



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**VINICIUS FEIJÓ CORDEIRO**

**MODELAMENTO NUMÉRICO DO FLUXO SUBTERRÂNEO ATUAL E  
SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS FUTUROS DA MINA DE MORRO  
AGUDO, PARACATU-MG**

**FORTALEZA-CE  
AGOSTO / 2012**

**VINICIUS FEIJÓ CORDEIRO**

**MODELAMENTO NUMÉRICO DO FLUXO SUBTERRÂNEO ATUAL E  
SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS FUTUROS DA MINA DE MORRO  
AGUDO, PARACATU-MG**

**Dissertação de Mestrado apresentada  
ao Curso de Pós-Graduação em  
Geologia do Departamento de  
Geologia da Universidade Federal do  
Ceará, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em  
Geologia. Área de concentração:  
Hidrogeologia e Gestão  
Hidroambiental**

**Orientador: Prof. Dr. Itabaraci  
Nazareno Cavalcante**

**FORTALEZA-CE  
AGOSTO / 2012**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará

- 
- C818m Cordeiro, Vinicius Feijó.  
Modelamento numérico do fluxo subterrâneo atual e simulações de cenários futuros da mina de Morro Agudo, Paracatu-MG. / Vinicius Feijó Cordeiro – 2012.  
103 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2012.  
Área de Concentração: Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.  
Orientação: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.
1. Modelo numérico. 2. Fluxo subterrâneo. 3. Hidrogeologia. 4. Simulações de cenários futuros. 5. Gestão de recursos hídricos. I. Título.

**VINICIUS FEIJÓ CORDEIRO**

**MODELAMENTO NUMÉRICO DO FLUXO SUBTERRÂNEO ATUAL E  
SIMULAÇÕES DE CENÁRIOS FUTUROS DA MINA DE MORRO  
AGUDO, PARACATU-MG**

Dissertação de Mestrado apresentada  
ao Curso de Pós-Graduação em  
Geologia do Departamento de  
Geologia da Universidade Federal do  
Ceará, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Mestre em  
Geologia. Área de concentração:  
Hidrogeologia e Gestão  
Hidroambiental

Orientador: Prof. Dr. Itabaraci  
Nazareno Cavalcante

Aprovada em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante (Orientador)**  
Universidade Federal do Ceará

**Prof. Dra. Sônia Maria Vasconcelos**  
Universidade Federal do Ceará

**Prof. Dr. Mariano Franca Alencar**  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

**FORTALEZA-CE**

**AGOSTO / 2012**

Quando nada parece ajudar, eu vou e olho o cortador de pedras martelando sua rocha talvez cem vezes sem que nem uma só rachadura apareça. No entanto, na centésima primeira martelada, a pedra se abre em duas e eu sei que não foi aquela a que conseguiu, mas todas as que vieram antes.

*Jacob Riis*

## DEDICATÓRIA

### **Aos meus pais**

Walber Cordeiro e Vânia Feijó Cordeiro pelo esforço e dedicação em minha formação e apoio incondicional em todas as fases de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À Votorantim Metais Zinco, na pessoa do Sr. André Rogério Sbardellini Cardoso - Gerente DHO, pela autorização de publicação dos dados neste trabalho.

Ao Engenheiro Ambiental, Alex Ezequiel do Amaral, por fornecer os dados utilizados neste trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

À MDGEO pelos novos conhecimentos adquiridos e fundamentais para a elaboração deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante, pela orientação e paciência.

Ao meu pai, Doutorando em Geologia, Walber Cordeiro, pelo incentivo e apoio.

À minha mãe, Vânia Feijó Cordeiro, pelo carinho dedicado.

À minha namorada, Viviane Cunha, pelo auxílio na correção e dedicação durante os meses em que estive trabalhando nesta dissertação.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Geologia do curso de Geologia, Centro de Ciências da Universidade Federal do Ceará, pelos sólidos conhecimentos transmitidos.

Aos amigos e colegas, fundamentais para a conclusão da pós-graduação.

## RESUMO

O modelamento numérico do fluxo subterrâneo da Mina de Morro Agudo, de propriedade da Votorantim Metais Zinco (VMZ), Paracatu-MG, utilizou os dados do monitoramento hidrometeorológico para calibrar o cenário atual e realizar simulações de cenários futuros do bombeamento realizado na mina, utilizando o software Visual MODFLOW 3.1. A área de estudo localiza-se em Paracatu-MG e encontra-se na parte externa da Faixa de Dobramentos Brasília na margem oeste do Cráton do São Francisco, a mina está inserida na sequência metassedimentar do Grupo Vazante, composta por dolarenitos, brechas dolareníticas e dolomíticas pertencentes à Formação Morro do Calcário. Em Junho de 2011 foi registrado 255m<sup>3</sup>/h em surgências de água na mina subterrânea, valor próximo à capacidade máxima, 270m<sup>3</sup>/h, da Estação de Tratamento de Efluentes. Assim, se fez necessário realizar simulações do acréscimo desta vazão até o ano 2017, seguindo o plano de expansão da mina, com objetivo de subsidiar ações efetivas no tratamento de água da unidade. Foram utilizados os dados de monitoramento disponibilizados pela equipe técnica da VMZ para atualizar o modelo hidrogeológico conceitual e realizar nova calibração do modelo numérico. Após a calibração foram realizadas simulações a partir do ano 2012 até 2017. A partir dos cenários simulados foi obtido um acréscimo constante nas vazões atingindo patamares de 530m<sup>3</sup>/h. Deste valor foi subtraída a vazão bombeada pelo Projeto Água Limpa e somada a vazão aduzida para a mina, chegando ao valor final de bombeamento de 504m<sup>3</sup>/h. Esta é a vazão que será considerada no planejamento da construção da nova Estação de Tratamento de Efluentes para atender as necessidades até o ano 2017. Essa vazão pode ser reduzida com a ampliação do Projeto Água Limpa, dependendo de um esforço conjunto entre os setores de Hidrogeologia, Meio Ambiente, Geologia e Lavra. O desaguamento da mina não está interferindo na vazão dos vertedouros situados no Córrego Morro Agudo de maneira definitiva, pois a água que infiltra na mina subterrânea é bombeada para a superfície, tratada e devolvida ao Ribeirão Traíras, sem provocar prejuízo ou impactos ambientais. Por se tratar de um aquífero fissural, não se pode precisar se a lavra irá atingir uma zona aquífera fraturada de maior expressão, aumentando consideravelmente as vazões simuladas.

**Palavras-chave:** Modelo numérico. Fluxo subterrâneo. Hidrogeologia. Simulações de cenários futuros. Gestão de recursos hídricos.

## ABSTRACT

The numerical modeling of underground flow of Morro Agudos' mine, property of Votorantim Metais Zinco (VMZ), Paracatu-MG, used data from hydrometeorological monitoring campaigns to calibrate the actual scenario and simulate future pumping scenarios of this mine, using Visual MODFLOW 3.1 software. The study area is located in Paracatu-MG and in external portion of Brasília Fold Belt at west margin of São Francisco Craton, the mine is inside metasedimentary sequence of Vazante Group, composed by dolarenite, dolarenitics and dolomitics breccias of Morro do Calcário Formation. In June of 2011 was registered 255m<sup>3</sup>/h of water springs inside underground mine, this value is nearly the maximum capacity, 270m<sup>3</sup>/h, of Wastewater Treatment Plant. So, it was necessary make some simulations to predict the increase of this pumping rate until the year of 2017, following expansion plans, purposing take effective actions in the water treatment. Was used monitoring data given by technical team of VMZ to update the concept hydrogeological model and make a new calibration of numerical model. After calibration, those scenarios were simulated from 2012 until 2017. From those scenarios were obtained an increased pumping rate that will achieve to 530m<sup>3</sup>/h. Of this value was subtracted the pumping rate of "Projeto Água Limpa" (Clean Water Project) and added the inside flow, reaching the final pumping value of 504m<sup>3</sup>/h. This pumping rate will be considered in the planning of the new Wastewater Treatment Plant to supply necessities until 2017. This value can be decreased with rising of "Projeto Água Limpa", but depends of mutual efforts from Hydrogeology, Geology, Environmental and Operations sectors. Mine's dewatering it's not interfering in stream flows around the mine, because all water is pumped to surface and returns to original stream, without being prejudicial or causing environmental impacts. As is a fissural aquifer it's impossible to affirm if galleries will cross an expressive fractural zone, increasing in a large way the pumping rate simulated by this work.

**Keywords:** Numerical modeling. Underground flow. Hydrogeology. Future scenarios simulations. Water resources management.

## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Figura esquemática de localização da Mina de Morro Agudo e destaque em vermelho para a área de estudo. (DNIT, 2012)</i> .....	13
<i>Figura 1.2 - Abatimentos na Fazenda do Sr. João Roquete. (MDGEO, 2005a)</i> .....	16
<i>Figura 2.1 - Abertura da rampa principal de acesso à mina subterrânea (VOTORANTIM, 2011)</i> .....	18
<i>Figura 2.2 - Abertura do shaft para içamento do minério (VOTORANTIM, 2011)</i> .....	19
<i>Figura 2.3 - Esquema do método de lavra da Mina de Morro Agudo (câmaras e pilares)</i> .....	20
<i>Figura 2.4 - Foto do método de lavra da Mina de Morro Agudo (câmaras e pilares)</i> .....	20
<i>Figura 2.5 - Foto do shaft de içamento de minério – Fev/2011</i> .....	21
<i>Figura 2.6 - Foto do Poço de Ventilação Central (PVC) – Fev/2011</i> .....	22
<i>Figura 2.7 - Barragens de rejeito da Mina Morro Agudo – Paracatu, MG</i> .....	23
<i>Figura 2.8 - Fluxograma atual de bombeamento da mina subterrânea</i> .....	25
<i>Figura 2.9 - Fluxograma do manejo das águas</i> .....	28
<i>Figura 3.1 - Mapa geológico regional (VOTORANTIM, 2011)</i> .....	30
<i>Figura 3.2 - Estratigrafia da região do Morro da Mina (Bertachini &amp; Silva, 2004)</i> .....	31
<i>Figura 3.3 - Perfil geológico da Mina Morro Agudo</i> .....	33
<i>Figura 3.4 - Vista em planta das falhas principais</i> .....	34
<i>Figura 3.5 - Perfil geológico esquemático da região da Mina de Morro Agudo (sem escala)</i> .....	35
<i>Figura 4.1 - Rede de monitoramento da Mina de Morro Agudo, Paracatu - MG</i> .....	37
<i>Figura 4.2 - Estação pluviométrica</i> .....	38
<i>Figura 4.3 - Monitoramento mensal do nível d'água - PZ-MD06 e INA-MD06 – Mai/2010</i> .....	40
<i>Figura 4.4 - Vertedouro trapezoidal de base 40cm (VTMA01) – Abr/2010</i> .....	41
<i>Figura 4.5 - Manômetro instalado em um furo de sondagem obturado – Fev/2011</i> .....	43
<i>Figura 4.6 - Coleta de água subterrânea pelo método Low Flow (Baixa Vazão) – Fev/2011</i> .....	45
<i>Figura 5.1 - Precipitação total anual e média anual na Mina de Morro Agudo, Paracatu – MG</i> .....	47
<i>Figura 5.2 - Mapa potenciométrico e de vetores de fluxo do Aquífero Raso com dados de Junho/2011</i> .....	49
<i>Figura 5.3 - Mapa potenciométrico e de vetores de fluxo do Aquífero Profundo com dados de Junho/2011</i> .....	50
<i>Figura 5.4 - Evolução do nível d'água no aquífero raso</i> .....	51
<i>Figura 5.5 - Evolução do nível d'água nos instrumentos do entorno das Barragens II e III</i> .....	52
<i>Figura 5.6 - Evolução do nível d'água no aquífero profundo</i> .....	53
<i>Figura 5.7 - Evolução do nível d'água no aquífero profundo (piezômetros novos)</i> .....	55
<i>Figura 5.8 - Gráfico de evolução das vazões nos vertedouros</i> .....	56
<i>Figura 5.9 - Evolução das vazões nos vertedouros VTMA01 e VTMA05</i> .....	57
<i>Figura 5.10 - Evolução das vazões somadas do VTMA04 e VTM06</i> .....	58
<i>Figura 5.11 - Evolução das vazões do VTMA03 e VTM04</i> .....	58
<i>Figura 5.12 - Gráfico da vazão diária, média mensal e curva de tendência do bombeamento da mina subterrânea para ETE</i> .....	62
<i>Figura 5.13 - Croqui de bombeamento</i> .....	63
<i>Figura 5.14 - Croqui de bombeamento do projeto Água Limpa</i> .....	64
<i>Figura 5.15 - Diagrama de Piper de todas as campanhas realizadas</i> .....	65
<i>Figura 7.1 - Área modelada da Mina Morro Agudo, Paracatu - MG</i> .....	70
<i>Figura 7.2 - Imagem de satélite da área da Mina Morro Agudo, Paracatu - MG</i> .....	71
<i>Figura 7.3 - Grid final do modelo</i> .....	73
<i>Figura 7.4 - Grid na direção vertical (eixo Z)</i> .....	74
<i>Figura 7.5 - Disposição dos instrumentos de monitoramento do nível d'água</i> .....	77
<i>Figura 7.6 - Potencial Especificado sobre o Ribeirão Traíras (células na cor vermelho escuro)</i> .....	79
<i>Figura 7.7 - Drenos (células na cor cinza)</i> .....	80
<i>Figura 7.8 - Drenos representando as surgências localizadas nas galerias</i> .....	80
<i>Figura 8.1 - Reta de calibração do nível d'água em regime permanente com os valores observados (eixo x) e calculados (eixo y) em cada instrumento</i> .....	84
<i>Figura 8.2 - Equipotenciais de carga hidráulica de 5 em 5 metros</i> .....	88
<i>Figura 8.3 - Modelo tridimensional (vista E-W) em perspectiva</i> .....	89
<i>Figura 9.1 - Planejamento de lavra para os próximos anos</i> .....	91
<i>Figura 9.2 - Reta de simulação do nível d'água em 2017 em Morro Agudo</i> .....	92
<i>Figura 9.3 - Evolução do nível d'água na área de Morro Agudo</i> .....	93

## LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1.1 - Coordenadas UTM SAD69 (Zona 23K) da área de estudo</i> .....	13
<i>Tabela 4.1 - Dados cadastrais dos instrumentos de monitoramento</i> .....	39
<i>Tabela 4.2 - Cursos d'água superficiais</i> .....	41
<i>Tabela 4.3 - Pontos de medição de vazão na mina subterrânea</i> .....	42
<i>Tabela 5.1 - Precipitação mensal (mm)</i> .....	46
<i>Tabela 5.2 - Pontos de medição de vazão na mina subterrânea</i> .....	59
<i>Tabela 5.3 - Vazão bombeada da mina para a ETE</i> .....	61
<i>Tabela 7.1 - Litotipos discretizados no modelo</i> .....	75
<i>Tabela 7.2 - Pontos escolhidos para o modelo</i> .....	77
<i>Tabela 7.3 - Zonas de balanço</i> .....	81
<i>Tabela 8.1 - Condutividade hidráulica obtidas na calibração em regime permanente (m/dia)</i> .....	83
<i>Tabela 8.2 - Calibração dos drenos</i> .....	85
<i>Tabela 8.3 - Quadro comparativo entre as vazões calculadas na calibração em regime permanente e as vazões monitoradas em Junho de 2011, em m<sup>3</sup>/dia e m<sup>3</sup>/h.</i> .....	86
<i>Tabela 9.1 - Novas zonas de balanço atribuídas às galerias</i> .....	92
<i>Tabela 9.2 - Vazões de surgências (em m<sup>3</sup>/h) simuladas para os anos 2012 a 2017</i> .....	93
<i>Tabela 9.3 - Vazões de entrada da ETE estimadas para os anos 2012 a 2017</i> .....	94

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMSA	Companhia Auxiliar de Empresas de Mineração S/A
AL	Aluvião
BDAR	Brecha Dolarenítica
BDOL	Brecha Dolomítica (dolorruditos)
BLUE	Best Linear Unbiased Estimator ou Melhor Estimador não Enviesado
CAD	<i>Computer Aided Design</i> ou Desenho Auxiliado por Computador
CMM	Companhia Mineira de Metais
CODEMIG	Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
DAR	Dolarenito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Leste
EB	Estação de bombeamento
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FR	Dolomito, microbrecha e brecha intraformacionais, doloarenito, chert
GHB	<i>General Head Boundary</i> ou Potenciais Generalizados
GIS	<i>Geographic Information System</i> ou Sistemas de Informações Geográficas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INA	Indicador de nível d'água
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
K	Condutividade hidráulica
km	Quilômetro
km <sup>2</sup>	Quilômetro quadrado
LSO	Solo laterítico
m	Metro
M.M.A.S.A.	Mineração Morro Agudo S.A.
m <sup>2</sup> /dia	Metro quadrado por dia
m <sup>3</sup> /h	Metros cúbicos por hora
m <sup>3</sup> /s	Metros cúbicos por segundo
MA	Metarenitos

METAMIG	Metais de Minas Gerais
MG	Minas Gerais
mm	Milímetro
N	Norte
N250	Nível 250
NE	Nordeste
NW	Noroeste
PMV	Ponto de medição de vazão
PROF	Profundidade
PROP	Propriedade
PVC	Poço de ventilação central
PVN	Poço de ventilação norte
PVS	Poço de ventilação sul
PZ	Piezômetro
S	Sul
SAD	Sequência Argilo Dolomítica
Sard	Filitos verdes e cinza escuros, metassiltitos, arenitos argilosos
SE	Sudoeste
SLP	Dolomito carbonoso cinza laminado, metapelitos carbonáticos, filitos dolomíticos grafitosos, metagrauvas, chert
SW	Sudoeste
SX	Cherts
t/h	Tonelada/Hora
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i> ou Sistema Universal Transverso de Mercator
VMZ	Votorantim Metais Zinco S.A.
VMZ-MA	Votorantim Metais Zinco S.A. – Unidade Morro Agudo
VTMA	Vertedouro Morro Agudo
W	Oeste
ZB	<i>Zone Budget</i> ou Zona de Balanço

# SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	<b>1</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>2</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>5</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>6</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>9</b>
<b>1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS</b> .....	<b>11</b>
1.1 OBJETIVOS.....	11
1.2 ATIVIDADES E MÉTODOS.....	11
1.3 LOCALIZAÇÃO.....	12
1.4 VIAS DE ACESSO.....	13
1.5 ASPECTOS GEOAMBIENTAIS.....	13
1.5.1 <i>Clima</i> .....	13
1.5.2 <i>Vegetação</i> .....	14
1.5.3 <i>Solos</i> .....	14
1.5.4 <i>Hidrografia</i> .....	14
1.5.5 <i>Geomorfologia</i> .....	15
1.6 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS.....	16
<b>2 SÍNTESE HISTÓRICA E DESCRITIVA DO EMPREENDIMENTO</b> .....	<b>18</b>
2.1 DRENAGEM DA MINA SUBTERRÂNEA.....	23
2.2 HISTÓRICO RELACIONADO À ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	26
2.3 MANEJO DE ÁGUA.....	27
<b>3 GEOLOGIA</b> .....	<b>30</b>
3.1 ESTRATIGRAFIA LOCAL.....	31
3.1.1 <i>Brechas dolomíticas (Dolorruditos) (BDOL)</i> .....	32
3.1.2 <i>Dolarenitos (DAR)</i> .....	32
3.1.3 <i>Sequência Argilo-Dolomítica (SAD)</i> .....	32
3.1.4 <i>Brechas Dolareníticas (BDAR)</i> .....	34
3.2 GEOLOGIA ESTRUTURAL.....	34
<b>4 REDE DE MONITORAMENTO</b> .....	<b>37</b>
4.1 PLUVIOMETRIA.....	38
4.2 POTENCIOMETRIA.....	38
4.3 VAZÕES DOS CURSOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS.....	41
4.4 VAZÕES DE ÁGUA NA MINA SUBTERRÂNEA.....	42
4.5 HIDROQUÍMICA.....	44
<b>5 ANÁLISE DOS DADOS DE MONITORAMENTO</b> .....	<b>46</b>
5.1 PLUVIOMETRIA.....	46
5.2 POTENCIOMETRIA.....	48
5.2.1 <i>Aquífero Raso</i> .....	51
5.2.2 <i>Aquífero Profundo</i> .....	53
5.3 VAZÕES DOS CURSOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS.....	56
5.4 VAZÕES DE ÁGUA NA MINA SUBTERRÂNEA.....	59
5.4.1 <i>Estação de Tratamento de Efluentes (ETE)</i> .....	61
5.4.2 <i>Bombeamento na mina subterrânea</i> .....	63
5.5 HIDROQUÍMICA.....	64

<b>6</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL .....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO .....</b>	<b>69</b>
7.1	ARQUIVOS GRÁFICOS UTILIZADOS .....	69
7.2	MALHA DE MODELAGEM ( <i>GRID</i> ).....	72
7.3	CÉLULAS INATIVAS ( <i>INACTIVE CELLS</i> ).....	74
7.4	PROPRIEDADES HIDROGEOLÓGICAS ( <i>PROPERTIES</i> ).....	74
7.5	INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA ( <i>OBSERVATION WELLS</i> ) 76	
7.6	RECARGA ( <i>RECHARGE</i> ) .....	78
7.7	RIO ( <i>RIVER</i> ) .....	78
7.8	POTENCIAIS ESPECIFICADOS ( <i>CONSTANT HEADS</i> ) .....	78
7.9	DRENOS ( <i>DRAIN</i> ) .....	79
7.10	POTENCIAIS GENERALIZADOS ( <i>GENERAL HEAD BOUNDARY</i> ) .....	80
7.11	ZONAS DE BALANÇO ( <i>ZONE BUDGET</i> ) .....	81
<b>8</b>	<b>CALIBRAÇÃO EM REGIME PERMANENTE .....</b>	<b>83</b>
8.1	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA ( <i>K</i> ).....	83
8.2	NÍVEL D'ÁGUA NOS INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO .....	84
8.3	CONDUTÂNCIA DOS DRENOS .....	85
8.4	ZONAS DE BALANÇO .....	86
8.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM REGIME PERMANENTE .....	87
<b>9</b>	<b>SIMULAÇÕES .....</b>	<b>90</b>
9.1	ENTRADA DE NOVOS DADOS NO MODELO .....	90
9.1.1	<i>Recarga</i> .....	90
9.1.2	<i>Estruturas de Drenagem da Mina</i> .....	90
9.1.3	<i>Zonas de Balanço</i> .....	91
9.2	RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO .....	92
<b>10</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>11</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>

## **1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

A Unidade de Morro Agudo, pertencente à Votorantim Metais Zinco S.A. (VMZ-MA), dispõe de diversos estudos hidrogeológicos realizados entre os anos 2004 e 2011 que abrangeram o inventário de pontos d'água, o projeto e instalação da rede de monitoramento hidrometeorológica, a análises desses dados, elaboração de um modelo hidrogeológico conceitual e do modelo numérico do fluxo d'água subterrânea do empreendimento e entorno.

Neste trabalho serão utilizados os dados coletados da rede de monitoramento de Janeiro de 2007 até 30 de Junho de 2011 para realizar a atualização do modelo hidrogeológico conceitual e a recalibração do modelo numérico do fluxo d'água.

### **1.1 OBJETIVOS**

O presente estudo visa atualizar o modelo hidrogeológico conceitual e a recalibrar o modelo numérico do fluxo d'água subterrânea na região da Unidade de Morro Agudo da VMZ com o objetivo de diagnosticar a interferência do aprofundamento da mina na disponibilidade hídrica da região, auxiliar na operação de desaguamento da mina e no projeto de construção da nova ETE (Estação de Tratamento de Efluentes) da unidade.

### **1.2 ATIVIDADES E MÉTODOS**

Para o desenvolvimento deste trabalho e alcançar com êxito os objetivos propostos, a metodologia utilizada contempla as seguintes etapas:

- **LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO**
  - a) Pesquisa bibliográfica dos trabalhos anteriores, realizados na área de estudo, que estejam relacionados ao contexto geológico e/ou hidrogeológico deste trabalho, assim como mapas e imagens de satélite;
  - b) Compilação da base cartográfica georeferenciada no datum SAD69 23S (South American Datum 1969), em escala compatível com os objetivos do trabalho, utilizando os softwares AutoCAD (Autodesk) e ArcGIS (ESRI), a partir dos dados obtidos na pesquisa bibliográfica.

- REDE DE MONITORAMENTO
  - a) Compilação dos dados da rede de monitoramento;
  - b) Tratamento dos dados até 30 de junho de 2011;
  - c) Análise dos dados.
  
- CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA
  - a) Litologia e aspectos geológicos dos aquíferos;
  - b) Potenciometria;
  - c) Direções preferenciais de fluxo;
  - d) Hidroquímica;
  - e) Parâmetros hidrodinâmicos;
  - f) Modelo hidrogeológico conceitual;
  - g) Montagem do modelo numérico.
  
- MODELAMENTO
  - a) Complementação dos dados de entrada
  - b) Modelamento do fluxo d'água subterrânea da área.
  
- SIMULAÇÕES
  - a) Simulações das vazões de surgências de água na mina subterrânea até o ano de 2017.

### **1.3 LOCALIZAÇÃO**

A Unidade Morro Agudo da Votorantim Metais Zinco situa-se na porção noroeste do estado de Minas Gerais, distando 42 km da cidade de Paracatu.

A área está inserida na folha PARACATU – SE-23-V-C-VI-1-NE e SE-23-V-C-III-3-SE, na escala de 1:25.000 (IBGE), e está delimitada pelas coordenadas UTM SAD69 apresentadas na Tabela 1.1 e Figura 1.1.

Tabela 1.1 - Coordenadas UTM SAD69 (Zona 23K) da área de estudo

Vértice	UTM E	UTM N
1	306311	8062559
2	306381	8064057
3	306628	8064412
4	306967	8064959

## 1.4 VIAS DE ACESSO

O principal acesso é pela BR-040, que liga Belo Horizonte a Brasília, até a cidade de Paracatu que dista 480 km de Belo Horizonte e 220 km de Brasília. A partir de Paracatu o acesso se faz pela BR-040 sentido Belo Horizonte por 26 km, posteriormente seguindo 16 km para sudoeste em rodovia cascalhada (Figura 1.1).

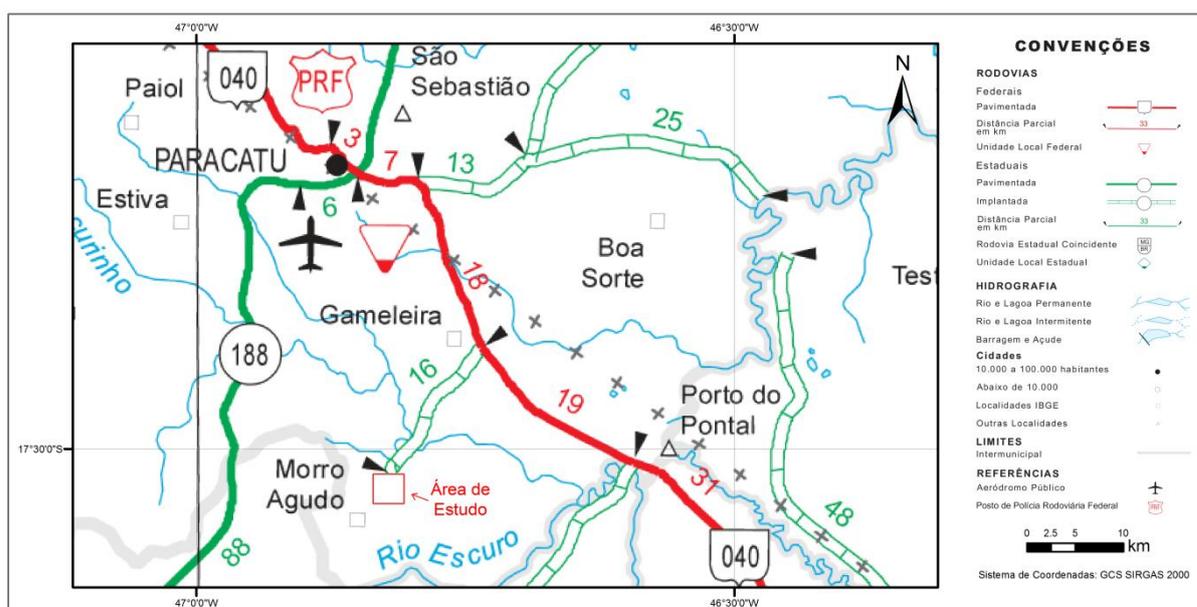


Figura 1.1 - Figura esquemática de localização da Mina de Morro Agudo e destaque em vermelho para a área de estudo. (DNIT, 2012)

## 1.5 ASPECTOS GEOAMBIENTAIS

### 1.5.1 Clima

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima na região de Paracatu é do tipo Aw – clima tropical úmido de savana, com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual é de 22,6°C, sendo a média do mês mais frio superior a 18°C e a média do mês mais quente de 29,1°C. A precipitação média

anual é de 1400 mm, sendo que no mês mais seco é inferior a 60 mm (ANTUNES, 1986), (BRASIL, 1992).

### **1.5.2 Vegetação**

Predomínio da vegetação de cerrado, típica do Brasil Central. O Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil e a maior formação da América do Sul em extensão, ocupando uma área de cerca de 1,8 milhões de km<sup>2</sup> no Brasil. É uma vegetação caracterizada pela presença de 3 estratos: arbóreo, arbustivo e herbáceo (MDGEO, 2005a).

### **1.5.3 Solos**

As grandes classes de solo presentes na bacia do Rio Paracatu são os Latossolos, Cambissolos, Neossolos Quartzarênicos, Solos Hidromórficos, Neossolos Flúvicos e solos com horizonte B textural (MDGEO, 2005a).

Na área de estudo o tipo de solo de maior expressividade é o latossolo que recobre boa porção da área.

### **1.5.4 Hidrografia**

A área de estudo pertence à bacia hidrográfica do Rio São Francisco, sub-bacia do Rio Paracatu. Localmente, o sistema de drenagem superficial da área da VMZ converge para o Córrego Morro Agudo, que por sua vez deságua no Ribeirão Traíras. O encontro desses dois cursos d'água ocorre bem próximo à área da Mina de Morro Agudo (COPASA, 1993).

O Ribeirão Traíras é o principal curso d'água local, possuindo diversos tributários, entre eles o próprio Córrego Morro Agudo, o Córrego Cercado (oeste da área), o Córrego Carrapato (norte da área) e outros menores sem denominação. O Córrego Morro Agudo tem sentido de fluxo principal de sul para norte enquanto o Ribeirão Traíras de oeste para leste. O Ribeirão Traíras deságua no Ribeirão Escurinho a aproximadamente 2,5 quilômetros da área da VMZ.

Durante a construção da barragem de sedimentação da VMZ, parte do leito original do Córrego Morro Agudo foi soterrado, sendo deslocado em torno de 30 metros para NW. Foi construído também outro desvio de água do Córrego Morro Agudo, este capta a água a montante do empreendimento, sendo parcialmente

tubulada e direcionada para a fazenda do Sr. Borginho à jusante da barragem de sedimentação da VMZ.

### **1.5.5 Geomorfologia**

Quanto ao relevo da região, predomina na porção oeste, sudoeste e noroeste a presença de serras alinhadas com direção preferencial NE/SW, onde a mais proeminente é a Serra das Araras. Na porção leste, sudeste e nordeste da área o relevo é mais aplainado ocorrendo à presença de alguns morros isolados.

As instalações da Mina de Morro Agudo situam-se próximo ao Córrego Morro Agudo no sopé do Morro do Calcário. As cotas topográficas variam em torno de 550 metros no córrego até 760 metros no alto do morro.

Na extremidade sudeste do Morro do Calcário (oposto às instalações da VMZ) existe uma cavidade natural que foi mapeada pela VMZ (BRANDT, 1998). Morfológicamente esta gruta é constituída por um amplo salão com mais de 90 m de comprimento por 150 m de largura, com desnível aproximado de 50 m.

Com exceção da gruta, não são observadas outras feições cársticas na região. Existem, no entanto, histórico de alguns casos de subsidência do terreno, típico de regiões cársticas.

Situada a cerca de 3 km a sudeste da Mina de Morro Agudo existe a Fazenda do Sr. João Roquete. Neste local ocorreu uma subsidência do terreno que teve início no final de 2002. São abatimentos da ordem de 20 metros de diâmetro e 15 metros de profundidade (Figura 1.2). Nesta fazenda existe um poço tubular localizado a cerca de 100 metros dos abatimentos, este poço possui 120 metros de profundidade, vazão de 3,5m<sup>3</sup>/h e funciona em torno de 1 hora por dia.



**Figura 1.2 - Abatimentos na Fazenda do Sr. João Roquete. (MDGEO, 2005a)**

Outro caso de subsidência do terreno foi registrado dentro da área industrial da unidade Morro Agudo, atrás do laboratório químico. Neste local ocorreu, em julho de 2004, uma subsidência do terreno com dimensão em torno de 5 metros de diâmetro e 8 metros de profundidade.

Além destes casos de subsidência, segundo os geólogos da VMZ, não existem registros de presença de cavidades no subsolo local, nem no solo e nem nas rochas carbonáticas.

## **1.6 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS**

Destaca-se em Paracatu a produção agropecuária, principalmente a produção de soja, milho e feijão e a criação extensiva de gado nelore, e a extração de minérios, sendo o ouro extraído na Mina Morro do Ouro pela empresa Kinross e zinco/chumbo na Mina Morro Agudo pela Votorantim Metais Zinco. A cidade recebe investimentos na área de biocombustíveis com a instalação de usinas de álcool e açúcar na região do Entre-Ribeiros.

A região do entorno da área de lavra e das instalações de beneficiamento do empreendimento mineiro da Mina Morro Agudo possui como alicerce da economia a atividade agropecuária.

A zona rural, próxima à área, apresenta baixa densidade demográfica, com a maioria dos seus moradores dedicada às atividades agropastoris de subsistência.

## 2 SÍNTESE HISTÓRICA E DESCRITIVA DO EMPREENDIMENTO

O depósito de zinco e chumbo foi descoberto em 1952 pelo Sr. Ângelo C. Solis, quando foi encontrada uma ocorrência de galena e esfalerita ao longo de um plano de falha, na Fazenda Traíras, junto à localidade de Morro Agudo. Nesta data iniciou-se o trabalho de exploração através de lavra rudimentar.

A partir de 1971 foram realizadas atividades de pesquisa geológica pela Companhia Auxiliar de Empresas de Mineração S/A – AEMSA. Em 1973, a Metais de Minas Gerais – METAMIG, atual CODEMIG, intensificou o trabalho de pesquisa na área realizando o levantamento geológico 1:10.000, trabalhos geofísicos e geoquímicos, além de 12.420 metros de sondagens.

Em 12 de Julho de 1974 deu-se a formação da Mineração Morro Agudo - M.M.A.S.A. para exploração da área. Em função das características geológicas tornou-se viável a elaboração de um plano de lavra subterrânea, utilizando-se o método de câmaras e pilares, com vias principais de acesso constituídas por um poço vertical para içamento de minério e uma rampa inclinada. Os trabalhos de abertura dessas estruturas iniciaram-se em 1975, a Figura 2.1 e Figura 2.2 mostram os registros fotográficos da área. A produção efetiva começou em 1978 (VOTORANTIM, 2011).



Figura 2.1 - Abertura da rampa principal de acesso à mina subterrânea (VOTORANTIM, 2011)



**Figura 2.2 - Abertura do shaft para içamento do minério (VOTORANTIM, 2011)**

No ano de 1984 a M.M.A.S.A foi privatizada e dividida entre as empresas CMM (Companhia Mineira de Metais), Ingá e Paraibuna.

A instalação da usina de concentração em Morro Agudo ocorreu por volta de 1985 e a barragem de rejeito começou a ser utilizada em 1988 e a Companhia Mineira de Metais (CMM) assume o total controle da M.M.A.S.A neste mesmo ano.

A Unidade de Morro Agudo pertence atualmente à Votorantim Metais Zinco. Compreende uma mina subterrânea onde é explotado o minério sulfetado contendo zinco e subordinadamente chumbo.

O método de lavra adotado é o de câmaras e pilares, sendo as primeiras desenvolvidas na direção da camada do minério, tendo uma largura em torno de 10 metros. Ao longo do mesmo corpo de minério são construídas diversas câmaras paralelas entre si e interligadas pelas denominadas varações, conforme Figura 2.3 e Figura 2.4.

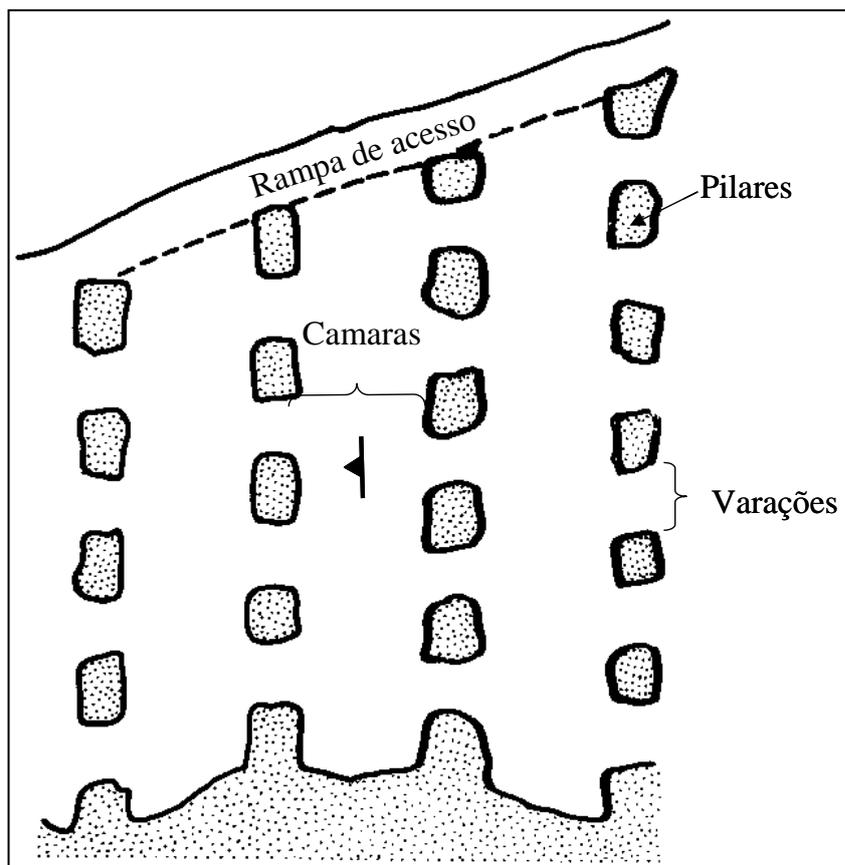


Figura 2.3 - Esquema do método de lavra da Mina de Morro Agudo (câmaras e pilares)



Figura 2.4 - Foto do método de lavra da Mina de Morro Agudo (câmaras e pilares)

Entre as câmaras são deixado os pilares com diâmetro médio de 5 metros. As varações possuem em geral uma largura de 7 metros e são desenvolvidas na direção do mergulho das camadas. A altura das câmaras é de 33 metros.

O acesso principal à mina é feito através de uma rampa helicoidal que dá acesso aos diversos níveis da mina. A retirada do minério é feito através de um *shaft* com capacidade de içamento de 160t/h com lançamento da carga diretamente no britador primário (Figura 2.5)



**Figura 2.5 - Foto do shaft de içamento de minério – Fev/2011**

O projeto inicial previa uma lavra até a profundidade em torno de 250 metros (nível 250), e assim a rampa principal e o *shaft* foram construídos com o objetivo de atender este planejamento. Com a expansão da mina em profundidade, foi construída a rampa II que dá acesso aos níveis inferiores.

Para a ventilação da mina foram construídos três poços de ventilação, estando um situado na porção norte da mina (PVN), outro na porção sul (PVS) e outro na porção central (PVC) (Figura 2.6). Estes estão conectados ao nível 250 da mina subterrânea, sendo que para o PVN foi construída uma galeria inclinada de acesso, partindo do nível 250. Os gases são exauridos através destes poços com capacidade total de exaustão de 330 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 2.6 - Foto do Poço de Ventilação Central (PVC) – Fev/2011**

O nível mais próximo à superfície é o nível 50 (diferença entre a cota topográfica da entrada da mina e o nível) e o espaçamento entre os níveis é em geral de 33 metros. Em junho de 2011 estava sendo lavrado o nível 583 e desenvolvendo o nível 616. O projeto final prevê um aprofundamento até o nível 683, o que resulta num tempo de vida útil até o ano de 2017.

Faz parte das instalações da Unidade de Morro Agudo uma usina de beneficiamento, onde é produzido o concentrado de zinco e chumbo.

O rejeito da usina é disposto em uma barragem que possui duas compartimentações (Barragem I). Enquanto se deposita o rejeito líquido em uma parte, a outra compartimentação é secada para retirada do pó calcário e periodicamente, alterna-se a deposição entre as duas compartimentações. Possui, ainda, duas barragens para depósito de rejeito do processo (Barragem II e III) (Figura 2.7), onde também há extração de calcário.

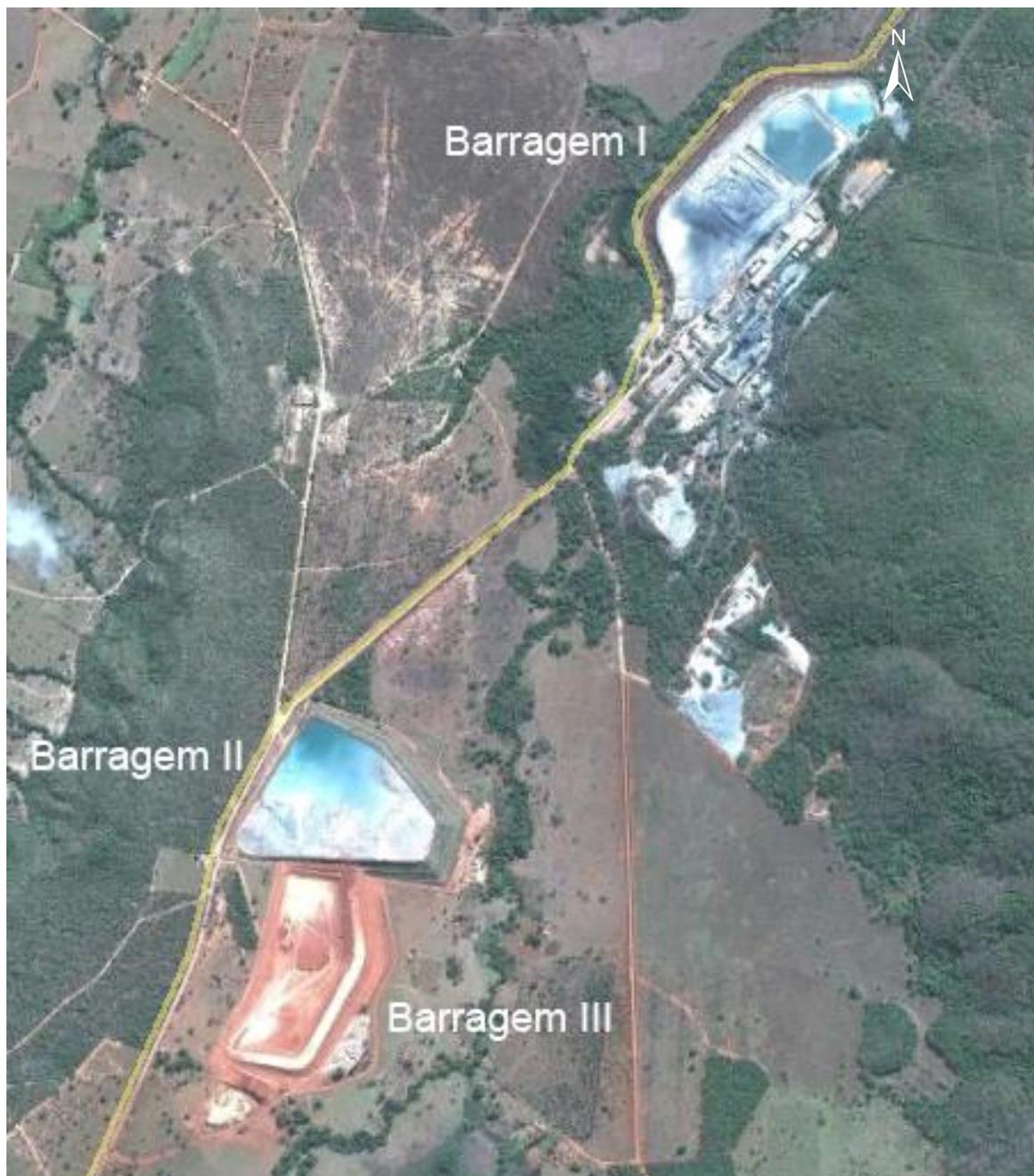


Figura 2.7 - Barragens de rejeito da Mina Morro Agudo – Paracatu, MG

## 2.1 DRENAGEM DA MINA SUBTERRÂNEA

Para o bom andamento dos trabalhos de extração do minério, é fundamental que as operações ocorram em ambientes já drenados. Para tanto, durante a etapa de desenvolvimento da mina, torna-se necessário realizar o recalque das águas que chegam às frentes de trabalho. Esta atividade é realizada basicamente por canaletas, furos de sonda, *raises* (*water pass*) e estações de bombeamento. As canaletas são feitas no piso lateral das galerias e direcionam o fluxo pela declividade natural até as estações de bombeamento que são feitas nas

entradas de todos os níveis de acesso à rampa principal e direcionadas a duas estações principais (MDGEO, 2005a). A Figura 2.8 apresenta o fluxograma geral de bombeamento subterrâneo da Mina de Morro Agudo.

A principal estação de bombeamento situa-se no Nível 250 e conta com duas bombas, que em conjunto conseguem bombear, em um único estágio,  $350\text{m}^3/\text{h}$  de água para a estação secundária que se localiza no Nível 150, que com duas bombas, conseguem bombear, também em um único estágio,  $350\text{m}^3/\text{h}$  de água para superfície. Porém não é utilizada toda a capacidade de bombeamento, sendo atualmente utilizada vazões na ordem de 240 a  $260\text{m}^3/\text{h}$ .

Ao longo da mina subterrânea existem diversas estações de bombeamento em escalas intermediárias que recalcam as águas das frentes de lavra para o Nível 250.

Destacam-se, também na mina, quatro pontos de surgência de água subterrânea, são eles:

- Surgências nas paredes do Poço de Ventilação Norte (PVN);
- Surgências nas paredes do Poço de Ventilação Sul (PVS);
- Surgências na galeria 350 R1E;
- Surgências nas paredes do *shaft* principal (nível 50);

As surgências dos poços de ventilação e da galeria 350 R1E são escoadas por gravidade até a caixa do Nível 250, conhecida como "Água Limpa" (por atenderem os padrões de qualidade), e bombeadas até o PVS. Posteriormente são bombeadas para uma caixa intermediária no Nível 150, e por fim, lançadas diretamente no Córrego Morro Agudo.

Toda a água restante na mina subterrânea (que não atendem aos padrões de qualidade), aproximadamente  $240\text{m}^3/\text{h}$ , é bombeada até a superfície, onde é tratada e aproveitada no processo. O excedente é escoado como efluente no Ribeirão Traíras.

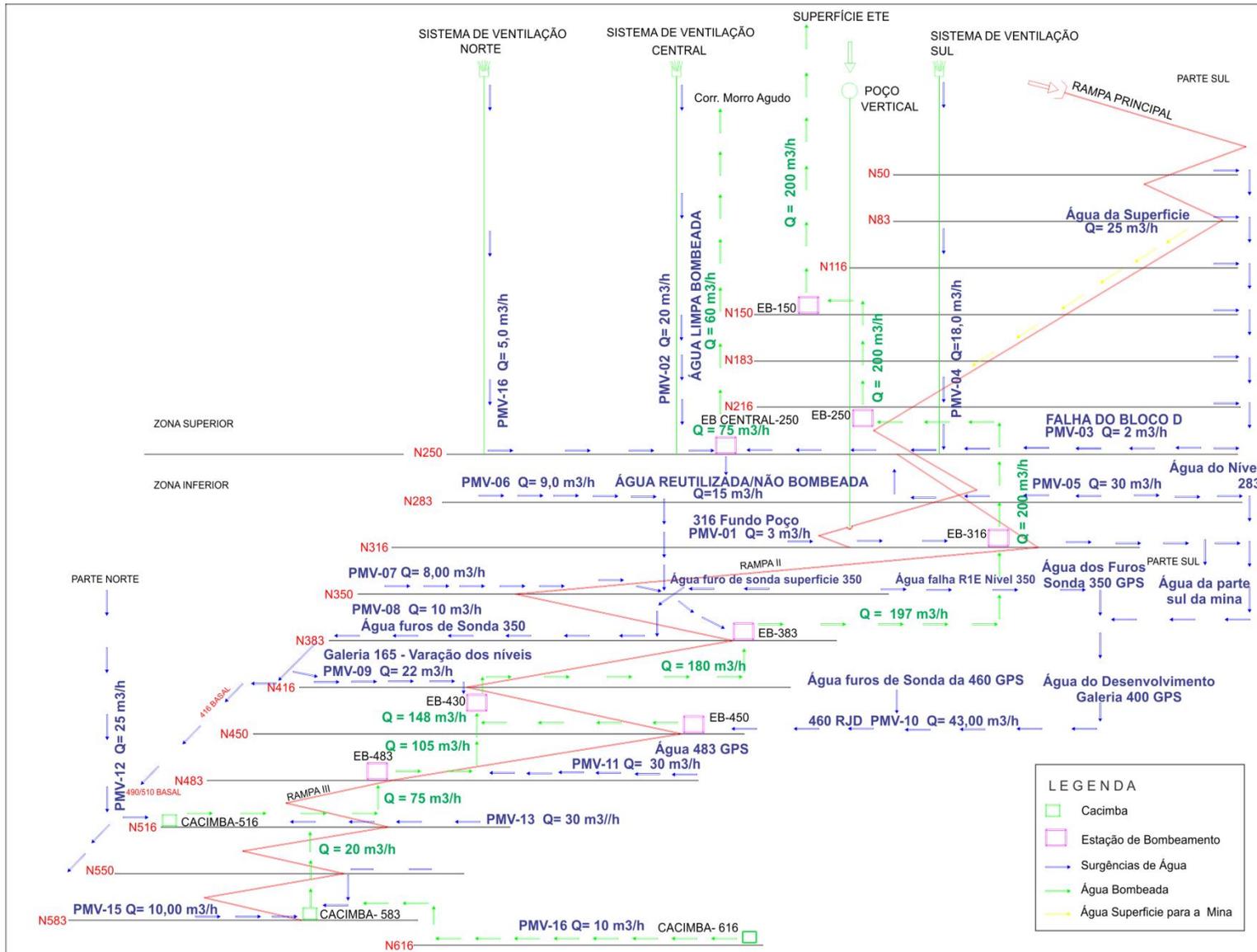


Figura 2.8 - Fluxograma atual de bombeamento da mina subterrânea

## 2.2 HISTÓRICO RELACIONADO À ÁGUA SUBTERRÂNEA

De maneira geral, na unidade de Morro Agudo, a presença de água subterrânea não é tão significativa. Neste estudo foram levantados alguns fatos históricos relacionados a esta questão, a maior parte dessas informações foram obtidas verbalmente, sendo muitas vezes pouco detalhadas e imprecisas.

Durante a perfuração do *shaft* principal da mina subterrânea, foi detectado uma entrada de água a 40 metros de profundidade, possivelmente na interceptação com a falha principal. Nesta região do *shaft* foi construída uma estrutura para a captação desta água que existe até hoje. A vazão desta surgência é de aproximadamente 10 m<sup>3</sup>/h.

Na mina subterrânea, a principal surgência de água subterrânea ocorre na falha do corpo D, atualmente na galeria 350 R1E. Sempre que as aberturas subterrâneas interceptam esta falha, ocorrem surgências de água. Estima-se atualmente que exista um aporte de água subterrânea da ordem de 20 a 40 m<sup>3</sup>/h provenientes da interceptação das galerias com esta falha.

Um caso particular ocorreu com a perfuração do Poço de Ventilação Sul (PVS), realizada no final de 2002. Embora este poço tivesse sido locado de modo a não interceptar a falha do corpo D, quando o furo chegou a 70 metros de profundidade encontrou a falha, jorrando cerca de 60 m<sup>3</sup>/h. Isto ocorreu devido à existência de inflexões no plano desta falha que não eram conhecidas. Para minimizar o problema foi colocado um anel metálico no local da entrada de água. Esta medida reduziu a vazão surgente para cerca de 30 m<sup>3</sup>/h. Segundo informações verbais, com a perfuração do PVS ocorreu um rebaixamento no nível d'água local. O furo 70/48, próximo ao poço, apresentou redução do nível d'água de 15 metros para 38 metros de profundidade.

O principal problema com água na mina subterrânea ocorreu na perfuração do Poço de Ventilação Norte (PVN). Esta perfuração foi iniciada em maio de 2004 e realizada com o "*raise boring*" (perfuração ascendente com o equipamento na superfície). Durante a execução do furo guia ocorreu um colapso do solo no local onde estava o "*raise boring*", devido ao grande afluxo d'água gerado pelo furo para a mina, da ordem de 160 a 180 m<sup>3</sup>/h. Para contornar a situação foi

injetado cimento em todo o entorno do poço o que conseguiu reduzir a vazão de água para cerca de 40 m<sup>3</sup>/h.

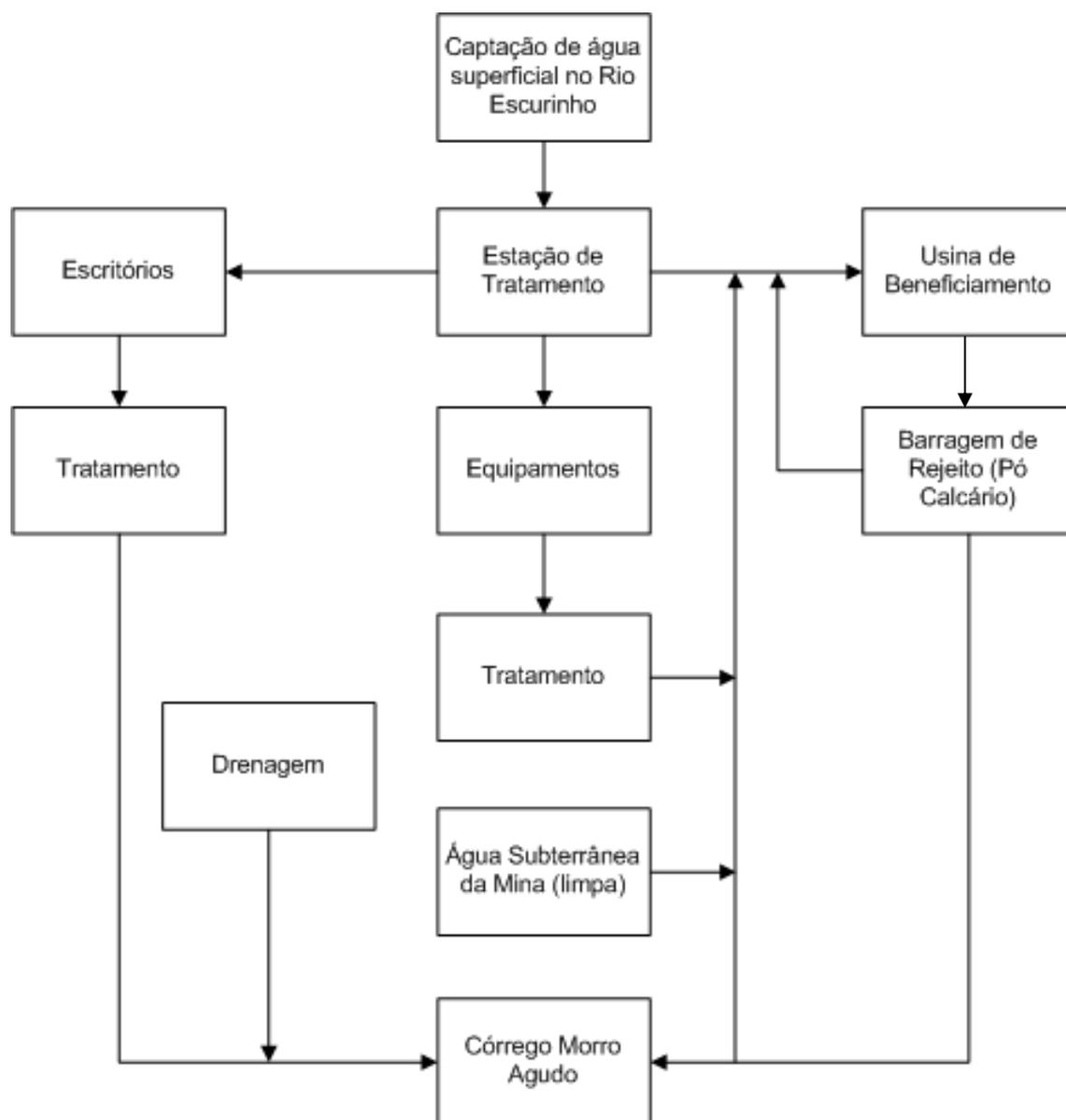
Outro caso foi registrado na barragem de rejeito da VMZ no início de 2000. Neste ano a compartimentação norte da barragem estava com água, e foram detectadas surgências de água poucos metros à jusante, caracterizando um processo de infiltração da água da barragem no solo e ressurgência. Para solucionar o problema, o compartimento norte da barragem foi esvaziado sendo detectadas algumas fendas em seu fundo que foram preenchidas com material estéril. Somente no ano de 2002 o compartimento norte voltou a receber água, não sendo detectado novamente este processo de infiltração e ressurgência.

Um problema ocorreu em uma das fazendas pertencentes ao Sr. Borginho, localizada a cerca de 3 km a SE da VMZ (na extremidade oposta do Morro do Calcário), onde existe um poço tubular profundo com cerca de 115 metros de profundidade que apresentava uma vazão em torno de 15 m<sup>3</sup>/h. Segundo informações dos moradores o poço secou por volta do ano 2001, sendo a VMZ responsabilizada pelo ocorrido. Visando evitar problemas, a VMZ fornece água a esta fazenda desde esta época.

Outro caso ocorreu na fazenda do Sr. João Roquete, com a redução de vazão de um poço tubular. Ao investigar o problema foi detectado que a tubulação de adução do poço estava corroída. A própria VMZ providenciou a troca da tubulação. Nesta fazenda ocorreram também problemas de subsidências no terreno conforme relatado no Item 1.5.5. Em 2010 esta subsidência foi novamente avaliada e não foi constatada nenhuma relação com as atividades da VMZ (MDGEO, 2011).

### **2.3 MANEJO DE ÁGUA**

A Figura 2.9 sintetiza o manejo de água nas instalações da Unidade de Morro Agudo.



**Figura 2.9 - Fluxograma do manejo das águas**

A principal fonte de água para a Unidade de Morro Agudo é a captação do Rio Escurinho, cujas águas são utilizadas para uso doméstico. A água utilizada na usina de beneficiamento e nos equipamentos da mina subterrânea são provenientes do sistema aquífero fissural, sendo estas recirculadas após tratamento, e de águas pluviais que são aduzidas para a mina subterrânea.

Toda água excedente no circuito, bem como as águas de drenagem pluvial são lançadas no Córrego Morro Agudo.

Conforme citado anteriormente, parte do Córrego Morro Agudo foi desviado e canalizado logo a montante do empreendimento sendo suas águas

conduzidas diretamente ao Ribeirão Traíras, passando pela Fazenda do Sr. Borginho.

A partir do ponto de desvio ocorre o lançamento de águas pluviais e água limpa no leito seco do córrego, que deságuam numa barragem de água construída próximo às instalações.

### 3 GEOLOGIA

A região de Paracatu encontra-se na parte externa da Faixa de Dobramentos Brasília (ALMEIDA, 1967) na margem oeste do Cráton do São Francisco. Predomina na região uma espessa sequência de metassedimentos marinhos, essencialmente pelito-dolomíticos dos Grupos Vazante e Canastra, de idade Proterozóica. A Figura 3.1 apresenta o mapa geológico regional da área.

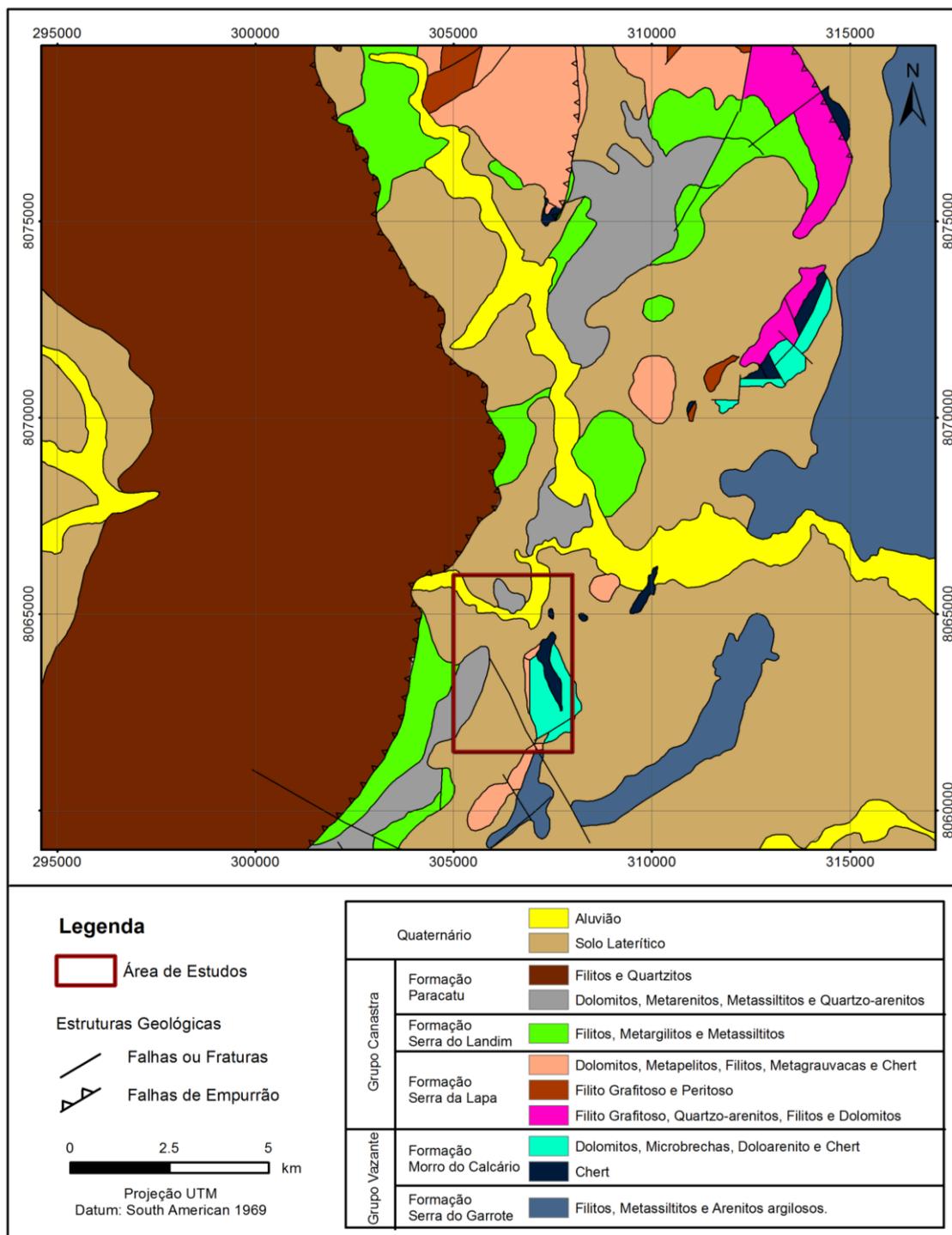


Figura 3.1 - Mapa geológico regional (VOTORANTIM, 2011)

A sequência estratigráfica regional não está definida, existindo diversas controvérsias quanto à formação ou grupo a que pertencem os litotipos. Ressalta-se que este trabalho é de compilação, não sendo objetivo do mesmo definir a coluna estratigráfica regional. A coluna estratigráfica adotada neste trabalho baseia-se na coluna proposta por BERTACHINI e SILVA (2004) e pode ser visualizada na Figura 3.2.

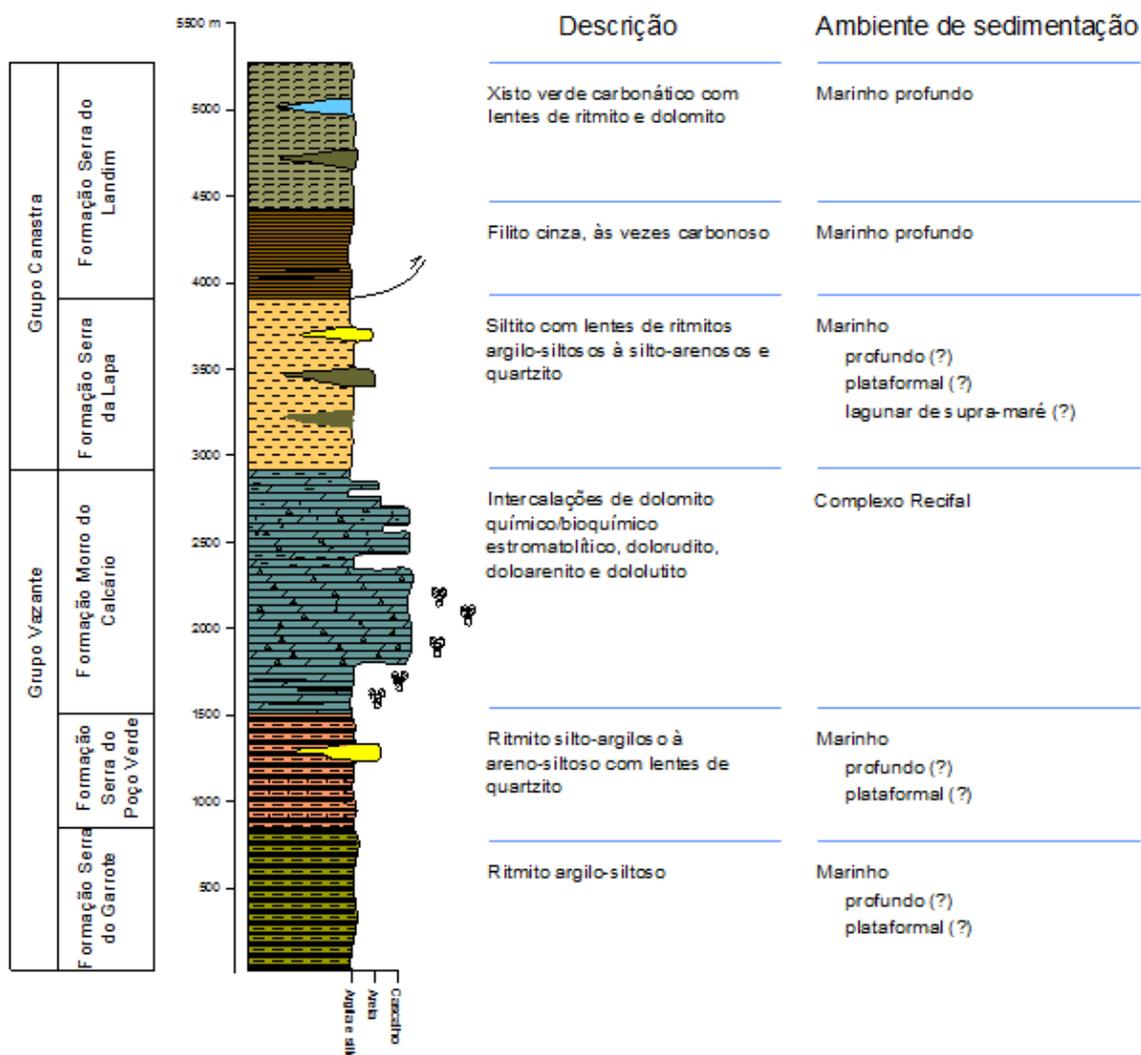


Figura 3.2 - Estratigrafia da região do Morro da Mina (Bertachini & Silva, 2004)

A mineralização de Morro Agudo está associada a um *trend* linear regional, com direção geral N-S e com aproximadamente 300 km, onde estão localizadas a Mina de Vazante e outras ocorrências de chumbo e zinco.

### 3.1 ESTRATIGRAFIA LOCAL

Na Mina de Morro Agudo os minérios encontram-se na sequência metassedimentar do Grupo Vazante, hospedados em dolarenitos, brechas

dolareníticas e dolomíticas pertencentes à Formação Morro do Calcário, que compreende um complexo recifal. (MDGEO, 2008)

São descritos na área da mina quatro litotipos:

### **3.1.1 Brechas dolomíticas (Dolorruditos) (BDOL)**

A base da estratigrafia local é ocupada por brechas dolomíticas, também denominadas dolorruditos. São brechas intraformacionais constituídas por clastos angulosos de tamanhos variados, desde milimétricos até métricos, de rochas dolomíticas laminadas ou maciças, de cor cinza-escuro e subordinadamente rosa.

Nestas brechas é comum a presença de blocos constituídos por acumulações maciças estromatolíticas.

O cimento destas rochas é predominantemente dolomítico e extremamente fino. Nelas ocorre zinco e chumbo na forma de crescimento de cristais, por vezes centimétricos, ocupando vazios de dissolução, espaços de porosidade da rocha e, ainda, preenchendo fraturas. Estas ocorrências definem três níveis conhecidos no jazimento, que se mostram descontínuos e compõem os corpos basais.

### **3.1.2 Dolarenitos (DAR)**

São rochas de cor cinza-clara a cinza-escuro constituídas por litoclastos dolomíticos, com tamanho médio de um milímetro, que se mostram bem arredondados e, por vezes, com bordas truncadas, agregados através de um cimento fino, também dolomítico.

O dolomito é o cimento predominante, ainda que quartzo e chert também ocorram em menor quantidade. Nos dolarenitos mineralizados, esfalerita e, subordinadamente galena, cimentam os grãos dolomíticos.

A espessura média do pacote de dolarenitos na mina é de 30 metros com mergulho em torno de 20°W.

### **3.1.3 Sequência Argilo-Dolomítica (SAD)**

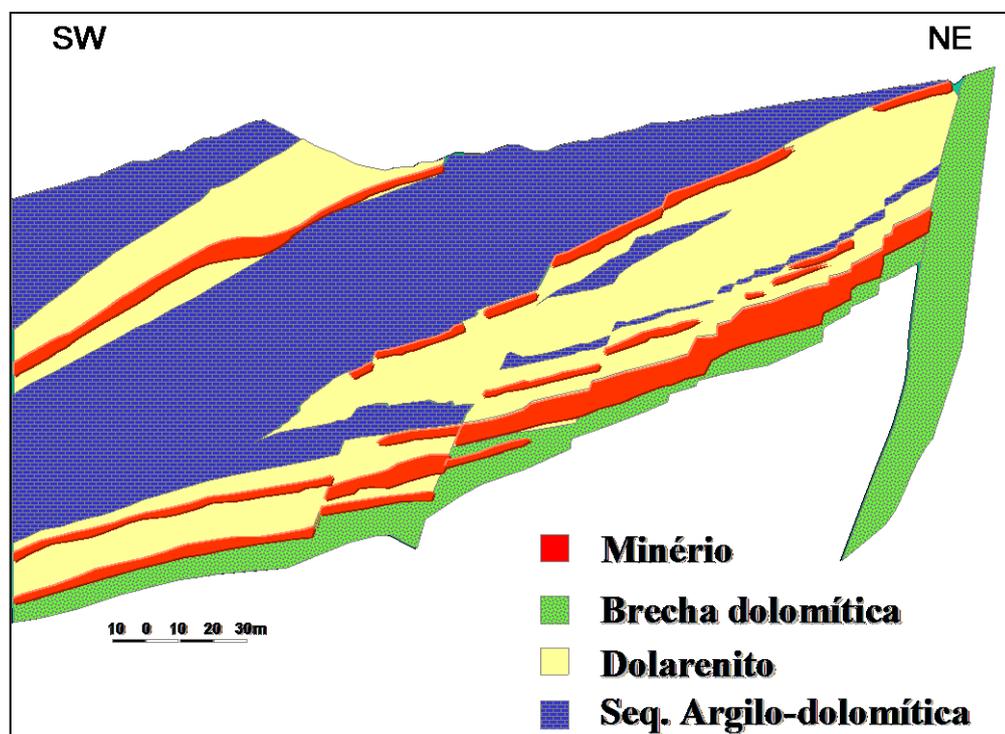
Usa-se esta denominação localmente para descrever um pacote de rochas de cor cinza-escuro, de aspecto laminado, constituída por intercalações

milimétricas a decimétricas, ora predominantemente dolomítica, ora argilosa com aspecto carbonosa escura.

Estas rochas se posicionam diretamente sobre os dolarenitos ou com estes encontram-se interdigitados a oeste do Morro de Calcário.

Regionalmente esta sequência argilo-dolomítica está correlacionada à Fácies Serra da Lapa, da Formação Serra da Lapa, onde aparecem como sedimentos depositados em ambiente lagunar.

A Figura 3.3 apresenta uma seção geológica vertical esquemática da estratigrafia da Mina de Morro Agudo, onde se observa os principais litotipos encontrados.



**Figura 3.3 - Perfil geológico da Mina Morro Agudo**

Nota-se pela figura a existência de um pacote de dolarenito contido dentro da sequência argilo-dolomítica (SAD). Nele está contido o corpo de minério superior do jazimento. Este pacote está espaçado verticalmente do pacote de dolarenito principal em média de 40-45 metros e tem uma espessura média de 10 metros e, acima, continua a sequência argilo-dolomítica

### 3.1.4 Brechas Dolareníticas (BDAR)

Interdigitado nas sequências supracitadas são encontradas as brechas dolareníticas que são as rochas hospedeiras das mineralizações mais ricas da mina.

As brechas dolareníticas são constituídas por fragmentos, em sua grande maioria menores que 2 centímetros, de dolomitos, assim como no tipo litológico basal, de cores cinza-escuro, cinza-clara, imersa numa matriz dolarenítica. Sua espessura é variada, em média 5 metros.

## 3.2 GEOLOGIA ESTRUTURAL

A Mina de Morro Agudo apresenta um grande sistema de falhas normais com direções variando entre N15°W e N55°W que sistematicamente rebaixa o bloco SW da jazida. Essas falhas normais apresentam rejeitos variados de alguns milímetros até 30 metros. Esse sistema de falhas dividem a mina em vários blocos denominados de A, B, C, D e E.

Dentre essas falhas, destaca-se a denominada “falha principal” situada na porção ENE do jazimento que delimita a ocorrência dos corpos de minério. Trata-se de uma falha normal com direção N15°-20°W e mergulho de 75°SW. Uma visualização em planta dessas falhas principais é apresentada pela Figura 3.4.

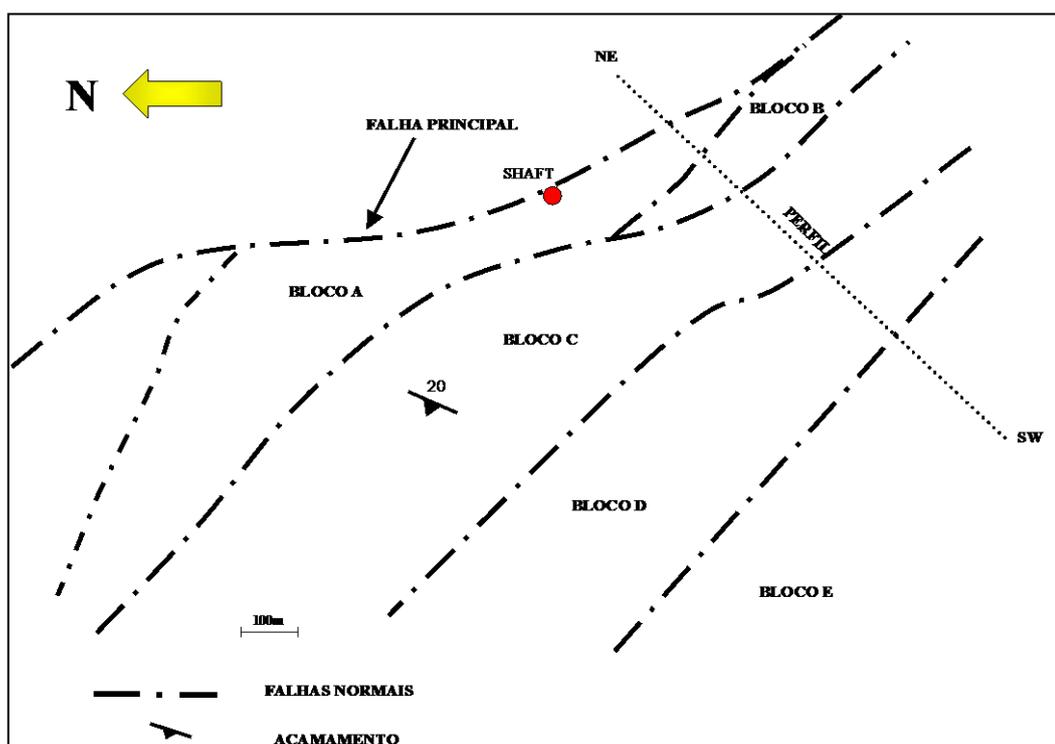


Figura 3.4 - Vista em planta das falhas principais

A Figura 3.5 apresenta um perfil geológico típico simplificado da Mina de Morro Agudo onde se observa os sistemas de falhas normais que dividem a mina nos vários blocos denominados de A, B, C, D e E.

O acamamento rochoso apresenta uma direção preferencial entre N10°-20°E com mergulho em torno de 20°W.

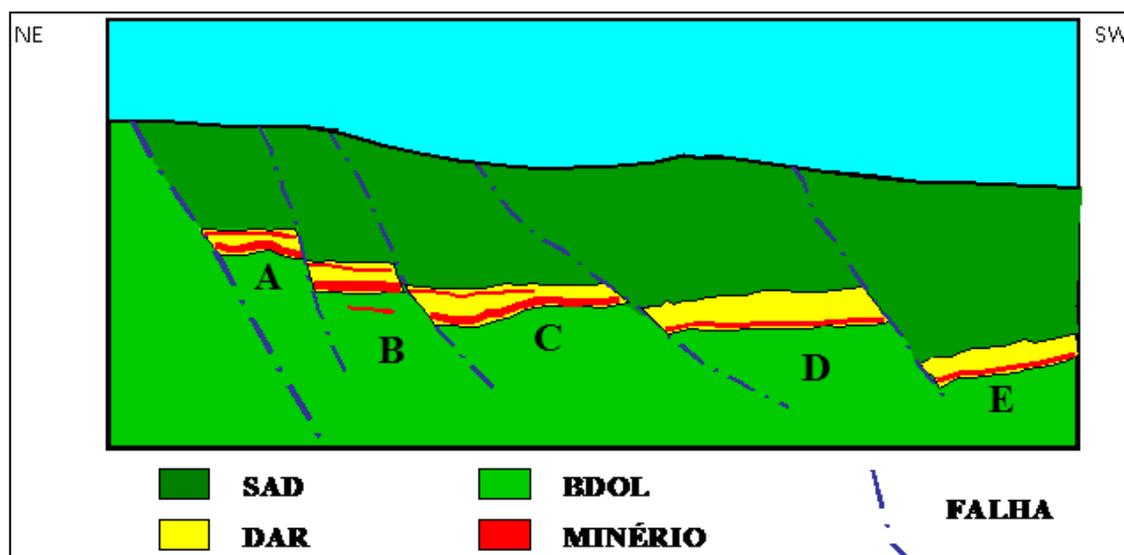


Figura 3.5 - Perfil geológico esquemático da região da Mina de Morro Agudo (sem escala)

Além do sistema de falhas normais principal, o jazimento apresenta-se intensamente falhado e fraturado, onde se destacam as seguintes direções: N15°W, N55°W, N75°W, N25°E e N75°E. Em geral essas estruturas planares rúpteis encontram-se fechadas ou preenchidas principalmente por dolomita remobilizada, pirita, galena e subordinadamente esfalerita. Citam-se abaixo as direções com suas respectivas falhas e fraturas encontradas (HGEO, 2004):

- N15°W: Falhas preenchidas por dolomita, galena, pirita e esfalerita e fraturas preenchidas por dolomita, galena e pirita.
- N55°W: Falhas e fraturas preenchidas por dolomita e esfalerita.
- N75°W: Falhas não preenchidas, fraturas não preenchidas e fraturas preenchidas por esfalerita.
- N25°E: Falhas preenchidas por galena e fraturas não preenchidas
- N75°E: Falhas e fraturas não preenchidas.

Segundo informações verbais levantadas, durante o desenvolvimento das galerias da mina subterrânea foram constatadas regiões onde a falha principal apresentava abertura de até 20 cm, preenchida por argila.

Outra informação importante refere-se à ausência de água nas fraturas e falhas na maior parte da mina subterrânea. Exceção ocorre na falha normal que delimita o corpo D, com corpo E. Esta falha apresenta quantidade significativa de água, dificultando inclusive que as aberturas subterrâneas atravessem esta estrutura.

#### 4 REDE DE MONITORAMENTO

A rede de monitoramento hidrometeorológica da Mina de Morro Agudo engloba diversos instrumentos (Figura 4.1), onde são citados: uma estação pluviométrica (☁), 16 piezômetros (📍), 29 indicadores do nível d'água (📍), 6 vertedouros (🌊) e 16 pontos de medição de vazão na mina subterrânea (não visualizados na figura) (MDGEO, 2010). Os dados de monitoramento fornecidos por estes instrumentos serão apresentados neste trabalho com atualização até 30 de junho de 2011.

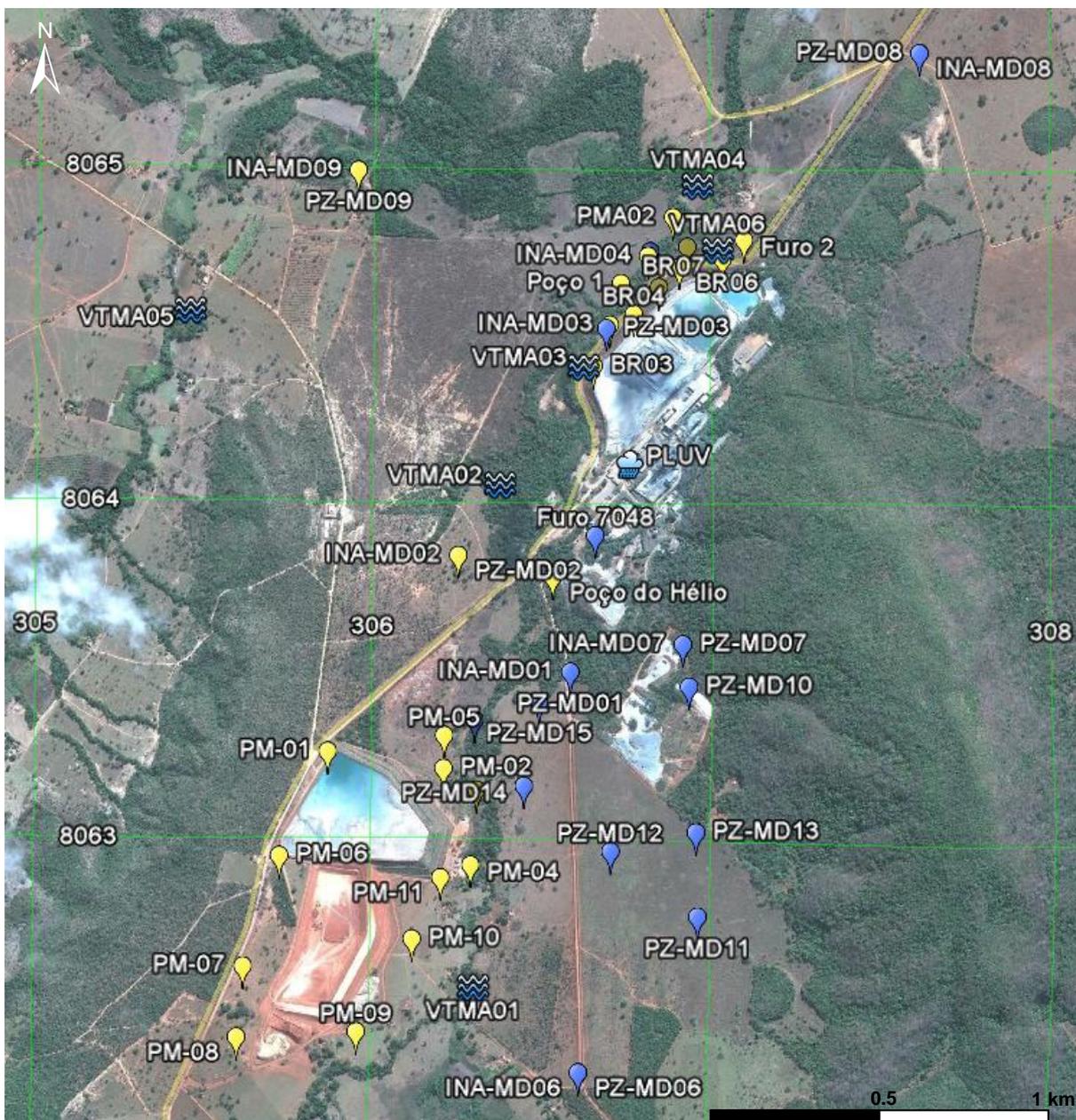


Figura 4.1 - Rede de monitoramento da Mina de Morro Agudo, Paracatu - MG

#### 4.1 PLUVIOMETRIA

O monitoramento da pluvimetria na unidade de Morro Agudo iniciou-se em setembro de 2006, sendo realizado através de uma estação pluviométrica (Figura 4.2) instalada nas proximidades dos prédios administrativos/técnicos da VMZ. Além deste monitoramento, a VMZ possui registros pluviométricos desde janeiro de 1987, realizados na unidade Agroflorestal localizada a cerca de 20 km da mina de Morro Agudo.



Figura 4.2 - Estação pluviométrica

#### 4.2 POTENCIOMETRIA

Os dados de monitoramento de nível d'água subterrânea foram compilados em uma série histórica para facilitar a visualização do comportamento de cada um desses instrumentos. A Tabela 4.1 apresenta os dados cadastrais desses instrumentos.

Tabela 4.1 - Dados cadastrais dos instrumentos de monitoramento

INSTRUMENTO	UTM E (m)	UTM N (m)	COTA (m)	PROF (m)
BR03	306658.46	8064391.34	550.89	22.5
BR04	306777.39	8064548.38	549.12	28.6
BR05	306852.28	8064629.44	547.56	25.5
BR06	306912.48	8064690.04	547.75	25.5
BR07	307039.82	8064713.84	553.06	26
Furo 2	307103.00	8064771.00	554.69	25.6
Furo 7048	306664.00	8063836.00	570.30	48
INA-MD01	306591.71	8063476.11	575.49	28.0
INA-MD02	306256.83	8063820.92	567.40	15.0
INA-MD03	306706.36	8064515.37	549.21	>10.5
INA-MD04	306821.21	8064724.34	539.72	>3.2
INA-MD06	306625.90	8062281.99	575.49	26.7
INA-MD07	306919.73	8063560.83	597.68	8
INA-MD08	307618.35	8065332.60	562.13	14.1
INA-MD09	305951.53	8064971.91	548.75	8.8
PM-01	305869.59	8063235.43	598.61	21.00
PM-02	306217.13	8063185.96	575.84	25.75
PM-03	306316.47	8063121.62	571.76	27.00
PM-04	306300.26	8062898.19	574.86	18.00
PM-05	306213.51	8063285.61	604.72	25.50
PM-06	305727.63	8062925.33	608.36	24.00
PM-07	305623.04	8062596.75	606.28	24.00
PM-08	305606.05	8062384.59	600.98	24.00
PM-09	305962.44	8062400.81	585.56	16.00
PM-10	306126.23	8062677.91	583.70	15.00
PM-11	306210.14	8062860.69	580.11	20.00
PMA02	306894.88	8064840.86	539.18	8.23
Poço 1	306740.00	8064641.00	542.43	4.11
Poço 2	306938.00	8064752.00	540.00	5.18
Poço do Hélio	306539.00	8063758.00	566.00	15.6
PZ-MD01	306591.71	8063476.11	575.51	78.2
PZ-MD02	306256.83	8063820.92	567.16	67.4
PZ-MD03	306696.09	8064504.57	549.53	71.2
PZ-MD04	306827.64	8064737.93	539.58	60
PZ-MD06	306625.90	8062281.99	575.51	59.9
PZ-MD07	306919.73	8063560.83	597.89	70.6

INSTRUMENTO	UTM E (m)	UTM N (m)	COTA (m)	PROF (m)
PZ-MD08	307618.35	8065332.60	562.20	41.7
PZ-MD09	305951.53	8064971.91	548.72	70.9
PZ-MD10	306939.85	8063435.29	595.77	137.15
PZ-MD11	306967.51	8062754.00	607.27	144.30
PZ-MD12	306712.64	8062944.35	590.58	281.45
PZ-MD13	306961.08	8063003.890	606.74	433.40
PZ-MD14	306457.75	8063134.70	572.15	281.45
PZ-MD15	306501.04	8063386.56	570.23	341.05
PZ-MD16	306310.25	8063330.03	568.89	460.40

O monitoramento é realizado mensalmente com a utilização de um medidor de nível d'água sonoro Sollinst, em todos os instrumentos, como visto na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Monitoramento mensal do nível d'água - PZ-MD06 e INA-MD06 – Mai/2010

### 4.3 VAZÕES DOS CURSOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS

A rede de monitoramento da vazão dos cursos d'água superficiais no entorno da Mina de Morro Agudo é composta por 6 pontos de medições fixas com vertedouros (MDGEO, 2005c). Esses pontos tiveram seu monitoramento iniciado em novembro de 2006. A Tabela 4.2 apresenta seus dados cadastrais.

**Tabela 4.2 - Cursos d'água superficiais**

Código	UTM E	UTM N	Local	Tipo de medição
VTMA01	306311	8062559	Córrego Morro Agudo, montante da mina	Trapezoidal de base 40 cm
VTMA02	306381	8064057	Córrego Morro Agudo, montante barragem, prox. Ponto 9, após descarga de efluente	Trapezoidal de base 40 cm
VTMA03	306628	8064412	Córrego Morro Agudo, no vertedouro da barragem de água	Trapezoidal de base 40 cm
VTMA04	306967	8064959	Córrego Morro Agudo, antes de desaguar no Ribeirão Traíras	Trapezoidal de base 40 cm
VTMA05	305454	8064572	Córrego Batuque, afluente da margem direita do Ribeirão Traíras	Triangular 90°
VTMA06	307025	8064765	Na saída do dreno de desvio do C. M. Agudo, ponto 7.	Trapezoidal de base 20 cm

O monitoramento é realizado mensalmente através da leitura da régua instalada no vertedouro na Figura 4.4.



**Figura 4.4 - Vertedouro trapezoidal de base 40cm (VTMA01) – Abr/2010**

#### 4.4 VAZÕES DE ÁGUA NA MINA SUBTERRÂNEA

Existem 16 pontos de medição de vazão no interior da mina subterrânea. As localizações e observações são apresentadas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Pontos de medição de vazão na mina subterrânea**

PONTOS DE MEDIÇÃO	LOCAIS	OBSERVAÇÕES SOBRE OS PONTOS DE MEDIÇÃO
PMV-01	NÍVEL 316 Fundo Poço	Poço Shaft e outras surgências da parte norte da mina
PMV-02	NÍVEL 250 - PVC	Poço perfurado para construção do PVC (Poço de Ventilação Central), surgência de água ocorreu no primeiro semestre de 2008 onde foi alargado e revestido até 138m. A mesma é escoada para caixa de água limpa nível 250, sendo bombeada para superfície e lançada no Córrego Morro Agudo.
PMV-03	NÍVEL 250 - BLOCO D	Falha do Bloco D, nível 250, escoada para caixa de água limpa da mina.
PMV-04	NÍVEL 250 - PVS	Poço perfurado para construção PVS (Poço de Ventilação Sul). A mesma é escoada para caixa de água limpa nível 250, sendo bombeada para superfície e lançada no Córrego Morro Agudo.
PMV-05	NÍVEL 283 - 260 JD	Falha da galeria 260 JD nível 283, a mesma é armazenada em uma cacimba e bombeada para o nível 250 caixa d'água limpa, sendo lançada no córrego Morro Agudo.
PMV-06	NÍVEL 283 CAB-SUL	Parte da água surgente no nível, restante da água escoada pelas galerias até o nível 350, chegando à caixa do nível 460.
PMV-07	NÍVEL 350 - ENTRADA GALERIA	Água surgente na galeria 350 e parte do nível 316.
PMV-08	NÍVEL 383 - ENTRADA GALERIA	Água surgente no nível 383 é escoada pela galeria, até o nível 416 onde é realizada a medição de vazão, depois é escoada para caixa do 430, onde entra no circuito de bombeamento.
PMV-09	NÍVEL 416- ENTRADA GALEIRA	Água surgente no nível 416 e 383, somada à água do furo de sonda de superfície da galeria 350. Água escoada para o nível e caixa 430.
PMV-10	NÍVEL 460 - GALERIA 460 RJD	Água surgente nas galerias superiores parte sul da mina e as águas dos furos de sonda da 350 e 460 GPS, são escoadas até a caixa do nível 460.
PMV-11	NÍVEL 483 - GALERIA 483 GPS	Falha e fraturas com água, surgiu em Dezembro de 2007, água é armazenada em uma cacimba depois é direcionada por gravidade até a caixa do nível 483, onde é bombeada para caixa do 430, seguindo o circuito principal de bombeamento.
PMV-12	NÍVEL 490 - FRENTE RASE	Água surgente nas galerias superiores da parte norte da mina, após se unirem escoada para galeria do 490 até a caixa do nível 516, sendo bombeada para caixa do nível 483.

PONTOS DE MEDIÇÃO	LOCAIS	OBSERVAÇÕES SOBRE OS PONTOS DE MEDIÇÃO
PMV-13	NÍVEL 516 - ENTRADA GALERIA	Água surgente nos níveis superiores na parte norte da mina com a água do nível 516 e parte da água do nível 483, são escoadas pela galeria até a caixa do nível 516, sendo bombeada para caixa do nível 483.
PMV-14	NÍVEL 550 - GALERIA 550 TR	Pouca água surge neste nível, atualmente escoo para o nível 583 até a cacimba para armazenamento, onde é bombeada.
PMV-15	NÍVEL 583 - ENTRADA RAMPA 3	Água do nível 583 somada à água do nível 550. É bombeada para caixa do nível 483.
PMV-16	NÍVEL 250 - PVN	Água do Poço PVN (Poço Ventilação Norte), a mesma escoo para caixa de água limpa do nível 250.

O monitoramento é realizado mensalmente através da utilização do método volumétrico e da leitura de pressão em manômetros instalados nos furos de sondagem obturados, como visto na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Manômetro instalado em um furo de sondagem obturado – Fev/2011

#### 4.5 HIDROQUÍMICA

A VMZ-MA dispõe de nove (09) campanhas hidroquímicas realizadas (Julho/07, Setembro/07, Abril/08, Setembro/08, Maio/09, Outubro/09, Abril/10, Outubro/10 e Abril/11).

A amostragem de água superficial foi realizada diariamente no ponto de lançamento do efluente e mensalmente em pontos específicos (córregos e nascentes) nas mediações da empresa até 2009, seguindo o padrão operacional e a legislação ABNT 9897/9898. (MDGEO, 2009)

A amostragem de água subterrânea é realizada bimestralmente na mina subterrânea e semestralmente nos poços de monitoramento subterrâneo, a partir de 2010.

Para a caracterização química das águas subterrâneas é necessária a amostragem completa e análise dos principais íons comumente encontrados na água, acrescidos dos metais pesados que geralmente ocorram como traços. É importante a realização de duas campanhas de coleta de água: uma no final do período seco e outro no final do período chuvoso.

Os equipamentos utilizados para a coleta são: bomba de bexiga 407 utilizando o método Low Flow (Baixa Vazão) (Figura 4.6), medidor multi-parâmetros da fabricante Hanna que possuem capacidade de medição de 13 parâmetros em campo, filtros Millipore 0,45µm e os frascos de propileno com seus respectivos preservantes, atendendo aos padrões operacionais da VMZ e a legislação ABNT 9897/9898.



Figura 4.6 - Coleta de água subterrânea pelo método Low Flow (Baixa Vazão) – Fev/2011

## 5 ANÁLISE DOS DADOS DE MONITORAMENTO

Os dados de monitoramento foram compilados e atualizados até Junho de 2011 e a análise destas informações é apresentada neste capítulo.

### 5.1 PLUVIOMETRIA

O ano hidrológico é definido por um período contínuo de doze meses, durante o qual ocorre um ciclo anual climático completo que permita uma comparação mais significativa dos dados meteorológicos. De acordo com os dados pluviométricos, determinou-se na região o ano hidrológico iniciando-se em agosto e terminando em julho do ano seguinte. Os dados de precipitação são apresentados e totalizados conforme o ano hidrológico.

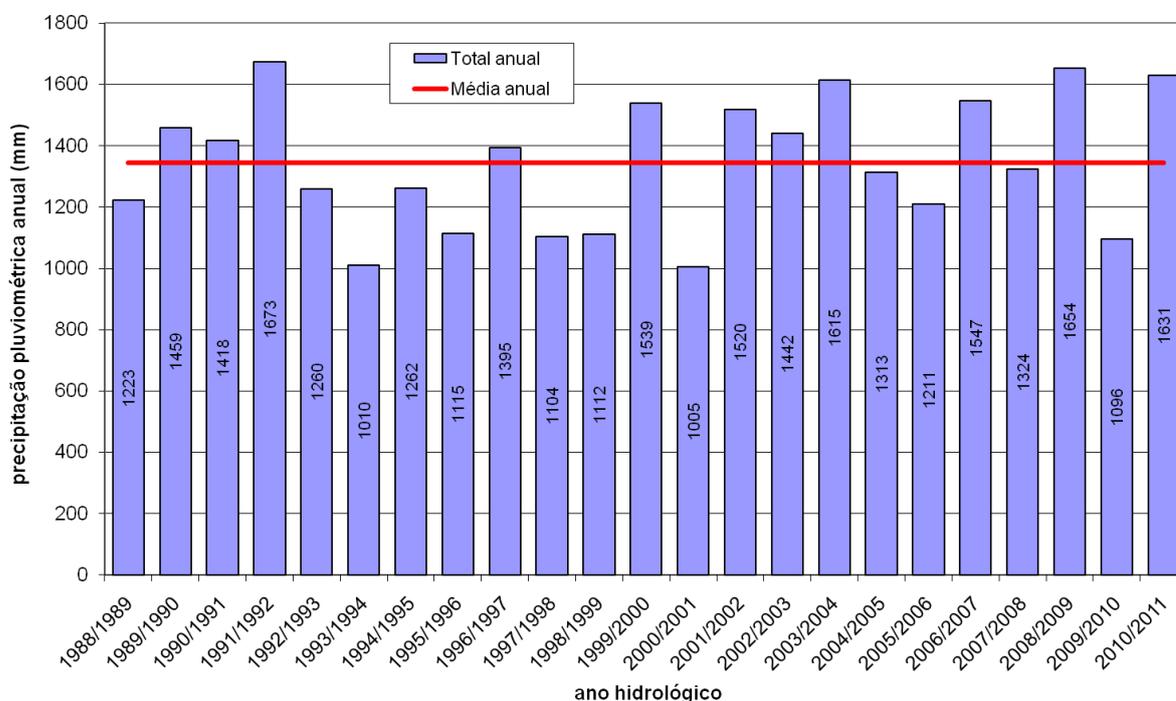
Para o estudo em questão serão consideradas as medições nas duas estações. A Tabela 5.1 apresenta os valores mensais da pluviometria medidos nestas estações e os valores descritos até agosto de 2006 referem-se à estação da Unidade Agroflorestal (MDGEO, 2007); a partir desta data os registros são da estação da unidade Morro Agudo.

**Tabela 5.1 - Precipitação mensal (mm)**

Ano Hidrológico	Precipitação (mm)												
	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	TOTAL
1987/1988							152	168	145	0	2	0	-
1988/1989	0	20	134	139	194	199	362	138	2	0	16	19	1223
1989/1990	14	126	43	305	438	88	158	94	0	120	0	73	1459
1990/1991	16	89	38	192	195	375	221	215	42	35	0	0	1418
1991/1992	0	34	101	290	239	513	324	151	3	18	0	0	1673
1992/1993	0	43	313	369	-	300	184	7	3	37	4	0	1260
1993/1994	1	64	18	143	-	300	75	340	28	36	5	0	1010
1994/1995	0	0	70	358	220	181	92	166	124	51	0	0	1262
1995/1996	0	8	130	124	350	159	187	67	80	10	0	0	1115
1996/1997	30	31	41	206	244	323	204	206	63	23	24	0	1395
1997/1998	0	5	91	98	289	205	220	73	65	58	0	0	1104
1998/1999	14	0	106	209	198	111	196	265	12	1	0	0	1112
1999/2000	0	13	65	279	579	266	156	136	29	12	0	4	1539
2000/2001	19	93	26	381	163	89	47	187	0	0	0	0	1005
2001/2002	58	25	118	219	396	310.2	270	53.5	0	53	0	17	1520
2002/2003	0	72	90	87	333.5	525	88	200.5	14	32	0	0	1442
2003/2004	32	2.5	47	151	214	254.5	508	269	114	3	0	20	1615
2004/2005	0	0	42.5	98	451.5	298	161.5	246.8	0	10	5	0	1313

Ano Hidrológico	Precipitação (mm)												TOTAL
	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	
2005/2006	5	9	15	382	375	120	26.5	188.5	89	0	0	0.5	1211
2006/2007	12	47.5	338	341	198	337	186	43	42	1	0	2	1547
2007/2008	0	0	14	138	165	314	259	237	190	7	0	0	1324
2008/2009	0	101	18	128	403	260	205	286	203	15	35	0	1654
2009/2010	21	54	130	102	335	150	74	167	35	18	10	0	1096
2010/2011	4	6	116	274.5	346.5	250.1	58.6	546	26.5	1.1	1.2		1631
Médias	10	37	92	218	301	258	184	185	55	23	4	6	1345
Mínimas	0	0	14	87	163	88	27	7	0	0	0	0	1005
Máximas	58	126	338	382	579	525	508	546	203	120	35	73	1673

A Figura 5.1 apresenta o gráfico da precipitação anual do período de 1988 a 2011, conforme ano hidrológico. Verifica-se que a precipitação média anual é de 1.345 mm. A mínima ocorreu no ano de 2000/2001 com 1.005 mm e a máxima em 1991/1992 com 1.673 mm. No ano de 2010/2011 a precipitação chegou muito próxima à máxima histórica registrada, 1.631mm.



**Figura 5.1 - Precipitação total anual e média anual na Mina de Morro Agudo, Paracatu – MG**

## 5.2 POTENCIOMETRIA

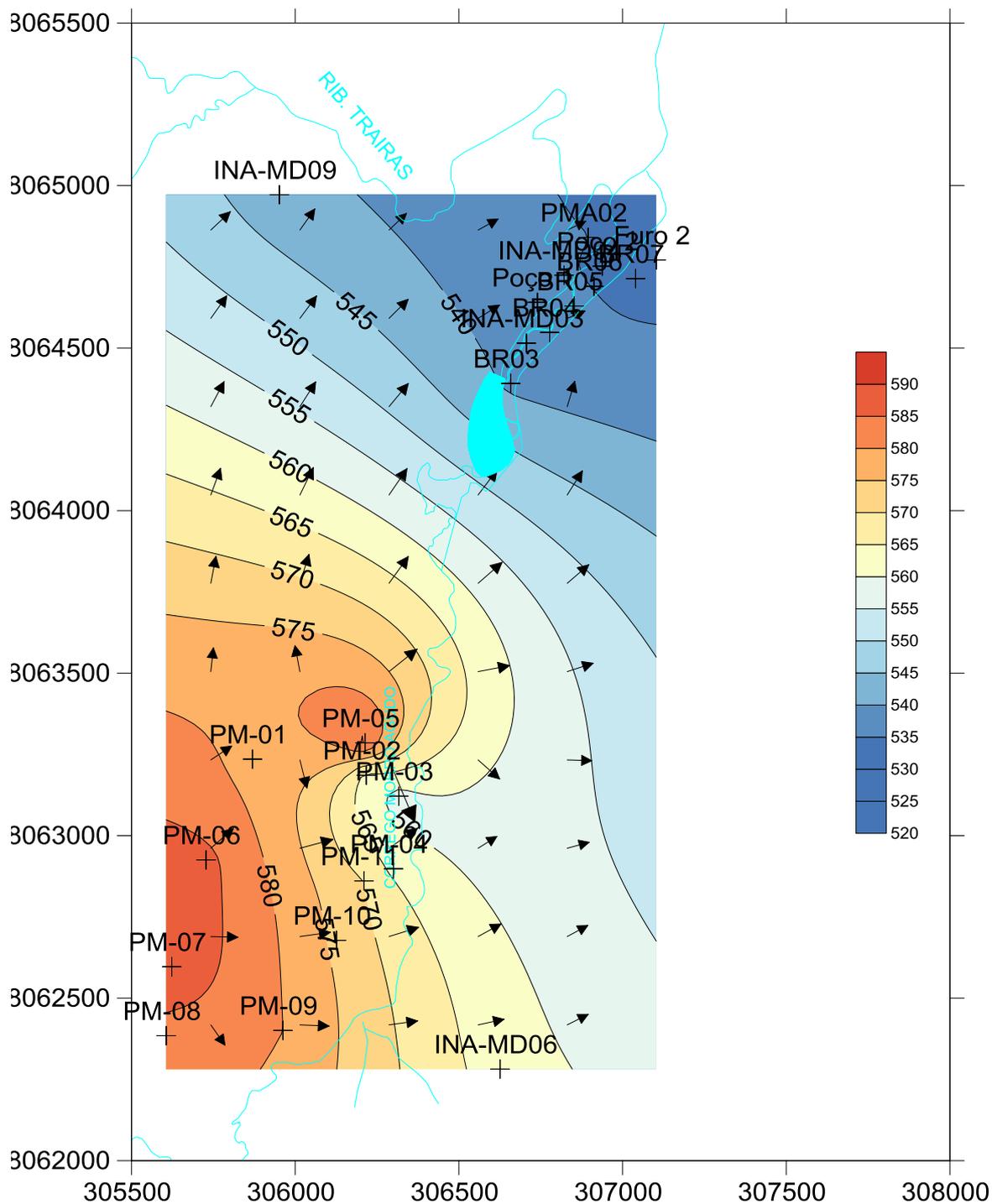
Para a elaboração dos mapas potenciométricos foram utilizadas as cotas dos níveis d'água de todos os instrumentos especificados no Item 4.2. Os dados estão organizados em uma planilha eletrônica do software Microsoft Office Excel que foi importada no software *Surfer v.10*. Utilizou-se o método de Krigagem para a interpolação dos dados.

A Krigagem parte do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados. A técnica de Krigagem assume que os dados recolhidos de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço. Isto é, se num aterro de resíduos tóxicos a concentração de um elemento num ponto  $p$  é  $x$ , é muito provável que se encontrem resultados muito próximos de  $x$  quanto mais próximos se estiver do ponto  $p$  (princípio da geoestatística). Porém, a partir de determinada distância de  $p$ , não se encontrarão valores aproximados de  $x$  porque a correlação espacial pode deixar de existir.

Considera-se o método de Krigagem do tipo BLUE (*Best Linear Unbiased Estimator* - Melhor Estimador Linear Não Enviesado): é linear porque as suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados existentes; é não enviesada, pois procura que a média dos erros (desvios entre o valor real e o valor estimado) seja nula; é a melhor porque os erros de estimação apresentam uma variância (variância de estimação) mínima. (LANDIM & STURARO, 2002)

Após a interpolação dos dados, foram gerados mapas de isolinhas (equipotenciais de carga hidráulica) e vetores de fluxo. As figuras a seguir exibem estes mapas para os aquíferos raso (Figura 5.2) e profundo (Figura 5.3) com nível d'água em 30 de junho de 2011.

## AQUÍFERO RASO



**Figura 5.2 - Mapa potenciométrico e de vetores de fluxo do Aquífero Raso com dados de Junho/2011**

No aquífero raso, compostos por coberturas e o manto de intemperismo, nota-se que o fluxo principal tem direção NE com uma inflexão próxima aos

instrumentos PM-05, PM-02 e PM-03 que estão localizados no entorno da barragem de rejeitos II.

## AQUÍFERO PROFUNDO

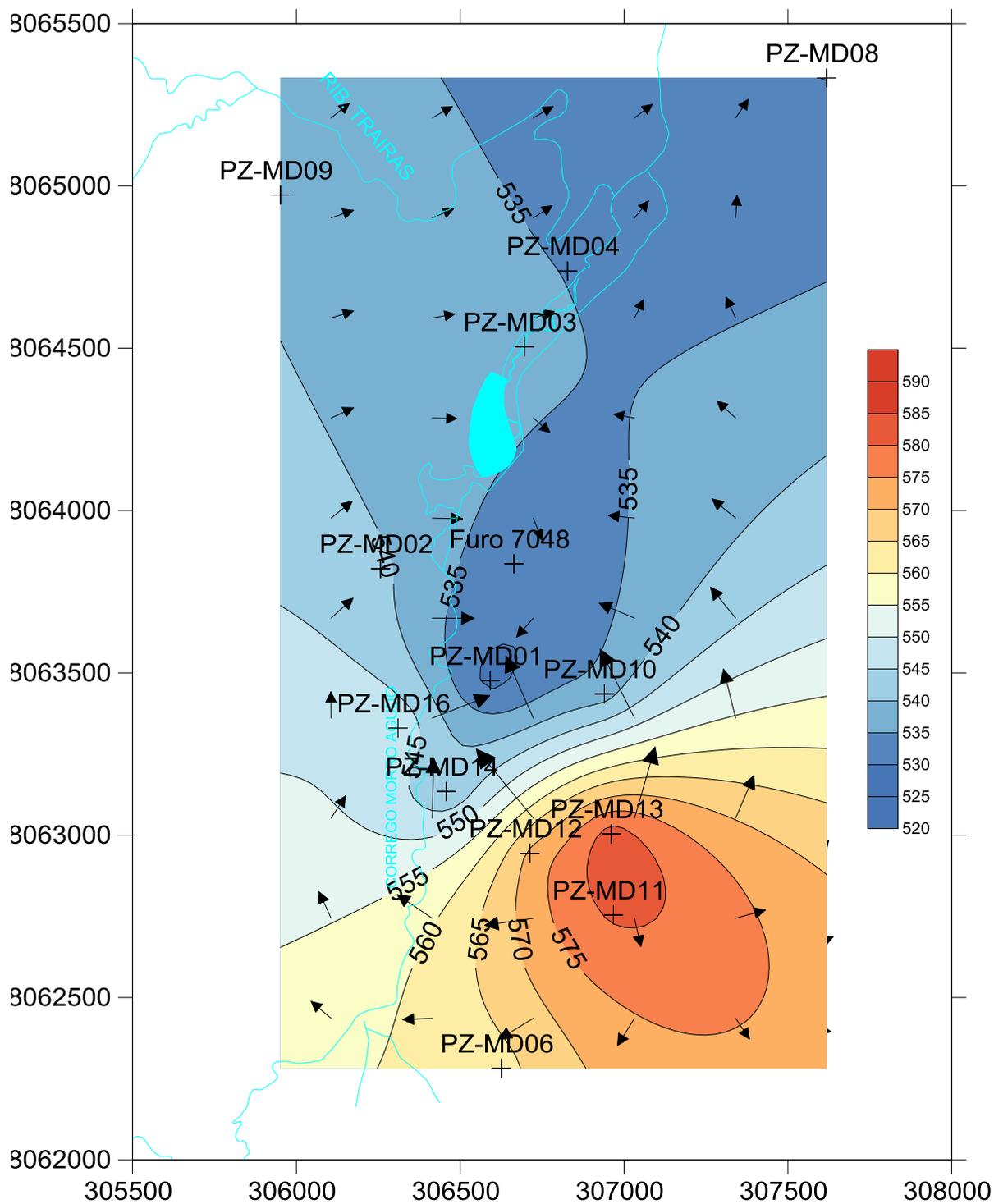


Figura 5.3 - Mapa potenciométrico e de vetores de fluxo do Aquífero Profundo com dados de Junho/2011

No aquífero profundo, a utilização de interpolação não é segura por se tratar de um aquífero fissural, porém apresenta uma tentativa de obter a direção preferencial de fluxo. Os instrumentos PZ-MD13 e PZ-MD11 se mostram com níveis mais elevados que os instrumentos do entorno, porém devido ao pouco tempo de monitoramento é possível que este nível não esteja estável. O fluxo preferencial tem direção NNE e é possível perceber um rebaixamento local na porção central do mapa, área da mina subterrânea, ocasionado pela infiltração da água na mina.

### 5.2.1 Aquífero Raso

A evolução do nível d'água nos instrumentos que monitoram o aquífero raso está representada na Figura 5.4.

Verifica-se o comportamento sazonal desses instrumentos, com aumento do nível d'água no período chuvoso e diminuição no período seco. Essa variação é maior no INA-MD01 devido a sua proximidade com o Córrego Morro Agudo e o fluxo subterrâneo ser na mesma direção.

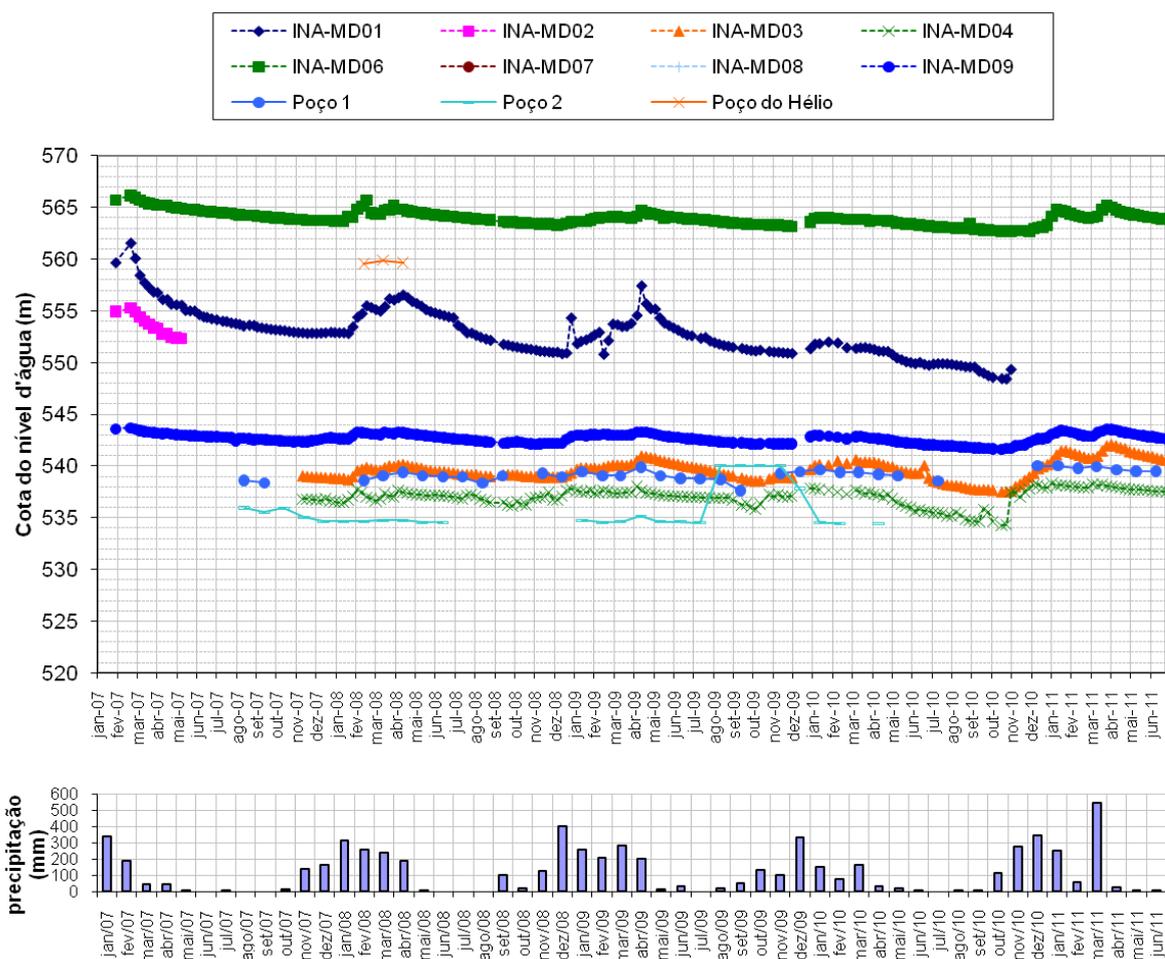


Figura 5.4 - Evolução do nível d'água no aquífero raso

O nível d'água é inferior à capacidade de monitoramento em alguns instrumentos no final do período seco, ou seja, usualmente se diz que o instrumento "secou", como é o caso do Poço 01 e Poço 02, sendo que este último não foi observada recuperação durante o período chuvoso do ano hidrológico 2010/2011. O INA-MD01 secou após a perfuração dos furos de sonda que deram origem aos novos piezômetros. Acredita-se que a sondagem tenha atravessado o sistema fraturado que estava conectado ao manto de intemperismo, o mesmo que o INA-MD01 monitorava, ou seja, houve uma migração da água do manto de intemperismo para o novo furo que interceptou a fratura.

Observa-se uma defasagem entre a chuva e a resposta nos INAs. Essa defasagem é de cerca de 3 a 4 meses. Assim, o período seco termina em setembro e os menores níveis nos INAs são observados somente em janeiro. Da mesma forma, os picos da chuva ocorrem em dezembro/janeiro, e os maiores níveis nos INAs são observados apenas em abril.

A evolução do nível d'água nos poços de monitoramento situados no entorno das barragens de rejeito II e III estão representados na Figura 5.5.

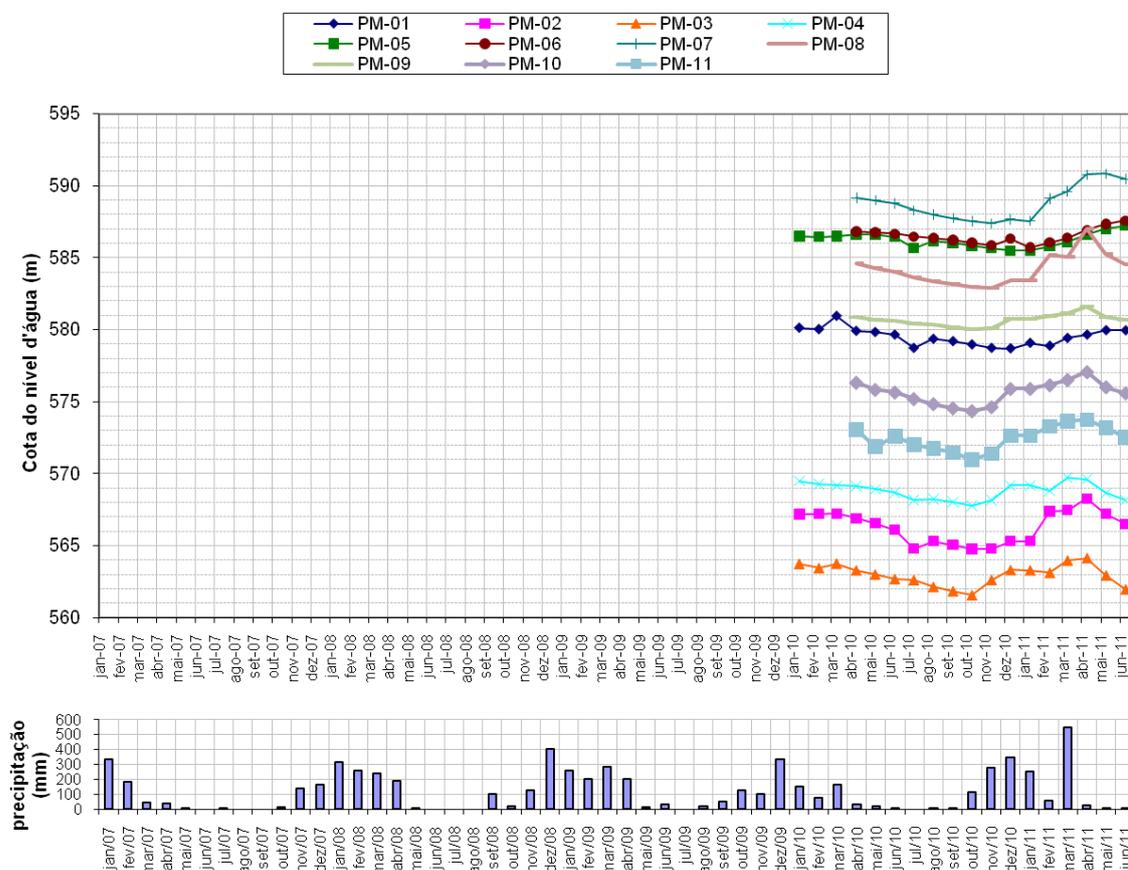


Figura 5.5 - Evolução do nível d'água nos instrumentos do entorno das Barragens II e III

Estes poços começaram a ser monitorados em Janeiro de 2010 e tem profundidade média de 21,8m, tendo o mais profundo 27m e o mais raso 15m de profundidade. Estes instrumentos respondem melhor à precipitação apresentando variação em seus níveis de acordo com a presença/ausência de chuva.

## 5.2.2 Aquífero Profundo

Os dados de monitoramento são obtidos através da utilização de um medidor de nível com capacidade de medição de até 300m e as leituras são realizadas semanalmente.

A evolução da cota do nível d'água nos instrumentos que monitoram o aquífero profundo está apresentada na Figura 5.6.

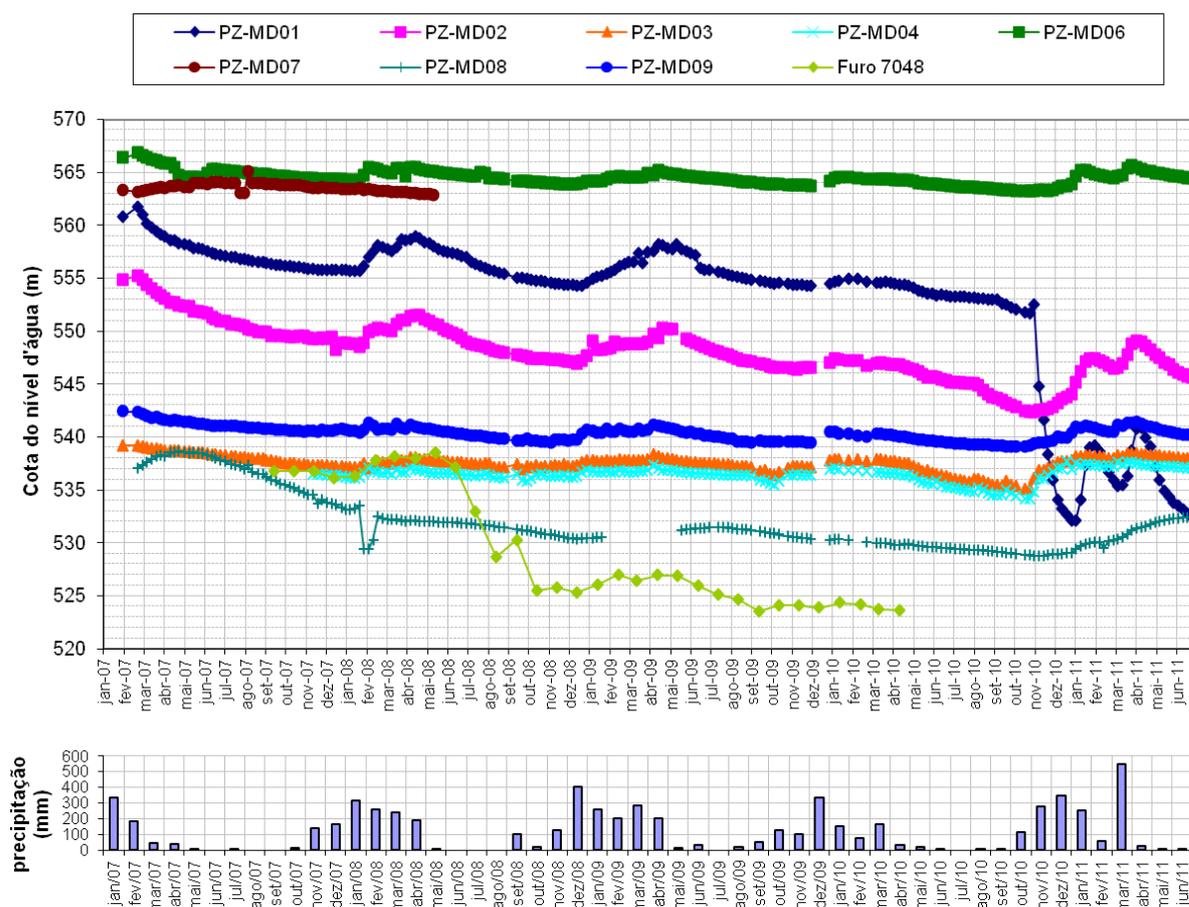


Figura 5.6 - Evolução do nível d'água no aquífero profundo

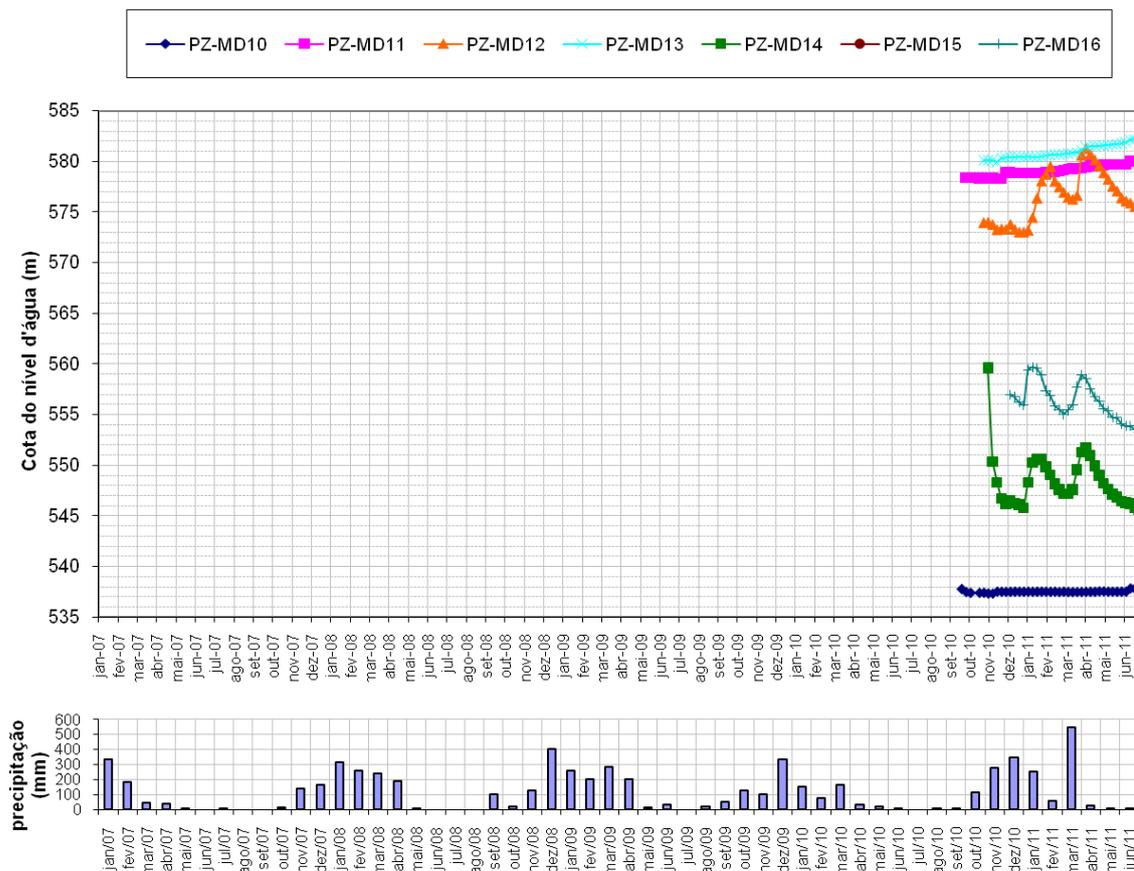
De maneira análoga ao aquífero raso, observa-se em alguns instrumentos o comportamento sazonal de seus níveis d'água com aumento no período chuvoso e diminuição no período seco. Esta condição é mais proeminente no PZ-MD01 e PZ-MD02.

Destaca-se na figura o comportamento anômalo dos instrumentos PZ-MD01, Furo 70/48 e PZ-MD08. O PZ-MD01 apresenta um rebaixamento em torno de 20m entre Novembro e Dezembro de 2010. Essa diminuição ocorreu após a perfuração dos furos de sonda, assim como o seu par INA-MD01.

O PZ-MD08 apresenta uma elevação do nível d'água no final do primeiro período chuvoso monitorado e depois um rebaixamento do nível d'água inclusive durante o período chuvoso de 2007/2008, posteriormente seu nível tende a se estabilizar. Este instrumento tem seu monitoramento dificultado pela presença de óleo em seu interior. Ao que tudo indica esse comportamento anômalo deve-se a alguma instabilidade do instrumento. Mesmo porque este piezômetro situa-se bem longe da área de interferência da VMZ-MA.

No Furo 70/48 o monitoramento indicava níveis d'água em torno da cota 533 metros ao longo do período chuvoso de 2007/2008. No período seco subsequente, seu nível desceu até a cota em torno de 527 metros, tornando-se a estabilizar ao longo do período chuvoso de 2008/2009 e permanecer contínuo até o final do ano hidrológico e secando a partir de Maio de 2010. Este comportamento indica possível falha no funcionamento desse instrumento.

A partir de Setembro de 2010, sete (07) piezômetros foram instalados aproveitando-se furos de sondagem da campanha exploratória realizada pela VMZ. A Figura 5.7 apresenta a evolução do nível d'água nestes instrumentos.



**Figura 5.7 - Evolução do nível d'água no aquífero profundo (piezômetros novos)**

É possível perceber a grande diferença de cota entre os novos instrumentos perfurados (aproximadamente 50m), fato que pode ser explicado pela maior presença de zonas fraturadas atravessadas pela sondagem nos instrumentos com cota mais alta. Além dessa diferença, se percebe uma grande alteração no nível dos instrumentos PZ-MD12, PZ-MD14 e PZ-MD16 seguindo a pluviometria, um comportamento ascendente nos instrumentos PZ-MD11 e PZ-MD13 e um comportamento estável no PZ-MD10.

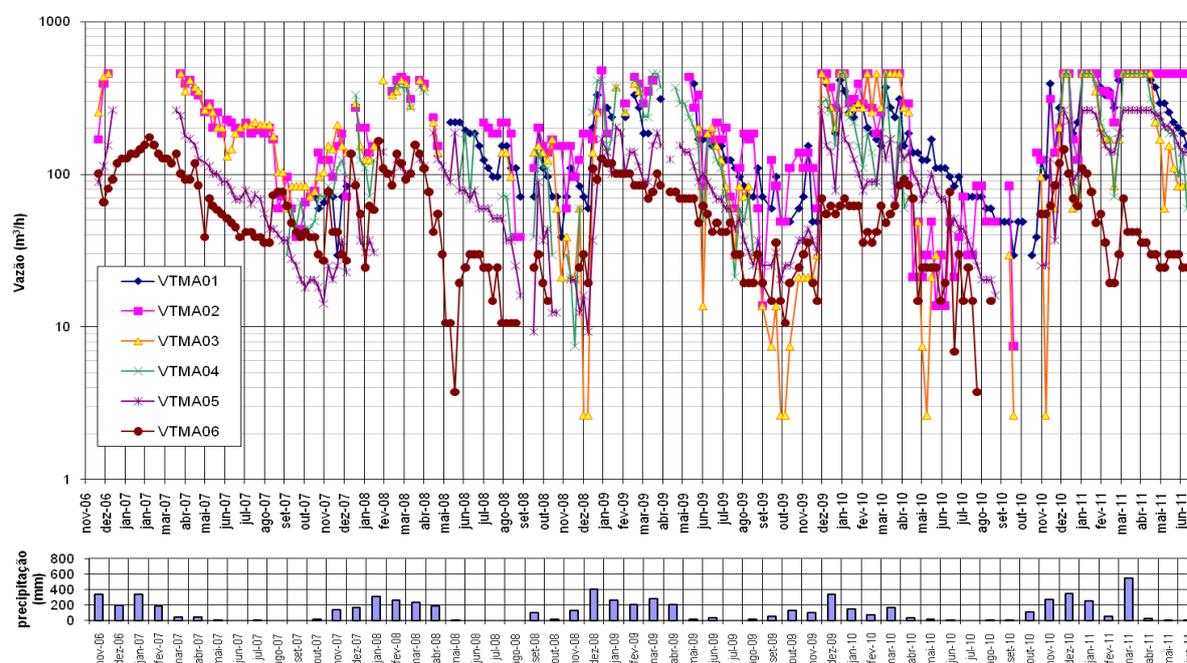
O monitoramento do PZ-MD15 não aparece no gráfico acima. Este instrumento foi instalado até 341,05m e foi reportado que houve perda de água em diversos pontos. Não há medidor de nível que alcance esta profundidade disponível na unidade, sendo assim, não se pode afirmar que o mesmo se encontra seco ou com o nível abaixo de 300m (limite de detecção do medidor existente).

### 5.3 VAZÕES DOS CURSOS D'ÁGUA SUPERFICIAIS

Os vertedouros VTMA-01, VTMA-02, VTMA-03 e VTMA-04 apresentaram transbordo durante o período chuvoso.

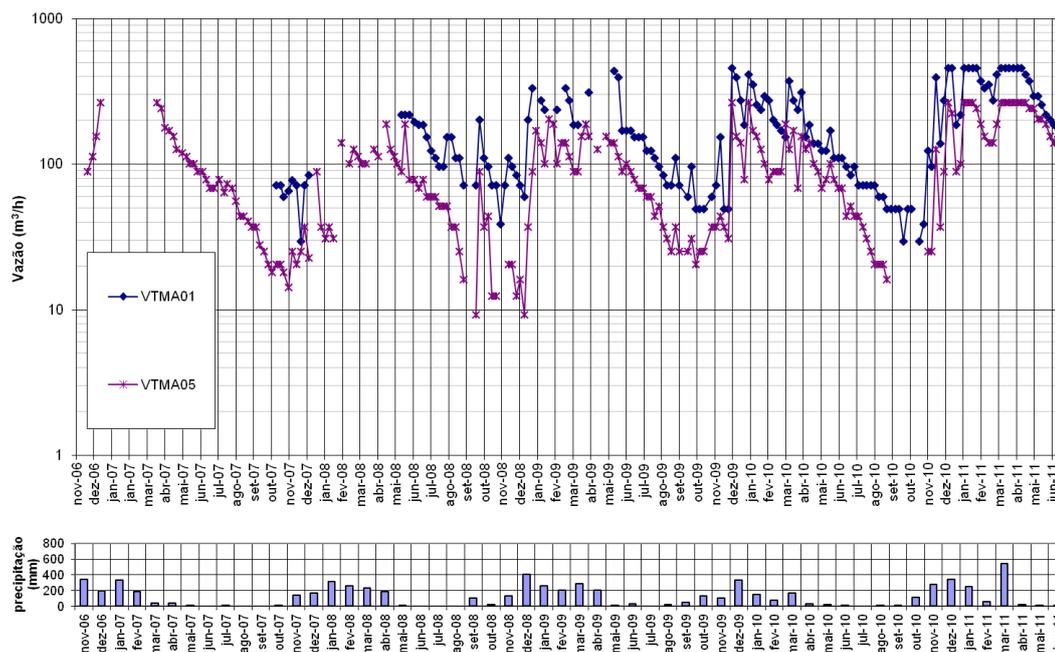
A Figura 5.8 apresenta o gráfico em escala logarítmica com a evolução das vazões nesses vertedouros.

Nota-se que os vertedouros têm uma resposta direta com as chuvas, ocorrendo muitas oscilações em suas leituras, principalmente no período chuvoso.



**Figura 5.8 - Gráfico de evolução das vazões nos vertedouros**

O VTMA01, localizado na Bacia Hidrográfica do Córrego Morro Agudo e a montante do empreendimento, apresentou no período seco de 2009/2010 vazão mínima de 49 m<sup>3</sup>/h e atingiu a marca de aproximadamente 460 m<sup>3</sup>/h no período chuvoso. O VTMA05, localizado na Bacia Hidrográfica do Córrego Batuque, secou no período seco e ultrapassou 264 m<sup>3</sup>/h. Ambas as variações são exibidas novamente no gráfico da Figura 5.9.

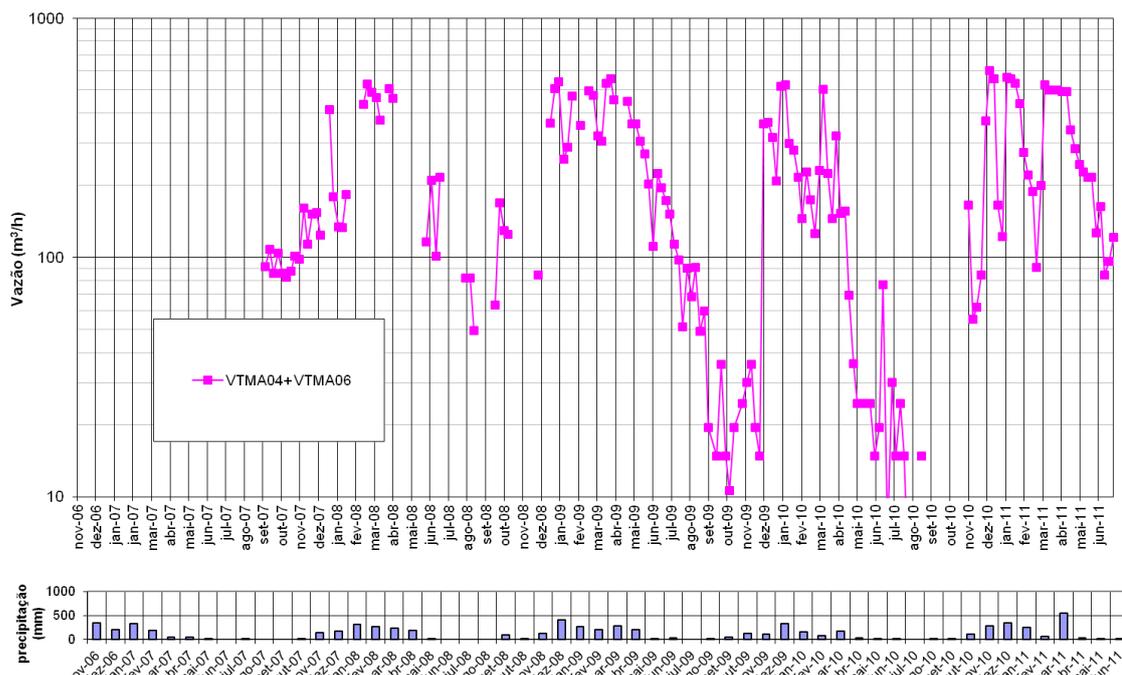


**Figura 5.9 - Evolução das vazões nos vertedouros VTMA01 e VTMA05**

Nota-se um comportamento similar entre os dois vertedouros, com exceção do período entre Junho a Novembro de 2010 em que o VTMA05 apresenta maior declínio e seca no final de Setembro/10, voltando a ter água em Novembro/10.

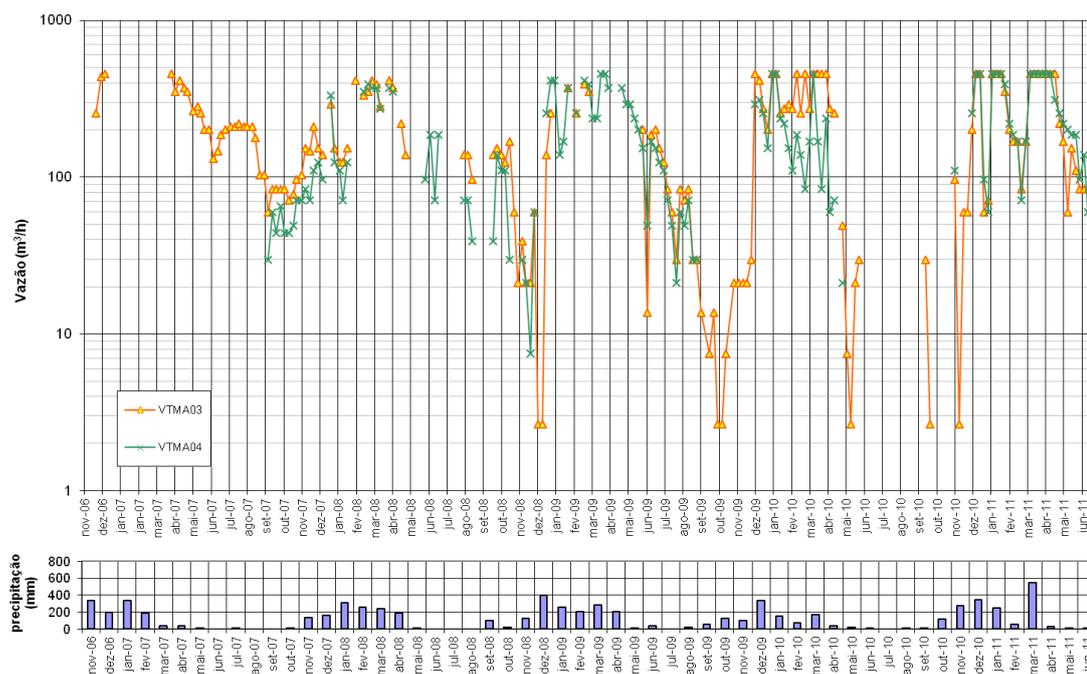
No Córrego Morro Agudo, a jusante do empreendimento, podemos somar a vazão do VTMA04 com a vazão do VTMA06 (Figura 5.10). O VTMA04 corresponde à água do Córrego Morro Agudo que deságua no Ribeirão Traíras e o VTMA06 corresponde a um desvio da água do Córrego do Morro Agudo que também vem a desaguar posteriormente no Ribeirão Traíras. A soma dos dois vertedouros nos fornece a vazão total do Córrego Morro Agudo que contribui para o Ribeirão Traíras.

Após a mudança de descarte de efluentes no Córrego Morro Agudo para o Ribeirão Traíras, se pode notar a diminuição da vazão somada dos vertedouros VTMA04 e VTMA06 (ano 2010) e posterior aumento desta no final de 2010 e início 2011 com o bombeamento do Projeto Água Limpa (Item 5.4.2) sendo descartado a montante do VTMA04, exibido no gráfico da Figura 5.10.



**Figura 5.10 - Evolução das vazões somadas do VTMA04 e VTMA06**

Em análises realizadas anteriormente, já se havia detectado que a vazão do vertedouro VTMA03 apresenta-se maior que a vazão do VTMA04, caso curioso já que o VTMA04 está à jusante do VTMA03. Após a implantação do Projeto Água Limpa (Item 5.4.2) em Abril de 2010, esta situação se inverte nos meses de Abril a Junho de 2011, pois o descarte desse projeto situa-se a montante do VTMA04 (Figura 5.11).



**Figura 5.11 - Evolução das vazões do VTMA03 e VTMA04**

Sendo assim, continua-se acreditando que entre esses dois vertedouros esteja havendo infiltração direta para a mina subterrânea com valores oscilando entre 20 a 40m<sup>3</sup>/h.

#### 5.4 VAZÕES DE ÁGUA NA MINA SUBTERRÂNEA

Existem 16 pontos de medição de vazão no interior da mina subterrânea. As localizações, vazões e observações são apresentadas na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 - Pontos de medição de vazão na mina subterrânea**

PONTOS DE MEDIÇÃO	LOCAIS	VAZÃO (m <sup>3</sup> /h)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS PONTOS DE MEDIÇÃO
PMV-01	NÍVEL 316 Fundo Poço	3	Poço Shaft e outras surgências da parte norte da mina
PMV-02	NÍVEL 250 - PVC	20	Poço perfurado para construção do PVC (Poço de Ventilação Central), surgência de água ocorreu no primeiro semestre de 2008 onde foi alargado e revestido até 138m. A mesma é escoada para caixa de água limpa nível 250, sendo bombeada para superfície e lançada no Córrego Morro Agudo.
PMV-03	NÍVEL 250 - BLOCO D	2	Falha do Bloco D, nível 250, escoada para caixa de água limpa da mina.
PMV-04	NÍVEL 250 - PVS	18	Poço perfurado para construção PVS (Poço de Ventilação Sul). A mesma é escoada para caixa de água limpa nível 250, sendo bombeada para superfície e lançada no Córrego Morro Agudo.
PMV-05	NÍVEL 283 - 260 JD	30	Falha da galeria 260 JD nível 283, a mesma é armazenada em uma cacimba e bombeada para o nível 250 caixa d'água limpa, sendo lançada no córrego Morro Agudo.
PMV-06	NÍVEL 283 CAB-SUL	9	Parte da água surgente no nível, restante da água escoada pelas galerias até o nível 350, chegando à caixa do nível 460.
PMV-07	NÍVEL 350 - ENTRADA GALERIA	8	Água surgente na galeria 350 e parte do nível 316.
PMV-08	NÍVEL 383 - ENTRADA GALERIA		Água surgente no nível 383 é escoada pela galeria, até o nível 416 onde é realizada a medição de vazão, depois é escoada para caixa do 430, onde entra no circuito de bombeamento.
PMV-09	NÍVEL 416- ENTRADA GALEIRA	22	Água surgente no nível 416 e 383, somada à água do furo de sonda de superfície da galeria 350. Água escoada para o nível e caixa 430.
PMV-10	NÍVEL 460 - GALERIA 460 RJD	43	Água surgente nas galerias superiores parte sul da mina e as águas dos furos de sonda da 350 e 460 GPS, são escoadas até a caixa do nível 460.

PONTOS DE MEDIÇÃO	LOCAIS	VAZÃO (m <sup>3</sup> /h)	OBSERVAÇÕES SOBRE OS PONTOS DE MEDIÇÃO
PMV-11	NÍVEL 483 - GALERIA 483 GPS	30	Falha e fraturas com água, surgiu em Dezembro de 2007, água é armazenada em uma cacimba depois é direcionada por gravidade até a caixa do nível 483, onde é bombeada para caixa do 430, seguindo o circuito principal de bombeamento.
PMV-12	NÍVEL 490 - FRENTE RASE	25	Água surgente nas galerias superiores da parte norte da mina, após se unirem escoam para galeria do 490 até a caixa do nível 516, sendo bombeada para caixa do nível 483.
PMV-13	NÍVEL 516 - ENTRADA GALERIA	30	Água surgente nos níveis superiores na parte norte da mina com a água do nível 516 e parte da água do nível 483, são escoadas pela galeria até a caixa do nível 516, sendo bombeada para caixa do nível 483.
PMV-14	NÍVEL 550 - GALERIA 550 TR		Pouca água surge neste nível, atualmente escoam para o nível 583 até a cacimba para armazenamento, onde é bombeada.
PMV-15	NÍVEL 583 - ENTRADA RAMPA 3	10	Água do nível 583 somada à água do nível 550. É bombeada para caixa do nível 483.
PMV-16	NÍVEL 250 - PVN	5	Água do Poço PVN (Poço Ventilação Norte), a mesma escoam para caixa de água limpa do nível 250.
<b>VAZÃO TOTAL:</b>		<b>255</b>	

Algumas observações são pertinentes para a obtenção da vazão total.

O ponto PMV-08 não é considerado no somatório, pois ele é medido no ponto PMV-09. O ponto PMV-14 apresenta pouco volume de água e foi desconsiderado.

Os furos de sonda que apresentaram água não são considerados no somatório, pois os mesmos se encontram obturados.

Do resultado destas campanhas pode-se estimar uma vazão de água surgente na mina subterrânea em torno de 255m<sup>3</sup>/h em 30 de junho de 2011.

A esta vazão devem ser adicionados 25m<sup>3</sup>/h, vazão aduzida por gravidade da superfície para a mina que é utilizada no processo de lavra em níveis superiores ao nível 316.

No total, tem-se uma vazão de 280m<sup>3</sup>/h para ser bombeada da mina para a superfície.

#### 5.4.1 Estação de Tratamento de Efluentes (ETE)

Outro monitoramento importante é a vazão de água da mina que é tratada na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE). Parte da água que é bombeada para fora da mina subterrânea é tratada na ETE sendo o monitoramento de sua vazão feito desde Setembro de 2006.

O monitoramento da vazão bombeada na ETE é diário sendo medida a vazão na bomba e as horas trabalhadas. Multiplicando as horas trabalhadas pela vazão obtêm-se o volume bombeado. A Tabela 5.3 apresenta uma síntese desses dados onde foram contabilizados o volume mensal bombeado e a vazão média mensal.

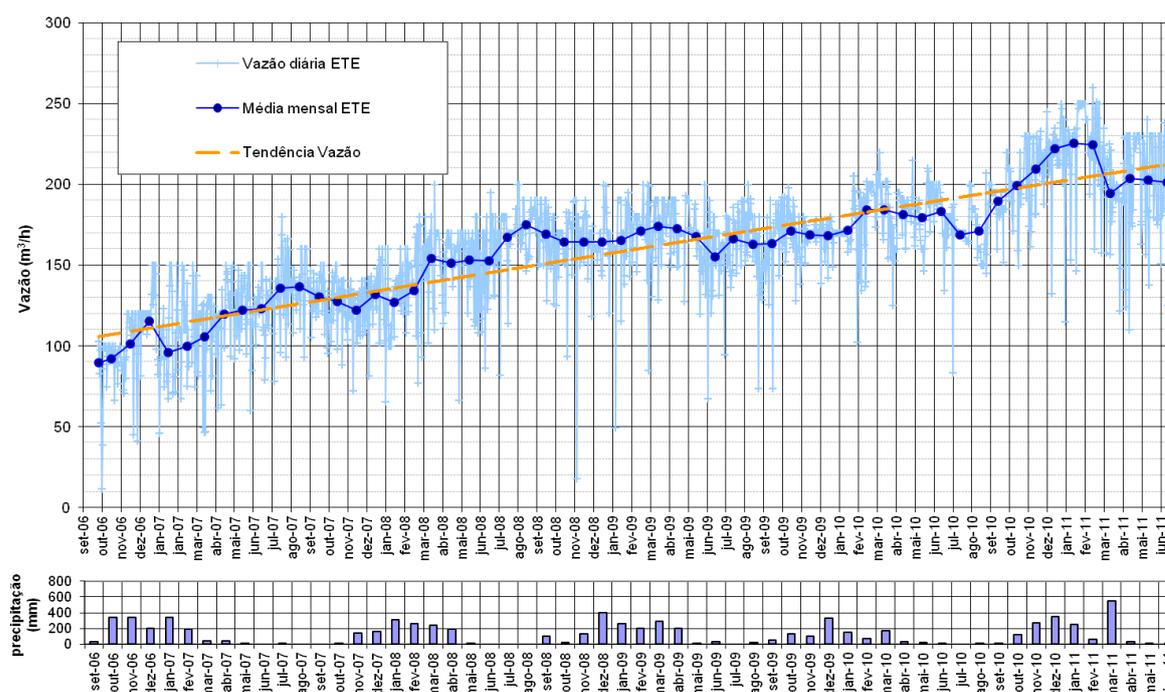
**Tabela 5.3 - Vazão bombeada da mina para a ETE**

<b>Mês</b>	<b>Volume acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vazão média mensal (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Mês</b>	<b>Volume acumulado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vazão média mensal (m<sup>3</sup>/h)</b>
set-06 <sup>1</sup>	10742	90	<b>fev-09</b>	114986	171
out-06	68620	92	<b>mar-09</b>	129556	174
nov-06	72940	101	<b>abr-09</b>	124210	173
dez-06	85772	115	<b>mai-09</b>	124932	168
jan-07	71586	96	<b>jun-09</b>	111945	155
fev-07	67199	100	<b>jul-09</b>	123848	166
mar-07	78723	106	<b>ago-09</b>	121370	163
abr-07	86161	120	<b>set-09</b>	117808	164
mai-07	91072	122	<b>out-09</b>	127260	171
jun-07	88694	123	<b>nov-09</b>	121613	169
jul-07	101235	136	<b>dez-09</b>	125252	168
ago-07	101804	137	<b>jan-10</b>	127616	172
set-07	93877	130	<b>fev-10</b>	123910	184
out-07	94886	128	<b>mar-10</b>	137240	184
nov-07	88094	122	<b>abr-10</b>	130806	182
dez-07	98240	132	<b>mai-10</b>	133704	180
jan-08	94588	127	<b>jun-10</b>	127564	183
fev-08	93419	134	<b>jul-10</b>	125773	169
mar-08	114953	155	<b>ago-10</b>	127526	171
abr-08	109083	152	<b>set-10</b>	136672	190
mai-08	114114	153	<b>out-10</b>	148206	199
jun-08	110019	153	<b>nov-10</b>	150843	210

Mês	Volume acumulado (m <sup>3</sup> )	Vazão média mensal (m <sup>3</sup> /h)	Mês	Volume acumulado (m <sup>3</sup> )	Vazão média mensal (m <sup>3</sup> /h)
jul-08	124631	168	dez-10	165424	222
ago-08	130310	175	jan-11	167686	225
set-08	122003	169	fev-11	151000	225
out-08	122387	164	mar-11	144925	195
nov-08	118563	165	abr-11	146791	204
dez-08	122292	164	mai-11	151042	203
jan-09	123114	165	jun-11	130344	201

<sup>1</sup> desde 26/09/06

Na Figura 5.12 é apresentada a vazão média mensal, a vazão diária e a curva de tendência.



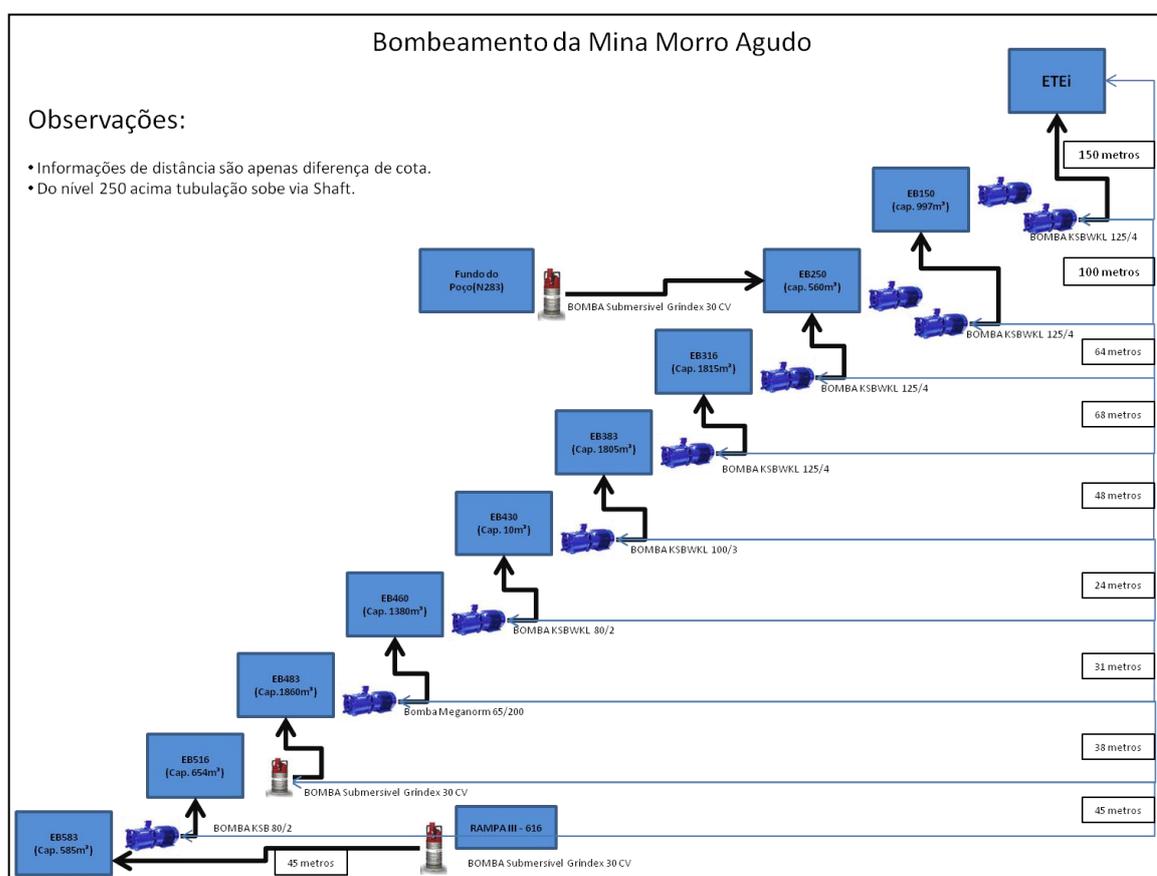
**Figura 5.12 - Gráfico da vazão diária, média mensal e curva de tendência do bombeamento da mina subterrânea para ETE**

Como observado, existe uma tendência contínua do aumento da vazão bombeada da mina subterrânea. No final de 2006 essa vazão era da ordem de 100 m<sup>3</sup>/h, atingindo em Janeiro e Fevereiro de 2011 valores de 225m<sup>3</sup>/h, e 201m<sup>3</sup>/h em Junho de 2011.

Nota-se que o valor bombeado pela ETE é menor que o total das vazões monitoradas dos pontos da mina subterrânea (Tabela 4.3), este fato é explicado pela implantação do Projeto Água Limpa na unidade e será descrito a seguir.

#### 5.4.2 Bombeamento na mina subterrânea

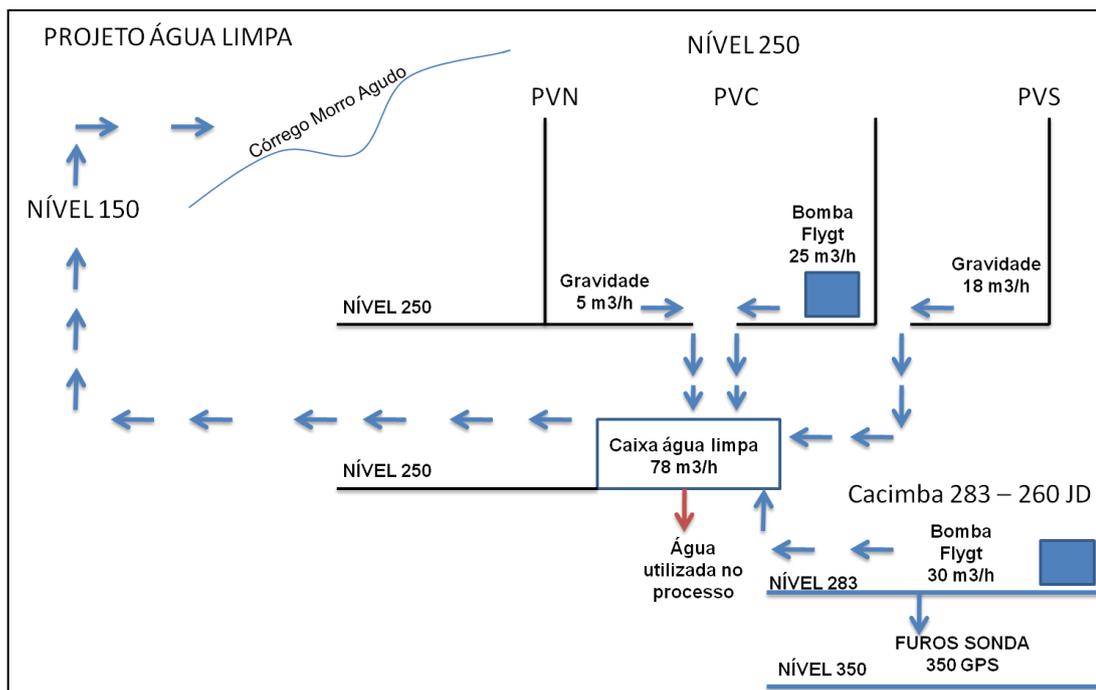
O bombeamento na unidade de morro agudo ocorre em diversos níveis até que se alcance a superfície e a água bombeada possa chegar à ETE (Figura 5.13) para tratamento e ser devolvida aos cursos d'água superficiais. Atualmente o bombeamento é monitorado por um medidor de vazão antes da entrada na ETE.



**Figura 5.13 - Croqui de bombeamento**

Em Abril de 2011 foi iniciado o projeto Água Limpa, que consiste na tentativa de bombear água de boa qualidade físico/química para evitar que a mesma seja tratada pela ETE sem necessidade. Foi bombeada uma média diária de 25m<sup>3</sup>/h em Abril, aumentando para 42,99m<sup>3</sup>/h em Maio e 52,09m<sup>3</sup>/h em Junho.

O Projeto Água Limpa é responsável pelo bombeamento da água vinda dos poços PVS, PVN, PVC e surgência da galeria 260 JD no nível 283 (Figura 5.14).



**Figura 5.14 - Croqui de bombeamento do projeto Água Limpa**

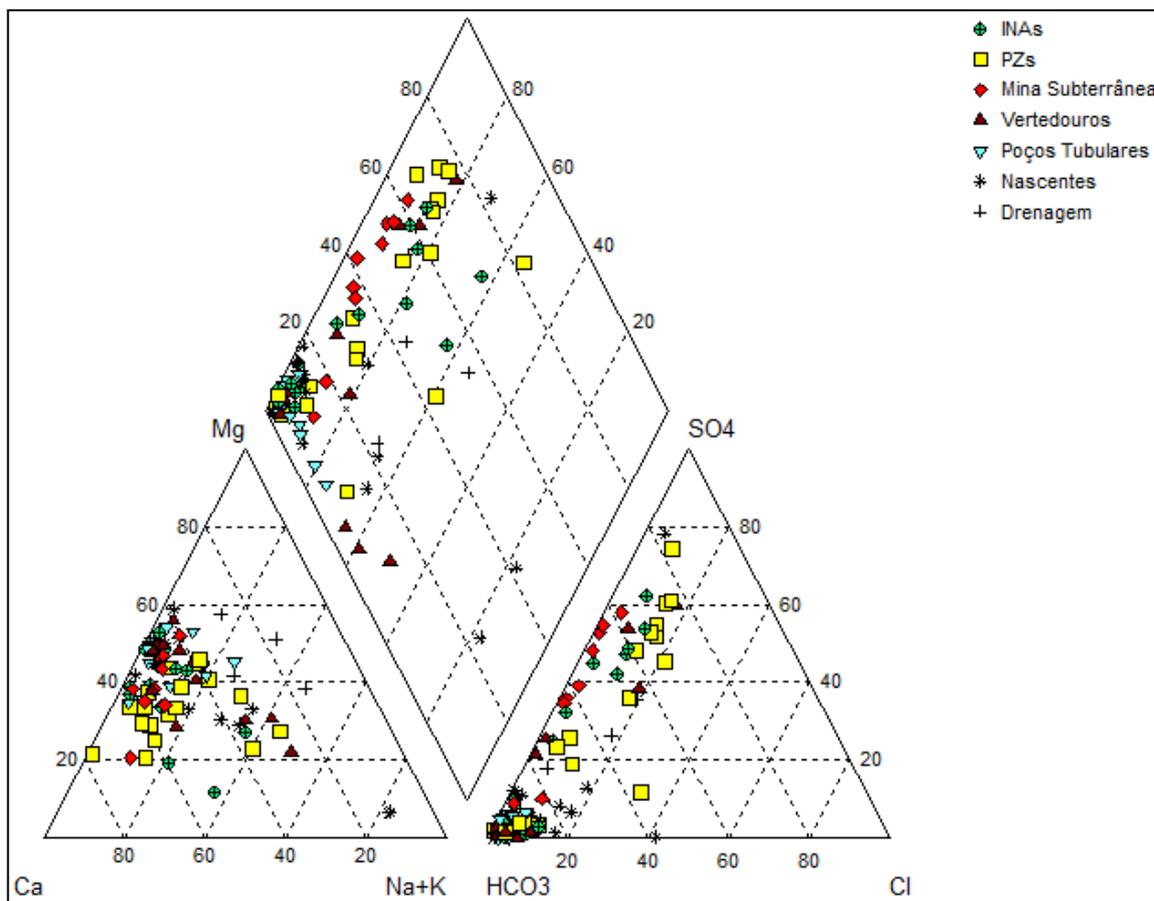
Também foi construída uma ETE de menor porte, para tratamento do excedente de água na mina, a mesma trata em média 50m³/h de água da mina e atualmente este efluente é lançado a montante do VTMA04.

## 5.5 HIDROQUÍMICA

A Figura 5.15 apresenta o diagrama de Piper Hill-Langelier de todas as campanhas realizadas.

Do ponto de vista hidroquímico tanto as águas do aquífero raso como do fissural são classificadas como águas Bicarbonatadas Cálcio-Magnesianas pouco salinas. Esse padrão hidroquímico mantém-se em todas as unidades litológicas da região.

Analisando a Figura 5.15 se evidencia a influência das instalações da VMZ na química das águas subterrânea e superficial, caracterizadas pela presença do sulfato. Os pontos com maior concentração de sulfato são INA/PZ-MD03, INA/PZ-MD04, MA-S03 (Falha no Corpo D), MA-S04 (Mina 250 PVS) e MA-S07 (Caixa D'água do Nível 250).



**Figura 5.15 - Diagrama de Piper de todas as campanhas realizadas**

A presença do sulfato em concentrações elevadas é indicativa do processo de drenagem ácida. Esse processo ocorre devido à exposição de sulfetos ao contato com o ar e água. A reação gera ácido sulfúrico e hidróxidos e no caso da pirita, hidróxido de ferro insolúvel e ácido sulfúrico (Equação 1):



A água torna-se mais ácida e passa a solubilizar os metais pesados, presentes em outros minerais. Conforme os minerais presentes, a acidez da água pode ser neutralizada, não sendo este parâmetro preponderante para definir a drenagem ácida, mas sim a presença de sulfatos em excesso e metais pesados, demandando tratamento químico da água da mina.

Os pontos das nascentes MA-N01 e MA-N06 (MDGEO, 2005b) estão à montante da barragem velha e não apresentam concentrações elevadas de sulfato nas suas análises.

Assim, conclui-se que está ocorrendo um processo de drenagem ácida incipiente na Barragem I e no estéril depositado na mina subterrânea.

## 6 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

A região em estudo apresenta, de modo geral, uma baixa vocação hidrogeológica e tal fato é atestado pela presença de nascentes de pequeno porte em superfície e pela ausência de água em grande parte da mina subterrânea.

Podemos definir duas principais unidades hidrogeológicas na área: o aquífero raso formado pelas coberturas (solo laterítico, aluvião, etc.) e o meio fissural (ou profundo) compostos pelas discontinuidades do maciço rochoso (dolomitos, filitos, brechas, arenitos argilosos e cherts).

O aquífero raso é bastante heterogêneo tanto do ponto de vista mineralógico e granulométrico quanto em relação a sua espessura. De modo geral é mais poroso e permeável que a rocha sã, o que proporciona a geração de um nível d'água suspenso, muitas vezes independente da rocha sã. Devido a sua heterogeneidade não apresenta uma superfície de nível d'água constante no tempo e no espaço, podendo ser definida a existência de porções (bolsões) com maiores acúmulos de água. Análises granulométricas realizados pelo IPT (TECNOHIDRO, 2007) indicaram uma granulometria do solo com 70% de argila, 17% silte e o restante de areia. A porosidade total obtida em laboratório foi de 54% e a efetiva de 21,6%. Ensaio de condutividade hidráulica realizados e interpretados obtiveram um valor de K da ordem de  $9,67 \times 10^{-6}$  m/s (0,835 m/dia) (TECNOHIDRO, 2007).

Uma maior capacidade de armazenamento e circulação d'água são encontrados nos aluviões e representam de modo geral um aquífero bastante heterogêneo.

O aquífero fissural (profundo) é descontínuo, podendo ser definido como "zonas aquíferas fraturadas" localizadas nas discontinuidades rochosas. Muitas vezes essas zonas aquíferas não apresentam conexões hidráulicas entre si e com o aquífero raso. A presença de furos de sonda e dos poços de ventilação proporciona uma maior conexão entre essas unidades aquíferas.

Apesar da existência de rochas dolomíticas não é notada a presença de carstificação em profundidade. Alguns dolinamentos locais indicam o desenvolvimento de um epicarste no contato da rocha sã com o solo, muitas vezes favorecidos pelo bombeamento de poços.

Com o aprofundamento e expansão da mina subterrânea, novas zonas aquíferas são interceptadas aumentando a descarga de água subterrânea na mina. De modo geral, trata-se de zonas aquíferas pouco expressivas. Maiores vazões podem estar relacionadas à conexão das mesmas com os cursos d'água superficiais.

Os dados de monitoramento da vazão bombeada da mina indicam vazão de desaguamento da ordem de 255m<sup>3</sup>/h, aumentando ao longo do tempo. Ainda existe um aporte de água de 25m<sup>3</sup>/h, em média, que é utilizado no processo de lavra em níveis superiores ao nível 316, totalizando 280m<sup>3</sup>/h de bombeamento.

Sabe-se, no entanto, que parte desta água corresponde à infiltração das águas dos cursos d'água superficiais na mina entre os vertedouros VTMA01 e VTMA02, VTMA02 e VTMA03 e sob a lagoa.

Tais valores de infiltração são difíceis de serem mensurados, o que dificulta a determinação da taxa de recarga ou do escoamento básico do aquífero fissural.

Do ponto de vista quantitativo, o desaguamento da mina do Morro Agudo não está afetando a disponibilidade de água subterrânea e/ou superficial, pois a água bombeada da mina é repostada aos cursos d'água.

Quanto à expansão da mina, o aquífero fissural é bastante imprevisível, mas a tendência na região é de não existir nenhuma zona aquífera de maior expressão. Alguma preocupação maior deveria existir caso a mina subterrânea avançasse para a região do Ribeirão Traíras. Isto porque, além do Ribeirão Traíras apresentar uma elevada vazão, está encaixado em uma zona de falha. Mas o planejamento da mina não prevê tal avanço.

Estimam-se valores de recarga de aproximadamente 10% da precipitação total.

Do ponto de vista hidroquímico tanto as águas do aquífero raso como do fissural são classificadas como águas Bicarbonatadas Cálcio-Magnesianas pouco salinas. Esse padrão hidroquímico mantém-se em todas as unidades litológicas da região.

O processo de drenagem ácida é também visível na água subterrânea, conforme abordado no Item 4.5. Este processo deve ocorrer principalmente na barragem de rejeito, cuja água infiltra em ambos aquíferos. Tal processo denota as águas uma maior salinidade e um caráter sulfatado para as mesmas.

## 7 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Nesse capítulo serão apresentados os dados utilizados na montagem do modelo numérico, bem como os recursos utilizados pelo Visual MODFLOW (condições de contorno) para simular as condições naturais da área modelada.

### 7.1 ARQUIVOS GRÁFICOS UTILIZADOS

Com o objetivo de exibir os possíveis impactos ambientais provocados pela atividade mineira e ajudar o planejamento de lavra, os limites do modelo foram expandidos para abranger uma área maior que a área da mina. Os arquivos utilizados foram disponibilizados pela equipe da VMZ-MA e são:

- Limites da área ocupada;
- Mapeamento geológico regional da área;

Foram utilizadas as imagens de satélite obtidas do software *Google Earth* para melhor ilustrar o modelo.

A área modelada representa um retângulo de 3.000 x 4.500 metros, que engloba parte das bacias dos Córregos Morro Agudo, Batuque e do Ribeirão Traíras como visto na Figura 7.1. A área ocupada pela mina subterrânea de Morro Agudo (galerias) está localizada no centro do modelo (destacado em vermelho). As coordenadas dos extremos da área são: SW – 305.000, 8.061.500m / NE – 308.000, 8.066.000m. No eixo vertical, o modelo está representando as cotas de -360m a 780m, compreendendo 1.140 metros de profundidade.

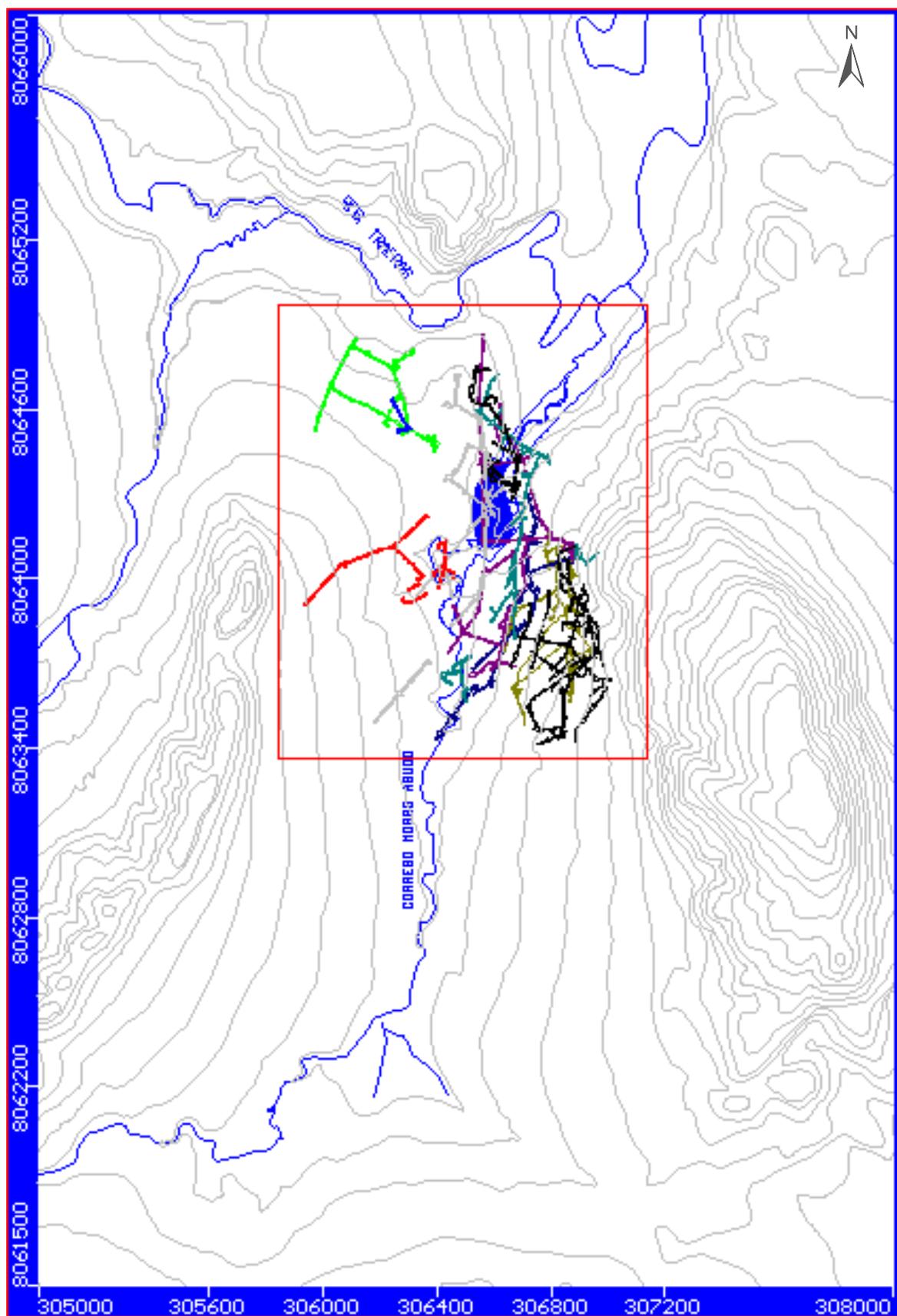


Figura 7.1 - Área modelada da Mina Morro Agudo, Paracatu - MG

A imagem de satélite da área foi adicionada à camada superior para facilitar a identificação das áreas de estudo. O resultado pode ser visto na Figura 7.2 abaixo.

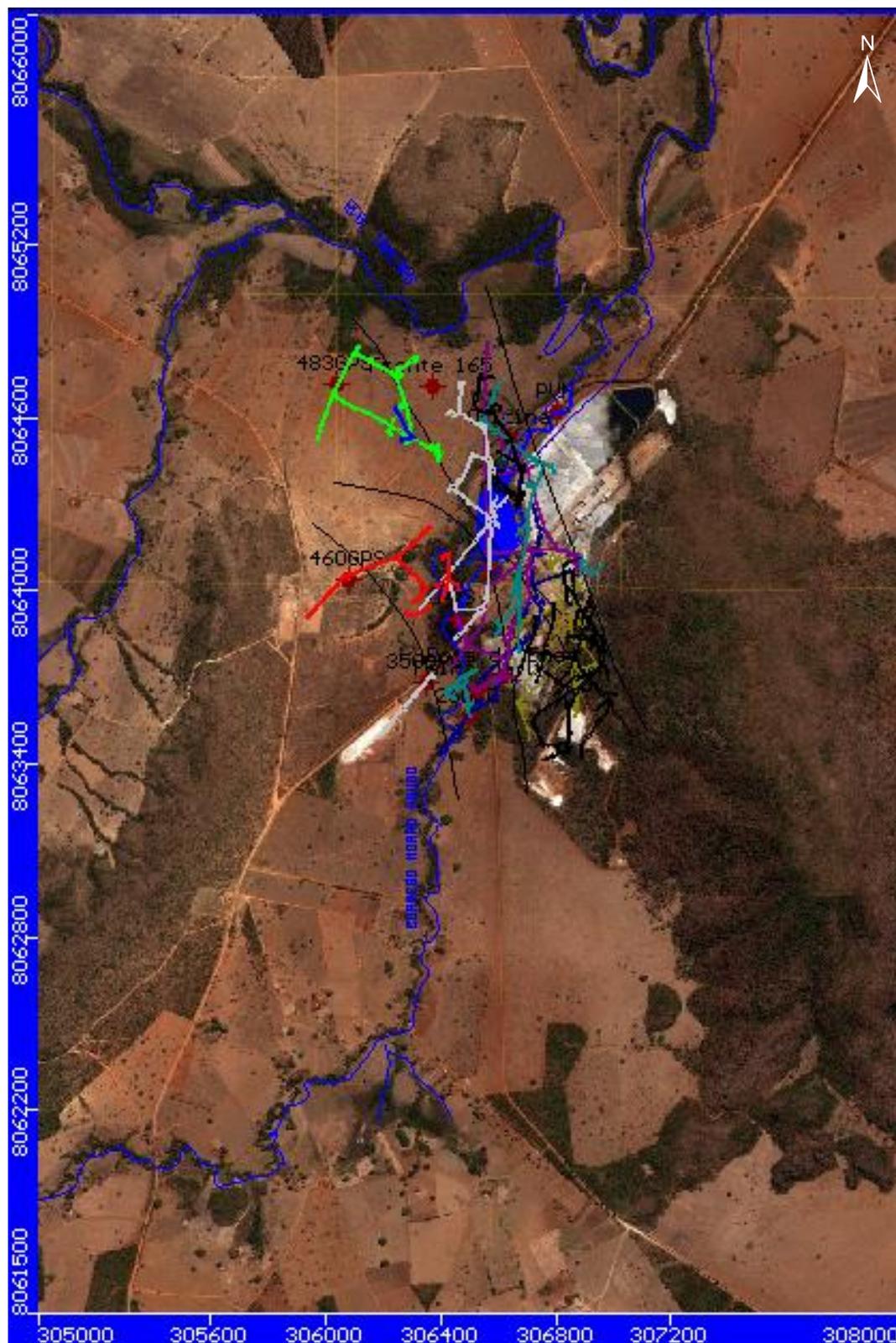


Figura 7.2 - Imagem de satélite da área da Mina Morro Agudo, Paracatu - MG

As unidades litológicas foram discretizadas com base no mapeamento regional fornecido, porém o mesmo não permite traçar corretamente os contatos litológicos em sub-superfície. Este fato não alterou efetivamente as condições modeladas, já que a área é composta basicamente por aluvião, solos, dolomitos, doloarenitos e brechas.

## 7.2 MALHA DE MODELAGEM (*GRID*)

O modelo proposto abrange uma área retangular de 4.500 metros de extensão por 3.000 metros de largura e 1.140 metros de profundidade.

Inicialmente, os eixos X e Y foram divididos em 90 linhas e 60 colunas, espaçados a cada 50 metros. Posteriormente esse *grid* foi refinado na região da mina culminando em células de 20 x 20 metros nessa região, que corresponde à região alvo do planejamento de lavra (modelo operacional). A configuração final dessa malha é apresentada na Figura 7.3.

Essa subdivisão das linhas e colunas centrais do modelo visa um melhor detalhamento do modelo na região do avanço de lavra. O refinamento segue um padrão de transição regular denominado *smoothing*, onde o intervalo de transição de uma coluna para outra não é superior (ou inferior) a 1,5 vezes a espessura da coluna subsequente. Ou seja:

$$\Delta x_1 \leq 1,5 \times \Delta x_2$$

Onde  $\Delta x_2$  é a espessura da coluna mais estreita e  $\Delta x_1$  é a espessura da coluna mais larga.

A mesma regra vale para a subdivisão das linhas no eixo Y.

Desta forma, a configuração final do *grid* do modelo compreende uma malha aberta nas extremidades e fechada na região central (mina), com 147 linhas e 108 colunas.

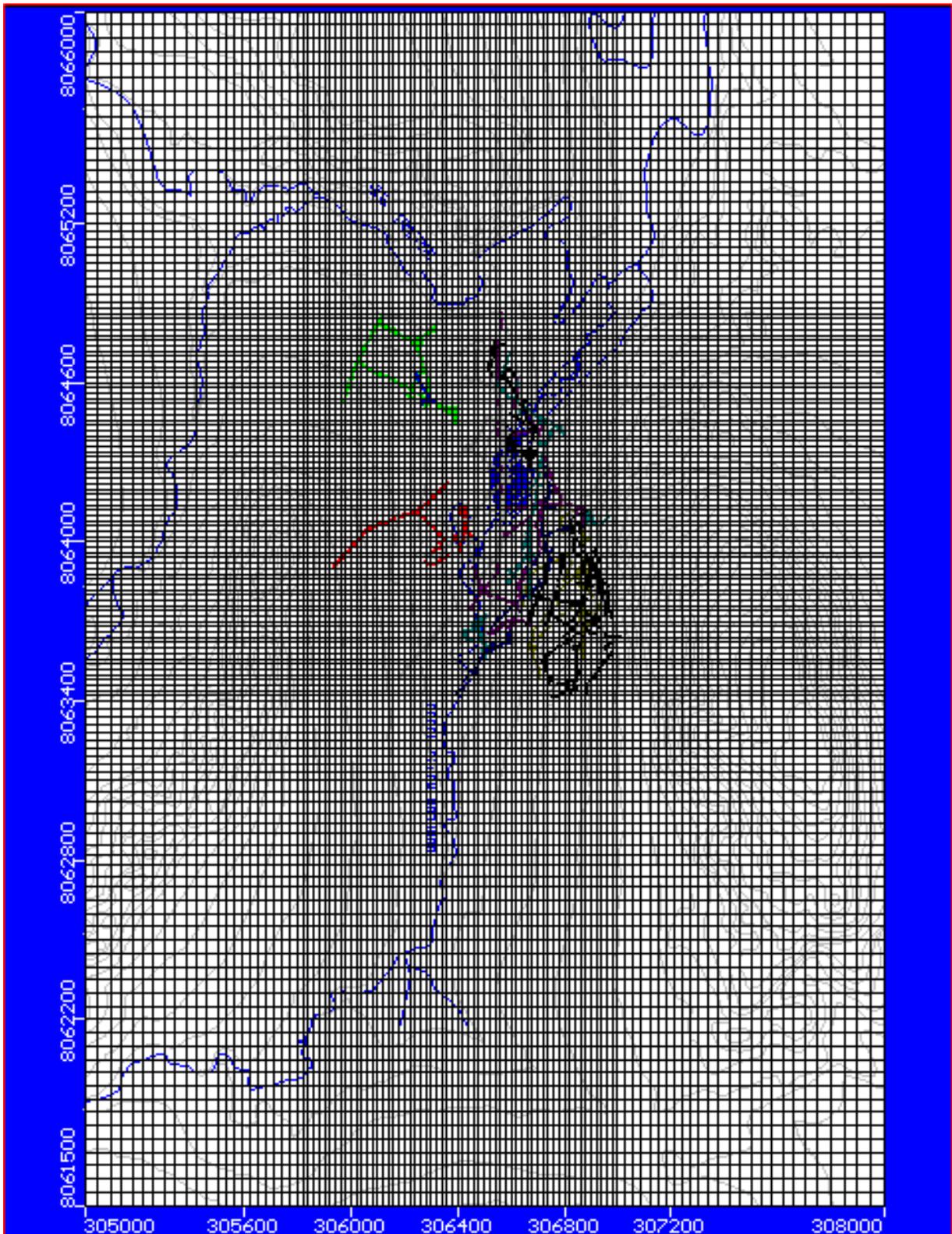
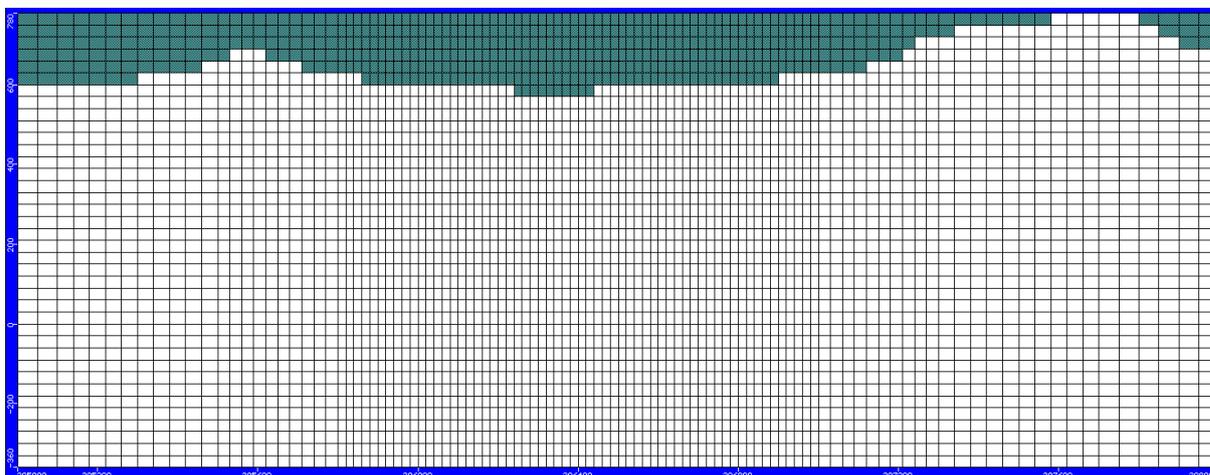


Figura 7.3 - Grid final do modelo

Na direção vertical (eixo Z), o modelo possui 1.140 metros de profundidade, com base na cota -360 metros e topo na cota 780 metros, conforme apresentado na Figura 7.4. Foram consideradas 38 camadas (*layers*) regulares de 30 metros cada.



**Figura 7.4 - Grid na direção vertical (eixo Z)**

Esse intervalo vertical de 1.140 metros foi escolhido de forma a representar desde as cotas superiores do terreno até níveis mais profundos do que a atual situação da mina.

### **7.3 CÉLULAS INATIVAS (*INACTIVE CELLS*)**

Células inativas são aquelas em que não ocorre fluxo d'água, ou seja, não entra nem sai água nestas células. Sendo assim as células situadas acima da superfície do terreno, segundo a base topográfica adotada, foram inativadas.

Por exemplo, na primeira camada do modelo (*Layer 1*), que possui a base na cota 750 metros, foram inativadas todas as células onde a superfície do relevo encontra-se acima desta cota. Na prática, essas células estão acima da cota da superfície do terreno.

### **7.4 PROPRIEDADES HIDROGEOLÓGICAS (*PROPERTIES*)**

A definição das propriedades hidrogeológicas do modelo baseou-se essencialmente nas características lito-estruturais de cada unidade mapeada. Como em hidrogeologia o que importa são as características hidrodinâmicas da rocha, as

unidades foram agrupadas baseadas no mapeamento regional fornecido pela VMZ-MA. Os litotipos discretizados, baseados no mapeamento geológico regional, foram:

- Aluvião (AL);
- Solo laterítico (LSO);
- Dolomitos carbonosos cinza escuros laminados, metarenitos laminados, metassiltitos carbonatados e quartzo-arenitos (MA);
- Dolomito carbonoso cinza laminado, metapelitos carbonáticos, filitos dolomíticos grafitosos, metagrauvacas, chert (SLP);
- Chert (Sx);
- Dolomito, microbrecha e brecha intraformacionais, doloarenito, chert (FR);
- Filitos verdes e cinza escuros, metassiltitos, arenitos argilosos (Sard).

A associação entre os litotipos e as unidades hidrogeológicas são apresentadas na Tabela 7.1.

**Tabela 7.1 - Litotipos discretizados no modelo**

PROP	LITOTIPO	UNIDADE HIDROGEOLÓGICA
1	LSO	Aquífero Livre
2	MA	Aquífero / Aquífero Fissural
3	SLP	Aquífero / Aquífero Fissural
4	FR	Aquífero / Aquífero Fissural
5	Sx	Aquífero / Aquífero Fissural
6	Sard	Aquífero / Aquífero Fissural
8	Rocha indefinida	Aquífero / Aquífero Fissural
9	Descontinuidades da rocha	“Aquífero” Livre
10	Galerias	“Aquífero” Livre
12	AL	Aquífero Livre

Em função da escala de trabalho adotada no modelamento e por falta de informação geológica das áreas fora da mina, não foi possível individualizar os contatos litológicos.

Adotou-se a propriedade 8 (oito) para representar todo o maciço rochoso (dolomitos, filitos, brechas, arenitos argilosos e cherts), o que não afeta o resultado, pois as propriedades hidrogeológicas destas rochas são praticamente iguais por se tratarem de rochas consolidadas e que não apresentam porosidade expressiva.

A propriedade 7 não foi utilizada na montagem do modelo numérico em função de sua cor (ocre) ser igual a das células secas, ou seja, dificultaria a distinção entre a propriedade hidrogeológica e possíveis células de fluxo nulo (secas). A propriedade 11 foi utilizada para realizar testes de condutividades com valores bastante diferenciados das demais.

A condutividade hidráulica é representada pela letra “K”, definida em m/dia para cada direção ( $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ ) e representa a vazão de água que passa por uma seção do aquífero com área unitária e gradiente hidráulico igual a 1.

Para a propriedade 1, que representa o solo laterítico, foram considerados os valores de K obtidos a partir de testes de permeabilidade realizados pelo IPT (TECNOHIDRO, 2007), que é da ordem de 0,835 m/d. Este valor foi utilizado para  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ .

Na propriedade 12, aluvião, se utilizou 0,835 m/d para  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ .

Para as propriedades de 2 a 8, que representam o maciço rochoso, adotou-se o valor de 0,1 m/d para  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ , por se tratarem de rochas consolidadas e sem porosidade expressiva (MDGEO, 2010).

## **7.5 INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA (OBSERVATION WELLS)**

A VMZ-MA dispõe de uma rede de monitoramento de 45 instrumentos, onde 16 são piezômetros e 29 indicadores do nível d'água. Os dados de monitoramento fornecidos por estes instrumentos foram apresentados neste trabalho com atualização até 30 de junho de 2011.

Para o modelo foram escolhidos os 18 pontos de maior relevância que estão listados na Tabela 7.2 abaixo. Estes pontos foram escolhidos por terem uma série histórica de monitoramento contínua e não terem apresentado problemas operacionais.

Tabela 7.2 - Pontos escolhidos para o modelo

Instrumentos	Coordenadas UTM		Cota Cano	Prof. Total	Cota Fundo	Cota Nível D'água
	X (m)	Y (m)	m	m	m	30/06/2011
<b>PZ-MD02</b>	306256.83	8063820.92	567.16	67.40	499.76	545.31
<b>PZ-MD03</b>	306696.09	8064504.57	549.53	71.20	478.33	536.31
<b>PZ-MD04</b>	306827.64	8064737.93	539.57	60.00	479.57	535.33
<b>PZ-MD08</b>	307618.35	8065332.60	562.20	41.65	520.55	529.51
<b>PZ-MD09</b>	305951.53	8064971.91	548.72	70.90	477.82	539.49
<b>INA-MD03</b>	306706.36	8064515.37	549.59	24.00	525.59	540.05
<b>INA-MD04</b>	306821.21	8064724.34	539.72	12.00	527.72	535.62
<b>INA-MD09</b>	305951.53	8064971.91	548.75	8.80	539.95	542.06
<b>BR-03</b>	306658.46	8064391.34	550.87	22.50	528.37	539.94
<b>BR-04</b>	306777.39	8064548.38	549.12	28.60	520.52	537.10
<b>BR-05</b>	306852.28	8064629.44	547.56	25.50	522.06	535.61
<b>BR-06</b>	306912.48	8064690.04	547.75	25.50	522.25	535.42
<b>BR-07</b>	307039.82	8064713.84	553.06	26.00	527.06	534.01
<b>PMA-02</b>	306217.13	8063185.96	575.84	25.75	550.09	565.85
<b>PMA-03</b>	306316.47	8063121.62	571.76	27.00	544.76	562.46
<b>PMA-04</b>	306300.26	8062898.19	574.86	18.00	556.86	568.42
<b>PMA-08</b>	305606.05	8062384.59	600.98	24.00	576.98	583.778
<b>PMA-09</b>	305962.44	8062400.81	585.56	16.00	569.56	580.357

Na Figura 7.5 (vista SW-NE da área) são exibidos os instrumentos de monitoramento do nível d'água em verde e a câmara de observação em amarelo.

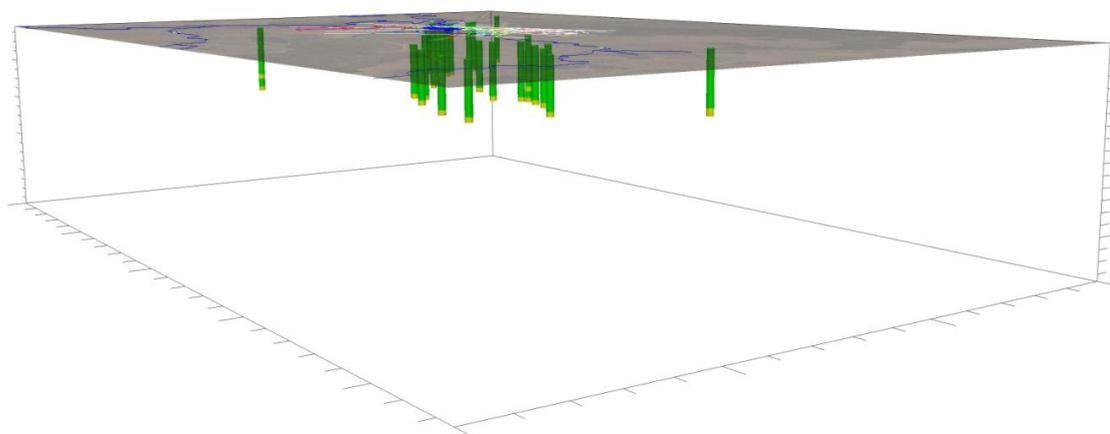


Figura 7.5 – Disposição dos instrumentos de monitoramento do nível d'água

## **7.6 RECARGA (*RECHARGE*)**

De acordo com a base de dados do monitoramento pluviométrico, a média na região é de 1.426 mm/ano entre os anos de 2006 e 2011 na Estação Meteorológica de Morro Agudo.

Considerando a recarga como o percentual da precipitação que infiltra no terreno e alimenta os aquíferos, foi atribuída uma taxa de 10% da precipitação (142,6 mm/ano). Nesse caso, os 90% restantes (1.283,4 mm/ano) equivalem principalmente à evapotranspiração e ao escoamento superficial.

Esses valores de recarga foram atribuídos à primeira célula ativa de cada coluna do modelo. Por exemplo, se em determinada área da camada 1 as células estão acima da superfície do terreno (inativas), a recarga é aplicada à célula subsequente, de maneira que toda superfície do terreno receba recarga.

## **7.7 RIO (*RIVER*)**

A condição de contorno rio é utilizada para simular a influência da superfície de um corpo d'água no fluxo de água subterrânea. Corpos d'água de superfície como rios, córregos, lagos e mangues, podem tanto contribuir para o sistema de águas subterrâneas, como agir como uma zona de descarga para essas águas, dependendo do gradiente hidráulico entre a superfície do corpo d'água e o sistema subterrâneo.

Foram adicionados 2 condições do tipo rio, a primeira sobre a lagoa e a segunda sobre a barragem de rejeito antiga que não é impermeabilizada.

## **7.8 POTENCIAIS ESPECIFICADOS (*CONSTANT HEADS*)**

Potenciais especificados são atribuídos a locais onde o nível d'água apresenta-se relativamente constante, independente de fatores naturais ou antrópicos.

Na montagem do modelo, essa condição de contorno foi aplicada nas células ativas do Ribeirão Traíras, situada a norte da mina (Figura 7.6). Segundo a base topográfica utilizada, o nível d'água do Ribeirão Traíras encontra-se na cota média de 530 metros, cota essa aplicada nessas células.

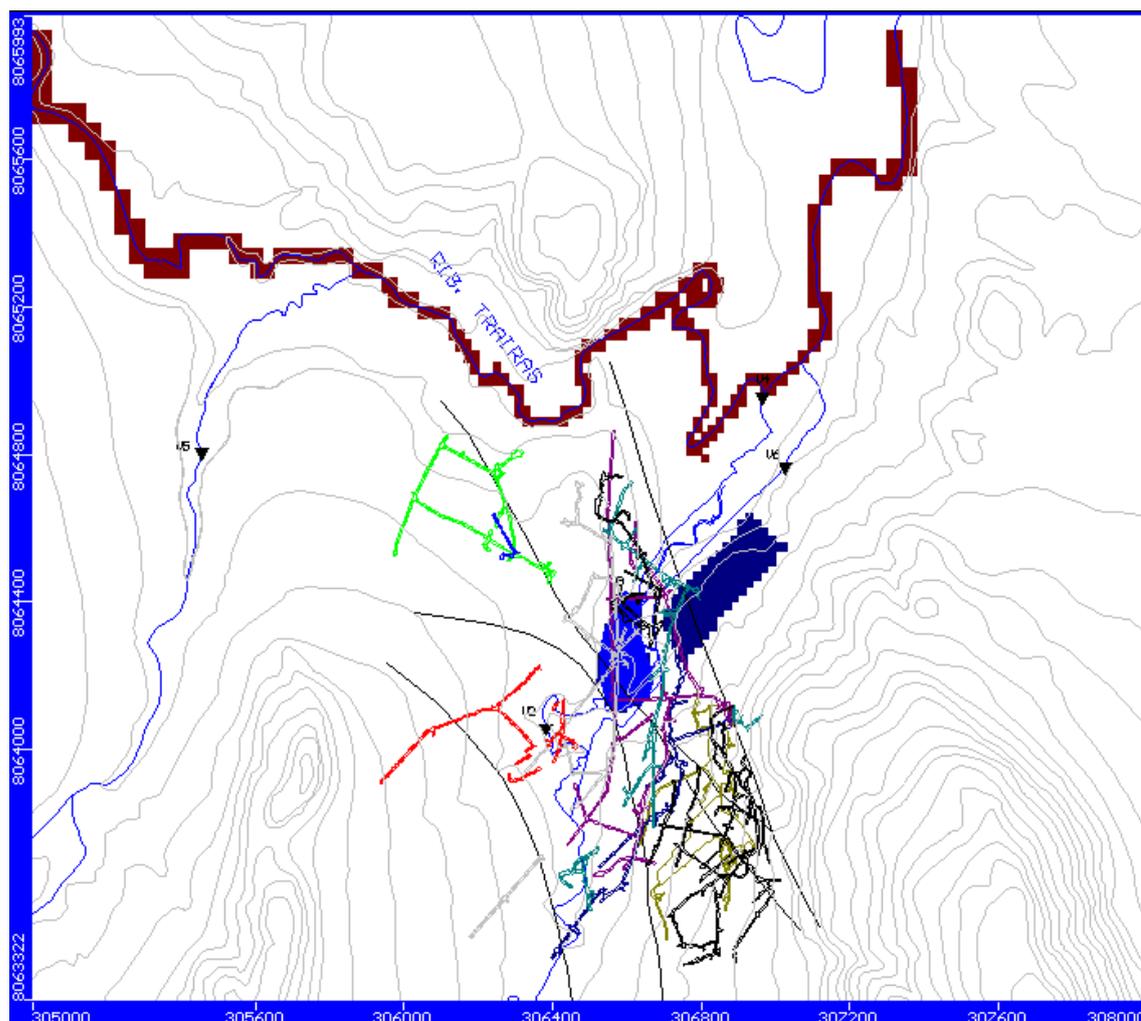
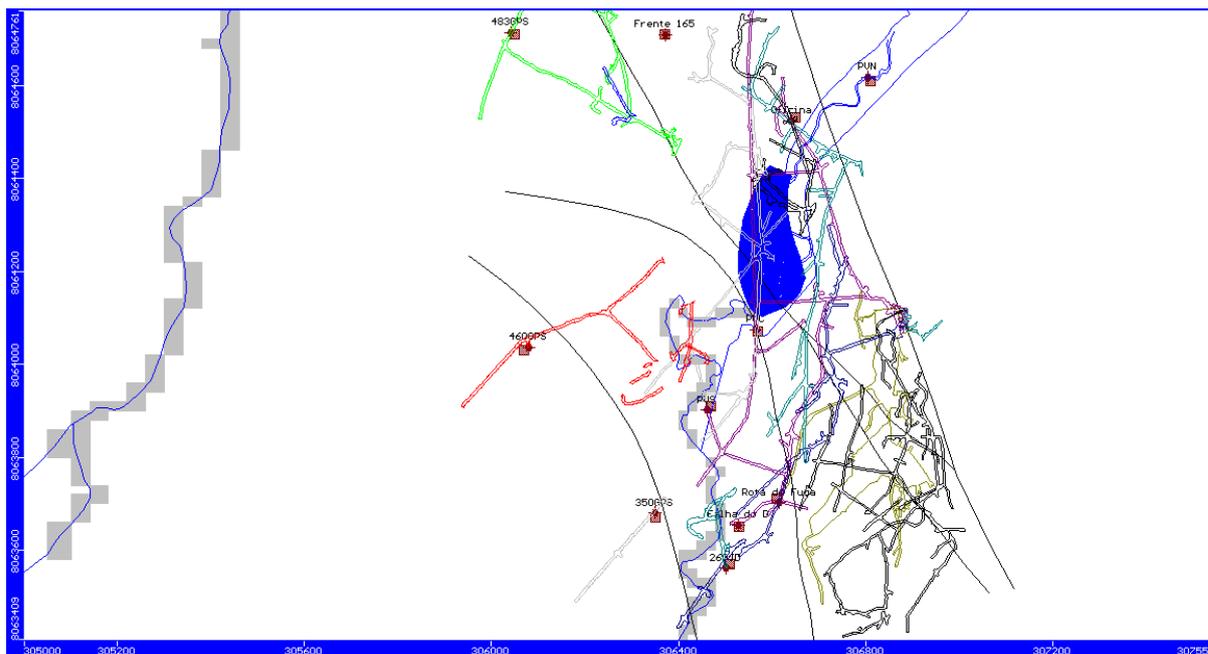


Figura 7.6 - Potencial Especificado sobre o Ribeirão Traíras (células na cor vermelho escuro)

## 7.9 DRENOS (*DRAIN*)

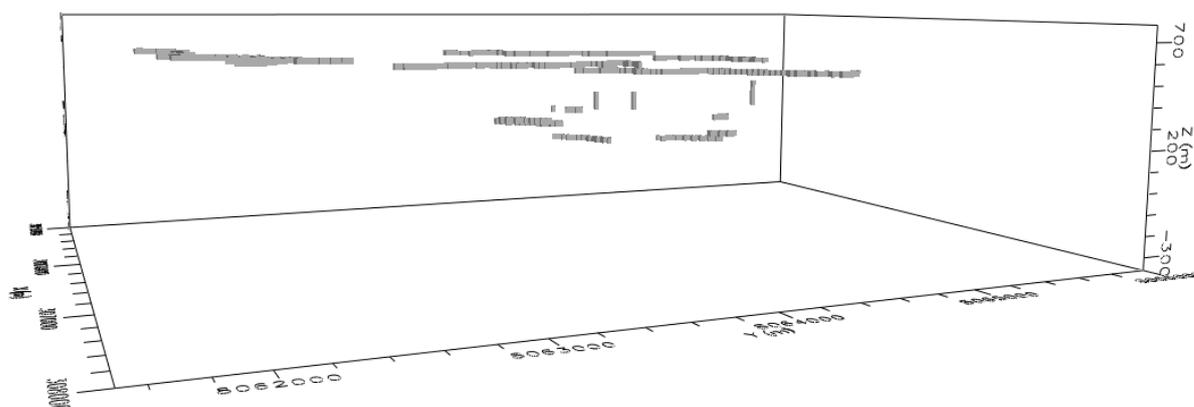
A condição de contorno dreno é utilizada para simular a retirada de água do modelo. A quantidade de água que escoar pela face de cada célula do dreno é determinada pela condutância, expressa em  $\text{m}^2/\text{dia}$ .

Os drenos foram aplicados aos córregos da região, Morro Agudo e Batuque. Esta propriedade foi atribuída às células ao longo do traçado destes córregos, predominantemente entre as cotas 597 e 523 metros (Layers 7 a 9), com condutâncias iniciais da ordem de  $100 \text{ m}^2/\text{dia}$ . Foi inserido outro dreno correspondendo ao desvio do Córrego Morro Agudo pelo superficial, com condutância de  $100 \text{ m}^2/\text{dia}$  e cota de 539 metros. Partes destes são exibidos na Figura 7.7 abaixo.



**Figura 7.7 - Drenos (células na cor cinza)**

Foram inseridos 11 drenos representando as surgências localizadas nas galerias da mina subterrânea e os poços de ventilação. Estes drenos possuem cotas que vão de 105m a 465m e foram atribuídas condutâncias de  $1\text{m}^2/\text{d}$  (Figura 7.8).



**Figura 7.8 - Drenos representando as surgências localizadas nas galerias**

## 7.10 POTENCIAIS GENERALIZADOS (*GENERAL HEAD BOUNDARY*)

Os potenciais generalizados representam a continuidade de aquíferos e/ou bacias hidrográficas para áreas fora do modelo, ou seja, permitem que haja fluxo entre fontes hídricas externas e o modelo.

Foram inseridos 3 GHB's no modelo, sendo o primeiro na cota 660 metros representando o divisor d'água da porção sudoeste do modelo, o segundo na cota

575 metros na parte sudoeste representando a continuidade da Bacia Hidrográfica do Córrego Morro Agudo, e o terceiro na porção oeste indicando a continuidade da Bacia Hidrográfica do Córrego Batuque, com cota de 642 metros. Todos os GHB's receberam como parâmetro de condutância o valor de 100 m<sup>2</sup>/dia.

### 7.11 ZONAS DE BALANÇO (*ZONE BUDGET*)

As zonas de balanço efetuam o cálculo do balanço hídrico em células pré-determinadas, a partir do resultado das calibrações. Esse balanço corresponde ao volume d'água que entra e sai em uma célula unitária ou conjunto de células as quais foram atribuídas as zonas de balanço.

Cabe ressaltar que o programa que calcula tais zonas não é o MODFLOW. Este programa (*Zone Budget*) é, juntamente com outros programas, parte integrante da interface gráfica Visual MODFLOW, executado ao final de cada calibração do modelo.

As zonas de balanço foram atribuídas às células ao longo dos Córregos Batuque e Morro Agudo e sobre o desvio deste, que receberam a propriedade drenos e que possuem dados de monitoramento por meio de vertedouros.

Além desses, também receberam zonas de balanço as áreas próximas aos poços de bombeamento que representam as surgências de água nas galerias da mina. Essas zonas de balanço são apresentadas na Tabela 7.3:

**Tabela 7.3 - Zonas de balanço**

ZONA DE BALANÇO	PONTO MONITORADO	DESCRIÇÃO
ZB1	-	-
ZB2	V1	Córrego Morro Agudo
ZB3	V2-V1+V6	Córrego Morro Agudo
ZB4	V5	Córrego Batuque
ZB5	V4	Jusante da lagoa
ZB6	V6	Desvio do superficiário
ZB7	483GPS	Galeria 483GPS
ZB8	PVN	Poço de Ventilação Norte
ZB9	PVC	Poço de Ventilação Central
ZB10	PVS	Poço de Ventilação Sul
ZB11	260JD	Galeria 260JD
ZB12	350GPS	Galeria 350GPS
ZB13	460GPS	Galeria 460GPS
ZB14	OFICINA	Oficina
ZB15	Falha do D	Falha do D
ZB16	Frente 165	Frente 165
ZB17	Rota de Fuga	Rota de Fuga

A zona de balanço 1 corresponde a toda área do modelo onde não foi aplicado as demais zonas, não considerada nas análises.

As zonas de balanço de 2 a 6 são utilizadas para realizar comparações com as medidas realizadas nos vertedouros que monitoram os córregos e desvio.

As zonas de balanço de 7 a 17 foram utilizadas para averiguar se as vazões informadas das surgências nas galerias estão condizentes com as calculadas pelo modelo.

## 8 CALIBRAÇÃO EM REGIME PERMANENTE

Na calibração em regime permanente, a variável tempo não é considerada, refletindo a condição de equilíbrio do aquífero e, neste caso, sem a influência de qualquer instrumento de rebaixamento do nível d'água.

Considerando o mês de Junho de 2011 como final efetivo do ano hidrológico, para a calibração em regime permanente foram utilizados os dados do monitoramento referentes ao dia 30 de Junho de 2011.

A seguir, serão apresentados os dados utilizados (e obtidos) na calibração do modelo numérico, em regime de escoamento permanente.

### 8.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K)

Partindo dos valores iniciais considerados (Tabela 7.1), os valores de condutividade hidráulica foram modificados sucessivamente, até que um padrão de fluxo d'água subterrâneo compatível com as condições naturais fosse alcançado.

Visando alcançar uma melhor aproximação entre os níveis d'água observados e calculados, foi atribuída uma anisotropia nesse parâmetro, com valores de condutividade hidráulica cerca de 10 vezes menores no eixo vertical Z, em relação aos eixos horizontais X e Y, simulando a anisotropia provocada pelas estruturas horizontais das rochas, que favorecem o fluxo de água no sentido horizontal. A única exceção foi a área que está mapeada como aluvião que ficou melhor calibrada com a isotropia da condutividade hidráulica.

A Tabela 8.1 abaixo apresenta o resultado obtido na retro-análise da condutividade hidráulica em regime permanente.

**Tabela 8.1 - Condutividade hidráulica obtidas na calibração em regime permanente (m/dia)**

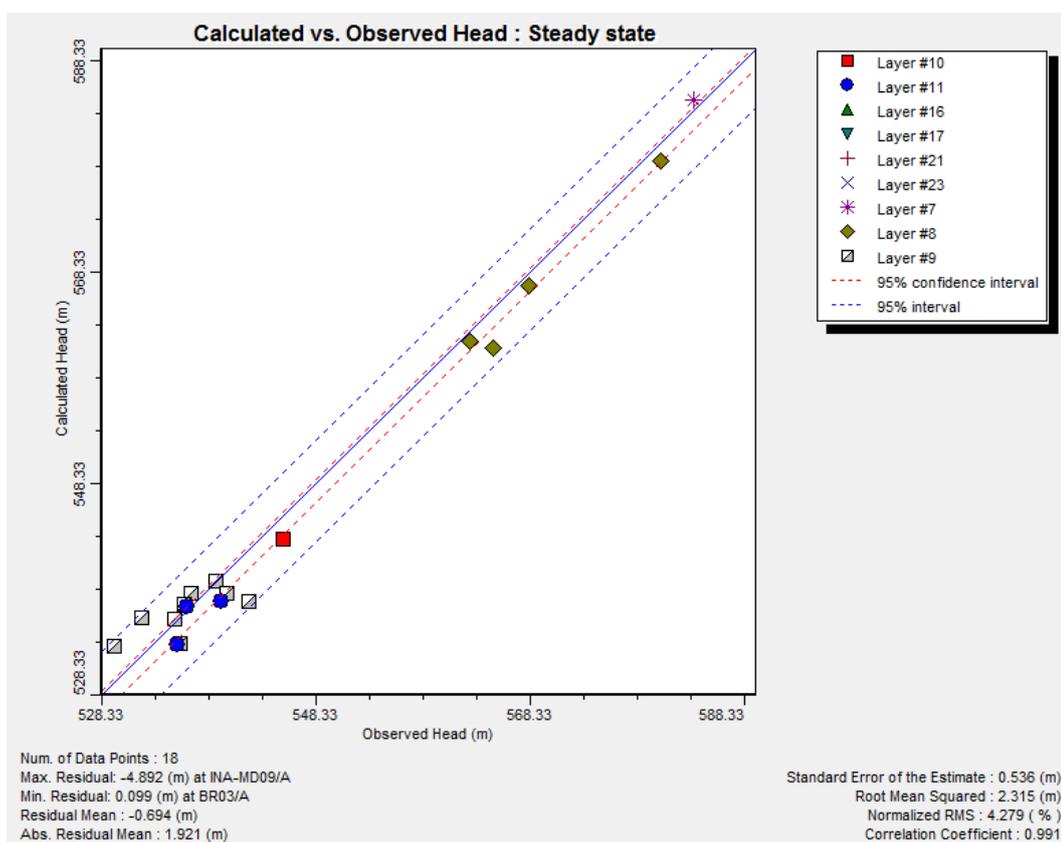
PROPRIEDADE	LITOTIPO	Kx	Ky	Kz
1	LSO	0,835	0,835	0,0835
2	MA	0,1	0,1	0,01
3	SLP	0,1	0,1	0,01
4	FR	0,1	0,1	0,01
5	Sx	0,1	0,1	0,01
6	Sard	0,1	0,1	0,01
8	Rocha indefinida	0,1	0,1	0,01
9	Descontinuidades da rocha	1	1	1
10	Galerias	1	1	1
12	AL	0,835	0,835	0,835

## 8.2 NÍVEL D'ÁGUA NOS INSTRUMENTOS DE MONITORAMENTO

Para a calibração em regime permanente foram considerados os instrumentos de monitoramento de nível d'água que apresentaram leitura em Junho de 2011.

A comparação entre os dados observados e calculados foi realizada através de sucessivas tentativas de calibração em regime permanente. Em cada versão foi verificada a relação entre os níveis d'água observados e calculados pelo modelo, buscando a melhor aproximação possível através de alterações nos valores de condutividade hidráulica das litologias, dos GHB's e dos drenos.

A reta de calibração, com os valores observados e calculados em cada instrumento é apresentada na Figura 8.1.



**Figura 8.1 - Reta de calibração do nível d'água em regime permanente com os valores observados (eixo x) e calculados (eixo y) em cada instrumento**

Analisando conjuntamente os instrumentos de monitoramento em questão, os níveis d'água calculados pelo modelo mostram uma aproximação bastante razoável com os níveis d'água monitorados nos indicadores de nível d'água e drenos verticais reais, com erro médio normalizado de 4,279%, com

coeficiente de correlação de 0,991. As retas tracejadas em azul do gráfico limitam um intervalo de confiança de 95% entre os valores.

### 8.3 CONDUTÂNCIA DOS DRENOS

Nessa etapa de calibração, também foram calibradas as condutâncias dos drenos, visando alcançar a melhor aproximação entre as vazões produzidas pelos mesmos (quantificadas nas zonas de balanço) e as vazões monitoradas.

Desta forma, a condutância atribuída inicialmente aos drenos foi modificada diversas vezes durante a calibração, os valores finais da calibração são vistos na Tabela 8.2, o comparativo entre as vazões observadas e calculadas serão discutidas no Item 8.4. Aliado a calibração dos demais parâmetros (condições de contorno), o ajuste da condutância proporciona uma melhor aproximação entre os dados monitorados e calculados pelo modelo. Ou seja, é uma ferramenta adicional no processo de calibração.

**Tabela 8.2 - Calibração dos drenos**

DRENO	LOCAL	COTA (m)	CONDUTÂNCIA (m <sup>2</sup> /d)
0	Córrego Batuque	525-563	1000
1	Córrego Batuque	564	1000
2	Córrego Morro Agudo	549-597	100
3	Córrego Morro Agudo	575-578	1000
4	Córrego Morro Agudo	574-577	1000
5	Desvio do Superficial	539	1000
6	483GPS	105	0,082
7	Frente 165	165	0,1
8	Oficina	285	0,06
9	PVN	405-465	0,78
10	460GPS	135	0,08
11	350GPS	255	0,21
12	260JD	285	0,13
13	Nível 250	345	0,4
14	Rota de Fuga	345	0,06
15	PVS	375-405	1,03
16	PVC	345-405	1,1

## 8.4 ZONAS DE BALANÇO

Como recurso para a calibração das condições de contorno utilizadas, procede-se a análise das vazões de saída obtidas em cada zona de balanço atribuída, através do programa *Zone Budget*.

Nessa análise, são comparados os dados calculados em cada zona de balanço com os dados reais monitorados nos instrumentos de monitoramento de vazão (vertedouros e galerias subterrâneas) no período determinado.

Sendo assim, nessa etapa de calibração, foram utilizados os dados de vazão obtidos nesses instrumentos no mês de Junho de 2011.

A Tabela 8.3 apresenta os valores comparativos entre as vazões calculadas na calibração em regime permanente e as vazões observadas (monitoradas).

**Tabela 8.3 - Quadro comparativo entre as vazões calculadas na calibração em regime permanente e as vazões monitoradas em Junho de 2011, em m<sup>3</sup>/dia e m<sup>3</sup>/h.**

ZONA DE BALANÇO	PONTO MONITORADO	OBSERVADA (06/2011) (m <sup>3</sup> /dia)	CALCULADA (CALIBRAÇÃO) (m <sup>3</sup> /dia)	OBSERVADA (06/2011) (m <sup>3</sup> /h)	CALCULADA (CALIBRAÇÃO) (m <sup>3</sup> /dia)
ZB1	-	-	-	-	-
ZB2	V1	2031.78	2010.1	84.66	83.75
ZB3	V2-V1+V6	93.43	105.85	3.89	4.41
ZB4	V5	1886.29	1535.6	78.60	63.98
ZB6	V6	587.99	439.65	24.50	18.32
	<b>TOTAL GALERIAS</b>	<b>4599.49</b>	<b>4091.2</b>	<b>191.65</b>	<b>170.46</b>
	<b>ERRO</b>	<b>11.05%</b>			
ZB7	483GPS	720.00	722.96	30.00	30.12
ZB8	PVN	240.00	254.63	10.00	10.61
ZB9	PVC	600.00	521.25	25.00	21.72
ZB10	PVS	432.00	417.10	18.00	17.38
ZB11	260JD	720.00	722.22	30.00	30.09
ZB12	350GPS	1656.00	1618.70	69.00	67.45
ZB13	460GPS	600.00	602.90	25.00	25.12
ZB14	OFICINA	72.00	74.12	3.00	3.09
ZB15	Falha do D	72.00	76.88	3.00	3.20
ZB16	Frente 165	360.00	352.19	15.00	14.67
ZB17	Rota de Fuga	48.00	46.65	2.00	1.94
	<b>TOTAL GALERIAS</b>	<b>5520.00</b>	<b>5409.60</b>	<b>230.00</b>	<b>225.40</b>
	<b>ERRO</b>	<b>2.00%</b>			

Pela análise desses dados, pode-se dizer que de forma geral as vazões calculadas nas zonas de balanço do modelo apresentam valores semelhantes aos monitorados.

A ZB3 está localizada no Córrego Morro Agudo e é utilizada para calcular o volume de água que passa no VTMA-02 (jusante), menos o volume que passa no VTMA-01 (montante), somado ao volume de VTMA-06 (desvio).

## **8.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO EM REGIME PERMANENTE**

Os níveis d'água calculados pelo modelo apresentam uma boa aproximação com os níveis d'água monitorados nos indicadores de nível d'água e drenos utilizados no monitoramento do nível d'água da VMZ-MA.

De maneira geral, as zonas de balanço que controlam as vazões da rede de drenagem da região e as vazões das surgências na mina subterrânea apresentam vazões bastante semelhantes às vazões monitoradas.

A Figura 8.2, apresenta o resultado da calibração em regime permanente com a disposição das curvas equipotenciais de 10 em 10 metros e os vetores de direção de fluxo no *Layer 9*, entre as cotas 510 e 540 metros.

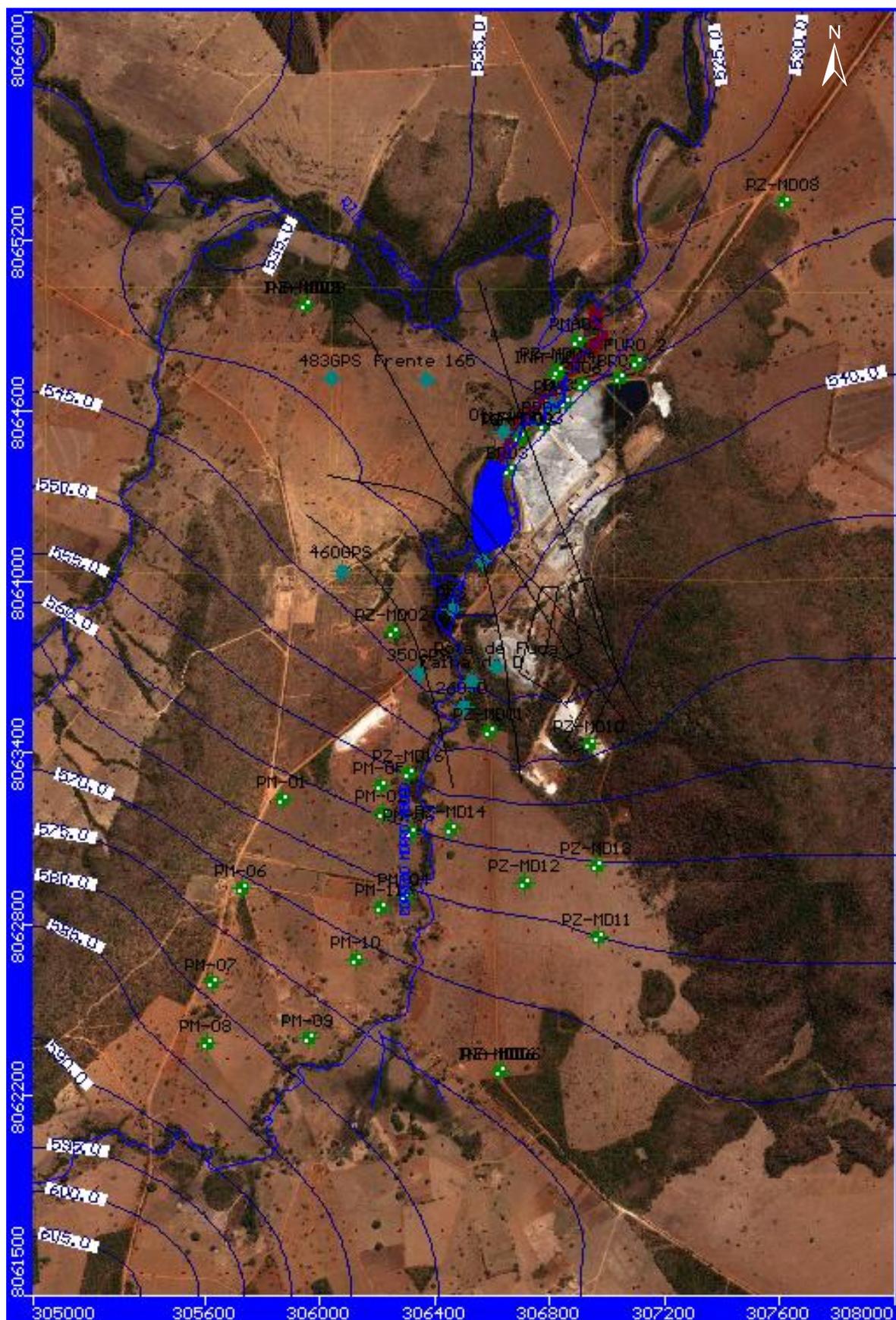
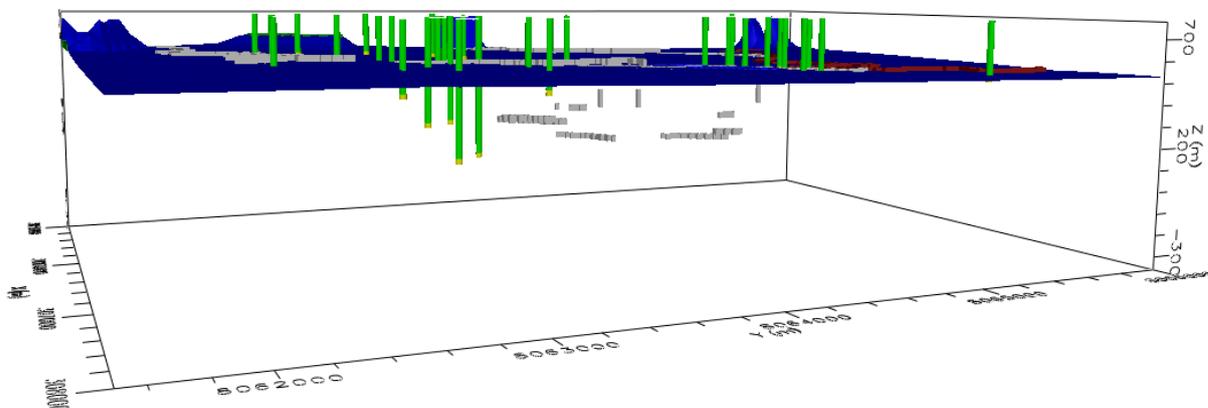


Figura 8.2 - Equipotenciais de carga hidráulica de 5 em 5 metros

Essa figura é meramente ilustrativa. A correta visualização dos níveis d'água calibrados se faz em análise tridimensional, nos planos X, Y e Z do modelo (Figura 8.3).



**Figura 8.3 - Modelo tridimensional (vista E-W) em perspectiva**

## 9 SIMULAÇÕES

Concluída a etapa de calibração do modelo numérico, prosseguiu-se com as etapas de simulação do surgimento de água da mina com o objetivo de estimar vazões de surgências nos próximos anos e assim auxiliar o projeto de construção da nova ETE na unidade. Foram simulados seis cenários distintos, correspondendo aos próximos anos até 2017.

Foram simulados os seguintes cenários: Anos de 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017.

Esses cenários baseiam-se em projeções de lavra dos blocos C, D e E.

### 9.1 ENTRADA DE NOVOS DADOS NO MODELO

Durante as etapas de simulação do rebaixamento do nível d'água nos cenários previstos, novos dados foram inseridos no modelo, descritos nos itens a seguir.

#### 9.1.1 Recarga

Conforme apresentado no Item 7.6, no processo de simulação do rebaixamento do nível d'água em regime permanente, a taxa de recarga definida na etapa de calibração foi mantida em 10% da precipitação média.

#### 9.1.2 Estruturas de Drenagem da Mina

Seguindo o planejamento de lavra da mina para os blocos C, D e E, foram utilizados arquivos do *software* AutoCAD como guias para a localização das novas galerias.

Devido à mina subterrânea estar localizada em meio a rochas de porosidade muito baixa, e a água estar diretamente associada a zonas de descontinuidades das rochas, como já explicado anteriormente, decidiu-se representar as galerias individualmente como drenos (*Drains*).

Foi atribuída uma condutância de  $0,15\text{m}^2/\text{d}$  (valor obtido da média das galerias que apresentam surgência de água) nas galerias que atravessam as zonas de falha e uma menor condutância nas galerias restantes ( $0,01\text{m}^2/\text{d}$ ).

Foram inseridos 68 novos drenos sobre as galerias apresentadas na Figura 9.1. Vale reforçar que o surgimento de água nestas galerias estará condicionado à passagem das mesmas em zonas de descontinuidades das rochas.



Figura 9.1 - Planejamento de lavra para os próximos anos

### 9.1.3 Zonas de Balanço

Na fase de simulação, novas zonas de balanço foram aplicadas nas células que receberam os drenos. O objetivo dessas zonas é quantificar a vazão surgente nestas galerias.

As novas zonas de balanço aplicadas são apresentadas na Tabela 9.1.

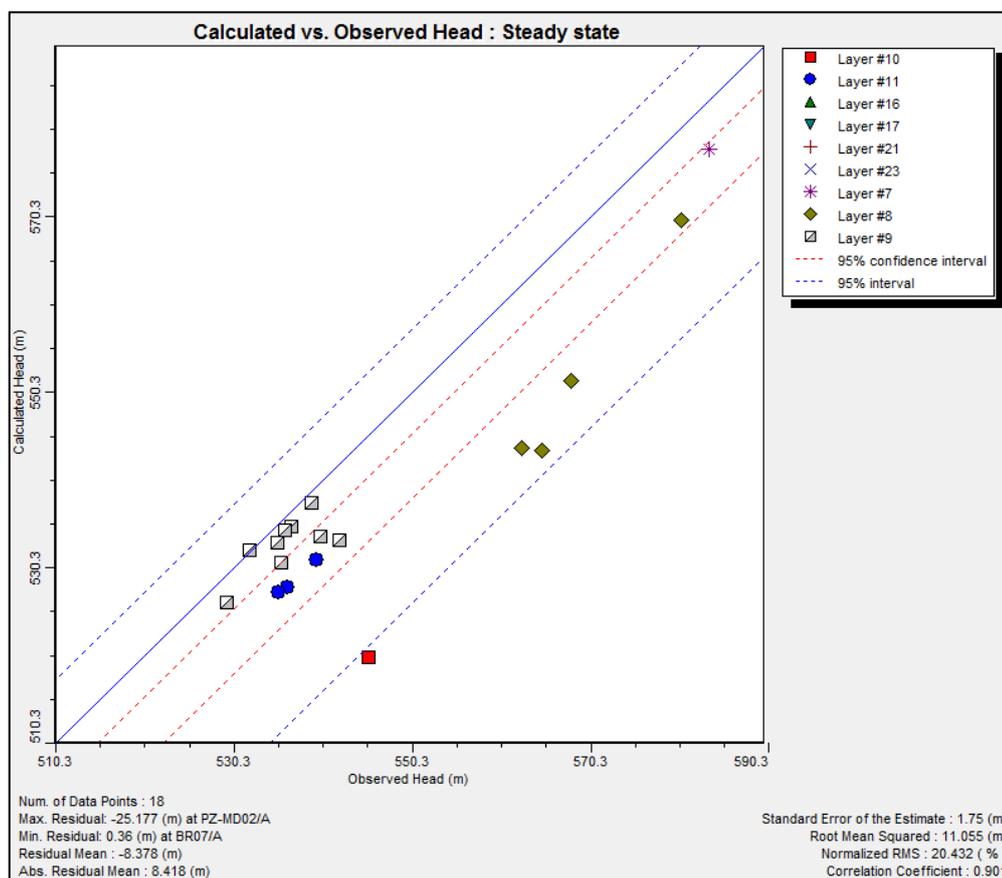
**Tabela 9.1 - Novas zonas de balanço atribuídas às galerias**

ZONA DE BALANÇO	ANO
18	2012
19	2013
20	2014
21	2015
22	2016
23	2017

## 9.2 RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO

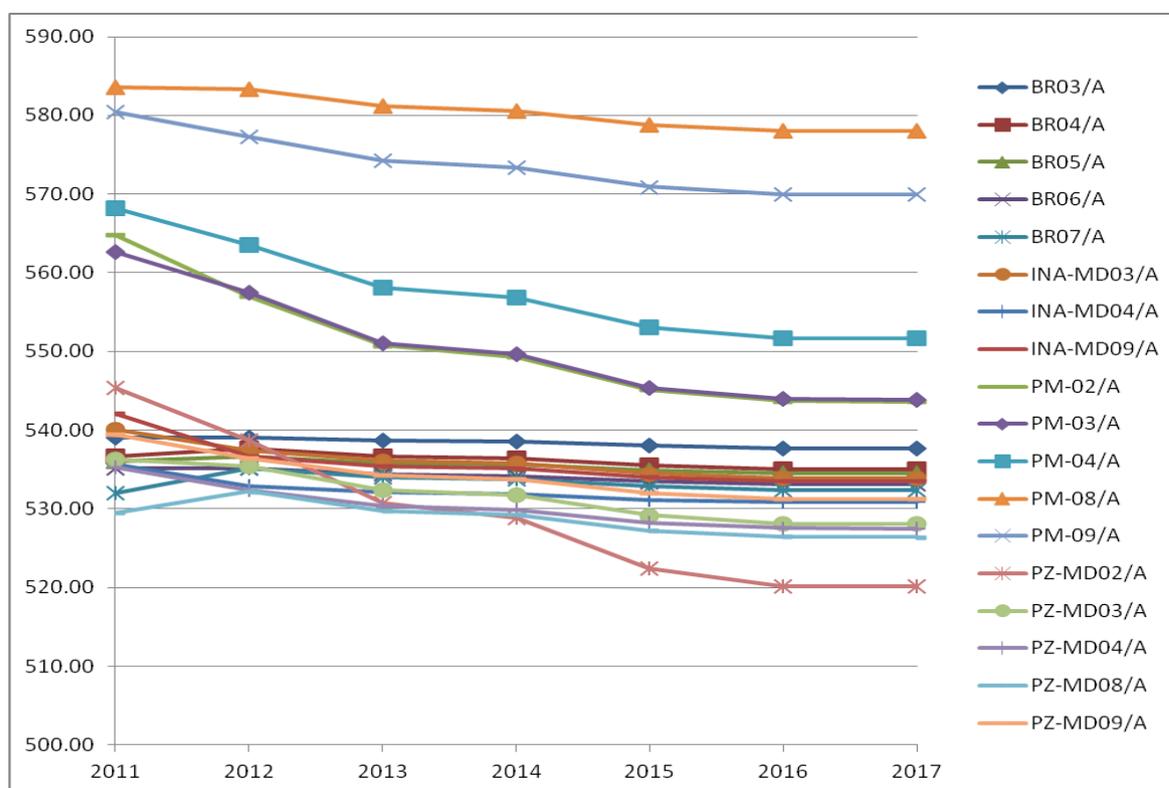
A simulação mostra que haverá um declínio acentuado no nível d'água. Entretanto, o monitoramento de nível realizado nos instrumentos indica que até a presente data o comportamento geral destes é de estabilidade, com algumas exceções.

O erro obtido na calibração do modelo era de 4,279% e após a inserção dos drenos, este aumentou para 20,432% no último ano simulado (2017), ou seja, 16,153% de diferença (Figura 9.2). Este valor pode variar com a precipitação que é diretamente relacionada à recarga dos aquíferos.



**Figura 9.2 - Retas de simulação do nível d'água em 2017 em Morro Agudo**

A evolução dos níveis d'água pode ser visualizada na Figura 9.3. Neste cenário todos os instrumentos possuem rebaixamento, porém os instrumentos que monitoram o aquífero raso apresentam este comportamento mais proeminente quando comparados aos instrumentos que monitoram o aquífero profundo.



**Figura 9.3 - Evolução do nível d'água na área de Morro Agudo**

A Tabela 9.2 apresenta as vazões de surgências em m<sup>3</sup>/h em todo o período simulado.

**Tabela 9.2 - Vazões de surgências (em m<sup>3</sup>/h) simuladas para os anos 2012 a 2017**

ZONA DE BALANÇO	JUN/2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>7 a 17</b>	225.40	216.44	199.90	198.20	192.86	191.03	191.00
18 (2012)		82.00	76.88	75.94	73.22	72.31	72.29
19 (2013)			131.07	129.73	126.65	125.62	125.60
20 (2014)				27.84	27.21	27.01	27.01
21 (2015)					79.28	78.70	78.69
22 (2016)						33.10	33.08
23 (2017)							1.02
<b>TOTAL (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>225.40</b>	<b>298.44</b>	<b>407.85</b>	<b>431.70</b>	<b>499.22</b>	<b>527.77</b>	<b>528.69</b>

A vazão total de surgências na mina subterrânea em 2017 atinge o valor de 528,69m<sup>3</sup>/h. Entre os anos de 2012 e 2013 o aumento pode chegar a 109,41m<sup>3</sup>/h e entre 2014 e 2015 o aumento seria de 67,52m<sup>3</sup>/h.

Para o projeto da nova ETE as vazões supracitadas deverão ser somadas à vazão de adução de água da superfície para os níveis superiores ao nível 316 (água do processo) e subtraída a vazão bombeada pelo Projeto Água Limpa. Sendo assim, adotou-se os valores de 25m<sup>3</sup>/h para a água aduzida e 50m<sup>3</sup>/h para a água limpa.

A Tabela 9.3 apresenta as etapas desses cálculos e a vazão final que será tratada pela ETE.

**Tabela 9.3 - Vazões de entrada da ETE estimadas para os anos 2012 a 2017**

<b>TOTAIS</b>	<b>JUN/2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
<b>TOTAL SURGÊNCIAS (m<sup>3</sup>/h)</b>	225.40	298.44	407.85	431.70	499.22	527.77	528.69
<b>TOTAL + ÁGUA ADUZIDA (m<sup>3</sup>/h)</b>	250.4	323.44	432.85	456.7	524.22	552.77	553.69
<b>TOTAL + ÁGUA ADUZIDA (m<sup>3</sup>/h) - ÁGUA LIMPA</b>	200.4	273.44	382.85	406.7	474.22	502.77	503.69
<b>VAZÃO DE ENTRADA DA ETE</b>	<b>200.4</b>	<b>273.44</b>	<b>382.85</b>	<b>406.7</b>	<b>474.22</b>	<b>502.77</b>	<b>503.69</b>

A vazão de 200,4m<sup>3</sup>/h calculada pelo modelo numérico é apenas 0,298% menor que a vazão real bombeada no mês de Junho de 2011 (201m<sup>3</sup>/h), mostrando assim a confiabilidade nos dados de entrada e saída.

Essas vazões podem ser reduzidas se o Projeto Água Limpa for ampliado, dependendo de um esforço conjunto entre os setores de Hidrogeologia, Meio Ambiente, Geologia e Lavra.

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho foi atualizado o modelo hidrogeológico conceitual e o modelo numérico do fluxo subterrâneo em regime permanente, além de permitir a simulação das vazões bombeadas e níveis d'água monitorados entre os anos de 2012 e 2017. Os estudos hidrogeológicos realizados na Mina de Morro Agudo permitiram definir que a surgência de água na mina subterrânea é crescente e pode atingir patamares de 530m<sup>3</sup>/h até o ano de 2017.

Espera-se que as simulações realizadas neste trabalho sejam úteis para o planejamento da construção da nova ETE da unidade de Morro Agudo. Para tal, os valores das vazões de surgências nas minas foram somados à vazão de água aduzida que está sendo utilizada no processo de lavra em níveis superiores ao nível 316 e subtraída da vazão bombeada média do Projeto Água Limpa.

Após a realização destes cálculos chega-se a valores de bombeamento da mina subterrânea de 503,69m<sup>3</sup>/h no ano de 2017.

Essas vazões podem ser reduzidas com a ampliação do Projeto Água Limpa, dependendo de um esforço conjunto entre os setores de Hidrogeologia, Meio Ambiente, Geologia e Lavra.

O desaguamento da mina não está interferindo na vazão observada nos vertedouros situados no Córrego Morro Agudo de maneira definitiva, pois a água que infiltra na mina subterrânea é bombeada para a superfície, tratada e devolvida ao Ribeirão Traíras, sem provocar prejuízo ou impactos ambientais.

Por se tratar de um aquífero fissural, não se pode precisar se a lavra irá atingir uma zona aquífera fraturada de maior expressão.

Recomenda-se a continuidade no trabalho de mapeamento estrutural e geológico detalhado da mina subterrânea, para que se possa guiar o avanço da lavra de forma que esta não tenha necessariamente que atravessar grandes zonas fraturadas.

Recomenda-se ainda que o monitoramento do nível d'água e as campanhas hidroquímicas sejam ampliadas/intensificadas nas surgências de água dentro da mina subterrânea, para que se possam analisar as correlações entre as

águas superficiais e estas subterrâneas, e acompanhar a evolução do nível d'água da área do empreendimento e do seu entorno.

Os instrumentos de monitoramento do nível d'água existentes fornecem as informações necessárias para a realização de análises hidrogeológicas como as apresentadas neste trabalho, porém a mina subterrânea irá avançar em direção oeste e sudoeste, fazendo necessária a ampliação da rede de monitoramento com o objetivo de obter mais informações sobre as zonas de falha e as áreas do Bloco D e E. Para suprir a necessidade de informações vindouras sugere-se a instalação de novos instrumentos.

## 11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. (1967). *Origem e evolução da Plataforma Brasileira*. DNPM/DGM, Rio de Janeiro.
- ANTUNES, F. (1986). *Caracterização climática do estado de Minas Gerais: climatologia agrícola*. Informe Agropecuário, Belo Horizonte.
- Bertachini, D. P., & Silva, T. (2004). *Mapeamento geológico da região de Poções, Paracatu, MG*. UFMG, Belo Horizonte.
- BRANDT. (1998). *Plano de Controle Ambiental - PCA - Jazidas do Morro Agudo, Tamanduá e Sucuri - MG*.
- BRASIL. (1992). *Normas climatológicas (1961-1990)*. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Departamento Nacional de Meteorologia., Brasília.
- COPASA. (1993). *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Hidrosistemas.
- DNIT. (2012). *Mapas Multimodais*. Acesso em 18 de 03 de 2012, disponível em DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes: <http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/mapas-multimodais/MG.pdf>
- HGEO. (2004). *Texto Explicativo do Mapeamento Estrutural da Mina de Morro Agudo e Região*.
- LANDIM, P., & STURARO, J. (2002). *Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos*. Departamento de Geologia Aplicada - IGCE - UNESP, Rio Claro.
- MDGEO. (2005a). *Relatório de Compilação e Síntese dos Dados Coletados da Unidade de Morro Agudo (CMM) – Paracatu, MG*. Belo Horizonte.
- MDGEO. (2005b). *Relatório do inventário dos pontos d'água da Unidade de Morro Agudo - Paracatu (MG)*. Belo Horizonte.
- MDGEO. (2005c). *Projeto da Rede de Monitoramento Hidrogeológico da Unidade de Morro Agudo - Paracatu (MG). Relatório Técnico*. Belo Horizonte.
- MDGEO. (2007). *Modelo Hidrogeológico Preliminar da Unidade de Morro Agudo – Paracatu, MG*. Belo Horizonte.

- MDGEO. (2008). *Reavaliação do Modelo Hidrogeológico Conceitual da Unidade de Morro Agudo – Paracatu, MG*. Belo Horizonte.
- MDGEO. (2009). *Estudo Hidrogeológico da Unidade de Morro Agudo, Análise da Rede de Monitoramento e do Modelo Hidrogeológico Conceitual*. Belo Horizonte.
- MDGEO. (2010). *Modelamento Numérico do Fluxo D'água Subterrânea da Área da Mineração Morro Agudo, Paracatu - MG*. Belo Horizonte.
- MDGEO. (2011). *Avaliação e laudo técnico do abatimento ocorrido na fazenda do Sr. Roquete, Paracatu, MG*. Relatório Interno, Belo Horizonte.
- TECNOHIDRO. (2007). *Hidroquímica Regional*. Votorantim Metais Zinco S.A. Unidade Morro Agudo.
- VOTORANTIM. (2011). *Informações internas*. Paracatu.