

ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS NA MINA MORRO DO OURO, PARACATU - MG

Eduardo Chapadeiro¹; David Banton²; Celso de Oliveira Loureiro³; Juliana M. M. Esper⁴; Rodrigo Dutra Amaral⁵

RESUMO

Estudos hidrogeológicos foram realizados na Mina Morro do Ouro, empreendimento da Rio Paracatu Mineração S/A, no município de Paracatu-MG. A modelagem hidrogeológica computacional, baseada em extensivo levantamento de dados, evidencia que, após o encerramento das atividades da mina e o enchimento da cava (formação do lago), esta funcionará como uma grande bacia fechada, dentro do sistema hidrogeológico local. A modelagem prevê que, no pós-fechamento, os níveis de água subterrânea sofrerão depleção de 3 a 14 metros, em relação à condição atual, em parte da área mais próxima da mina. Quanto à formação do lago da cava final, destaca-se que: o tempo de enchimento da cava varia de 11 a 16 anos; o escoamento superficial advindo de áreas não mineradas da bacia de drenagem representa o maior componente (50 a 60%) do aporte de água para a cava; o escoamento superficial advindo de áreas mineradas da bacia de drenagem e a precipitação direta sobre o lago contribuem com 10 a 25% do aporte total; e o fluxo de água subterrânea é o componente mais insignificante para o enchimento do lago (menos que 3%).

ABSTRACT

Hydrogeological studies were carried out at Morro do Ouro Mine, operated by Rio Paracatu Mineração S/A, in the municipality of Paracatu-MG. The hydrogeological modeling, based on an extensive data collection, shows that, after the mine closure, the pit lake will be a large and closed basin inserted in the local hydrogeologic system. At post-closure stage the modeling shows that the groundwater levels will undergo depletion from 3 to 14 meters in comparison to the current condition in some of the areas close to the open pit. With regards to the pit lake formation it should be highlighted that: the open pit flooding time varies from 11 to 16 years; the surface runoff from mined areas within the drainage basin represents the major component (50 to 60%) of the inflow to the lake; the surface runoff from the non-mined areas within the drainage basin and the direct precipitation on the lake contributes with 10 to 25% of the total inflow; the groundwater inflow is the most insignificant component for the pit flooding (less than 3%).

Palavras-Chave - Mineração; Modelagem; Pós-Fechamento.

¹ Golder Associates Brasil: Av. Barão Homem de Melo, 4.484 - 8º Andar, Belo Horizonte - MG, (31) 2121-9800, fax (31) 2121-9801, echapadeiro@golder.com.br

² Golder Associates Inc.: 18300 NE Union Hill Road, Suite 200, Redmond, WA USA 98052-3333, (425) 883-0777, fax (425) 882-5498, dbanton@golder.com

³ Ph.D., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Bairro Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30.110-060, tel: (31)-3238-1884, celso@desa.ufmg.br

⁴ Rio Paracatu Mineração: Estrada do Machado, S/Nº - Caixa Postal 168 - Paracatu - MG, (38) 3679-1000, fax (38) 3679-1006, juliana.esper@rpm.kinross.com.br

⁵ Rio Paracatu Mineração: Estrada do Machado, S/Nº - Caixa Postal 168 - Paracatu - MG, (38) 3679-1021, fax (38) 3679-1006, rodrigo.amaral@rpm.kinross.com.br

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos de 2002, 2003 e 2004, foram realizados estudos hidrogeológicos na Mina Morro do Ouro, empreendimento operado pela Rio Paracatu Mineração (RPM) e que consiste na lavra, no beneficiamento e na hidrometalurgia de minério de ouro.

A RPM é detentora de duas Portarias de Lavra na área do Morro do Ouro, no município de Paracatu, no oeste de Minas Gerais (Figura 1). As atividades da empresa são devidamente licenciadas pelo Conselho Estadual de Política Ambiental do Estado de Minas Gerais (COPAM), com base em diversos estudos técnicos e projetos desenvolvidos por firmas de consultoria contratadas pela RPM.

Os estudos hidrogeológicos foram realizados em 3 fases, conforme a seguir:

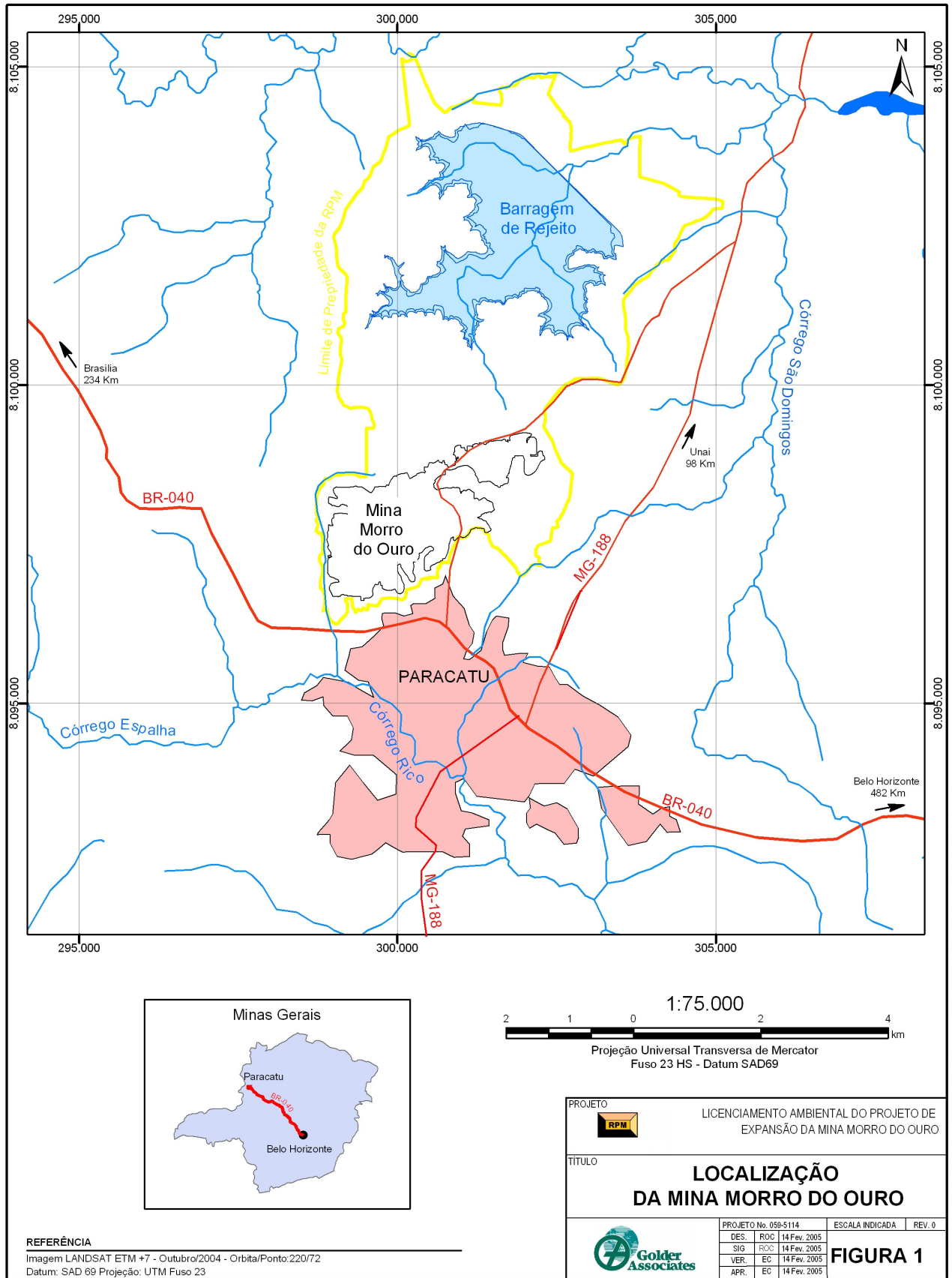
- Fase I – Desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual, baseado na consolidação e revisão dos dados existentes na RPM (Golder Associates Brasil, 2003);
- Fase II – Refinamento e validação de modelo hidrogeológico conceitual, baseado na coleta de novos dados e em um inventário de pontos de água superficial e subterrânea (Golder Associates Inc., 2004);
- Fase III – Desenvolvimento de modelos dinâmicos de previsão, baseados em modelos computacionais hidrogeológicos (Golder Associates Inc., 2005).

Neste artigo é apresentada uma consolidação dos resultados das três fases dos estudos e as principais conclusões do trabalho até o final do ano de 2005.

2. O EMPREENDIMENTO ATUAL E O PROJETO DE EXPANSÃO DA RPM

A RPM iniciou a implantação do Projeto Morro do Ouro em meados de 1985 e entrou efetivamente em operação em outubro de 1987. Em 1993, a lavra atingiu o patamar de 13 Mt/ano. Até 1997, a lavra concentrou-se em minério oxidado, porém a partir de então se passou a lavar também o minério sulfetado primário, sem qualquer detrimento do teor. Isto implicou uma série de investimentos no circuito de Tratamento do Minério e na área de Meio Ambiente.

Com o Projeto de Expansão de Lavra, que implicará produção de 30Mt/ano, a RPM pretende promover o aumento de suas reservas minerais, com a expansão da Mina Morro do Ouro em sua extensão e em sua profundidade. Para o aprofundamento da cava, em cerca de 100 metros, deverá ser feito o rebaixamento do nível de água subterrânea. A mina passará a ter uma configuração de cava fechada em parte da área de lavra. Além disso, será feito um desvio parcial do córrego Rico e, posteriormente, com o avanço da lavra, a incorporação de toda a porção desse curso d'água contígua à mina. A partir do ano 2020, será implantado um canal periférico para coleção da drenagem pluvial durante a operação da mina.



P:\Sig\Projetos\RPM\059_5114\GAB_BHP\Plagem\Final\0001_01_01\Figura3_2_A4Retrato.pdf

FIGURA 1 - Localização da Mina Morro do Ouro.

3. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E HIDROLÓGICA DA ÁREA

3.1 Aspectos Geológicos

As informações apresentadas neste item, sobre os aspectos geológicos da área de influência do empreendimento, baseiam-se, essencialmente, no artigo “Geologia e Caracterização dos Recursos Minerais do Morro do Ouro, Paracatu, Minas Gerais” de Möller et al. (2001), consubstanciados em trabalho publicado em Pinto e Martins Neto (2001). Os dados hidrológicos resultaram da análise dos dados disponíveis na RPM e, também, de levantamentos específicos.

O pacote de rochas filíticas que hospeda a mineralização aurífera do Morro do Ouro é considerado como pertinente à base da Formação Paracatu, definindo o localmente chamado Membro Morro do Ouro. A Formação Paracatu, de idade Proterozóica Superior, aflora ao longo de extensa faixa orientada NS, no setor meridional da porção oriental da chamada Faixa de Dobramentos Brasília.

Em termos das características geológicas locais, o Morro do Ouro se constitui num alto topográfico proeminente na região de Paracatu, em meio a terrenos bastante erodidos e aplainados. No Morro do Ouro afloram os mesmos filitos regionais, porém com algumas diferenças notáveis: as rochas são nitidamente mais deformadas e mostram a comum presença dos *boudins* de quartzo que caracterizam o corpo mineralizado. Além de serem muito mais sulfetadas, as litologias do Morro do Ouro são mais sericíticas que as rochas encaixantes, como resultado do processo hidrotermal que provocou a mineralização. A foliação das rochas mostra direção geral N20-40°W, com mergulho médio da ordem de 10°SW.

A área em que se localiza a mina a céu aberto da RPM é caracterizada por uma seqüência de filitos que apresentam uma transição entre uma zona oxidada, próxima à superfície, e uma zona sulfetada, em profundidade. Abaixo desta ocorre uma zona não mineralizada, denominada horizonte A – “footwall”. Os horizontes C, T e B1 se constituem na porção oxidada do corpo mineralizado, ao passo que a Unidade B2 representa a parte primária, sulfetada, de maior dureza, e com menor grau de fraturamento.

As rochas intemperizadas e oxidadas têm entre 20 e 40 m de espessura e apresentam sistemas de fraturamentos significativos. Os horizontes C e B1 foram removidos em quase toda a área da mina como conseqüência da atividade de exploração mineral. O horizonte B2 é bem mais resistente que o horizonte B1, e sua dureza aumenta em profundidade. Supõe-se que com o aumento da resistência da rocha, o grau de fraturamento diminua em profundidade de modo similar. O horizonte B2 tem espessura de até 100 m.

Sistemas de falhas normais com forte mergulho foram identificados e atravessam a área da mina. Essas falhas se orientam aproximadamente segundo as direções norte-sul e leste-oeste. As

zonas de falhas são geralmente estreitas, não mais largas que 10 m e contêm filito menos resistente e brechas associadas. A maior parte da mina faz parte de uma estrutura em “graben” com direção leste-oeste.

O córrego Rico, a oeste da mina, flui sobre depósitos aluvionares recente; eles são compostos basicamente por sedimentos clásticos com granulometria variando de arenosa a cascalho arenoso. A largura dos depósitos aluvionares é incerta, porém é estimada em aproximadamente 100 m e as espessuras atingem até 7 metros (CETEC, 2004). O cascalho de aluvião tem sido extensivamente trabalhado por garimpeiros.

3.2 Hidrologia e Balanço Hídrico

Com base em dados meteorológicos, aproximadamente 700 mm de uma precipitação anual de 1.300 mm estão disponíveis para escoamento superficial, recarga de águas subterrâneas e para repor a umidade do solo em áreas de solo natural (Golder Associates, 2003). Na área da mina, espera-se uma evaporação menor que em solos naturais por causa da ausência de vegetação. Portanto, mais de 1.000 mm podem estar disponíveis para escoamento superficial (*runoff*) e recarga de águas subterrâneas na área da mina.

A água está disponível para escoamento superficial tipicamente apenas nos meses de verão. O escoamento superficial da área da mina é direcionado para os tanques escavados dentro dela, junto a perímetro da mina. Nesses tanques, a água é armazenada e recirculada para as instalações de beneficiamento mineral ou para o abastecimento de caminhões-pipa. Em áreas com exposição de minério sulfetado, não há liberação de escoamento superficial da mina para as drenagens superficiais vizinhas à área, a não ser em situações emergenciais, após a neutralização da acidez da água e de acordo com o Plano de Emergência do empreendimento.

A avaliação das medições de fluxo de base indica que de 50 a 100 mm podem recarregar o sistema de águas subterrâneas anualmente. Dadas a estimativa do fluxo de base e a baixa permeabilidade da rocha, conclui-se que boa parte da água restante se torna escoamento superficial (*runoff*). O escoamento superficial pode somar 950 mm ou mais nas áreas da mina desprovidas de vegetação. Com base nesses dados, estima-se que a recarga total na área da mina (presumida de 4,5 km²) some entre 400 e 800 l/m. Anualmente, esta recarga descarregaria nos córregos a jusante do Morro do Ouro.

4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL DA MINA MORRO DO OURO

Esta seção apresenta a consolidação dos estudos hidrogeológicos desenvolvidos na área da Mina Morro do Ouro, de acordo com as fases mencionadas na Introdução deste artigo.

Na área do projeto como um todo, foram realizados levantamentos e serviços de campo diversos, objetivando, principalmente, a coleta de dados hidrológicos e hidrogeológicos, de acordo com o que segue:

- levantamento de nascentes e surgências de água;
- monitoramento do nível de água em tanque de armazenamento de *runoff* da mina;
- medições de vazões de cursos d'água;
- realização de serviços de geofísica, perfuração e instalação de poços de monitoramento;
- execução de testes de condutividade hidráulica nos poços de monitoramento;
- monitoramento do nível de águas subterrâneas nos poços de monitoramento.

A mina está localizada no Morro do Ouro e se estende da região logo abaixo do divisor topográfico até os vales dos córregos Rico, Macacos e São Domingos. A rocha matriz (*bedrock*) filítica da área da mina tem baixa permeabilidade. As propriedades hidráulicas da rocha matriz na área da mina foram determinadas com base em testes de permeabilidade (*slug test*) e pela metodologia de balanço hídrico, estando em uma faixa de 5×10^{-5} cm/s a 5×10^{-6} cm/s. Existe uma ligeira diminuição da condutividade hidráulica com o aumento da profundidade.

Em meios de baixa permeabilidade sem significativos efeitos de falhas, o perfil do nível de água subterrâneo é uma réplica suavizada da topografia de superfície (Figura 2). Os níveis mais elevados de águas subterrâneas encontram-se abaixo dos divisores topográficos e as porções menos elevadas, nos fundos de vales. Esta é a condição encontrada no Morro do Ouro, com os fluxos de água subterrânea partindo dos pontos mais elevados em direção ao fundo dos vales.

As direções de fluxo nas áreas mais elevadas têm uma componente de fluxo descendente, enquanto nas áreas mais baixas a componente é ascendente. Com base nestas condições e nas observações da componente hidráulica vertical descendente observada nos poços localizados fora dos fundos de vale, a maior parte da área da Mina é uma área de recarga subterrânea. A área menos elevada da mina fica próxima aos córregos Rico, Macacos e Cigano, que são áreas de descarga, como observado pelo gradiente hidráulico ascendente e pela presença de nascentes. Não há evidência de que falhas alterem significativamente as direções de fluxo, da água subterrânea.

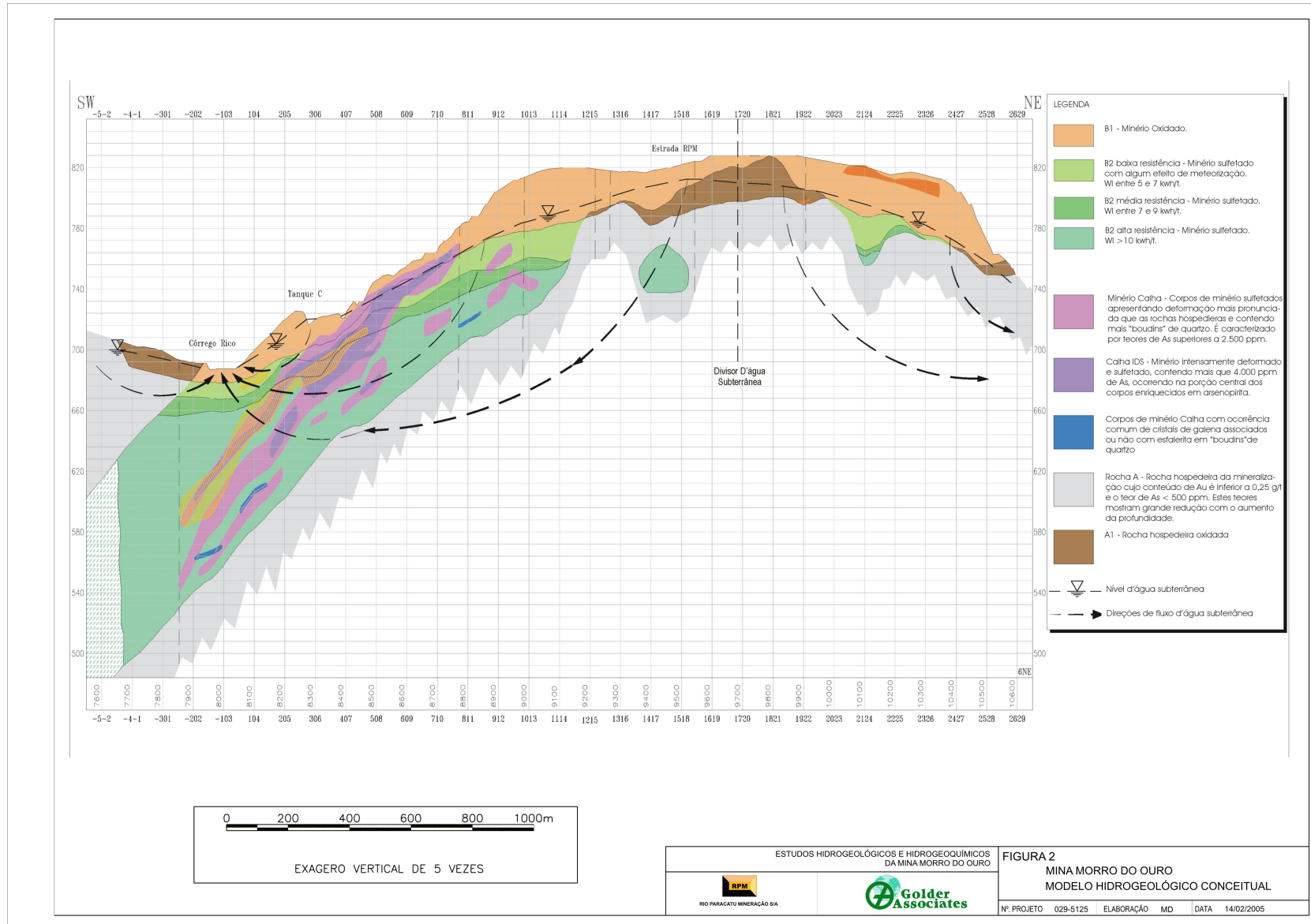


FIGURA 2 - Mina Morro do Ouro – Modelo hidrogeológico conceitual.

A recarga do sistema de águas subterrâneas ocorre nos meses de verão (estação chuvosa) e os níveis de águas subterrâneas se elevam em resposta a ela. Como foi indicado anteriormente, a quantidade de recarga é pequena (50 a 100 mm/ano) por causa da baixa permeabilidade da rocha matriz filítica. A recarga que entra na subsuperfície flui preferencialmente através das fraturas ou estruturas de foliação no interior do filito. Devido à pequena diminuição na condutividade hidráulica em profundidade, o fluxo subterrâneo estaria concentrado nas partes superiores das porções saturadas dos horizontes C e B1. Seria esperado menor fluxo subterrâneo nos horizontes B2 e A por causa de sua permeabilidade, que é menor que a do horizonte B1 subjacente.

O fluxo subterrâneo na rocha matriz foi estimado com base em uma variação presumida nas propriedades hidráulicas e nos gradientes medidos na mina. A velocidade de fluxo das águas subterrâneas é uma função do gradiente hidráulico, da condutividade hidráulica e da porosidade efetiva. Em rochas fraturadas, a porosidade efetiva é baixa, tipicamente na faixa de 0,05 a 5%. Nos cálculos, presumiu-se uma porosidade efetiva de 1%. Com base nos valores presumidos, o fluxo subterrâneo por quilômetro de largura da unidade hidrogeológica poderia variar de 0,04 L/s a 2L/s (3.000 a 172.000 L/dia). A velocidade de percolação subterrânea é estimada na faixa de aproximadamente 6 a 110 m/ano.

Com base nestes cálculos, e presumindo que a largura do caminho de fluxo da área da mina para o córrego Rico é de aproximadamente 3.000m, o córrego poderia receber, então, entre 0,12 e 6 L/s de descarga de água subterrânea da área da mina. Isto se compara às medições de fluxo de base de aproximadamente 8 a 11 L/s em ponto situado logo a jusante da área da mina (Ponto 17B). A comparação entre estes resultados sugere que uma estimativa final alta de descarga de água subterrânea da área da mina para o córrego Rico é, provavelmente, um valor superestimado.

Em síntese, os córregos adjacentes ao Morro do Ouro, tal como o Rico, o Macacos, o Cigano, dentre outros, constituem os pontos de descarga para as águas subterrâneas a jusante da área da mina. Os tanques da mina interceptam e armazenam o escoamento superficial e parte da descarga subterrânea, porém não evitam a descarga de água subterrânea nos córregos. A descarga de águas subterrâneas mantém parte do fluxo de base nos córregos e alimenta as nascentes locais.

Quanto às incertezas do modelo hidrogeológico, deve-se salientar que os dados de flutuação de nível de águas subterrâneas em resposta à precipitação são limitados. Sendo assim, extenso monitoramento do nível de águas subterrâneas se faz necessário.

5. MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA COMPUTACIONAL

O propósito da modelagem hidrogeológica da área da mina foi determinar:

- a taxa de fluxo da água subterrânea, em regime estacionário, para dentro da cava da mina ao final de sua vida útil (situação de exaustão das reservas lavráveis conhecidas);
- a modificação potencial no fluxo de base dos cursos d'água localizados nas proximidades da mina, na condição de cava final (situação de exaustão das reservas lavráveis conhecidas);
- as alterações potenciais da posição do nível d'água subterrâneo na área de entorno da mina, ao final de sua vida útil; e
- as alterações de longo prazo, nas condições hidrogeológicas locais, associadas à formação de um lago na cava remanescente da mina (situação de reequilíbrio hidrogeológico na etapa de pós-fechamento da mina).

5.1 Abordagem Metodológica e Seleção dos Modelos Computacionais

Para avaliar os efeitos da formação da cava da mina sobre as condições hidrogeológicas locais, foi desenvolvido um modelo hidrogeológico simplificado, de regime estacionário (*steady-state model*), para a área da mina e seu entorno, utilizando-se o software MODFLOW do USGS (*United States Geological Survey*). Esse software, desenvolvido por McDonald & Harbaugh (1988), bastante utilizado e aceito pela comunidade técnico-científica, foi utilizado através do VisualMODFLOW (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2002).

O VisualMODFLOW é um “pacote” computacional que opera em condições de completa saturação e possibilita modelagem tridimensional, em estado transiente ou estacionário.

Para avaliação do tempo de enchimento da cava final, após o fechamento da mina, foi utilizado modelo simplificado, baseado em planilha eletrônica de cálculo, alimentada com informações compiladas e/ou determinadas a partir do tratamento dos dados.

5.2 Modelo Computacional Hidrogeológico da Área da Mina

O modelo numérico abrange o empreendimento da RPM e, também, uma grande área ao redor deste, totalizando aproximadamente 32 km². O modelo não inclui a área da barragem de rejeito e seu reservatório. Os limites da área de modelagem foram delineados de modo a coincidir com elementos da hidrografia local (sub-bacias e talvegues de drenagem).

As unidades hidrogeológicas e respectivas condutividades hidráulicas utilizadas na modelagem são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1
UNIDADES DO MODELO E SUAS PROPRIEDADES

Camada	Espessura (m)	Condutividade Hidráulica (cm/s)		Condições Geológicas
		Kx, Ky	Condições Iniciais / Valores Calibrados	
1	50	8.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}	Colúvio / Saprolito
2	50	1.0×10^{-6}	9.0×10^{-6}	Filito fraturado
3	50	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-6}	Filito menos fraturado
4	250	1.0×10^{-7}	6.0×10^{-7}	Filito são, não-intemperizado

A Figura 3 mostra o resultado do modelo em termos das curvas equipotenciais obtidas. A calibração para a configuração atual do nível d'água subterrâneo mostrou-se consistente. A Figura 4 apresenta os resultados da calibração do modelo em um gráfico de valores observados em campo *versus* valores calculados pelo modelo. A ocorrência de pontos que se alinham com a reta de 45° indica uma calibração favorável, com grau de confiança de 94%. Este nível de tolerância é considerado adequado para a calibração do modelo hidrogeológico no estágio atual de entendimento do comportamento hidrogeológico da área.

Além desses bons resultados da calibração, o modelo prevê valores de fluxos de base similares aos medidos nos cursos d'água locais, conforme evidenciado na Tabela 2.

TABELA 2
DADOS DO MODELO CALIBRADO E DAS MEDIÇÕES DIRETAS DO FLUXO DE BASE NA ÁREA DA MINA

Córrego	Fluxo de Base Previsto pelo Modelo (L/s)	Fluxo de Base Medido (L/s)
Corrego Rico - Ponto 17A	0.6	0.7
Corrego Rico - Ponto 17B	10.4	8.9
Corrego Criminoso	4.3	7.0
Corrego Rapadura - Ponto 02	2.9	0.4
Grota de Venus - G_Venus	0.3	0.4

5.3 Simulação na Condição de Pós-Fechamento da Mina

O modelo numérico calibrado foi utilizado para avaliar os efeitos potenciais da expansão da mina e de sua desativação, sobre as condições hidrogeológicas locais (situação de formação de um lago, com lâmina d'água na cota 685 m). Apenas a simulação da condição de pós-fechamento, com formação de um lago na cava, é apresentada a seguir.

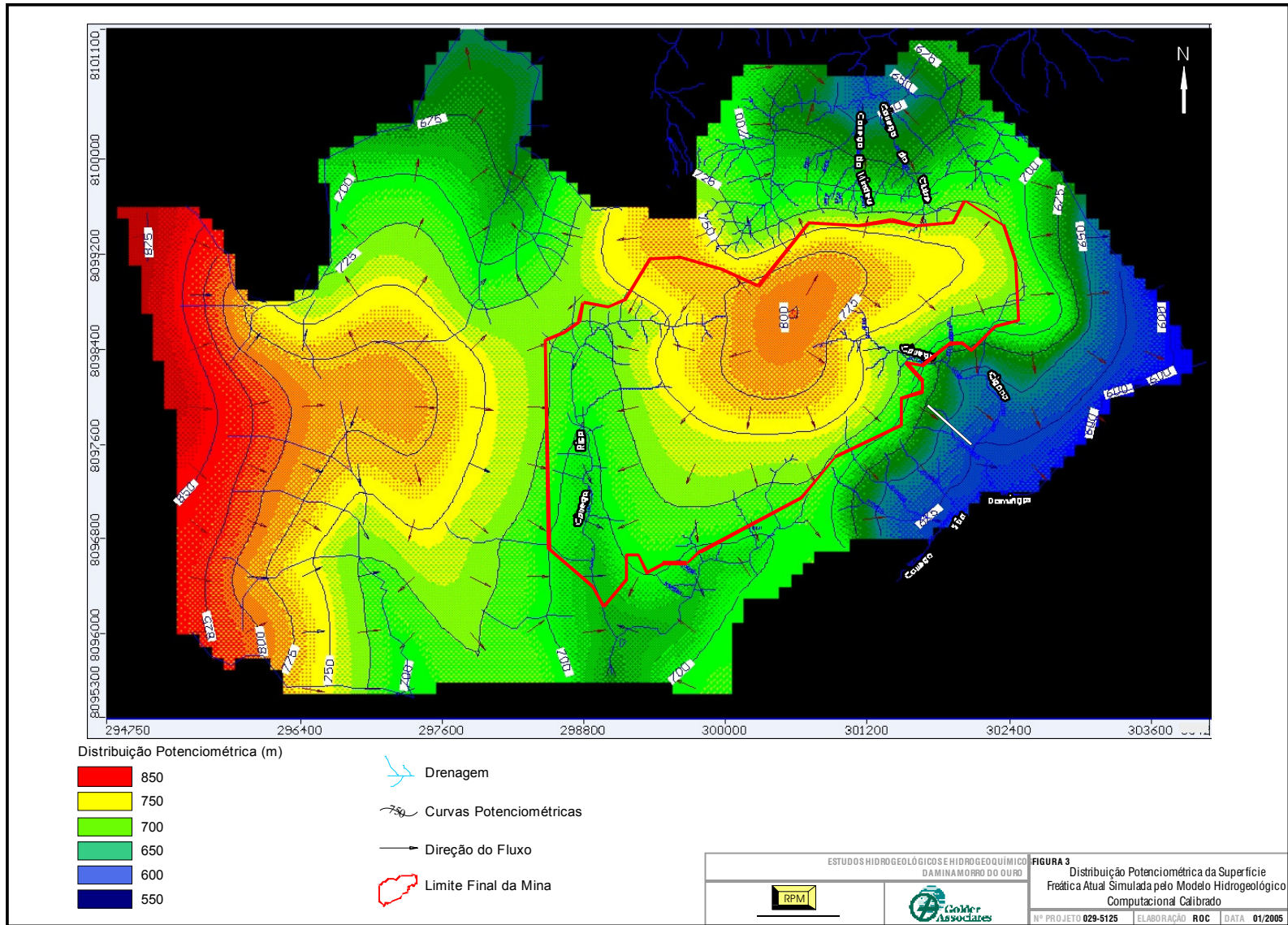


FIGURA 3 - Distribuição potenciométrica da superfície freática atual simulada pelo modelo hidrogeológico computacional calibrado.

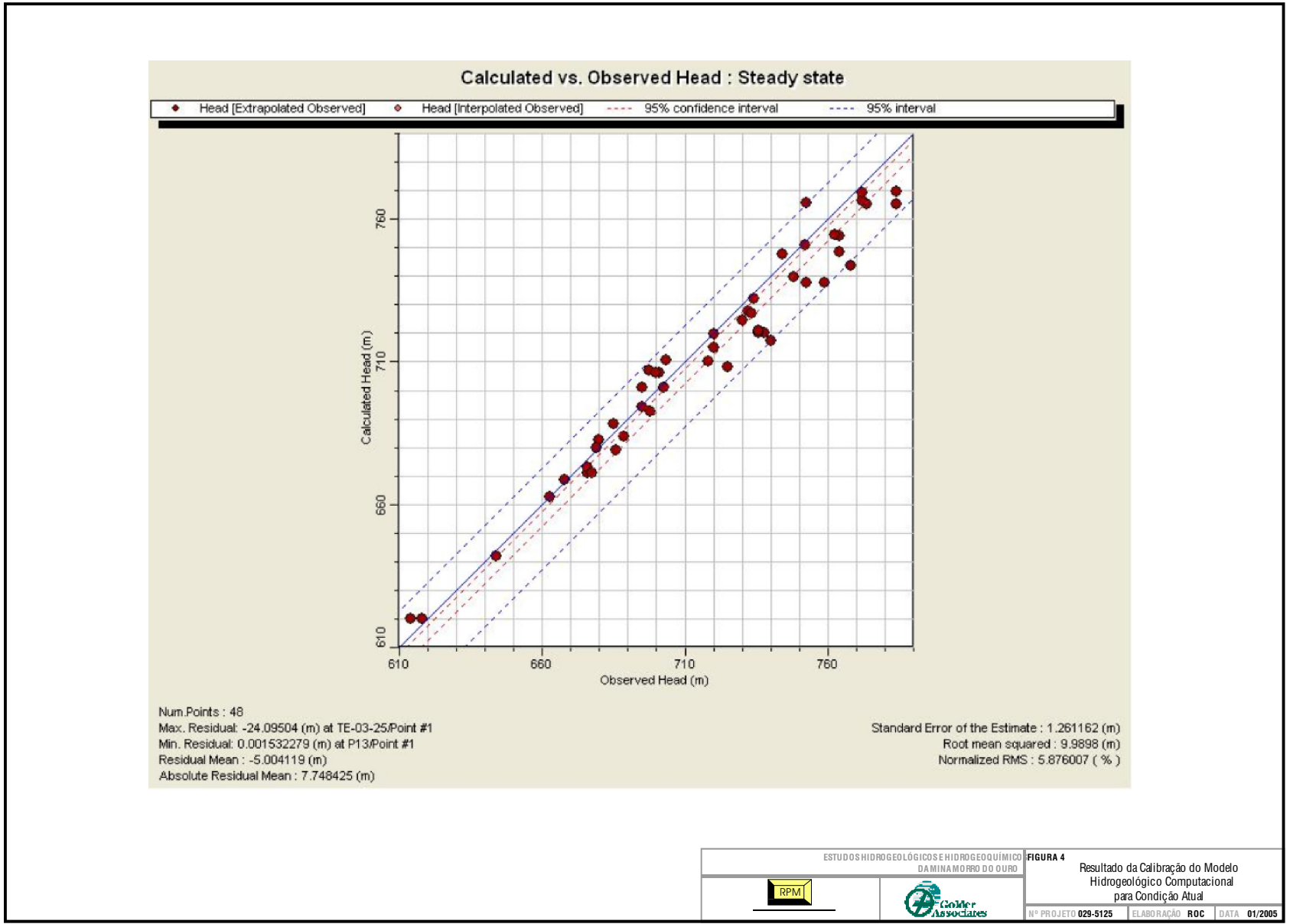


FIGURA 4 - Resultado da calibração do modelo hidrogeológico computacional para a condição atual.

Para a simulação das condições de pós-fechamento, admitiu-se que os valores de recarga para a área do modelo, mesmo que excluída a área da cava, permaneciam os mesmos. Nenhum tanque de mina foi incluído nessa simulação. Células de carga constante foram utilizadas para representar o nível d'água estabilizado dentro da cava da mina, na elevação aproximada de 685 metros.

A Figura 5 apresenta as curvas potenciométricas na área da mina e seu entorno, na condição de regime estacionário, para a situação de pós-fechamento, isto é, após a exaustão da mina e a formação de um lago na cava remanescente. A condição no pós-fechamento será alcançada cerca de 15 anos depois de cessadas as operações de lavra.

A cava continuará funcionando como uma grande bacia fechada dentro do sistema hidrogeológico local, para dentro da qual haverá o aporte de água subterrânea proveniente de várias direções. Haverá o extravasamento de água da cava pela porção sul desta, aproximadamente a partir da cota 685 metros. A zona de captura da cava é mostrada na Figura 5. A figura evidencia que a recarga sobre uma grande porção da área da mina continuará contribuindo para a cava. O fluxo da água subterrânea, em regime estacionário, em direção à cava será, de acordo com a modelagem computacional, de aproximadamente 756,8 m³/dia (8,76 L/s). Ao entrar no lago formado na cava, essa água de origem subterrânea passa a ser mais um componente do balanço hídrico do lago.

A modificação nas condições hidrogeológicas entre a situação atual e a de pós-fechamento implicará alterações nos quantitativos de fluxo de base dos córregos vizinhos à mina. A Tabela 3 apresenta um sumário das mudanças que potencialmente poderão ocorrer nesses fluxos de base. O fluxo de base previsto pelo modelo, no Ponto 17B situado no córrego Rico, logo a jusante da mina, não leva em conta a descarga adicional que irá ocorrer a partir do vertimento do lago, a partir da cota 685 m, na nova condição de equilíbrio da situação de pós-fechamento. Naquela situação, espera-se que o fluxo de base no Ponto 17B seja, de fato, maior do que o atual, pois a área de contribuição das águas subterrâneas para o córrego Rico irá aumentar, em função da formação da cava.

TABELA 3
FLUXO DE BASE NA ÁREA DA MINA RESULTANTE DA MODELAGEM
COMPUTACIONAL, NAS CONDIÇÕES ATUAL (ANTES DA EXPANSÃO DA MINA) E
DE PÓS-FECHAMENTO DA MINA

Córrego	Fluxo de Base do Modelo para a Situação Atual (L/s)	Fluxo de Base do Modelo para a Situação de Pós-Fechamento (L/s)
Córrego Rico - Ponto 17 ^a	0,6	-
Córrego Rico - Ponto 17B	10,4	10,5
Córrego Criminoso	4,3	4,4
Córrego Rapadura - Ponto 02	2,9	2,8
Grota de Venus - G_Venus	0,3	0,2

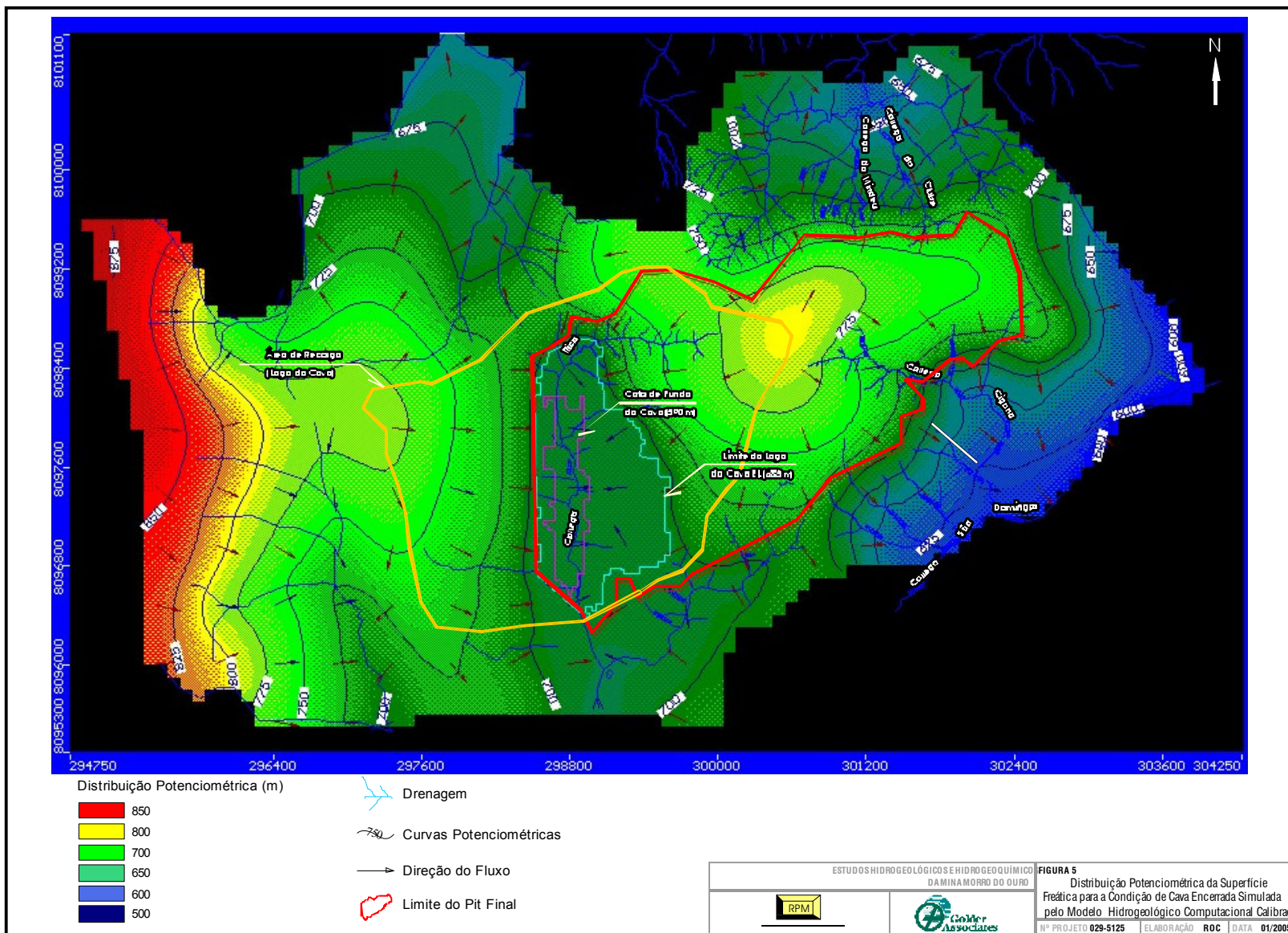


FIGURA 5 - Distribuição potenciométrica da superfície freática para a condição de cava encerrada simulada pelo modelo hidrogeológico computacional calibrado.

A modelagem prevê que, na condição de pós-fechamento, os níveis de água subterrânea sofrerão uma depleção de 3 a 14 metros, em relação à condição atual, em parte da área urbana de Paracatu mais próxima da mina e em área vizinha ao Córrego Rico. Essa depleção não é considerada significativa e é improvável que cause impacto adverso sobre a produtividade de poços tubulares da área.

5.4 Modelagem da Formação do Lago da Cava Final

Após o encerramento das atividades de lavra, um lago será formado na cava devido ao retorno do nível de água subterrânea a uma cota próxima da original. Com a finalidade de avaliar o tempo de formação do lago, foi implementado um modelo de balanço hídrico, utilizando como ferramenta somente uma planilha eletrônica.

O propósito do balanço hídrico do lago da cava foi o de determinar:

- o tempo de enchimento da cava exaurida com água de diversas origens;
- as proporções das várias fontes de contribuição de água para enchimento da cava com o tempo; e
- a estimativa da taxa média anual de descarga de água do lago da cava, quando este estiver cheio.

No final das atividades da mina, o fundo da cava atingirá uma elevação de cerca de 588 m acima do nível do mar, o que é próximo de 100 m abaixo do nível do córrego Rico no local. A cota final do limite sul da cava estará na cota 685 m, coincidente com a elevação do vale do córrego Rico no local.

Durante as atividades de lavra, as águas subterrâneas e superficiais que aportarem à cava serão bombeadas para fora, para manter a cava seca e em condições de operação. Após a exaustão da mina e cessada a operação de bombeamento, a água fluirá para a cava a partir das seguintes fontes naturais e nela se acumulará (Figura 6):

- drenagem pluvial superficial da mina reabilitada (*runoff* da área da mina);
- drenagem pluvial superficial de áreas não mineradas da parte oeste da mina (*runoff* das áreas não lavradas);
- água subterrânea a partir do *pit* da mina (água subterrânea da área da mina);
- água subterrânea da parte oeste da mina (água subterrânea de fora da mina); e
- precipitação direta sobre a superfície do lago da cava.

Além dessas fontes, a RPM poderá optar por bombear água da barragem de rejeitos ou de outra fonte para a cava, de modo a acelerar sua inundação.

O conceito do lago da cava, no qual se fundamentou o modelo de cálculo do balanço hídrico, é o de um *sistema reservatório* com fluxos de entrada e saída em uma base anual (Figura 6). Ao

final de cada ano, o modelo do balanço hídrico calcula a água total que entrou na cava, vinda de todas as fontes, e subtrai a água do lago da cava perdida por evaporação. Disto resulta o volume de água que efetivamente preenche a cava em uma base anual. O fluxo efetivo anual de água de enchimento é somado à quantidade de água já existente na cava, produto da acumulação do ano anterior. Com isso, então, determina-se o volume total de água na cava ano a ano.

No modelo, o volume de água na cava é usado para estimar a cota do nível de água dentro dela, tendo por base a relação *cota x área x volume* dada pelo plano de lavra da RPM. A simulação foi feita até que a elevação da água na superfície do lago da cava alcançasse a cota de saída da água (descarga), na elevação 685 m, o ponto no qual o sistema estará em equilíbrio.

As propriedades hidrológicas adotadas no balanço hídrico foram:

- Precipitação Média Anual da Área da Mina – estimada em 1.440 mm/ano, tendo como referência os dados de longo prazo da estação de Paracatu;
- Evapotranspiração Média Anual (área da mina considerando reabilitação parcial) – estimada em cerca de 450 mm/ano. Este valor foi estimado com base no balanço hídrico simplificado para um dos tanques da mina (Tanque C), no ano de 2004. A evapotranspiração é definida como a diferença entre a precipitação e o bombeamento total do Tanque C, em função da área de contribuição do tanque. Os cálculos assumem uma recarga mínima de água subterrânea a partir do Tanque C, em razão da baixa condutividade hidráulica do substrato rochoso na área da cava.
- Evapotranspiração Média Anual (áreas fora da mina) – estimada em aproximadamente 700 mm/ano, tendo como referência os dados da estação de Paracatu.
- Média Anual de Evaporação direta a partir da Superfície da Água – estimada em 1.300 mm/ano, com base nos dados da estação de Paracatu.
- Média Anual de Drenagem Pluvial (runoff) da Área da Mina – determinada pela diferença entre a precipitação, a evapotranspiração (dos solos e vegetação da mina reabilitada) e a recarga de água subterrânea na área da mina.
- Média Anual de Drenagem Pluvial (runoff) da Área Fora da Mina – determinada pela diferença entre a precipitação, a evapotranspiração (dos solos e vegetação da área não minerada) e a recarga de água subterrânea fora da área da mina.

As propriedades hidrogeológicas adotadas no balanço hídrico foram:

- Média Anual de Recarga de Água Subterrânea (fora da área da mina) – estimada em 50 mm/ano com variação potencial de 25 a 100 mm/ano.
- Média Anual de Recarga de Água de Subterrânea (área da mina) – estimada em 25 mm/ano com variação potencial de 15 a 50 mm/ano. Admite-se que a recarga de água subterrânea na área da mina será menor do que nas áreas não mineradas porque a maioria

do substrato remanescente na mina será constituído por litologias da zona A. As investigações hidrogeológicas realizadas indicam que a condutividade hidráulica diminui com a profundidade, sendo maior nas rochas da zona B1 e decrescente de B2 para A. Espera-se que os materiais B1/B2 tenham condutividades hidráulicas entre 1×10^{-5} cm/s e 1×10^{-7} cm/s. Menores recargas são esperadas nos materiais da zona A, pois sua condutividade hidráulica é estimada como menor que 1×10^{-7} cm/s.

Utilizando-se os dados acima, um modelo de *caso-base* foi desenvolvido, admitindo que a drenagem pluvial da área da mina, na condição futura, será similar à atual e que não será bombeada água da barragem de rejeitos ou de qualquer outra fonte, com a finalidade de acelerar o enchimento da cava. Os resultados dessa simulação são itemizados a seguir:

- O tempo para enchimento do lago da cava será de, aproximadamente, 13 anos;
- O volume do lago da cava, no equilíbrio, será de, aproximadamente, 94.000.000 m³;
- O aporte de água à cava (fluxo de entrada menos a evaporação a partir do lago da cava) varia entre 7,8 milhões de m³/ano e 6,8 milhões de m³/ano, durante um período de 13 anos;
- A taxa de descarga da água da cava, na condição de equilíbrio, é de, aproximadamente, 6,8 milhões de m³/ano;
- A drenagem pluvial de água da mina (*runoff*) representa o maior componente (aproximadamente 50 a 60%) do aporte de água para a cava;
- A drenagem pluvial superficial vinda de fora da mina e a precipitação direta no lago da cava contribuem com, aproximadamente, 10 a 25% do fluxo total de entrada no lago, dependendo do ano considerado; e
- O aporte de água subterrânea da área da mina e da área oeste do córrego Rico constitui o componente mais insignificante para o enchimento do lago (menos que 3% do afluxo total).

Os resultados das análises de sensibilidade indicam que:

- O tempo de enchimento da cava varia de 11 a 16 anos;
- A taxa de descarga média anual da cava, quando cheia, pode variar de 5,4 milhões a 7,5 milhões de m³/ano.

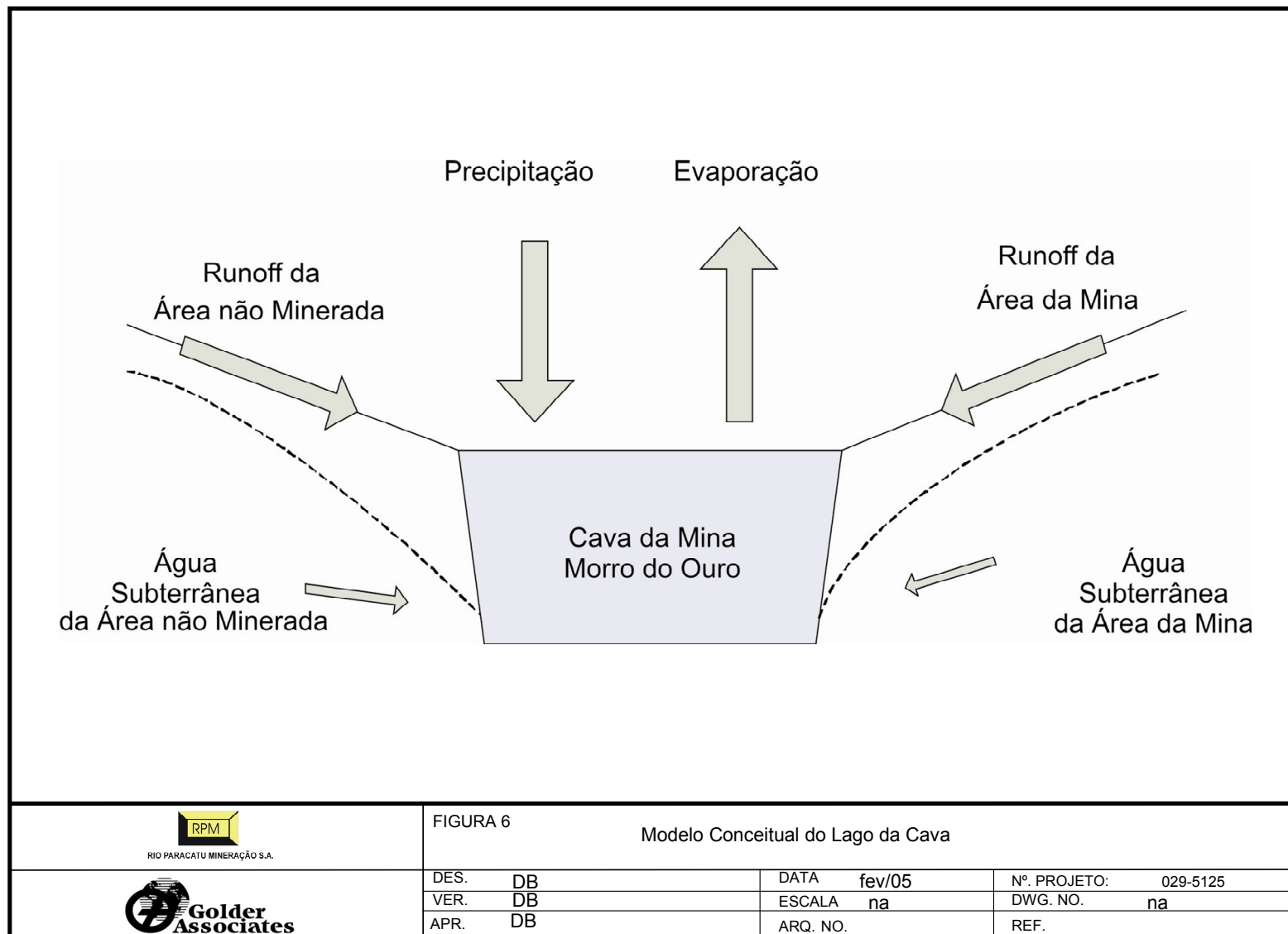


FIGURA 6 - Modelo conceitual do Lago da Cava.

Enfatiza-se que o estudo elaborado resulta em um balanço médio anual, que se baseia em condições médias de cada ano da simulação. Na realidade, o padrão climático incluirá anos secos e úmidos ao longo do período de enchimento. Um período extenso de anos secos poderá aumentar o tempo estimado de enchimento do lago, enquanto que um período extenso de anos úmidos poderá diminuir o tempo estimado de seu enchimento. De maneira similar, as taxas de descarga a partir da cava serão função da quantidade e distribuição de chuvas em cada ano subsequente ao período de enchimento.

6. CONCLUSÕES

Os modelos computacionais hidrogeológicos apresentados foram desenvolvidos para subsidiar uma avaliação dos impactos potenciais decorrentes da expansão da Mina Morro do Ouro. Para fins de planejamento das operações de mina ou desenvolvimento de seu projeto de fechamento, é fundamental que esses modelos sejam refinados e atualizados com informação adicional a ser coletada.

Como em qualquer modelagem computacional, várias premissas simplificadoras foram assumidas no processo de elaboração dos modelos. Os modelos, contudo, são uma boa representação das condições hidrogeológicas gerais da área da mina e fornecem resultados de qualidade suficiente para uma avaliação preliminar do impacto do projeto de expansão da mina. (Golder Associates Brasil, 2004).

Após o encerramento das atividades da mina e o enchimento da cava (formação do lago), esta continuará funcionando como uma grande bacia fechada dentro do sistema hidrogeológico local, para dentro da qual haverá o aporte de água subterrânea proveniente de várias direções. Haverá o extravasamento de água da cava pela porção sul desta, aproximadamente a partir da cota 685 metros. A modificação nas condições hidrogeológicas entre a situação atual e a de pós-fechamento implicará alterações nos quantitativos de fluxo de base dos córregos vizinhos à mina. A modelagem prevê que, na condição de pós-fechamento, os níveis de água subterrânea sofrerão uma depleção de 3 a 14 metros, em relação à condição atual, em parte da área mais próxima da mina. Essa depleção não é considerada significativa, sendo improvável que cause impacto adverso sobre a produtividade de poços tubulares da área.

Quanto à formação do lago da cava final as seguintes conclusões da modelagem devem ser destacadas:

- O tempo de enchimento da cava varia de 11 a 16 anos;
- A taxa de descarga média anual da cava quando cheia pode variar de 5,4 milhões a 7,5 milhões de m³/ano;

- A drenagem pluvial de água da mina (*runoff*) representa o maior componente (aproximadamente 50 a 60%) do aporte de água para a cava;
- A drenagem pluvial superficial vinda de fora da mina e a precipitação direta no lago da cava contribuem com, aproximadamente, 10 a 25% do fluxo total de entrada no lago, dependendo do ano considerado; e
- O aporte de água subterrânea da área da mina e da área oeste do córrego Rico constitui o componente mais insignificante para o enchimento do lago (menos que 3% do fluxo total de entrada na cava).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Golder Associates Brasil, 2003. Task 1 – Development of Preliminary Hydrogeological and Hydrochemical Conceptual Model Using Existing Data, Paracatu Mine, Minas Gerais, Brazil. Prepared for Rio Paracatu Mineracao.

Golder Associates Inc., 2004. Phase II – Refinement and Validation of the Hydrogeological and Hydrochemical Conceptual Model, Paracatu Mine, Minas Gerais, Brazil. Prepared for Rio Paracatu Mineracao.

Golder Associates Brasil, 2004. Estudo de Impacto Ambiental do Projeto Expansão de Lavra, Paracatu, Minas Gerais. Elaborado para Rio Paracatu Mineração e Fundação Estadual do Meio Ambiente - MG.

Golder Associates Inc., 2005. Phase III – Hydrogeological and Hydrochemical Modeling of Paracatu Mine, Minas Gerais, Brazil. Prepared for Rio Paracatu Mineração.

Pinto C. P. & Martins-Neto M. A. 2001. Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais. p:199-234.

Waterloo Hydrogeologic Inc., 2002, Visual MODFLOW User's Manual. Waterloo, Ontario, Canada.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem à Rio Paracatu Mineração e à Golder Associates Brasil pelo apoio e pela autorização para a publicação deste artigo.