

ESTUDO HIDROGEOLÓGICO PRELIMINAR DA ÁREA DE INFLUÊNCIA DE DEPÓSITO DE ESTÉRIL E DE MINÉRIO DA MINA DO SOSSEGO

Eduardo Chapadeiro¹; Celso de Oliveira Loureiro²; Leonardo Inácio de Oliveira³; Suely de Oliveira⁴; Roberta Morais⁵; Hélio Alexandre Lazarim⁶

RESUMO

Um estudo hidrogeológico ambiental preliminar foi realizado na área do depósito de estéril e minério SE da Mina do Sossego, em Canaã dos Carajás, PA, empreendimento operado pela CVRD. Os resultados obtidos através do modelo hidrogeológico computacional, coerentes com o modelo conceitual elaborado, sugerem que, somente no longo prazo, em um período superior a 50 anos, as águas subterrâneas infiltradas pelo depósito de estéril/minério poderão efetivamente alcançar o rio Parauapebas, porém sempre preferencialmente através das camadas aluviais (AL) mais superficiais da estratigrafia local. Essa é uma conclusão de caráter preliminar, obtida considerando uma recarga de 200 mm/ano de forma ininterrupta. Com a alternância de períodos de estiagem e de chuva, os tempos de chegada reais das águas subterrâneas infiltradas pela pilha devem ser mais elevados.

ABSTRACT

A preliminary environmental hydrogeological study was performed at the barren and low grade ore deposit area of the Sossego Mine, operated by CVRD, in Canaã dos Carajás, PA. The results obtained with the computational hydrogeological model, based on the respective conceptual model, suggested that, only in a long term, within a period longer than 50 years, the groundwater would infiltrate through the barren/ore deposit and effectively reach the Parauapebas river. Yet, the preferable pathways would be through the upper alluvial layers of the local stratified soil system. Nevertheless, this was a preliminary conclusion, considering a continuous groundwater recharge of 200 mm/year. With the alternating precipitation periods, of the rain regime, the actual transport time of the groundwater, infiltrating through the ore/barren piles, should be larger than the values previously estimated.

Palavras-chave - Estudo Hidrogeológico; Hidrogeologia Ambiental; Mina do Sossego.

¹ M.Sc., Geólogo, Golder Associates Brasil: Av. Barão Homem de Melo, 4484 – 8º Andar, BH - MG, tel.: (31) 2121-9800, fax.: (31) 2121-9801, echapadeiro@golder.com.br

² 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

³ Ph.D., Professor Visitante 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, leonardo@desa.ufmg.br

⁴ Geóloga, Golder Associates Brasil: Av. Barão Homem de Melo, 4484 – 8º Andar, BH - MG, tel.: (31) 2121-9800, fax: (31) 2121-9801, soliveira@golder.com.br

⁵ Geóloga, CVRD - Companhia Vale do Rio Doce, Mina do Sossego, Estrada Raimundo Mascarenhas s/n - Mina N4 - Prédio 4 - GAJAN, tel.: (94) 3327-5021, roberta.morais@cvrd.com.br

⁶ Ph.D., Geólogo, CVRD - Companhia Vale do Rio Doce, Mina do Sossego, Rua Grajaú, 63, Núcleo Urbano de Carajás, Pará, Brasil, CEP 68.516-000, tel.: (94) 3327-3293, helio.lazarin@cvrd.com.br

1. INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste artigo um estudo preliminar sobre a hidrodinâmica subterrânea na área de influência do depósito de estéril e de minério marginal da Mina do Sossego, em Canaã dos Carajás, PA. O empreendimento é operado pela Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e consiste na lavra, no beneficiamento e na concentração de minério sulfetado de cobre.

As premissas fundamentais para a execução dos estudos descritos neste artigo foram:

- 1) os estudos deveriam refletir a situação física da área da pilha de minério marginal e de material estéril, verificada em Agosto/2005;
- 2) os estudos deveriam se basear em informações já existentes;
- 3) os estudos teriam um caráter preliminar, devendo incluir as recomendações com relação às providências e procedimentos a serem adotados para promover monitoramentos mais definitivos sobre o comportamento hidrogeológico no entorno das pilhas de minério marginal e de estéril da mina; e,
- 4) os estudos deveriam ser realizados em um prazo de aproximadamente três meses.

2. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

A área do Projeto Sossego está localizada em região de clima tropical úmido de monção. Verifica-se uma pequena amplitude térmica entre as normais de temperaturas máximas e mínimas, variando entre os extremos de 31,8°C e 19,2°C, com a temperatura média entre 25,0 a 26,0°C (Golder Associates, 2001a). A precipitação anual na região do Projeto Sossego é de aproximadamente 1.900 mm e a evapotranspiração é de aproximadamente 1.400 mm (Golder Associates, 2001b).

O domínio de interesse do sistema hidrogeológico local foi definido levando-se em consideração a topografia do terreno, porém refletindo as intervenções realizadas até o momento nesta topografia, tais como a construção da barragem de rejeitos e o empilhamento de estéril e minério minério (Figura 1). O domínio compreende uma área de aproximadamente 9,3 km² em um terreno cuja topografia original possui um suave declive.

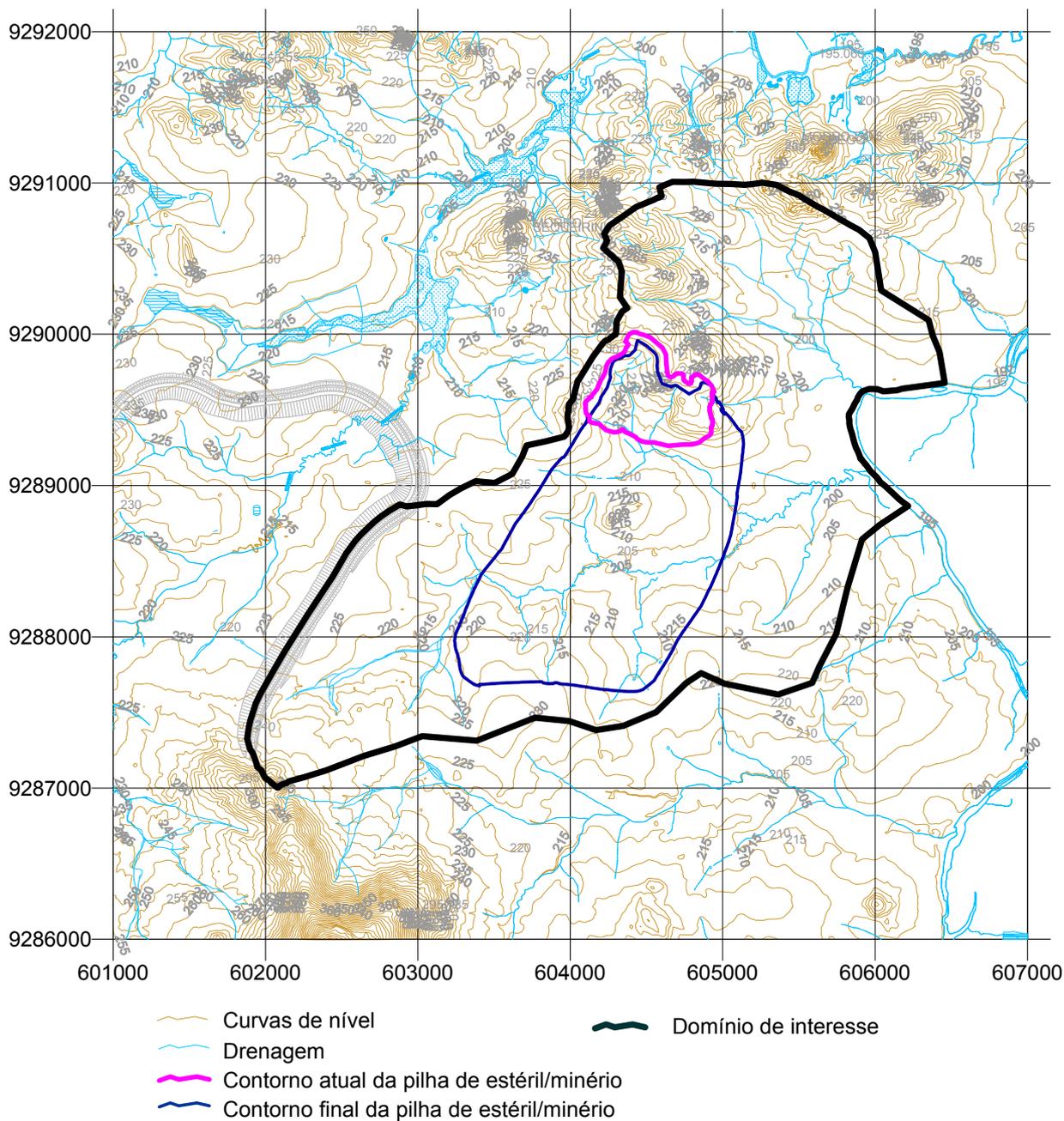


FIGURA 1 - Limites do domínio hidrogeológico conceitual.

2.1 Geologia e Hidrogeologia Locais

A geologia superficial da área adotada pelo modelo hidrogeológico é marcada pela presença das seguintes unidades litoestratigráficas: complexo Xingu (unidade dominante), granito, gabro, xistos, formação ferrífera, granito Rio Branco, canga, solo coluvionar, cascalho aluvionar e aluvião (Figura 2).

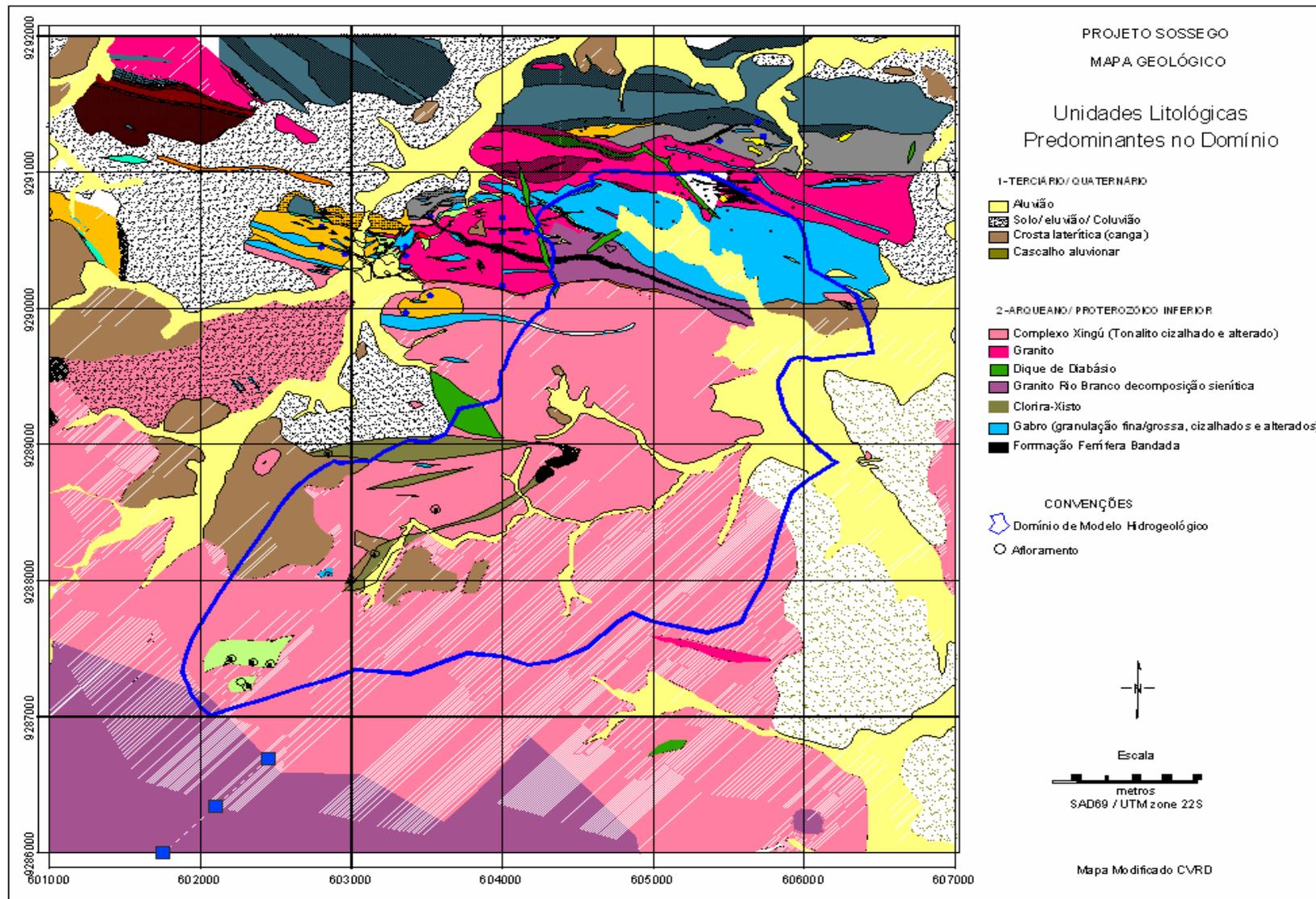


FIGURA 2 – Mapa geológico da região de estudo.

2.1.1 Seções Geológico-Geotécnicas Verticais

A Figura 3 mostra a localização das seções A-A' e B-B', descritas a seguir.

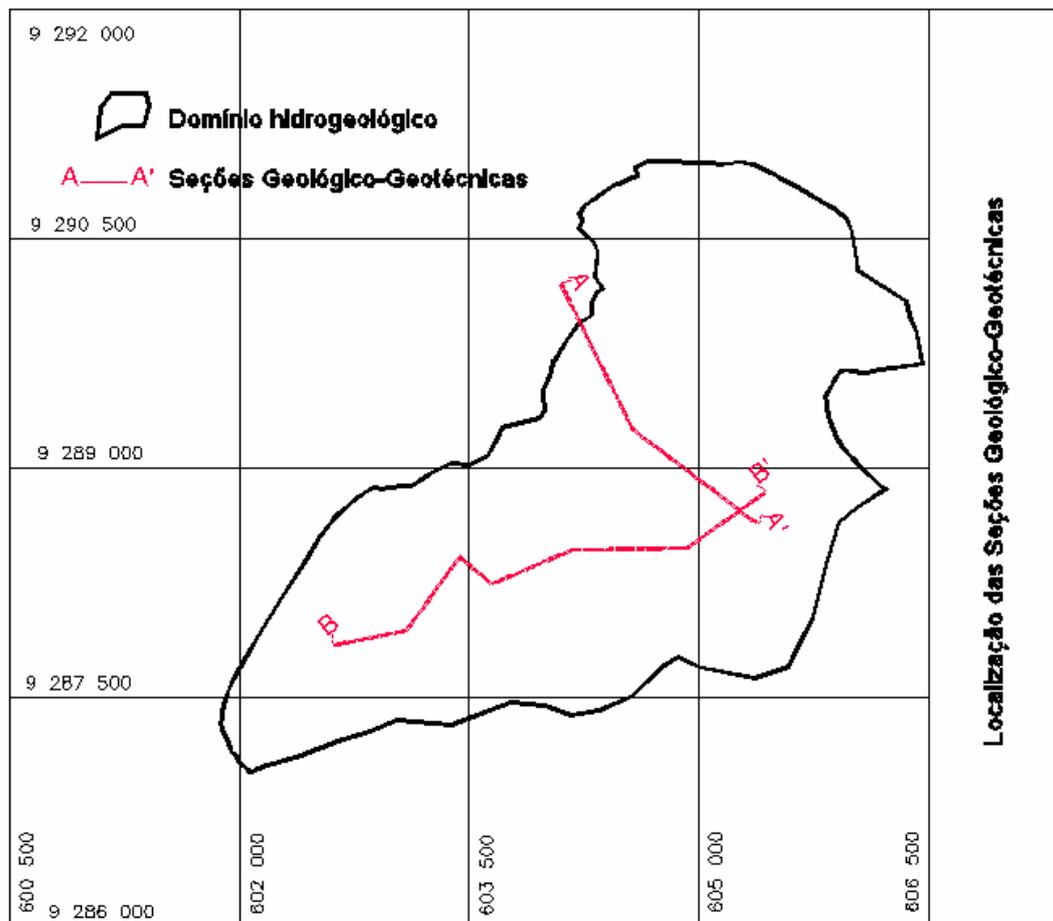


FIGURA 3 - Localização das seções geológico-geotécnicas.

A seção geológico-geotécnica denominada Seção A-A', na qual a posição do nível d'água (NA) varia entre 2 e 5 m de profundidade, localiza-se na porção centro-norte do domínio hidrogeológico, e corta a área onde se encontra a pilha de estéril. A referida seção tem comprimento de 2.060 m; foi descrita a partir de 13 sondagens, distribuídas ao longo do seu eixo. Ao longo da Seção A-A', a estratigrafia do terreno é representada pelos seguintes estratos:

- COB: cobertura com matéria orgânica e solo coluvionar constituído por material silto-argiloso com pedregulhos finos, médios e grossos mal selecionados, atingindo até 1 m de espessura;
- AL: solo aluvionar constituído por areias médias e finas poucas argilosas, de espessura variável podendo atingir até 2 m;
- SR: solo residual constituído por material silto-argiloso, por vezes com porções arenosas, sem estruturas litológicas preservadas (inclui elúvio e solo residual maduro), de espessura

variando até 4 m;

- SAP: saprolito constituído por material silto-arenoso (inclui solo residual jovem, saprolítico), com espessura variando de 0 a 2 m, nas encostas, chegando a 10 m nas áreas de topografia mais plana; e,
- RS: rocha sã (litologia indiscriminada).

A seção geológico-geotécnica denominada Seção B-B', na qual a posição do nível d'água (NA) varia em torno de 1 m de profundidade, localiza-se na parte centro-sul do domínio hidrogeológico, cortando a pilha de estéril. A referida seção tem comprimento de 4.010 m; 14 sondagens foram rebatidas ao longo do seu eixo. A estratigrafia do terreno, ao longo da Seção B-B', é representada pelos mesmos estratos descritos na Seção A-A', porém com espessuras diferentes:

- COB (cobertura) – espessura variando entre 0 e 1 m;
- AL (aluvião) – espessura variando até 3 m;
- SR (solo residual) – espessura em torno de 2 e 12 m, com espessura média em torno de 9 m;
- SAP (saprolito) – espessura variando de 3 a 15 m; e,
- RS (rocha sã) – espessura variável.

2.1.2 Unidades Hidroestratigráficas

A definição das unidades hidroestratigráficas foi feita com base nas unidades litoestruturais identificadas nas seções geológico-geotécnicas descritas acima, e também com base no modelo hidrogeológico regional, proposto anteriormente (Golder Associates, 2001b). Foram definidas cinco unidades hidroestratigráficas para representar o sistema hidrogeológico local.

Na Tabela 1 é apresentada a caracterização destas unidades, com os respectivos valores de espessura, faixa de variação da condutividade hidráulica e valores estimados de porosidade.

As faixas de valores de condutividade hidráulica (K), representativas de cada unidade litoestratigráfica, foram definidas após a compilação de diversas medições de K realizadas na área de estudo. Na Figura 4 é mostrada a distribuição espacial dos valores de K , determinados através de ensaios de infiltração, e de testes de injeção. As faixas de variação da condutividade hidráulica adotadas para diferentes unidades hidroestratigráficas têm por base tanto os valores medidos nos furos de sondagens na área de estudo, quanto os valores determinados para essas mesmas unidades, utilizados em modelo hidrogeológico regional anterior (Golder Associates, 2001b).

TABELA 1
UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS ADOTADAS NO MODELO
HIDROGEOLOGÍCO LOCAL

| Ordem | Ident. | Descrição | Faixa de Variação da Espessura (m) | Faixa de Variação da Condutividade Hidráulica, K (cm/s) | Valores Estimados de Porosidade Efetiva |
|-------|--------|--|------------------------------------|---|---|
| 1 | AL | Aluvião, homogênea, de ocorrência nos fundos de vales. | 0 - 3 | $10^{-8} - 10^{-2}$ | 0,15 |
| 2 | COB | Material de cobertura, intemperizado, poroso, homogêneo, constituído por cobertura, colúvio e solo residual (COB e SR). | 0 - 12 | $10^{-6} - 10^{-3}$ | 0,1 |
| 3 | SAP | Material saprolítico e rocha muito fraturada. | 0 - 15 | $10^{-6} - 10^{-3}$ | 0,05 |
| 4 | RS1 | Meio fissurado, constituído por rochas de permeabilidade primária nula, com distribuição homogênea de fraturas abertas condutoras de água. | 50 | $10^{-7} - 10^{-4}$ | 0,01 |
| 5 | RS2 | Meio fissurado homogêneo constituído por rochas impermeáveis, com uma distribuição homogênea de fraturas com tendência a serem fechadas. | 150 - 200 | $10^{-8} - 10^{-5}$ | 0,005 |

A distribuição das unidades hidroestratigráficas, em profundidade, adotadas no modelo, levará em consideração os afloramentos e a variação das espessuras desses materiais. A distribuição vertical dessas unidades é indicada na Tabela 2.

TABELA 2
DISTRIBUIÇÃO DAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS EM PROFUNDIDADE

| Ordem das Camadas | Profundidade (m) | Unidades Hidroestratigráficas |
|-------------------|------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0 - 3 | AL e/ou COB e/ou SAP e/ou RS1/RS2 |
| 2 | 3 - 12 | COB e/ou SAP e/ou RS1/RS2 |
| 3 | 12 - 20 | SAP e/ou RS1/RS2 |
| 4 | 20 - 50 | RS1 e/ou RS2 |
| 5 | 50 - 200 | RS2 |

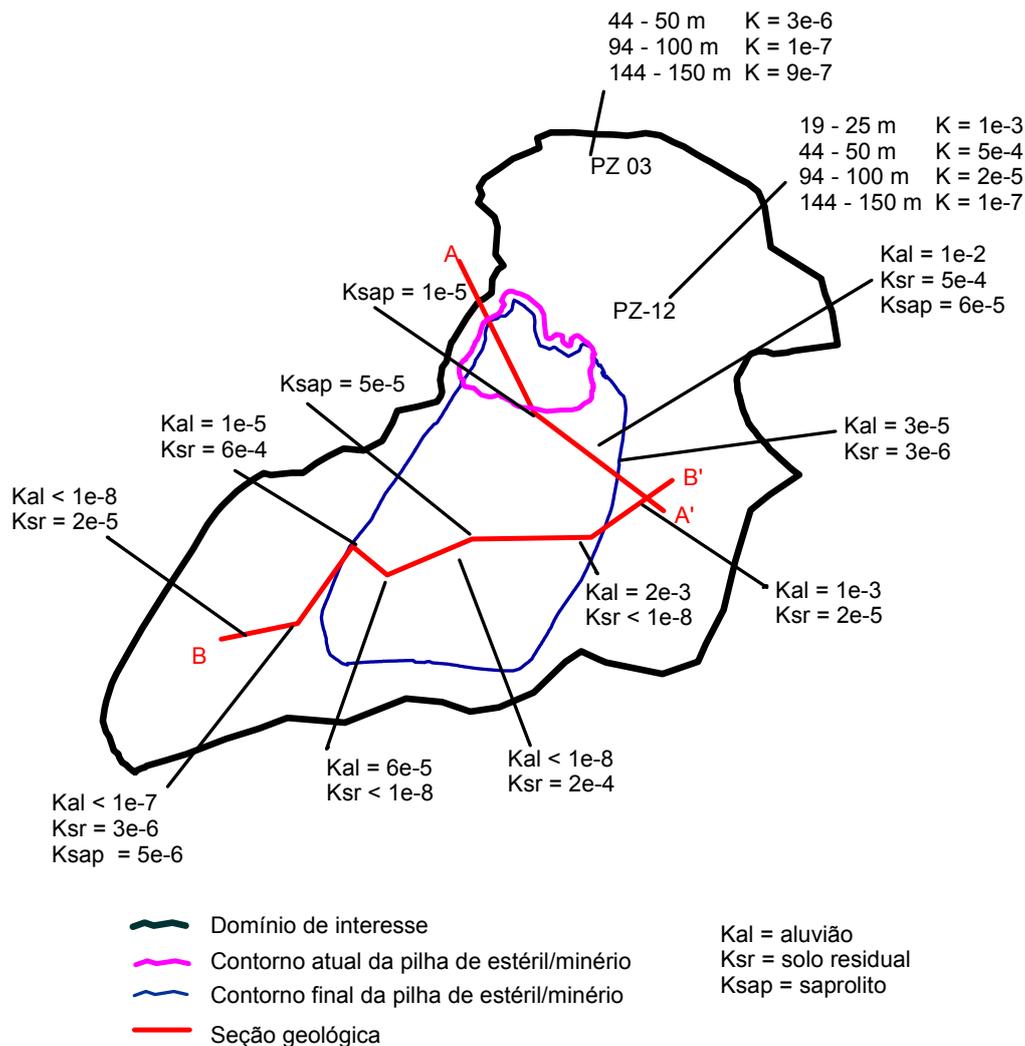


FIGURA 4 – Distribuição espacial tridimensional dos valores de condutividade hidráulica (K) nas unidades litoestratigráficas presentes no domínio de estudo (valores expressos em cm/s).

2.1.3 Profundidade do Nível Freático

No interior do domínio de interesse existem 21 pontos passíveis de monitoramento do nível do lençol freático, incluindo: 13 piezômetros, 3 cisternas e 5 medidores de nível d'água. Todavia, a leitura das variáveis de interesse não se encontra disponível em todos esses por motivos diversos, que vão da falta de acesso em determinada época até a obstrução de algum poço. Em janeiro/2005, que corresponde a uma época representativa do período chuvoso, foi feita a leitura em 6 dos 21 pontos citados. Assim, com o objetivo de se obter um número maior de pontos com leituras do nível d'água que pudessem subsidiar a inferência da distribuição da profundidade do lençol freático dentro do domínio, foi ampliada a área de busca dessas informações, abrangendo toda a região atualmente monitorada pela mineração. Dessa forma, foram identificados 50 locais com medições realizadas no final do mês de janeiro/2005.

2.1.4 Direção do Escoamento Subsuperficial

A partir da interpolação dos níveis do lençol freático, as direções do escoamento subsuperficial puderam ser determinadas. Como mostra a Figura 5, na parte centro-norte do domínio de interesse, onde se localiza a pilha de minério marginal, o fluxo se orienta no sentido noroeste-sudeste, indicando um escoamento da região do morro Sequeirinho para o rio Parauapebas, com gradientes mais elevados junto ao pé do morro. Já na parte centro-sul do domínio de interesse, o fluxo se orienta predominantemente no sentido oeste-leste, indicando um escoamento da barragem de rejeitos para o rio Parauapebas. Na parte sul do domínio o sentido do fluxo é de sudoeste para nordeste, em virtude da interferência da área de recarga ao sul do domínio.

2.1.5 Recarga

As condições geológicas e climáticas sugerem dois regimes distintos: 1) um regime condicionado por elevados valores de precipitação (recarga), correspondente ao período chuvoso, com níveis elevados do freático e rápido escoamento subsuperficial; e, 2) um regime condicionado por baixos valores de precipitação correspondente ao período de estiagem, com níveis mais baixos do freático e escoamento mais lento. Nos estudos de modelagem realizados anteriormente, adotou-se um valor de recarga média de 80 mm/ano. Desta maneira, com base neste valor médio, e considerando as condições extremas dos níveis elevados de águas subterrâneas, prevê-se uma variação dos valores de recarga entre os limites de 80 mm/ano e 300 mm/ano, para a simulação do regime hidrodinâmico no período chuvoso.

2.1.6 Medições de Vazão

Informações sobre vazões nas drenagens de um domínio são importantes para se calibrar o modelo computacional. As medições de vazão do vertedouro da canaleta de calcário, na base da pilha de minério misto, (PM-02) mostram vazões variando entre 0,12 e 23,9 m³/h. Já a vazão monitorada a jusante da barragem de rejeitos (PM-08) variou entre 30 e 70 m³/h.

O volume bombeado para fora da mina em 2004 foi de 1.493.273 m³, o que corresponde a uma vazão de aproximadamente 170 m³/h. Até maio/2005, o volume acumulado anual bombeado para fora da mina foi de 748.895 m³, o que representa uma vazão média de aproximadamente 213 m³/h.

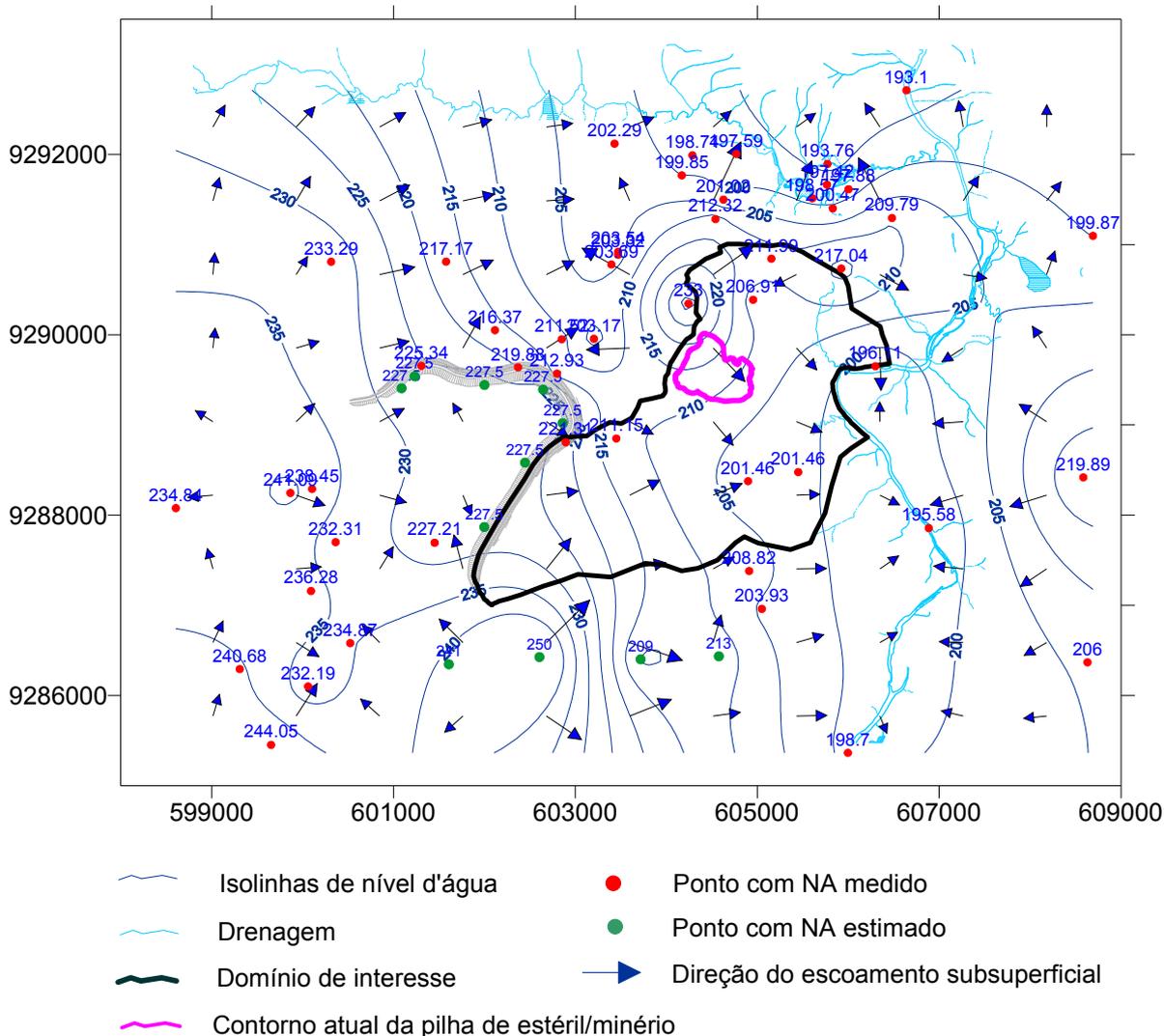


FIGURA 5 – Isolinas de nível d'água e direção do escoamento subsuperficial na região do projeto.

3. MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL

A versão computacional do modelo que representa a dinâmica hidrogeológica no domínio de investigação, na área da pilha de estéril e de minério marginal, foi implementada através do aplicativo VisualModflow® (Guiguer e Franz, 1996) desenvolvido pela Waterloo Hydrogeologic, Inc. Esse modelo computacional simula o escoamento da água subterrânea numa configuração geométrica tridimensional, através de um modelo numérico de diferenças finitas utilizando a equação diferencial apresentada por Anderson e Woessner (1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^*$$

onde:

- K_x , K_y e K_z representam os componentes do tensor de condutividade hidráulica nas direções x , y e z , respectivamente, [$L T^{-1}$];
- h representa a carga hidráulica, [L];
- S_s representa o armazenamento específico do meio poroso, [L^{-1}];
- R^* representa o termo geral de fonte ou sumidouro de água [T^{-1}], reproduzindo a injeção ($R > 0$) ou remoção ($R < 0$) de um volume de água, por unidade de volume do meio, por unidade de tempo; e,
- t representa o tempo, [T].

3.1 Desenvolvimento do Modelo

O modelo hidrogeológico computacional foi desenvolvido em uma condição temporal estacionária, na qual os valores de cargas hidráulicas variam espacialmente, porém são constantes no tempo.

O desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional se deu, primeiro, pela definição do domínio de cálculo e sua subsequente divisão em uma malha. Em seguida, foram implementadas as unidades litoestratigráficas e suas correspondentes propriedades hidrodinâmicas. O desenvolvimento prosseguiu, então, com a determinação das condições de carga hidráulica e de fluxo de água nos contornos do domínio de cálculo, com a indicação das fontes e sumidouros que existem no interior do domínio. Em seguida, os parâmetros internos do modelo, como condutividade hidráulica e recarga, foram ajustados para que o modelo se comportasse de maneira correspondente àquela observada no campo, ou seja, que fosse capaz de prever os níveis piezométricos e vazões defluentes, num processo chamado de calibração.

Na área em questão foram identificados os seguintes contornos: os divisores de água da sub-bacia hidrográfica na qual está inserida a pilha de estéril, a oeste, norte e sul; o eixo da barragem de rejeito, na porção sudoeste; o eixo do rio Parauapebas, situado a oeste da pilha de estéril; e, os contornos de topo e base, representados pela superfície topográfica e pelo limite de fundo (embasamento cristalino), respectivamente.

O modelo computacional elaborado abrange uma área retangular de 19,74 km². O domínio de cálculo e a localização dos contornos da área em questão são mostrados na Figura 6.

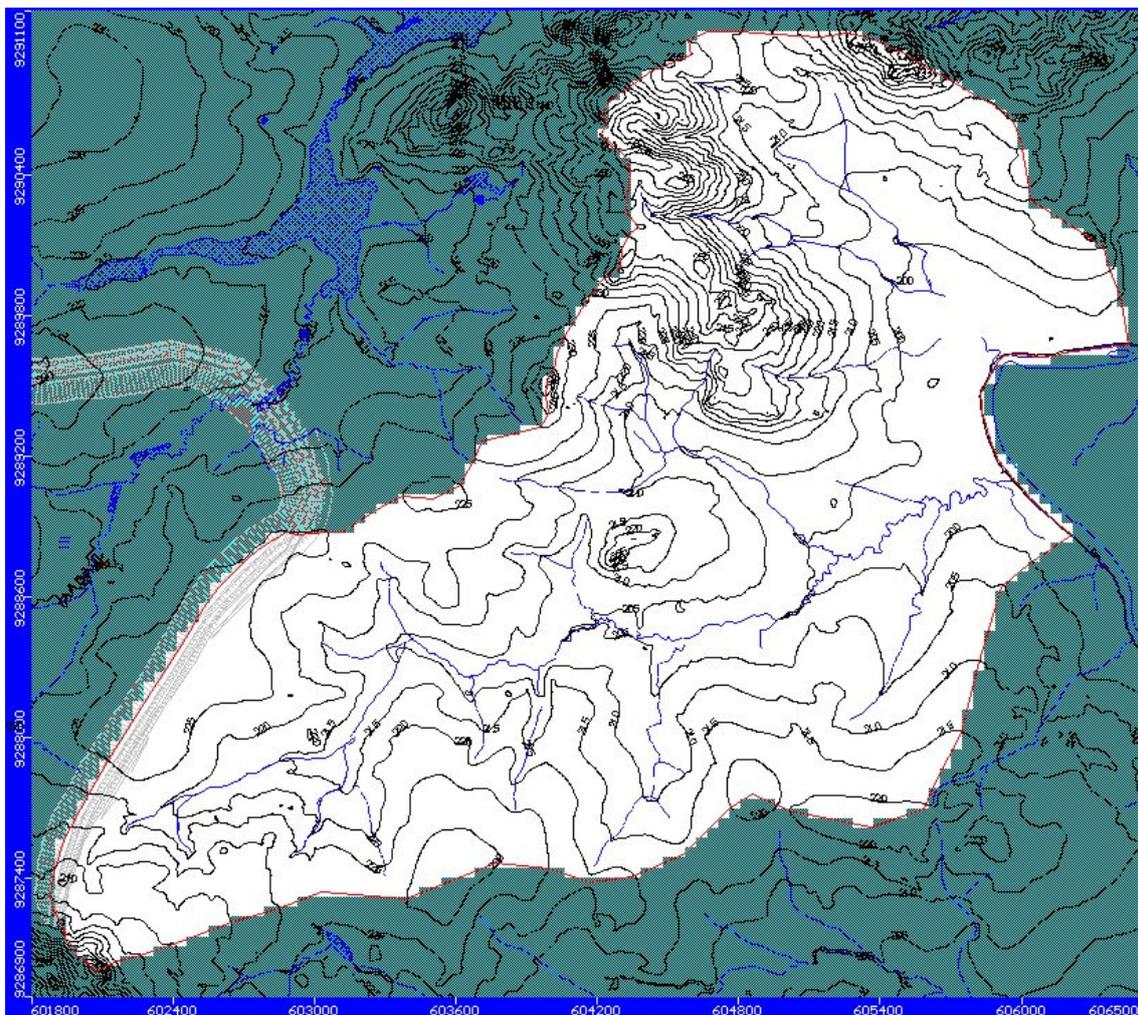


FIGURA 6 – Domínio de cálculo (em branco) e os contornos da área de interesse.

As unidades hidroestratigráficas, definidas anteriormente, foram implementadas no modelo computacional da seguinte maneira, do topo para a base:

- a aluvião (AL) foi distribuída espacialmente nos fundos de vales, de acordo com os afloramentos delineados no mapa geológico da região, com uma espessura variando de 2 a 4 m;
- o colúvio/solo residual (COB) foi distribuído na superfície do domínio (exceto na área da pilha de estéril) e abaixo da aluvião, com espessura variando de 3 a 8 m;
- o saprolito e a rocha muito fraturada (SAP) foram alocados abaixo da camada anterior com espessuras variando de 5 a 10 m;
- a rocha fissurada (RS1), de porosidade primária nula, foi distribuída com espessuras variando entre 20 e 40 m; e, por último,
- a rocha sã (RS2) foi distribuída na parte inferior do domínio, com espessuras variando entre 90 e 140 m até atingir a cota, de base, de 80 m.

Outras duas unidades hidroestratigráficas, além das citadas anteriormente, foram definidas e introduzidas no modelo computacional, a saber: uma primeira unidade, representando o material de baixa condutividade hidráulica correspondente ao solo compactado do fundo da barragem de rejeitos; e, uma segunda unidade, representando o material não consolidado que compõe a pilha de estéril.

A definição das propriedades hidrodinâmicas (condutividade hidráulica e porosidade) de cada um dos blocos ativos do modelo numérico foi baseada essencialmente na geologia, ou seja, para cada unidade litoestratigráfica foi associado um grupo de propriedades hidrodinâmicas, constantes para cada grupo. Dessa forma, a faixa de variação da condutividade hidráulica (K) e os valores de porosidade efetiva, representativos de cada unidade hidroestratigráfica, foram associados às respectivas células no modelo de acordo com a associação de cores mostrada na Tabela 3.

TABELA 3
FAIXA DE VARIAÇÃO DOS VALORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA E
POROSIDADE EFETIVA DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS E A
CORRESPONDENTE ASSOCIAÇÃO DE CORES NO MODELO COMPUTACIONAL

| Litologia | Faixa de Variação de K (cm/s) | Porosidade Efetiva |
|---|---|---------------------------|
| Aluvião (AL) | $10^{-8} - 10^{-2}$ | 0,15 |
| Colúvio/solo residual (COB) | $10^{-6} - 10^{-3}$ | 0,1 |
| Rocha muito fraturada e saprolito (SAP) | $10^{-6} - 10^{-3}$ | 0,05 |
| Rocha fissurada (RS1) | $10^{-7} - 10^{-4}$ | 0,01 |
| Rocha sã (RS2) | $10^{-8} - 10^{-5}$ | 0,005 |
| Solo compactado do fundo da barragem | $10^{-7} - 10^{-5}$ | 0,01 |
| Material da pilha de estéril/minério | $10^{-6} - 10^{-3}$ | 0,1 |

3.1.1 Definição e Implementação das Condições de Contorno

As condições implementadas nos contornos do modelo computacional buscaram representar as condições efetivamente existentes no domínio em questão. Essas condições são:

- condição de carga hidráulica constante (condição de 1º tipo), na cota 227 m, na barragem de rejeitos;
- condição de fluxo variável (condição de 3º tipo), função da diferença dos potenciais hidráulicos acima e abaixo do leito do rio Parauapebas, implementada através do recurso “Rio” do aplicativo VisualModflow®. O espelho d’água foi considerado constante, na cota 195 m e o seu leito na cota 194 m;
- condição de fluxo constante (condição de 2º tipo), associada à recarga, distribuída uniformemente pelo topo da primeira camada do modelo; e,
- condição de fluxo nulo (condição de 2º tipo), associada aos contornos hidráulicos

representados pelo limite de base e de topo, e, também, pelos divisores de água. Essa associação é feita automaticamente pelo aplicativo, à medida em que não é especificada nenhuma outra condição para as respectivas células do contorno do domínio.

Buscando representar realisticamente as restrições ao fluxo de água impostas pelo corpo da barragem de rejeitos, aplicou-se, na face oriental das células que compõem aquela barragem, o recurso “Parede” do aplicativo VisualModflow®. Dessa maneira, força-se o fluxo de água apenas pelas bases dessas células de cálculo, resultando, assim, em uma distribuição de potencial hidráulico, naquela região, mais similar àquelas geralmente associadas às seções de barragens.

Os sumidouros de água existentes no domínio correspondem às drenagens superficiais que ocorrem nos talwegues naturais do terreno, e ao dreno construído no fundo da pilha de estéril, cujo projeto é mostrado na Figura 7. Tanto os drenos de talvegue quanto o dreno de fundo da pilha foram implementados no modelo computacional através do recurso “Dreno” do VisualModflow®.

3.1.2 Calibração do Modelo Computacional

A calibração do modelo computacional é um procedimento no qual se variam os parâmetros intrínsecos do modelo, tais como recarga e condutividade hidráulica, e se observam os efeitos dessas mudanças de propriedades nas predições de carga hidráulica e de vazões feitas pelo modelo. Essas predições são, então, comparadas com valores medidos em campo, a partir de leituras feitas em piezômetros, em medidores de nível d’água, ou em vertedouros. O objetivo da calibração é obter um conjunto de predições que seja o mais concordante possível com as observações de campo.

A calibração do modelo foi feita com base em medições de vazão feitas no ponto de monitoramento PM-02 (localizado junto à base da pilha de estéril, na porção sudeste) e em medições de nível d’água ou de potencial hidráulico no domínio de cálculo, feitas nos pontos listados na Tabela 4. As cotas do nível d’água nesses locais são representativas dos valores médios observados no mês de março/2005, período chuvoso na região.

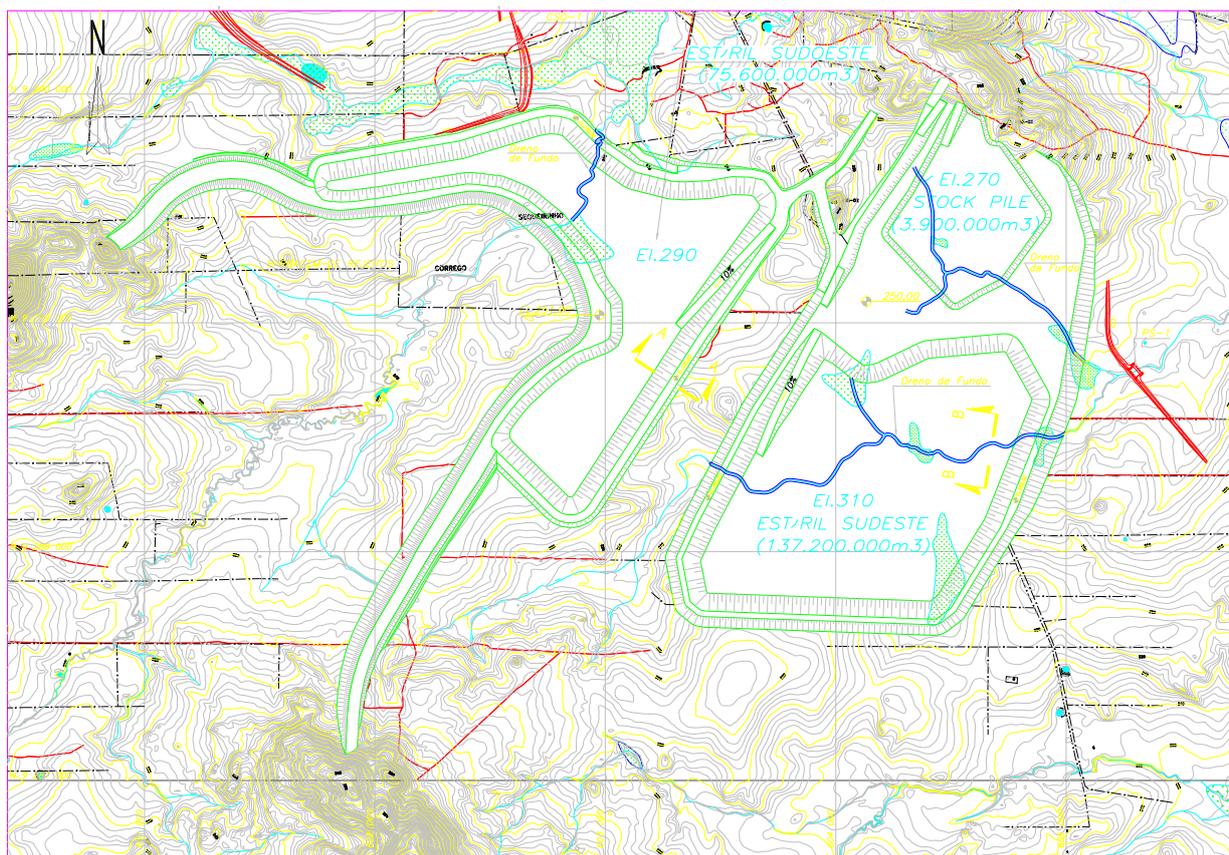


FIGURA 7 – Projeção do dreno de fundo da pilha de estéril (em azul).

**TABELA 4
DADOS UTILIZADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL,
REPRESENTATIVOS DO MÊS DE MARÇO/2005**

| Ponto de Medição | Vazão |
|------------------|--------------------------|
| PM-02 | 0,5 m ³ /h |
| Ponto de Medição | Cota do Nível D'água (m) |
| REJ-03 | 202,0 |
| CIST-06 | 201,4 |
| CIST-07 | 212,0 |
| CIST-08 | 207,0 |
| PZ-03 | 212,0 |

Durante a calibração, variou-se o valor da recarga entre 120 e 300 mm/ano até que se observasse uma vazão no ponto PM-02 de cerca de 0,5 m³/h, valor próximo à média observada em março/2005, naquele ponto. Essa faixa de variação buscou representar um período de elevada recarga devido às intensas precipitações que ocorrem no período chuvoso. Em seguida, os valores de condutividade hidráulica (K) foram variados dentro da faixa citada anteriormente (Tabela 3), buscando-se obter níveis do lençol freático que mais se aproximassem daqueles listados na Tabela 4.

Os valores da recarga e das condutividades hidráulicas das unidades litoestratigráficas que resultaram no melhor ajuste dos valores de vazão e dos níveis d'água observados no campo são listados na Tabela 5.

A curva de calibração, correspondente a essa configuração de condutividades hidráulicas e de recarga, é mostrada na Figura 8. O erro absoluto médio das previsões foi de 1,38 m, com desvio padrão de 0,49 m, e com uma média normalizada dos quadrados das diferenças (NRMS) de 15,9%. Esses resultados foram considerados satisfatórios levando-se em consideração o pequeno número de pontos disponíveis para calibração. Após a implementação de novos pontos de monitoramento e a obtenção de novas medidas de nível d'água, será possível verificar e depurar o processo de calibração.

TABELA 5
VALORES FINAIS DE RECARGA E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS, OBTIDOS POR CALIBRAÇÃO

| Recarga | Condutividade Hidráulica | | |
|------------|---|-------------------------|----------------------|
| | Litologia | Cor Associada no Modelo | K (cm/s) |
| 200 mm/ano | Aluvião (AL) | | $5,0 \times 10^{-3}$ |
| | Colúvio/solo residual (COB) | | $9,0 \times 10^{-4}$ |
| | Rocha muito fraturada e saprolito (SAP) | | $7,0 \times 10^{-5}$ |
| | Rocha fissurada (RS1) | | $1,0 \times 10^{-5}$ |
| | Rocha sã (RS2) | | $5,0 \times 10^{-7}$ |
| | Solo compactado do fundo da barragem | | $1,0 \times 10^{-6}$ |
| | Material da pilha de estéril/minério | | $1,0 \times 10^{-4}$ |

3.2 Resultados do Modelo Computacional

Os resultados de maior interesse, obtidos pelo modelo hidrodinâmico computacional são: a distribuição da superfície freática no domínio; a distribuição dos gradientes hidráulicos, responsáveis pelo escoamento das águas subterrâneas; a conseqüente distribuição do campo de velocidades.

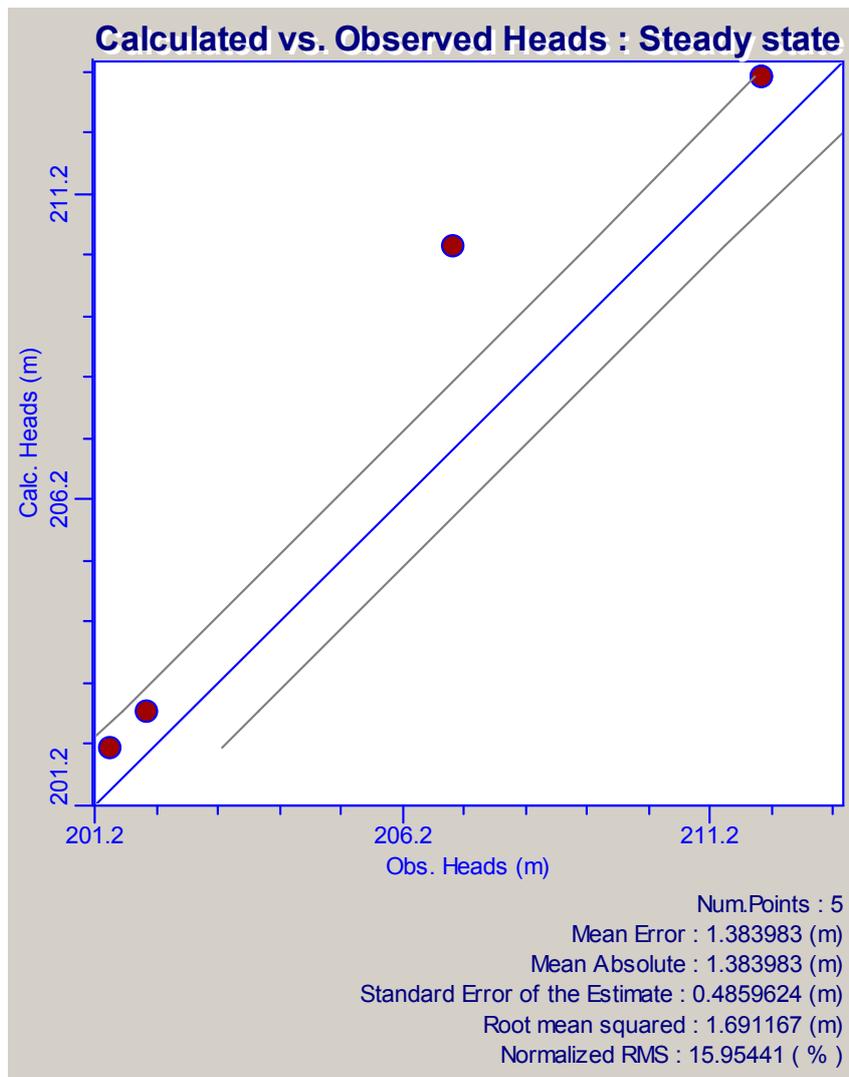


FIGURA 8 – Curva de calibração do modelo.

3.2.1 Superfície Freática e Direção do Escoamento

A distribuição espacial da superfície freática, obtida pelo modelo computacional e representada na Figura 9, é coerente com aquela antevista no modelo conceitual, que havia sido interpolada com base em medições de nível d'água feitas no interior do domínio e nas adjacências.

As cotas mais altas calculadas para o lençol freático (cerca de 250 m) se encontram nos terrenos mais elevados, próximos da pilha de estéril, na porção noroeste do domínio. Na área da pilha de estéril/minério, o escoamento é direcionado para a porção sul do domínio, em virtude da presença do dreno de fundo sob aquela pilha. As cotas mais baixas do lençol freático correspondem à várzea do rio Parauapebas. As setas indicativas da direção do escoamento subsuperficial demonstram uma convergência desse escoamento em direção às drenagens superficiais, e também, em direção ao rio Parauapebas.

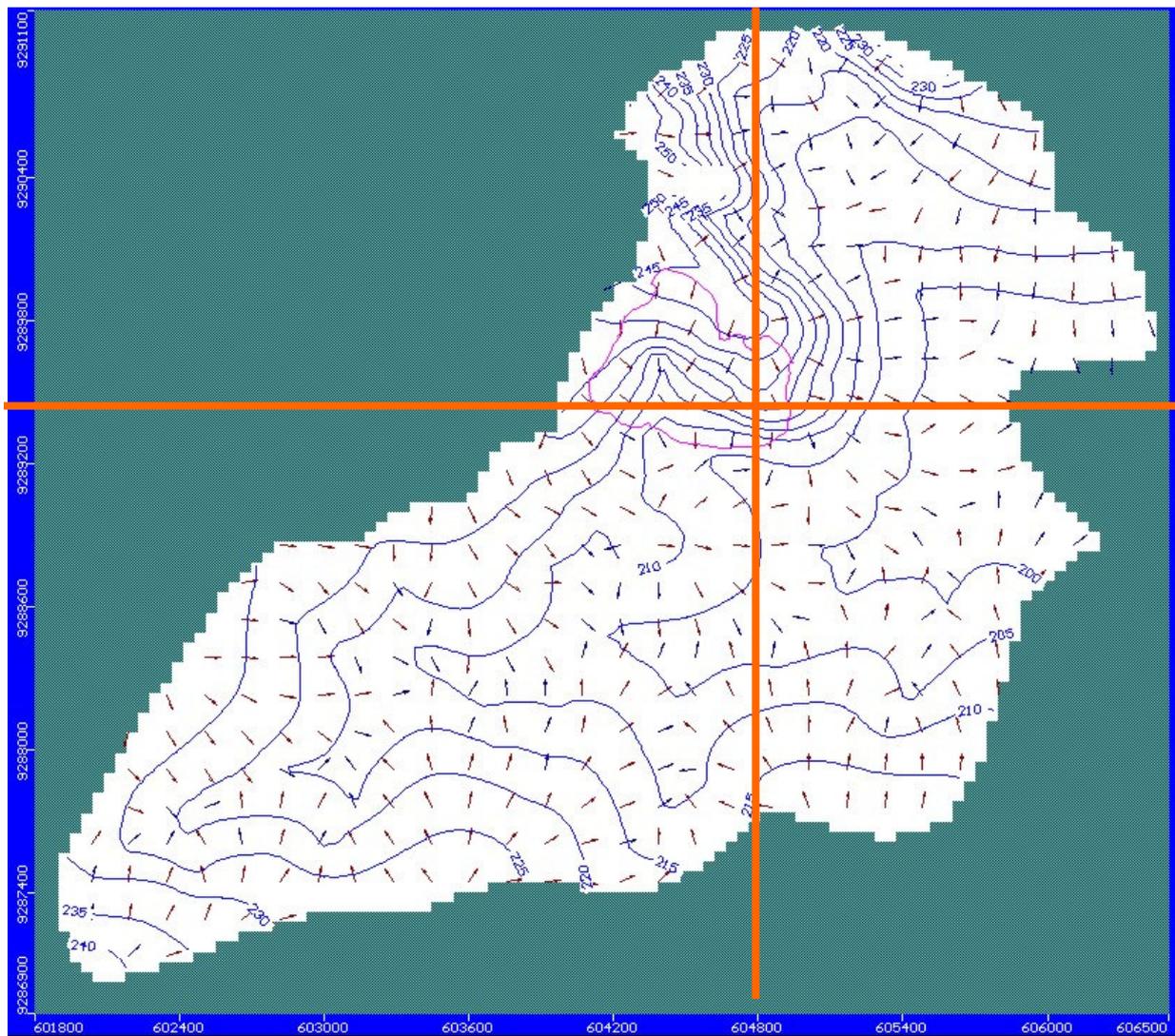
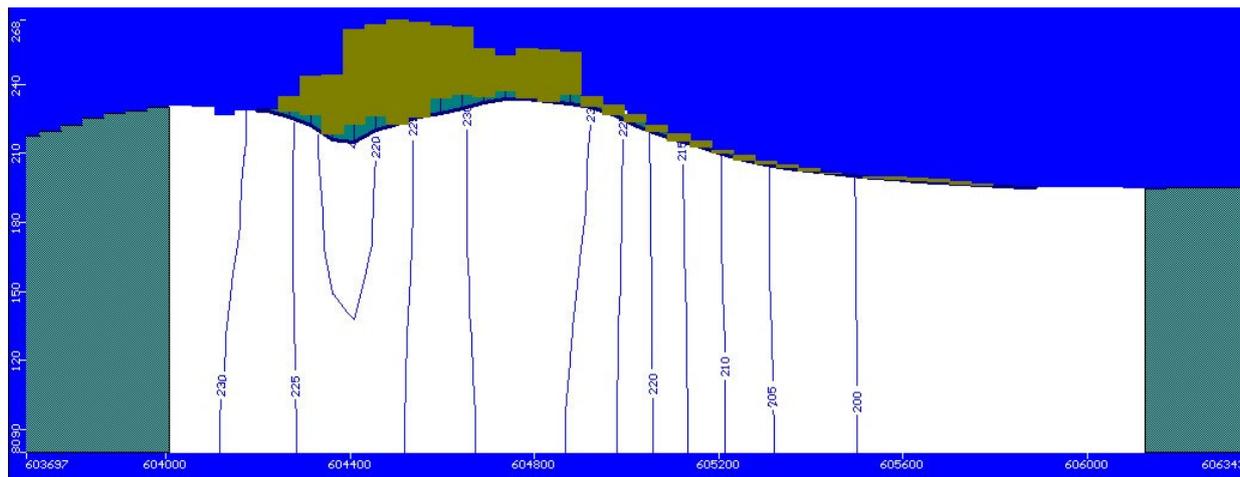


FIGURA 9 – Isolinhas de nível d’água e direção do escoamento subsuperficial previstas pelo modelo computacional e setas indicativas da direção do escoamento.

Na Figura 10 estão mostradas as linhas de potencial hidráulico nas seções W-E e S-N, respectivamente, indicadas na Figura 9. Nessas seções, os gradientes hidráulicos variam de 0,011 m/m, nas cotas mais baixas, próximas da área de descarga do rio Parauapebas, a 0,14 m/m, nas áreas mais elevadas, de recarga do sistema. O gradiente hidráulico médio no domínio de cálculo se encontra na faixa de 0,05 m/m.

(a)



(b)

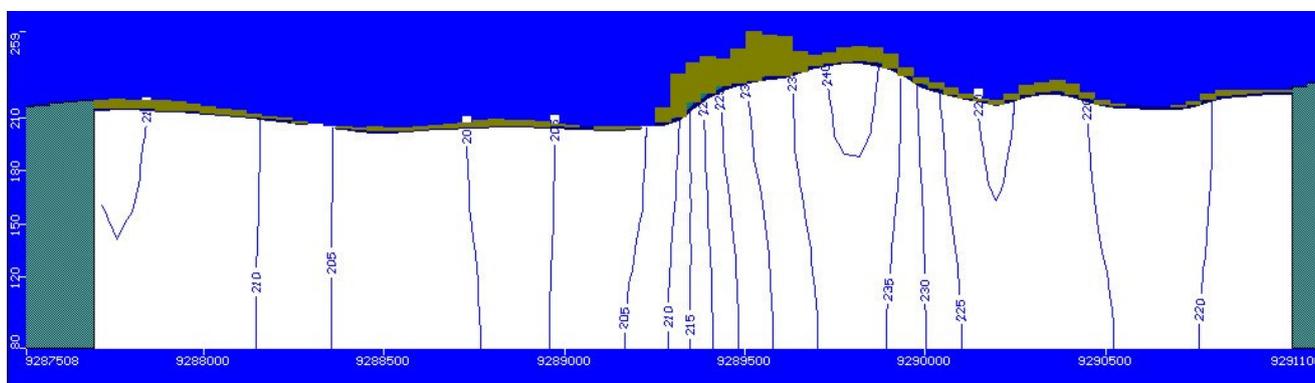


FIGURA 10 - Distribuição do potencial hidráulico nas seções W-E (a) e S-N (b).

4. CONCLUSÕES

Os resultados do comportamento hidrodinâmico do sistema hidrogeológico da área de influência da pilha de estéril, obtidos através do modelo computacional, sugerem que:

- as cotas mais altas do lençol freático se encontram em torno de 250 m, nos terrenos mais elevados, próximos da pilha de estéril, na porção noroeste do domínio;
- as cotas mais baixas do lençol freático correspondem à várzea do rio Parauapebas;
- o escoamento subsuperficial converge, primariamente, em direção às drenagens superficiais, e, secundariamente, em direção ao rio Parauapebas;
- os gradientes hidráulicos variam de 0,011 m/m, nas cotas mais baixas, próximas da área de descarga do rio Parauapebas, a 0,14 m/m, nas áreas mais elevadas, de recarga do sistema. O gradiente hidráulico médio no domínio de cálculo se encontra na faixa de 0,05 m/m.

Os resultados obtidos através do modelo hidrogeológico computacional sugerem que, somente no longo prazo, em um período superior a 50 anos, as águas subterrâneas infiltradas pelo depósito

de estéril/minério poderão efetivamente alcançar o rio Parauapebas, porém sempre preferencialmente através das camadas aluvionares (AL) mais superficiais da estratigrafia local. Deve ser ressaltado que essa é uma conclusão de caráter preliminar, obtida levando-se em conta uma recarga de 200 mm/ano de forma ininterrupta. Com a alternância de períodos de estiagem e de chuva, os tempos de chegada reais das águas subterrâneas infiltradas pela pilha devem ser mais elevados.

É de fundamental importância que o monitoramento das variáveis hidrogeológicas seja continuado nos pontos no interior do domínio considerado, e, também, que sejam implementados novos pontos de monitoramento, de acordo com programa de monitoramento redefinido no âmbito do trabalho.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, M. e WOESSNER, W. (1992). *Applied Groundwater Modeling*. “Simulation of flow and Advective Transport. Academic Press, Inc. San Diego, California, USA.

GOLDER ASSOCIATES, 2001a. Relatório RT-PR-CT047-MI-0000-92-0125-00-B. “Relatório de estudos hidrológicos e climatológicos e de dimensionamentos hidráulicos” - 2001.

GOLDER ASSOCIATES, 2001b. Relatório RT-PR-CT047-MI-1000-93-0001-00-J. “Caracterização hidrogeológica”- 2001.

GUIGUER, N e FRANZ, T. (1996). User’s Manual for Visual Modflow. Waterloo hydrogeologic Inc. Waterloo, Ontario, Canada.

6. AGRADECIMENTOS

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