de água subterrânea por meio de bateria de poços profundos, drenos e sumps.

Como aquífero na Mina do Azul está semiconfinado às camadas de minério manganesífero subsuperficial, existe grande dificuldade na locação de poços de rebaixamento de alta vazão que possam provocar o efetivo rebaixamento de nível d'água na Mina. Para minimizar a possibilidade de perfuração de poços “secos” foi utilizada a técnica de integração de dados geológicos e geofísicos (imageamento elétrico bidimensional) na locação dos últimos oito poços.

2 Contexto Geológico

2.1 Geologia Local

A Província Mineral de Carajás está limitada a norte pela serra do Bacajá, ao sul pela serra dos Gradaús, a leste pelos rios Araguaia e Tocantins e a oeste pelo rio Xingu, situando-se,

aproximadamente, entre as latitudes 05024'42 "S e 08000'00" S e as longitudes 51000'00 "W e 49021'42" W.

No interior dessa província ocorre a Serra dos Carajás que é constituída por um conjunto de cristas contínuas, com direção geral E-W, como eixo de um anticlinal assimétrico com caimento suave para leste, e com cotas médias de 700 m. A área mineralizada de manganês situa-se na cabeceira do Igarapé Azul, alinhada com a direção NW-SE da Falha Carajás, a cerca de 3 km a noroeste do Granito Carajás, que corta a parte central do Sistema de Falhas de Carajás (Coelho & Rodrigues, 1986), e Pinheiro, 1997).

O Depósito de Manganês do Azul era relacionado a uma seqüência de sedimentos pelíticos (Membro Azul), na base da FM Rio Fresco, em contato discordante com a Seqüência Salobo-Pojuca e com o Grupo Grão Pará (Coelho & Rodrigues, 1986). O depósito foi descoberto em 1971, devido à ocorrência de blocos superficiais de pisólitos manganésíferos (Anderson et al., 1974, in Coelho & Rodrigues, 1986), tendo a Mina do Azul entrado em atividades de produção em 1985, explorada pela CVRD, paralelamente à implantação de uma unidade de tratamento de minério na própria área do Azul (Silva, 1988).

Gibbs et al. (1986, in Pinheiro, 1997); Olszewski et al. (1989, in Pinheiro, 1997); Gibbs & Wirth (1990, in Pinheiro, 1997) e Lindenmayer et al. (1993, in Pinheiro, 1997), preferem correlacionar as rochas pelíticas da Mina do Azul com a seqüência superior do Grupo Grão Pará. Já Figueira et al. (1987, in Pinheiro, 1997) sugerem ser incorreto relacioná-las com o Grupo Rio Fresco. Macambira et al. (1990, in Pinheiro, 1997) propuseram então um arranjo estratigráfico diferenciado, relacionando as rochas da Mina do Azul com o nome de FM Igarapé Boa Sorte, uma unidade superior no Grupo Grão Pará. Nogueira et al. (1995, in Pinheiro, 1997) e Coelho & Rodrigues (1984?) correlacionam as rochas da Mina do Azul como parte do Membro Inferior da FM Águas Claras, baseado principalmente na presença de estruturas primárias indicativas de deposição em plataforma marinha afetada por turbiditos, separada do Membro Superior pela Falha Carajás (Pinheiro, 1997).

Essa jazida se encontra afetada pela grande Falha do Carajás, havendo-se produzido o enriquecimento de mineral segundo seu traçado, por isso existe maior desenvolvimento mineral em sentido NW-SÉ, virtualmente W-E.

As rochas da área mineralizada são finas, argilosas, e estão muito intemperizadas. As partes topograficamente mais altas, de direção geral N75W a E-W, são constituídas por blocos manganésíferos. Pisólitos formam faixas descontínuas, com larguras variáveis e com cotas topográficas inferiores.

As litologias observadas na mina do Azul são de cima para baixo são: Solo Argiloso, canga, pisolito, detrítico, transição detrítico /pelito, pelito tabular, pelito manganésífero rico, pelito silito, silito, minério de manganês maciço de manganês, unidade manganésífera e silito, das quais o silito é a litologia mais impermeável.

Associadas aos pisólitos, encontram-se plaquetas lamelares. Localmente, encontram-se fragmentos de blocos e de plaquetas cimentados por óxidos de manganês e ferro, denominados de brecha laterítica manganésífera, geralmente circundados por solos argilosos, lateríticos, com ocorrência local de canga laterítica (Coelho & Rodrigues, 1986), de acordo com a coluna estratigráfica indicada na **tabela 1**.

Espessura	Teor de Mn	Descrição
>70m	6%	UNIDADE 6 – Silito com óxidos de manganês, com quartzo anguloso. Matriz argilosa.
33 – 54m	14 – 16%	UNIDADE 5 - Unidade Manganésífera Superior – leitos de silito intercalados a leitos argilo-carbonatados. Placóide, estratificada. Próximo à superfície transforma-se nos pelitos manganésíferos ricos. Definido como uma marga rítmica.
17 – 44m	<5%	UNIDADE 4 - Silitos avermelhados, estratificados, placóides, com leitos intercalados de concreções manganésíferas.
46 – 50m	<4%	UNIDADE 3 - Silito carbonoso, estratificado, placóide, com intercalações mais argilosas de folhelho carbonoso na base.
18 – 40m	21 – 26%	UNIDADE 2 - Unidade Manganésífera Inferior – camada de folhelho manganésífero carbonático, ou pelito manganésífero. Estratificadas, cores escuras, com alternância de estratos argilosos e com rodocrosita, quartzo e pirita. Por alteração e enriquecimento esta unidade produziu material manganésífero granulado e pelitos manganésíferos enriquecidos.
65m	<14%	UNIDADE 1 - Silitos e argilitos carbonosos escuros, silicosos e bem consolidados, com intercalações de mica e cimento ferruginoso (pirita).

Tabela 1 Coluna estratigráfica característica da jazida do Manganês do Azul.

Afastada da jazida, em sentido Norte, observa-se uma nova anomalia, de estrutura, semelhante e paralela à explorada no Manganês do Azul, que está sendo investigada atualmente. De acordo com a interpretação geológica, supõe-se que a jazida continua neste sentido, sem haver-se reconhecido um limite claro.

O corpo de minério principal é formado por dióxido de manganês, em estado pulverulento (granulometria 0,02 mm), embora também se apresente como agregados duros em blocos, ocasionalmente associado à goethita. O teor em manganês dessa mina está em torno do 51%.

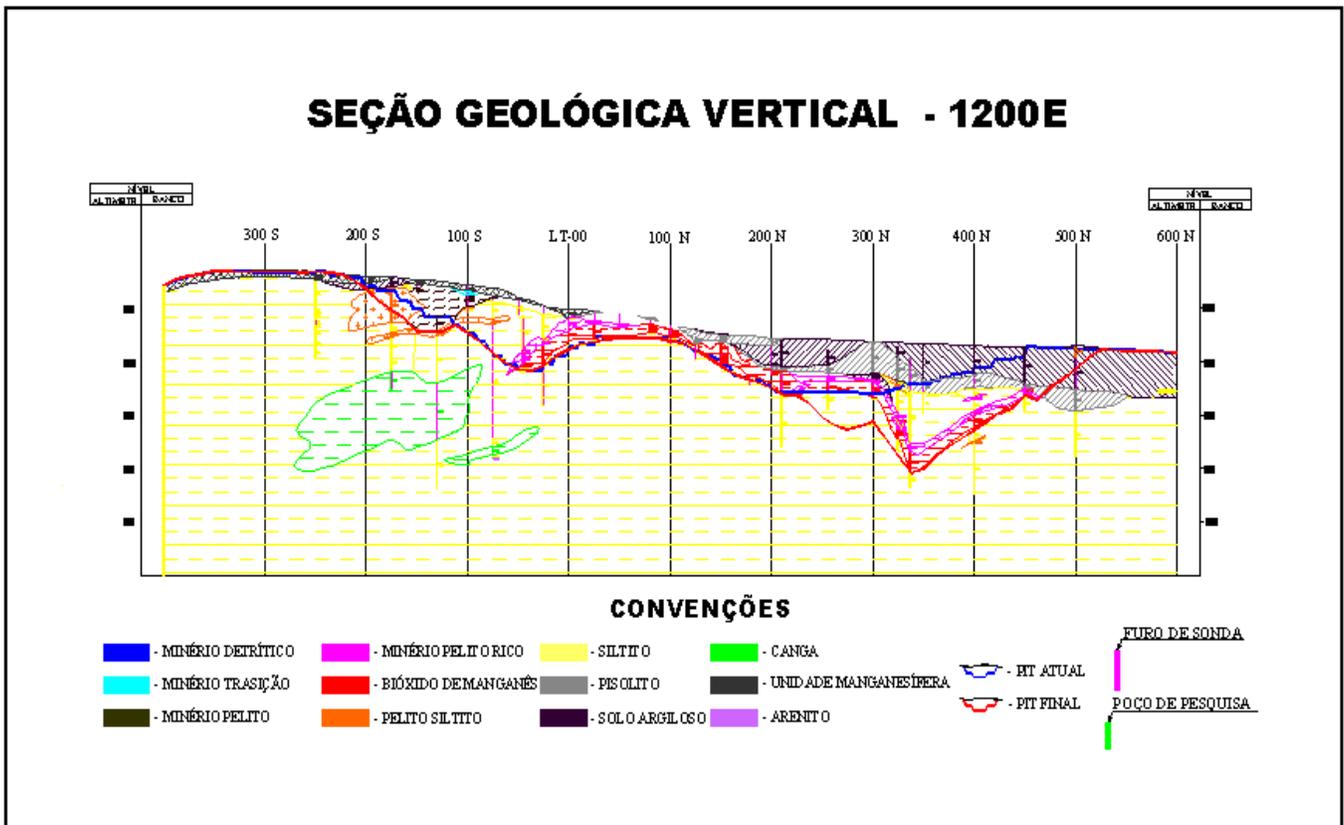


Figura 2 apresenta uma seção típica do jazimento, correspondendo à seção transversal N-S na posição 1200E.

As litologias observadas, de acima a abaixo, são: solo argiloso, arenito, canga, pisolito, detrítico, transição detrítico/pelito, pelito tabular, pelito manganífero rico, pelito siltito, minério de manganês maciço de manganês, unidade manganífera e siltito, das quais o siltito é a litologia mais impermeável.

O minério manganífero do Azul, considerando os aspectos genéticos, petrológicos, mineralógicos e qualidades físico-químicas, pode ser subdividido em três grandes grupos tipológicos, a saber:

- **Detrítico (DET):** é representado pelos materiais dispostos sem orientação em matriz argilosa (blocos, plaquetas e brechas manganíferas), formados por ação de intemperismo, condições topográficas e variações do lençol freático; possui coloração avermelhada e se distribui superficialmente e subsuperficialmente na jazida.
- **Pelítico (PLT = PMR - pelito manganífero rico, PMT - pelito manganífero tabular, TRD - transição entre detrítico e pelítico):** constituído por pacotes de rochas intemperizadas, que mantêm a estratificação rítmica original, alternando leitos escuros manganíferos com leitos esbranquiçados argilosos/caulínicos; de maneira geral possui coloração cinza escura, e apresenta-se ora bastante friável ora em forma de blocos tabulares de fácil desagregação ao impacto.
- **Minério de manganês maciço (MMN):** apresenta-se sob a forma de material granulado irregular, cinza a preto, em matriz pulverulenta negra ou, raramente, em forma de blocos tabulares ou maciços; é um minério rico com teor acima de 56 % de Mn.

Na unidade manganífera inferior, a alteração por oxidação dos constituintes transformaram, de início, a rocha finamente estratificada, pouco endurecida, com predominância de rodocrosita em uma rocha manganífera mais endurecida, constituída de criptomelana.

3 - REBAIXAMENTO DE NÍVEL D'ÁGUA NA MINA DO AZUL

O dimensionamento dos volumes de água subterrânea necessária para provocar a drenagem local na área da mina tem como base o modelo geológico local e regional e devem levar em conta ainda da definição de um modelo hidrogeológico conceitual onde serão determinadas e levantadas as

características hidrogeológicas das várias formações geológicas presentes. É necessário ainda o levantamento de estruturas regionais, zonas preferenciais de fluxo subterrâneo, barreiras hidráulicas, investigação de níveis d'água, zonas de recarga e descarga, e do inventário e das condições iniciais dos pontos d'água ao redor do empreendimento..

O processo de rebaixamento do nível de água na mina de Manganês do Azul iniciou-se em Outubro de 1998, com a perfuração de quatro poços tubulares profundos pioneiros. O processo teve continuidade com a perfuração de mais três poços no segundo semestre de 1999 e outros dois poços em 2000 e 2001. Em Setembro de 2002, a mina contava com nove poços em operação, um em fase de desenvolvimento e outros dois programados.

Atualmente o sistema de rebaixamento da mina de manganês é composto por 20 poços tubulares profundos, dos quais 11 poços estão ativos e nove serão colocados proximamente em operação. A vazão dos poços varia de 5 m³/h (1,3 l/s) a 70 m³/h (19,44 l/s).

Na região da mina do Manganês do Azul, o nível piezométrico encontrava-se muito próximo à superfície nas zonas de menor cota (1 m de profundidade), enquanto que nas de maior altitude se encontraria algo mais profundo (3 m de profundidade). Dessa forma a cota do nível piezométrico inicial variava entre 473 e 465 m s.n.m., localizando-os pontos de maior cota no extremo Sudeste e Noroeste, enquanto que os mais baixos se situam em torno do Igarapé Calunga.

Devido às complexidades hidrogeológicas e necessidades operacionais de se proceder ao rebaixamento do nível d'água no interior da cava, foram feitos diversos modelos hidrogeológicos a partir de 2001 para auxiliar o planejamento da drenagem e prever o dimensionamento das estruturas de drenagem futuras capazes de manter as operações de lavra em condições secas.

Para execução desses modelos numéricos de simulação foi utilizado o software MODFLOW, como software de pré e pós-tratamento e o VISUAL MODFLOW, versões V2.8.2.52 e V 3.0.

3.1 - HIDROGEOLOGIA DA REGIÃO DO MANGANÊS DO AZUL

Em geral, no Manganês do Azul o nível de água se mantém muito próximo ao fundo de mina. A direção de fluxo de água subterrânea mais importante observada, no entorno mineiro, discorre através da jazida, em sentido Leste - Oeste, de forma que seu deságüe natural se realiza através dos córregos existentes no extremo ocidental (“córregos ganhadores”).

A análise dos níveis de água observados historicamente nos piezômetros do Manganês do Azul indica que se trata de um aquífero confinado, desenvolvido a partir da jazida enriquecida, mantendo em todos os pontos um nível de água semelhante.

A drenagem subterrânea, provocada pelo bombeamento intensivo de água na mina, intercepta o fluxo natural e converteu-se no ponto piezométrico mais baixo do entorno, invertendo o sentido do fluxo de água subterrânea entre os córregos e a mina, de forma que os córregos passam a ser “perdedores”, alimentando o aquífero.

Analisando as direções de fluxo de água subterrânea observa-se que a alimentação do cone de drenagem se realiza a partir do entorno mineiro, sobretudo desde seu extremo oriental (a favor do gradiente hidráulico existente por diferença topográfica) e ocidental (recarga induzida pelos córregos).

3.2 - Unidades hidrogeológicas

As unidades hidrogeológicas locais foram definidas em função das propriedades hidrodinâmicas das litologias mapeadas na mina. A principal unidade aquífera é o minério de manganês maciço (MMM) que apresenta maiores valores de condutividade hidráulica e armazenamento, seguido pelo pelito rico (PMR) e pelito tabular (PMT). Estas unidades apresentam porosidade intersticial e de fraturas.

As demais litologias são bastante argilosas, podendo ser definidas como aquitardos, devido à pequena condutividade hidráulica e baixa porosidade eficaz. Citam-se: pisolito (PIS), pelito siltito (PMS), siltito (SIL), unidade manganésifera (UM), coberturas (SAG, CGF, DET). Nestas unidades o fluxo d'água é bastante incipiente sendo favorecido em algumas regiões devido à presença de fraturamentos, que definem uma porosidade secundária.

A unidade do minério maciço dispõe-se numa estrutura comumente denominada de “caixa de ovos”. Trata-se de uma camada não tão contínua, que apresenta diversos baixos estruturais definidos por dobramentos E-W e N-S. A camada do minério maciço apresenta em média uma espessura de 15 metros, atingindo até 50 metros, nos baixos estruturais onde ocorre o espessamento da camada.

A principal encaixante é o siltito, que é a unidade hidrogeológica predominante. As demais unidades apresentam-se comumente em forma de lentes.

Os dados provenientes de novos piezômetros apontaram para uma diferença da pressão hidrostática entre o minério de manganês maciço e o siltito muito pequena, indicando assim um semi-

confinamento do minério maciço bastante incipiente. Em função desta diferença de pressão ser pequena, todas as unidades aquíferas foram consideradas como um único sistema aquífero, não existindo diferença de nível d'água entre as unidades.

Embora esta condição foi aceita para o modelo hidrogeológico, acredita-se que isto não seja válido para regiões próximas aos poços. Devido a maior condutividade hidráulica do minério de manganês maciço, o bombeamento dos poços chega a secar esta unidade, entretanto as unidades sotopostas (aquítardos) continuam com água.

3.3 - Parâmetros Hidrodinâmicos do Aquífero

Na **tabela 3.3.1** são resumidos os valores de condutividades hidráulicas e coeficientes de armazenamento, atribuídos a cada material em torno ao complexo do Manganês do Azul. Estes foram calculados a partir da interpretação de ensaios realizados, contrastados com a bibliografia, e ajustados finalmente mediante a calibração dos modelos hidrogeológicos.

Litologia	Tipo de material	Condutividade (m/dia)		Armazenamento	
		$K_x=K_y$	K_z	Ss (1/m)	Sy
Solo argiloso	Impermeável	0,3	0,03	0,0005	0,05
Unidade manganésifera	Pouco permeável	0,3	0,03	0,0004	0,04
Siltito		0,3	0,03	0,0005	0,05
Pelito siltito		0,3	0,03	0,0005	0,05
Pisolito	Semipermeável	6,0	0,6	0,0025	0,25
Arenito	Permeável	10,0	1,0	0,0005	0,05
Pelito manganésífero rico	Muito permeável	24,0	2,4	0,0025	0,25
Pelito tabular		28,0	2,8	0,0025	0,25
Transição detrítico/pelito	Alta permeabilidade	34,0	3,4	0,0035	0,35
Material detrítico		38,0	3,8	0,0004	0,04
Canga	Muito alta	40,0	4,0	0,004	0,4

Minério de manganês de manganês	de permeabilidade	60,0	6,0	0,005	0,5
---------------------------------	-------------------	------	-----	-------	-----

Tabela 3.3.1 Parâmetros hidrodinâmicos estabelecidos para o Manganês do Azul.

Em torno do Manganês do Azul, o coeficiente de armazenamento dos materiais em condições confinadas (S_s), varia entre 0,0005 1/m nos menos capacitivos, e 0,005 1/m nos mais capacitivos. Quando os materiais passam a comportar-se como aquífero livre (S_y), varia sua capacidade de armazenamento entre 0,05 (5%), nos menos capacitivos, e 0,5 (50%), nos mais capacitivos, dependendo da litologia e área em que se encontrem.

Após as calibrações em regime permanente e transitório foi feitas várias simulações visando identificar quais seriam os volumes de água a serem bombeados nos próximos anos . Foi identificado que em vários pontos da mina o nível de d'água interceptaria as cavas propostas no sequenciamento da lavra.

4 - INTEGRAÇÃO DE DADOS DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA UTILIZANDO O MÉTODO DE IMAGEAMENTO BIDIMENSIONAL PARA LOCAÇÃO DE NOVOS POÇOS DE REBAIXAMENTO

Observando as propriedades hidrodinâmicas do aquífero, a vazão dos poços em operação existentes e correlacionando com o tipo de mineralização na mina do Azul percebeu-se que os maiores volumes bombeados estão associados aos minérios pelíticos e maciços cuja condutividade hidráulica é muito maior em relação às encaixantes.

Visando a identificação de massas manganesíferas de alto teor de manganês , em 2004 foram levantados 50 Km lineares de geofísica pelo método de imageamento elétrico bidimensional ao longo de toda mina do Azul e adjacências . A aplicação desse método foi justificado por Costa (2004) pelo fato de que a resistividade elétrica de rochas com alto teor de manganês é muito baixa (normalmente inferior a 20 ohm.m).

Esse método geofísico caracteriza-se por medir a variação da resistividade elétrica das rochas em subsuperfície, usando um sistema de quatro eletrodos AMNB ligados ao terreno (Figura 1). Os eletrodos A e B constituem o denominado Circuito de Corrente, enquanto que os eletrodos M e N

compõem o Circuito de Potencial. O primeiro transmite corrente elétrica I (miliamperímetro) para o interior da Terra, e o segundo mede a diferença de potencial elétrico ΔV (milivoltímetro) entre os outros dois eletrodos.

A resistividade elétrica é obtida através da relação $\rho = K \cdot \Delta V / I$, sendo :

ρ resistividade elétrica do terreno;

K constante geométrica que depende da geometria do arranjo entre os eletrodos e da distância entre os mesmos;

ΔV diferença de potencial entre M e N medida no circuito de potencial e

I corrente elétrica transmitida para o interior da Terra, medida no circuito de corrente.

A resistividade elétrica depende basicamente da composição, granulometria, porosidade, grau de saturação e salinidade da água que preenche os vazios (poros e fraturas) das rochas.

Quando o terreno não é homogêneo e isotrópico considera-se que o valor medido para cada posição dos eletrodos corresponde a uma resistividade elétrica aparente ρ_a , que reflete a contribuição de diferentes resistividades elétricas das rochas em profundidade, sob a zona central do arranjo dos eletrodos. A profundidade alcançada aumenta, à medida que o mesmo ocorre com a distância entre os eletrodos de corrente AB.

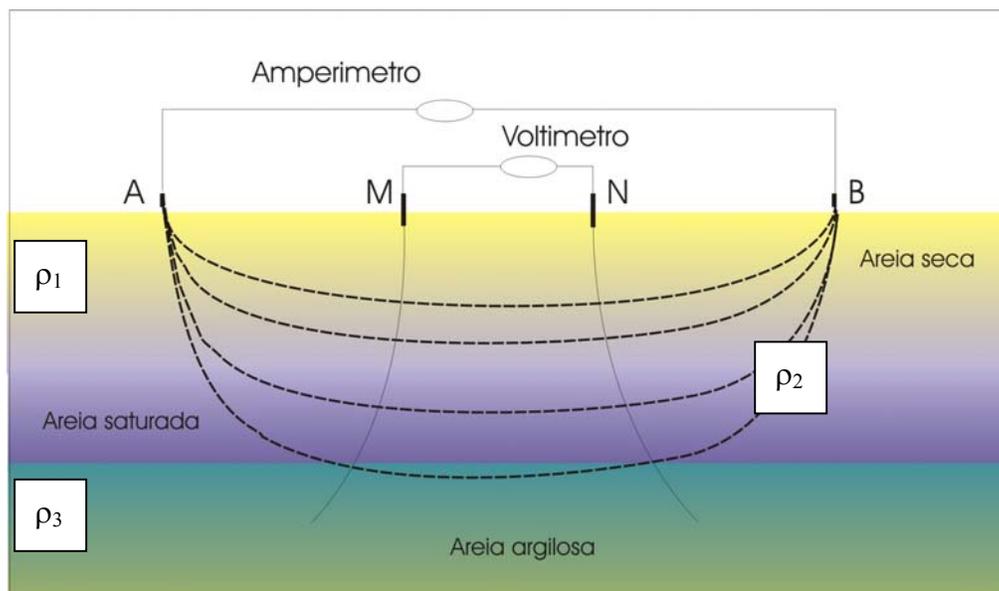


Figura 3. Esquema do método Eletrorresistividade - quatro eletrodos AMNB

Na aquisição dos dados foi empregado o sistema fabricado pela AGI Advanced Geosciences Inc., modelo STING R1 IP, com cabos multieletrados e espaçamento entre os mesmos de 10 metros. Na aquisição foi utilizada uma combinação dos arranjos wenner-schlumberger e gradiente, com parâmetros para alcançar até 200 metros de profundidade.

A modelagem 2D e 3D foi realizada através dos softwares RES2DINV e RES3DINV, desenvolvidos por M.H.Loke (www.geoelectrical.com). A definição dos melhores parâmetros de inversão para a área foi feita em seção (Linha 200W) que atravessa uma zona mineralizada bem conhecida e delimitada por vários furos de sondagem.

A interpretação foi feita a partir da correlação geológico-geofísica na seção 200W e da caracterização da resistividade elétrica dos diferentes materiais (minério e estéril) que ocorrem na área, a partir da medição em amostras de campo e em testemunhos de sondagem (Figura 4).

Por meio de medições de resistividade em amostras de campo e de testemunho de sondagem foram definidos que os valores mais baixos de resistividade (geralmente menores que 20 ohm.m) correspondem ao minério e a marga manganesífera e as rochas correspondentes ao estéril (siltitos e pelitos) apresentam valores de resistividade maiores que 100 ohm.m;

A Tabela 4.1 apresenta as amostras e suas resistividades medidas. Todas as amostras permaneceram três dias em molho na água para atingirem a saturação visando representar suas condições naturais.

Amostra/Descrição	Resistividade (ohm.m)
Unid. Mang. Inf. Baixo Teor - Furo 482/86m	29,6
Siltito Estéril – Furo 483/86m	270,8
Siltito Mang. Baixo Teor – Furo 486/147m	14,5
Pelito Tabular – Afloramento Linha 200W	157,4
Bióxido	13,8
Siltito Caolínico Argiloso – Furo 550/70m	448,0
Marga manganesífera Baixo Teor – Furo 486	4,0
Pelito Rico Tabular – Afloramento	2,8
Pelito Rico 40% - Furo 471/40m	40,9
Pelito Siltito Médio Teor 30% - Furo 471/20m	146,0
Bióxido Maciço – Furo 539/23m	1,8

Tabela 4.1 Resistividade das amostras coletadas na Mina do Azul.

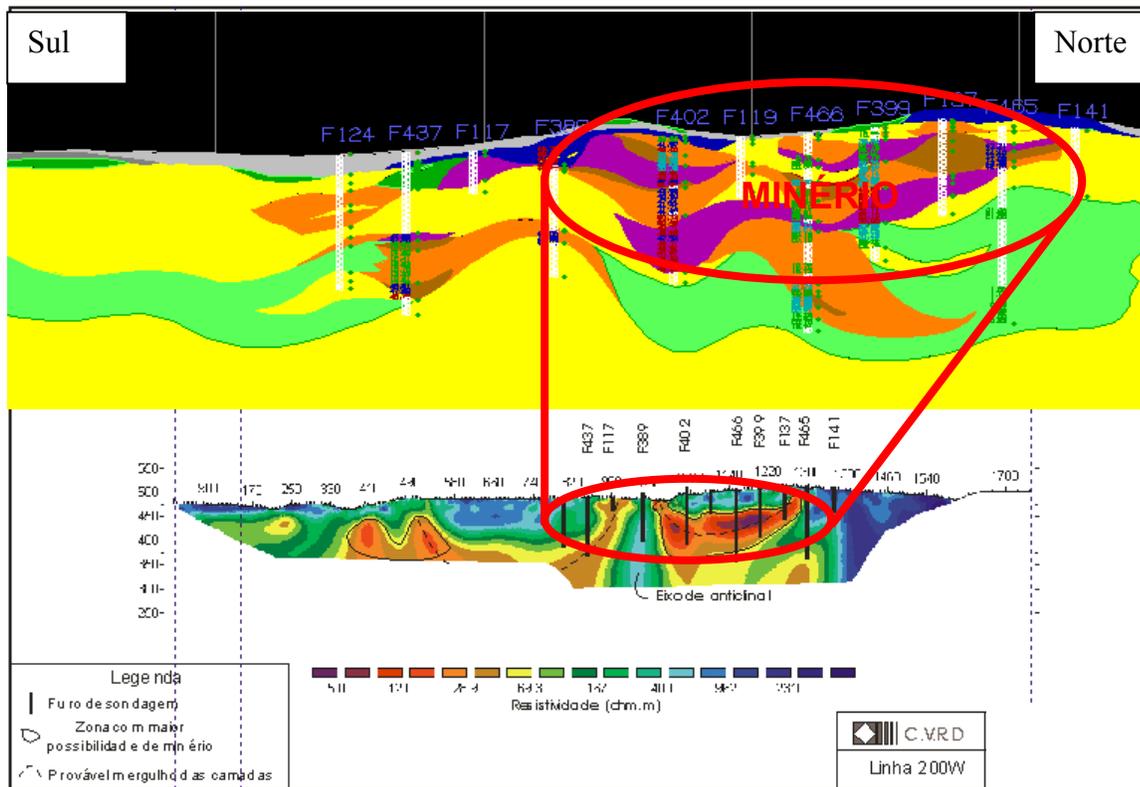


Figura 4 – Seção geológica 200W, mostrando a correlação entre o perfil geofísico e o geológico.

5. RESULTADOS OBTIDOS

A partir das correlações entre a geofísica por imageamento elétrico bidimensional e as seções geológicas percebe-se que os limites dos corpos mineralizados estão bem marcados pelo gradiente de resistividade existente entre as zonas mineralizadas e as encaixantes (Figura 5).

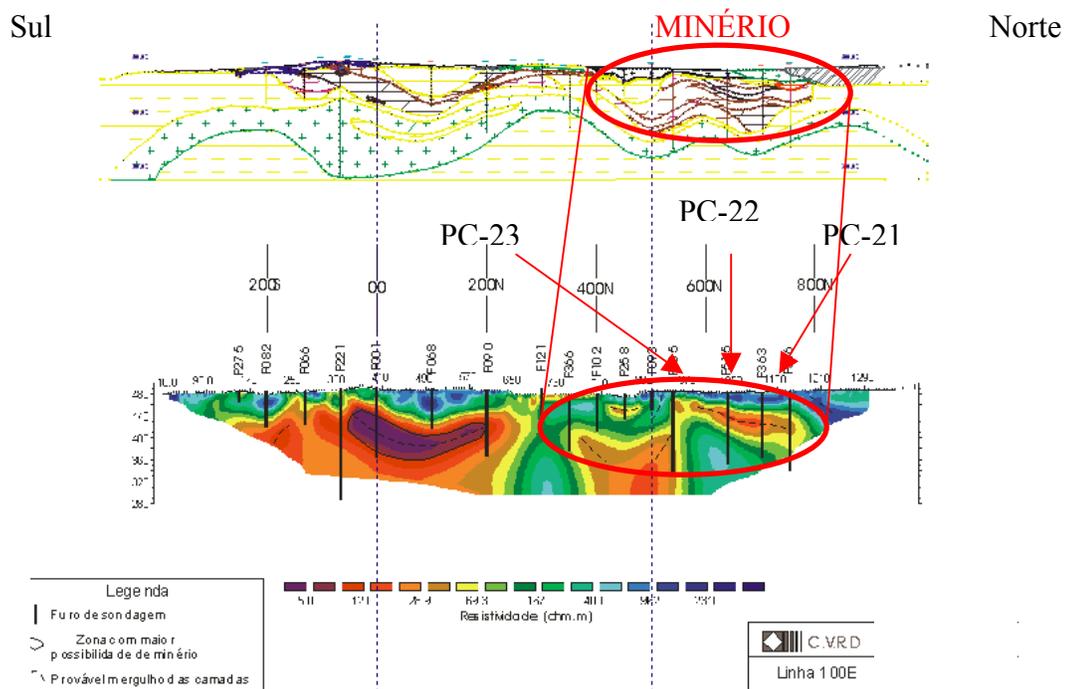


Figura 6 – Seção geofísica 100E mostrando antifomes e sinformes representando zonas menos resistivas (tons em vermelho e violeta) e as zonas mais resisitvas (tons de azul).

Ao longo da seção geofísica 100E (Figura 6) existe uma seqüência de anomalias geofísicas sob a forma de dobras antifomes e sinformes de sul para norte, com mergulhos suaves para sul e norte. Os valores mais baixos de resistividade localizam-se entre as coordenadas 200S a 200N e 300 N a 800 N, inclusive com zonas menos resistivas abaixo de 10 ohm.m (tom violeta). Essa zona foi atravessada pelos furos F001 e F090, ocorrendo unidades manganíferas com baixo teor de manganês. No entanto, o trecho anômalo entre as coordenadas 300N e 400N, com resisitvidades abaixo de 20 ohm.m. foi atravessado pelos furos F515 e F363, no qual ocorrem níveis decamétricos de pelito rico e pelito tabular de médio a alto teor de manganês e permeabilidade mediana, associados a uma descontinuidade estrutural entre as coordenadas 500N e 550N. Em função disso, foram locados 3 poços (PC'S 21, 22 e 23) nessa anomalia de alto gradiente geofísico e forma de anticlinal. Os três poços apresentaram vazões médias a altas (20 a 60 m³/h). Os poços localizados em um raio de 200m desses poços apresentam vazões muito menores (abaixo de 7 m³/h).

O mesmo princípio de locação de poços foi feito para na seção 1400E (figura 8). Nessa seção ocorrem diversas anomalias de baixa resistividade (20 ohm.m) entre as coordenadas 150S a 00 e 200N e 400N e 600N.

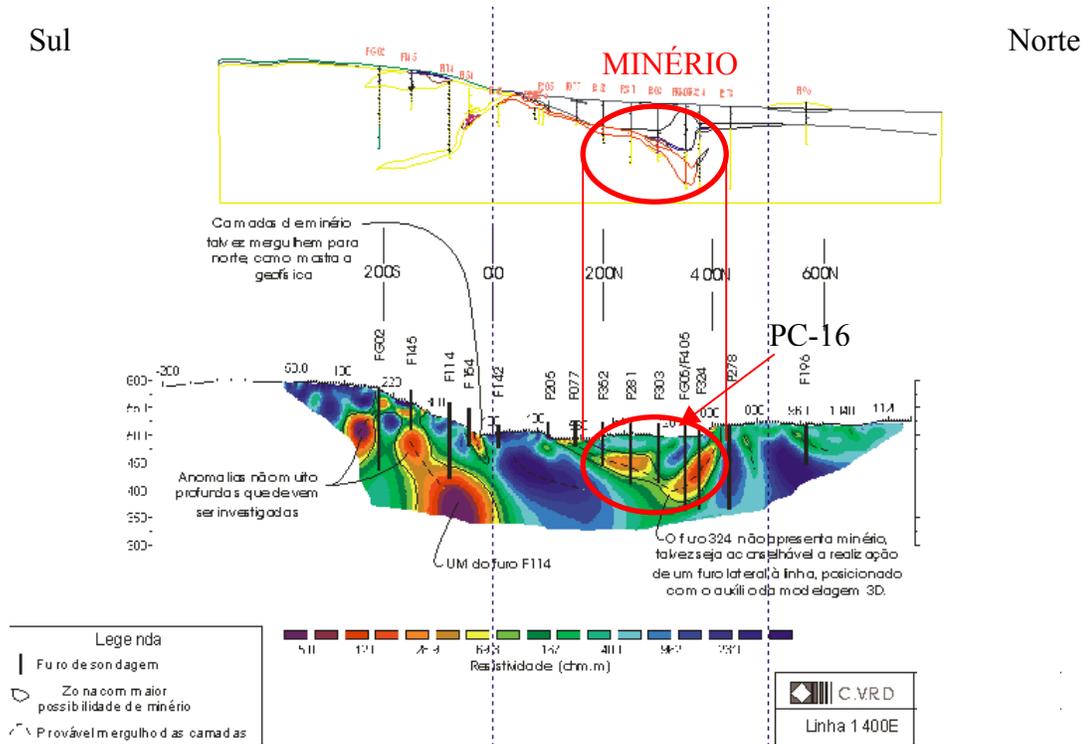


Figura 8 - Seção geofísica 1400E mostrando anomalias geofísicas (tons de violeta e vermelho) em forma de antifórme e sinfórme com vergência para sul.

A geologia dessa seção mostra uma seqüência de antifórmes e sinfórmes com minério manganésífero maciço e pelito rico de alta permeabilidade encaixados em siltitos de baixa permeabilidade. Foi locado um poço (poço 16) no flanco norte do sinfórme existente entre as coordenadas 200N e 400N. Associado a essa estrutura ocorre uma anomalia geofísica descontínua, de alto gradiente, porém com mesma forma observada nos furos de sondagem. O poço interceptou aproximadamente mais de 50 m de minério de manganês maciço com vazão específica da ordem de 100,9 m³/h. Trata-se do poço com maior vazão específica da Mina de Manganês do Azul. Em função da continuidade dessas anomalias para leste, novos poços estão sendo projetados seguindo a mesma estruturação encontrada nessa seção.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Mina de Manganês do Azul até 2003 baseava suas locações de poços de rebaixamento de nível d'água no conhecimento hidrogeológico e na geologia já conhecida da mina. Normalmente eram procuradas estruturas sinformais com a presença de minério de manganês maciço (muito alta permeabilidade) e pelito rico (alta permeabilidade).

Em 2004 foram executados 50 km de levantamento geofísico pelo método de imageamento elétrico bidimensional e observou-se a alta correlação entre os minérios manganesíferos de alta permeabilidade e zonas de resistividade baixas (abaixo de 20 ohm.m). Esta correlação permitiu a correlação entre as estruturas das anomalias geofísicas com a estruturação das camadas manganesíferas em antiformes e sinformes.

Baseado nas simulações de modelos hidrogeológicos numéricos e na necessidade do rebaixamento de água subterrânea em locais específicos na Mina do Azul, foram feitas locações de poços em zonas de anomalias com descontinuidade estrutural, na interface entre anomalias de baixa resistividade (zona de minério) e alta resistividade (encaixante).

O método de locação proposto revelou-se eficaz para a Mina do Azul, uma vez que a maioria dos poços locados utilizando essa correlação geológica-geofísica aliado às descontinuidades estruturais, apresentou vazões altas (entre 20 e 60 m³/h), inclusive possibilitando a descoberta do poço de maior vazão específica (100,9 m³/h) na Mina do Azul.

A locação de poços em ambientes sedimentares com aquíferos semi-confinados e características hidrodinâmicas semelhantes a Mina de Manganês do Azul é muito complexa. As utilizações de técnicas geofísicas aliadas ao conhecimento geológico facilitam na identificação de aquíferos com alta vazão de produtividade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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, p.149-164.
- BEISIEGEL, V.R.; BERNARDELLI, A.L.; DRUMMOND, H.F. RUFF, A.W.; TREMAINE, J.W. 1973. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. *Rev. Brás. Geo.* 3(4):215-242.
- 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, p.1431-1444.
- BERNARDELLI, A.L. 1982. Jazida de Manganês do Azul. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia*, 1. Belém, 1982. Anexo dos Anais do ... Belém, 1982, p. 47-60.
- BETARCHINI, A. C.; SOUSA, K; COTA, M.A. 2004. Relatório das simulações numéricas do fluxo d'água subterrânea da mina de manganês do azul – Carajás (PA). 28p
- COELHO, C.E.S & RODRIGUES, O.B. 1986. Jazida de Manganês do Azul, Serra dos Carajás, Pará. Principais depósitos Minerais do Brasil. DNPM/CVRD, v.2, p. 145-152.
- COSTA, A. F.U & COSTA, R.T. 2004 – Imageamento Elétrico Bidimensional - Relatório Final - Mina de Manganês do Azul. 60p
- 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.
- GIBBS, A.K.; WIRTH, K. R.; HIRATA, W. K.; OLSZEWSKI Jr, W. J. 1986. Age and composition of the Grão Pará Group Volcanics, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo. 16 (2): 201-211.
- LINDENMAYER, Z.G., FACCINI, U., GUIMARÃES NETTO 1993. Encontrada a mais antiga forma de vida da América. *Revista Unisinos*, 58:16-18.
- NOGUEIRA, A.C. R.; TRUCKENBRODT, W ; PINHEIRO, R.V.L. 2002. Formação Aguas Claras, Pré-Cambriano da Serra dos Carajás. Redescrição e redefinição. *Boletim do Museu Emílio Goeldi*.
- 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. 168p.
- 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).
- 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. p.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 minerais; Anexo dos Anais, Belém, p.73-94.

WIRTH, K.R., GIBBS, A.K. OLSZEWSKI, W.J. 1986. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará groups and Serra dos Carajás Granite, Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16:195-200.