

4

Estudo de caso: Mina subterrânea

4.1.

Introdução

A unidade presente no município de Vazante-MG está localizada na porção noroeste do Estado de Minas Gerais, Brasil. A exploração de minério de zinco ocorre desde 1969, onde se processava apenas a céu aberto com o predomínio da calamina. No início dos anos 1980 foram executados estudos que viabilizaram o avanço da mineração na porção subterrânea, iniciando a operação da lavra em dezembro de 1982, onde se registra a presença somente de willemita como mineral-minério oxidado. São empregados, basicamente, dois métodos principais de lavra nas operações realizadas na Mina de Vazante: *Vertical Retreat Mining* (VRM), Corte e Aterro (C&A), ambos utilizados devido à necessidade de recuperação dos pilares de minério deixados para sustentação do maciço rochoso. Os produtos de exploração, beneficiamento e comercialização são o zinco oxidado e o cádmio (associado aos minérios de calamina e willemita que passam pelo processo de britagem, moagem e flotação). O plano de produção prevê uma redução da produção da Mina de Vazante até sua exaustão em 2025.

A Mina de Vazante está inserida no contexto de terrenos cársticos, que, associados aos processos tectônicos que atuaram na área, comandam a dinâmica de circulação hídrica e suas relações com a morfologia do relevo e a ocorrência de feições típicas deste ambiente, tais como surgências, sumidouros e cavernas. Aliando-se a estes fatores naturais, há que se considerar ainda que a área de interesse está sofrendo intervenção do rebaixamento de nível d'água subterrânea, procedimento necessário ao avanço da lavra de minério em profundidade.

Como resultado da combinação desses fatores naturais e antrópicos, podem ser apontadas algumas características percebidas no ambiente estudado, as quais são de preocupação para as operações mineiras, tais como: altas vazões (registradas com o avanço da lavra) nos condutos cársticos associados a estruturas

geológicas preferenciais nas galerias de mina e a potencialização ou indução ao surgimento de dolinas e/ou *sinkholes* (sumidouros) além daquelas naturalmente registradas. Estas vazões medidas não correspondem aos valores esperados de acordo com o atual modelo hidrogeológico, por não considerarem feições cársticas que geram fluxo preferencial de águas subterrâneas.

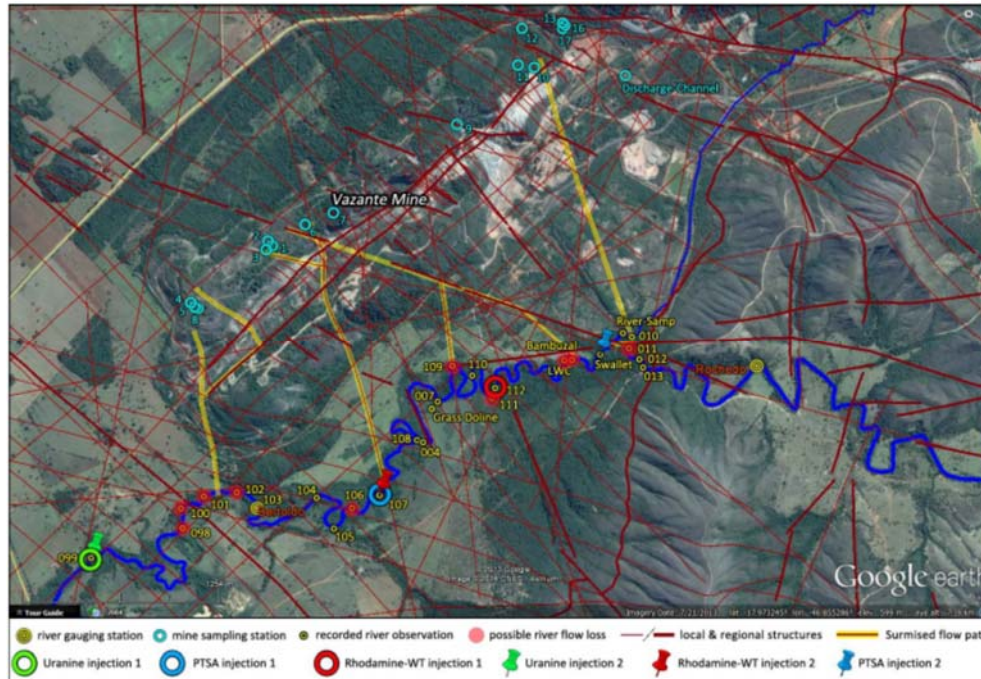


Figura 4.1- Caminhos de fluxos presumidos entre o rio e a mina com base nas formações locais e regionais mapeadas (Guiguer *et al.*, 2013).

A empresa DHI do Brasil foi contratada pela Votorantim Metais (VM) para realizar testes de rastreamento de água subterrânea entre o rio Santa Catarina e a mina subterrânea de Vazante. De acordo com Guiguer *et al.*, 2013, a execução desse trabalho teve como propósito o reconhecimento das rotas de fluxo subterrâneo entre pontos entre as margens do rio Santa Catarina e o interior da mina subterrânea (Figura 4.1). Os resultados desse estudo indicaram a presença de três caminhos discretos de fluxo de água baseados na distribuição de traçadores detectados. Contudo, as características cársticas do aquífero indicam que o fluxo do rio para mina ocorre através de fraturas discretas mas que não têm uma conexão perfeita entre o rio e a mina. Em vez disso, o fluxo do rio para a mina deve primeiramente atravessar um volume de armazenamento substancial do aquífero, mais provavelmente dentro do epicarste que está situado entre a rocha dolomítica e o rio. A magnitude e o tempo do fluxo através do epicárstico e na

mina são substancialmente afetados por gradientes hidráulicos criados por flutuações nos estágios do rio e pela presença do filito que separa o rio da mina.

Modelagens numéricas do sistema de águas subterrâneas foram empregadas para simular de uma forma explícita as características do fluxo nos condutos identificadas pelos testes de rastreamento, e ao mesmo tempo para ser utilizada como uma plataforma na avaliação dos benefícios de várias estratégias hipotéticas para reduzir o fluxo dentro da mina a partir do rio.

Para isto é necessário uma avaliação e modificação do modelo hidrogeológico atual, redesenhando-o de acordo com as condições geológicas e hidráulicas (baseados em dados instrumentais) mais recentes, que acomode as componentes necessárias para uma representação mais apropriada, *i.e.*, recalibrando-o ao ano 2014. Esta recalibração deverá levar em conta a diminuição⁹ da permeabilidade do meio poroso para poder atingir o equilíbrio em termos de fluxo e cargas hidráulicas que será alterado pela inserção de estruturas mais permeáveis (meio poroso fraturado mais feições cársticas), mas também considera o uso adequado das condições de contorno na representação do rio, gerando assim, uma representação mais realista do nível do lençol freático, que anteriormente não vinha sendo feito. Este modelo recalibrado servirá como uma plataforma excelente para a avaliação do efeito de estratégias atenuantes, tais como o reposicionamento ou o revestimento do rio nos locais (Item 3.4.1 – Impermeabilização da superfície do terreno) em que foram registradas perdas ou em que sua existência é presumida; ou o fechamento dos condutos formados por dissolução. Uma esquematização deste processo de impermeabilização do rio é mostrada na Figura 3.1.

Portanto, este estudo numérico com o FEFLOW 6.2 tem como objetivo principal fornecer uma melhor representação do sistema hidrogeológico, que permita projetar respostas mais aprimoradas para os trabalhos futuros. Por outro lado, também procura implementar diferentes cenários de fluxo, onde comparações considerando ou não feições cársticas em conjunto com a impermeabilização do rio como sistema de controle das águas permitam verificar a influência destas estruturas no sistema hidrogeológico.

⁹ A permeabilidade atribuída no modelo antigo era alta porque era a média do meio poroso mais as estruturas.

4.2.

Aspectos intervenientes ao cenário hidrogeológico local

Baseados em dados coletados na rede de monitoramento mantida na área de influência do empreendimento, contínuos estudos por parte da mineradora culminaram em um amplo ganho de conhecimento sobre temas intervenientes (geologia, geomorfologia e hidrogeologia), visando subsidiar o entendimento sobre aspectos ambientais e operacionais relacionados ao desaguamento da mina e sua interferência na dinâmica aquífera local e outros fatores geoambientais. Estes aspectos intervenientes, como a geologia e geomorfologia são aqui abordados por gerarem um conhecimento integrado que contribuirá para a descrição do modelo hidrogeológico conceitual da área de influência do estudo, que será abordado mais adiante.

4.2.1.

Condicionantes geológicas

As bases geológicas disponíveis englobam informações de cunho regional apresentadas por CPRM (2002) em cooperação com o Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (Rostirolla *et al.*, 2000), além dos estudos apresentados por IPT (2004) e aqueles sumarizados e interpretados pela equipe de exploração mineral da Votorantim Metais, apresentadas na forma de um mapa geológico integrado da área, mostrada na Figura Anexo 1. Dessa maneira, as condicionantes geológicas (Pessoa *et al.*, 2012) apresentadas aqui, de forma muito sucinta, destacam apenas o mais relevante de maneira a compor uma base única e consolidar a importância dos elementos litoestratigráficos e geoestruturais na concepção do modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas e suas interações com outras feições naturais do ambiente cárstico, tais como as cavernas, dolinamentos, surgências e sumidouros (*sinkholes*).

4.2.1.1.

Elementos litoestratigráficos

A área em estudo está situada na região noroeste do Estado de Minas Gerais, próxima à cidade de Vazante, e engloba uma sequência de rochas carbonáticas e pelíticas de idade proterozóica superior posicionadas na porção sudeste do Cinturão Brasília, em contato com a borda oeste da Bacia Bambuí, Cráton São

Francisco. Nesta área foram reconhecidas cinco unidades litoestratigráficas principais definidas, da base para o topo, como: Formação Serra do Garrote, Formação Serra do Poço Verde, Formação Morro do Calcário, Formação Serra da Lapa (estas 4 unidades estão inseridas no contexto do grupo Vazante) e Formação Paracatu (inserida no grupo Canastra). A distribuição destas unidades é apresentada no mapa geológico (Figura Anexo 1). De modo geral o grupo Vazante abrange uma predominância de filitos carbonosos e quartzosos aflorando ao leste da área da mina (Formação Serra do Garrote) sendo que dolomitos estromatolítico constituem o setor noroeste da área de empreendimento (Formação Morro do Calcário). Ao oeste das minas Vazante e Extremo Norte a predominância é de filitos intercalados com quartzitos finos e filitos quartzosos e metassedimentos argilo-arenosos. Esta região (Formação Serra da Lapa) mostra um relevo acidentado, com trechos de drenagens perenes e padrões preferencialmente dendríticos. Neste grupo Vazante encontram-se ainda os depósitos de zinco e chumbo (Formação Serra do Poço Verde) associados à Zona de Falha Vazante, comumente sob intercalações de filitos carbonosos.

Em termos hidrogeológicos, a região da formação Serra do Garrote é caracterizada por apresentar valores muito baixos de condutividade hidráulica e recarga. Em função disso, esta unidade se classifica como zona não aquífera. A Formação Serra da Lapa e Paracatu, em função de seu caráter litológico variável (intercalação de filitos, quartzitos e dolomitos), podem indicar algum potencial hidrogeológico. Por sua vez, as formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário caracterizam a bacia dolomítica da área de interesse desse estudo, constituída essencialmente por litotipos cársticos fissurados intercalados com filitos, atribuindo um caráter, predominantemente, de zonas aquíferas associadas.

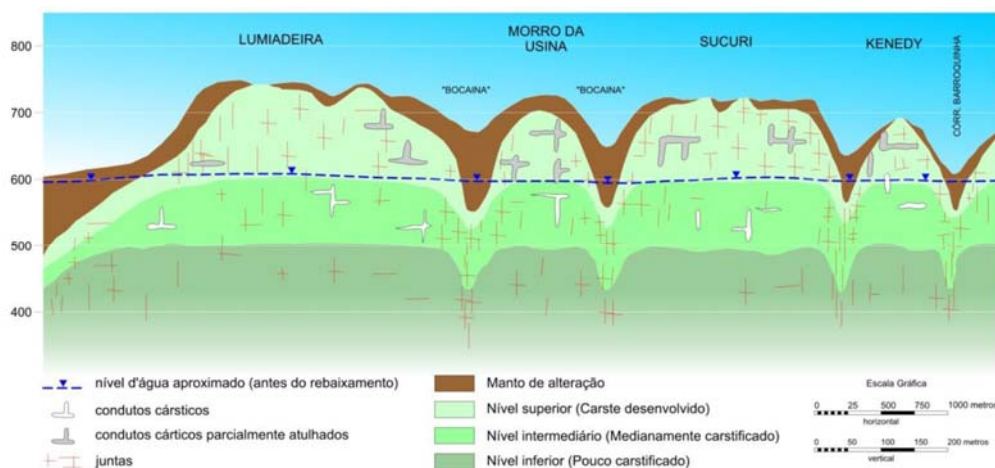
4.2.2.

Gênese de feições cársticas

As principais feições cársticas reconhecidas na área de interesse são as dolinas e sumidouros (*sinkholes*) que indicam zonas preferenciais de infiltração de águas superficiais, também condutos e surgências que indicam os locais onde os sistemas cársticos são drenados, e, as cavernas que constituem feições desenvolvidas pela circulação de águas em direções preferenciais.

De acordo com as análises estruturais efetuadas por IPT (2004), aliadas às observações das feições de dissolução em diferentes níveis da mina subterrânea, permitiram individualizar três horizontes distintos de desenvolvimento das feições cársticas locais: nível superior ou vadoso, nível intermediário e nível inferior, conforme ilustrado pela Figura 4.2, abaixo.

O nível superior corresponde à porção do maciço rochoso que está acima do nível d'água. Caracteriza-se como o nível de maior evolução do carste, distribuídas de grandes fendas de dissolução, abatimentos, semidouros e etc. Neste nível, a circulação de água se dá basicamente por movimentos verticais descendentes. Neste contexto, quando são verificados eventos de intensa precipitação, associados a inundações de determinadas drenagens, como o rio Santa Catarina, por exemplo, percebe-se uma intensificação natural no surgimento de abatimentos e semidouros provocados pela rápida infiltração de águas superficiais e lixiviação de sedimentos inconsolidados. Este efeito pode ser mais intensificado em área sob a influência do rebaixamento, pois o mesmo gera condições para o aumento do gradiente hidráulico e de velocidade de escoamento das águas superficiais, aumentando ainda mais o potencial de surgimento destas feições cársticas.



Fonte: Modificado por Pessoa *et al.*, 2012 do IPT (2004).

Figura 4.2 - Níveis de desenvolvimento de feições cársticas na sua condição original (Pessoa *et al.*, 2012).

O nível intermediário abrange a porção do maciço rochoso situado abaixo do nível d'água subterrânea, até aproximadamente a cota 500 metros, onde o processo cárstico encontra-se, atualmente, em desenvolvimento. Já no nível

inferior o maciço rochoso situado abaixo da cota 500, onde a carstificação é incipiente, o meio comporta-se como fissural, não ocorrendo grandes condutos cársticos como aqueles encontrados nos níveis superior e intermediário.

4.2.3.

Condicionantes geomorfológicas

Conforme apontado por Bittencourt *et al.*, 2008, Rostirolla *et al.*, 2000 e IPT (2004), a bacia dolomítica de interesse aos estudos hidrogeológicos encontra-se capeada por colúvios, que dificultam a identificação e a análise dos processos de carstificação. Esta cobertura, cuja espessura varia desde poucos metros até pouco mais de uma centena de metros, é reflexo da evolução geomorfológica da área. Estes materiais são constituídos essencialmente por filitos, de granulometria variada. As águas pluviais incidentes sobre os filitos escoariam quase que totalmente para o interior da bacia dolomítica, devido à pequena capacidade de retenção das águas nestas áreas.

4.3.

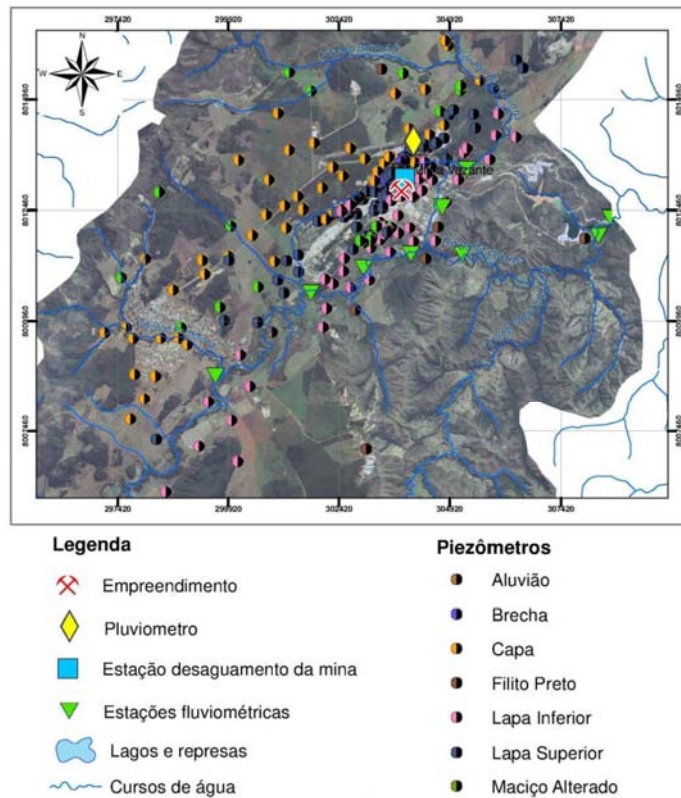
Compilação e interpretação dos dados disponíveis

Neste capítulo são compilados e apresentados os dados e informações pertinentes ao contexto de monitoramento hídrico da área de influência do empreendimento, com o intuito de subsidiar a concepção do modelo hidrogeológico conceitual e refinar as discussões necessárias. O monitoramento compreendeu dados piezométricos e medidores de nível d'água, vazões bombeadas no interior da mina, precipitações pluviométricas e vazões de cursos d'água no entorno do empreendimento. Todos esses dados foram coletados e disponibilizados pela Votorantim Metais.

4.3.1.

Piezômetros e poços medidores de nível d'água

O monitoramento do rebaixamento de nível d'água subterrânea com o avanço da lavra da mina de Vazante está sendo efetuado através de vários piezômetros e poços medidores de nível d'água instalados na área de influência do empreendimento.



Fonte: Dados disponibilizados pela Votorantim Metais.

Figura 4.3 - Mapa de distribuição dos pontos de monitoramento na área de influência definida para os estudos hidrogeológicos (Pessoa *et al.*, 2012).

Este sistema de monitoramento abrange dados de 130 piezômetros e 5 poços em operação, instalados em unidades hidrogeológicas de interesse, conforme apresentado na Tabela 4.1 e ilustrado na Figura 4.3 para o ano de 2013. Vale a pena ressaltar que a oscilação de nível de água nos piezômetros, em geral, responde à sazonalidade climática da região.

Tabela 4.1 - Piezômetros instalados nas diferentes unidades hidrogeológicas da área de influência da Mina Vazante a dezembro de 2013.

Unidade monitorada	Número de pontos de monitoramento
Aluvião	8
Maciço alterado	18
Capa	34
Lapa superior	35
Lapa inferior	37
Filito	3
Total:	135

4.3.2.

Vazões bombeadas na mina

O procedimento de desagüamento da mina envolve um sistema de drenagem subterrânea gravitacional, utilizando a própria mina como estrutura de drenagem principal associada a um conjunto de bombas instaladas em seu interior. O monitoramento de vazão bombeada da mina ocorre em um único ponto. Na Figura 4.4 encontram-se os valores de taxa de bombeamento em m³/h desde o início das operações em 1990 até 2013. De acordo com a DHI (Guiguer *et al.*, 2013), esta taxa de bombeamento para o ano de 2013 foi na ordem de 11000 m³/h.

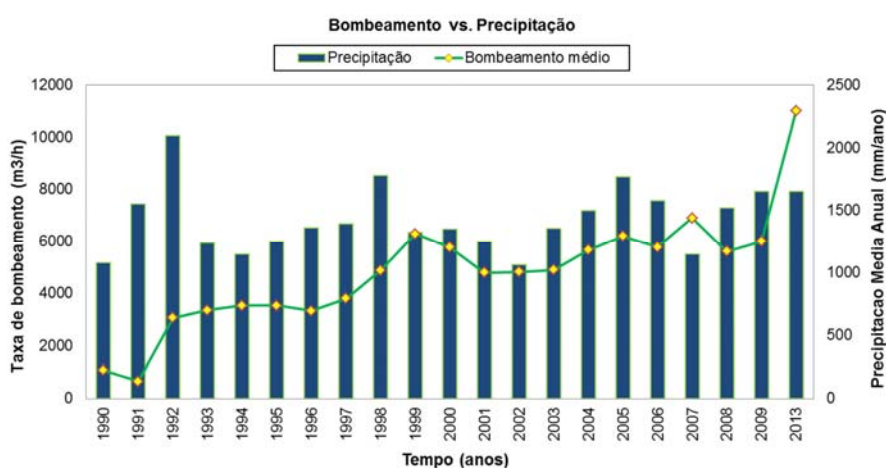


Figura 4.4 - Diagrama das médias históricas anuais de precipitação x bombeamento (Adaptado de Prado, 2010).

Conforme indicado na Figura 4.4, a taxa média de bombeamento praticado na mina sofre grande variação ao longo do tempo e do ano hidrológico, em parte, devido à necessidade de avanço da mina, em parte, devido à sazonalidade climática.

4.3.3.

Pluviometria

De acordo com os dados da Hidrovia (Pessoa *et al.*, 2012), a precipitação durante o ano hidrológico na região em estudo é bastante variável, que desde 1990 até o 2013 apresentaram-se períodos úmidos (novembro a março) com a precipitação média máxima registrada em dezembro (312,2 mm) e no período seco (abril a outubro) a precipitação média mínima ocorre no mês de junho (4,0 mm).

Os dados de precipitação pluviométrica da área de influência adotada são provenientes do registro do posto instalado nos domínios da referida Mina de Vazante, conforme localização apresentada na Figura 4.3.

4.3.4.

Monitoramento do rio Santa Catarina

O monitoramento das vazões se iniciou em 1989, a partir de pontos selecionados na calha do rio Santa Catarina e nos ribeirões Carrancas e Carrapato, os demais pontos passaram a ser monitorados a partir de 1992 até a atualidade.

De acordo com a história das vazões, apresentados no trabalho de Pessoa *et al.*, 2012, os picos se correlacionam fortemente com os picos de precipitação pluviométrica, ou seja, existe uma influência direta de aumento de vazão dos cursos d'água devido ao aumento de precipitação.

Tabela 4.2 - Localização dos pontos de monitoramento de vazão (m³/h) nos cursos d'água da área de interesse do estudo (Pessoa *et al.*, 2012)

Nº de Ordem	Ident. do Ponto
1	Bambuzal
2	Barragem
3	Bertoldo
4	Córrego Barrocão
5	Córrego da Mata
6	Córrego Guariroba
7	Módulo III
8	Montante Aroeira
9	Poço Verde
10	Prainha
11	Rio Santa Catarina/Rochedo
12	Ribeirão Carranca
13	Rio Carrapato
14	Nova Captação
Fonte: Dados fornecidos pela Votorantim Metais.	

O monitoramento do rio Santa Catarina é importante de ser avaliado, sobretudo, na relação atual entre o aquífero (aluvião) e o rio, em particular no seu trecho mais próximo à mina. Neste contexto, 5 estações fluviométricas (EF) localizados neste trecho foram analisados: Prainha, Bertoldo, Poço Verde, Bambuzal e Rochedo. Assim, a contribuição por parte do aquífero (aluvião) ao rio já vinha sendo observada desde o 2010 em três dos quatro trechos considerados, observando-se perdas consideráveis de água (perda média em torno de 1800 m³/h)

em um trecho bastante pequeno do rio (420 m), correspondente à região entre as estações Poço Verde e Bambuzal.

Tabela 4.3 - Relação entre o aquífero e o Rio Santa Catarina (ganho/perda d'água do rio) (Prado, 2010)

Trecho do Rio	Distância Aprox. (m)	Dolinas Mapeadas	Vazão (m/h)	Ganho / Perda
EF-Prainha a EF-Bertoldo	4400	0	1871	Ganho
EF-Bertoldo a EF-Poco verde	4300	3	510	Ganho
EF-Poço Verde a EF-Bambuzal	420	14	1732	Perda
EF-Bambuzal a EF-Rochedo	800	4	1643	Ganho

Média das diferenças de vazão medidas entre duas fluviométricas, considerando no cálculo das diferenças apenas medições realizadas no mesmo dia.

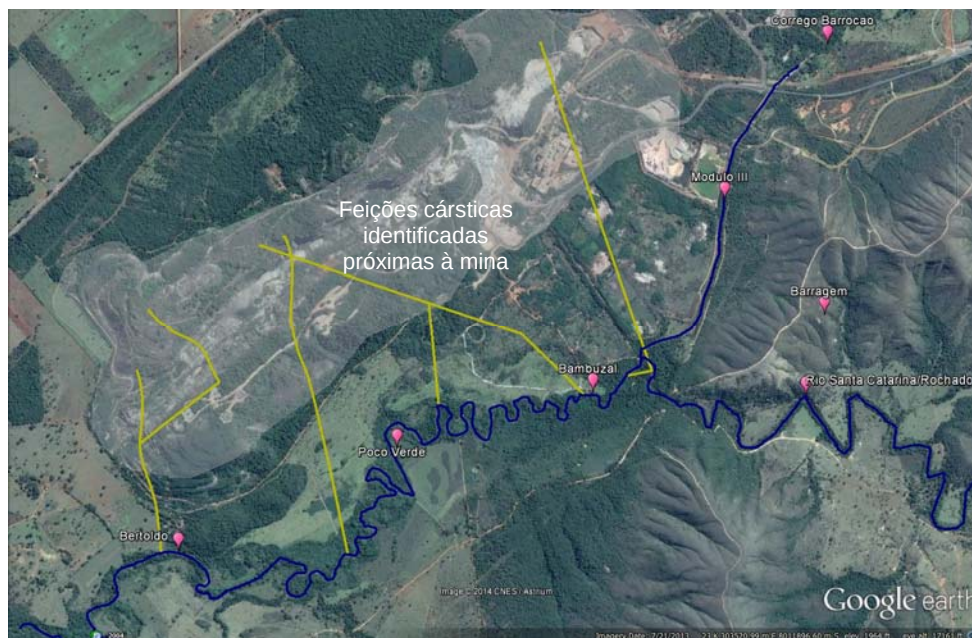


Figura 4.5 - Pontos de monitoramento fluviométricos analisados próximos à mina.

O problema de perda de água do rio Santa Catarina foi estudado pela DHI do Brasil no 2013, onde foram realizados testes de rastreamento de água subterrânea entre o rio Santa Catarina e a mina subterrânea com o intuito de identificar as fontes de infiltração da água do rio na mina.

A partir dos procedimentos de rastreamento que abrangeu injeção em fases de três traçadores no rio Santa Catarina, onde cálculos da recuperação da massa foram realizados para poder comparar a quantidade de traçador recuperada no rio com a quantidade recuperada da mina e, dessa forma, estimar a quantidade da

perda do fluxo do rio que entra na mina (nesta metodologia foi considerado que não há perdas devido à adsorção ou decaimento nos caminhos por onde fluem os traçadores). Os resultados da DHI (Guiguer *et al.*, 2013) revelou que as perdas de fluxo do rio entre as estações de Bertoldo e Rochedo (3400 m³/h) poderiam representar no máximo 37% da descarga total da mina (água perdida para o aquífero), assumindo que 100% do fluxo de rio perdido vai para a mina. Este resultado de perda de fluxo do rio foi monitoramento em 4 diferentes períodos, sendo o de 15/03/2013 – 21/11/2013, o período mais longo do registro e o que apresenta maior perda de fluxo.

4.4.

Modelo hidrogeológico conceitual

As componentes do modelo conceitual tal como o domínio, contornos, unidades hidroestratigráficas e propriedades hidráulicas, sistemas de recarga e descarga, interação das águas superficiais e subterrâneas bem como o balanço de massa foram definidas inicialmente pela Schlumberger, 2008 baseados nos condicionantes geológicos e geomorfológicos e nos dados de monitoramento registrados desde 1989 pela mineira Votorantim Metais.

4.4.1.

Domínio do modelo

A área total do domínio do modelo conceitual é de 161,2 km², o qual abrange o 100% da bacia dolomítica. Esta bacia é demarcada em planta em torno da bacia hidrográfica do rio Santa Catarina e Barroquinha, sendo limitada no extremo norte pela Lagoa Feia. Levando em consideração que as bordas das bacias geram um fluxo divergente, é apenas necessário modelar até seus contornos, considerando que não existirá um fluxo de intercâmbio entre bacias. A geometria na seção transversal e longitudinal poderia ser limitada em profundidade até a unidade do Garrote, devido a que a condutividade hidráulica dessa unidade, em comparação com outras unidades hidrogeológicas, é muito menor, então, poderia se considerar que esta unidade se comportaria como um contorno impermeável inferior, sendo não necessária sua inclusão no desenvolvimento do modelo conceitual.

4.4.2.

Unidades hidrogeológicas e propriedades hidráulicas

Cinco unidades hidrogeológicas principais foram definidas: (1) sedimentos recentes – coberturas aluviais e colúviais; (2) dolomitos – topo de epicarste e compartimentos da Capa, Lapa Superior e Lapa Inferior; (3) Corpo Brechado; (4) aquífero/Filito Preto e (5) aquífero/Xistos. A disposição espacial desse arranjo, apresentada por Pessoa *et al*, 2012, é também representada na Figura 4.6.

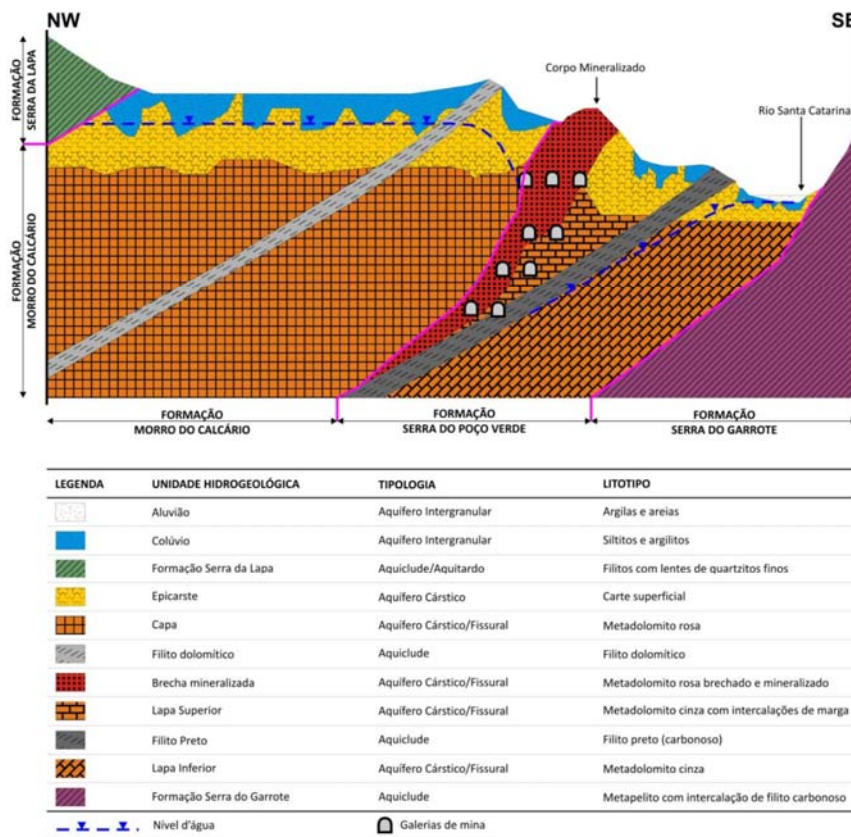


Figura 4.6- Perfil hidrogeológico esquemático na Mina Vazante (Pessoa *et al.*, 2012).

A superfície potenciométrica original, antes da interferência do rebaixamento do nível d'água do aquífero pelo bombeamento, segundo o descrito por Pessoa *et al.* 2012, devia se encontrar próxima a cota 600 NMM, sendo esta considerada o nível de base regional.

Com relação às características hidráulicas, no ano de 1989 foram realizados diversos ensaios de bombeamento e recuperação do nível d'água do aquífero, o que, segundo Schlumberger (2007) possibilitou o cálculo dos parâmetros

hidrodinâmicos do aquífero cárstico. Os dados foram analisados por diversos autores, obtendo valores de condutividade hidráulica de $1,4 \times 10^{-5}$ m/s.

4.4.3.

Recarga e descarga de águas subterrânea

Segundo Pessoa *et al.*, 2012, estudos isotópicos de deutério e oxigênio 18 mostraram que a água de chuva é a origem principal das águas subterrâneas, tendo sido determinada por este método uma taxa de infiltração entre 11% e 25% da precipitação média anual na bacia dolomítica.

Foi determinado a partir dos dados de monitoramento que as principais fontes de entrada de água no modelo conceitual são a precipitação e a ocorrência de perdas de água ao longo da calha do rio Santa Catarina, na sua parte norte (entre as estações Bertolo e Poço Verde). E como fontes de descarga encontram-se a parte sul do rio Santa Catarina e o volume de bombeamento total extraído da mina. Baseado nestas informações é possível obter o balanço hídrico do sistema.

4.5.

Revisão e recalibração do modelo numérico existente

O modelo numérico de fluxo existente (Votorantim Metais, 2013) em FEFLOW é aqui verificado e modificado com o intuito de incluir as feições cársticas e as condições de contornos ideais para a obtenção de resultados mais realistas.

Vale ressaltar que o modelo conceitual original realizado pela Schlumberger no ano de 2006 foi elaborado no programa PETREL, a qual gera uma malha numérica deformável onde as superfícies das camadas numéricas coincidem como os limites das unidades hidrogeológicas. Este modelo é preparado a partir de dados topográficos, falhas geológicas mapeadas, 1230 sondagens de exploração regionais e de mina, 12 seções verticais regionais e no mapa de geologia superficial, para a elaboração do arcabouço geológico. O modelo numérico original no FEFLOW considerou que a infiltração é dada via recarga (precipitação) mais os rios e a descarga pelo rios e lagoas. As estruturas geológicas como falhas foram representadas por elementos discretos planares de 0,01m de espessura.

Neste trabalho de revisão e recalibração do modelo numérico o arcabouço geológico original foi mantido. A malha de elementos finitos no programa FEFLOW sofreu uma leve alteração geométrica pela adição de uma superfície (*slice*) na unidade hidroestratigráfica superficial (aluvião) diminuindo, desta forma, o comprimento vertical dos elementos que estavam representando o rio por comprimentos mais coerentes, para essa camada numérica.

Algumas características do modelo numérico atual são descritas a seguir.

- Área total do modelo: 161,2 km², cobrindo 100% da bacia dolomítica.
- Discretização: 1073592 elementos triangulares (células) e 562302 nós (pontos de intersecção das células) (Figura 4.7).
- 26 camadas numéricas distribuídas verticalmente em 10 unidades hidroestratigráfica.
- Estruturas geológicas (elementos discretos planares 2D com Lei de fluxo de Darcy), mapeadas a partir do levantamento geofísico realizado em 2008, localizadas no extremo superior do domínio do modelo (setor Extremo Norte).

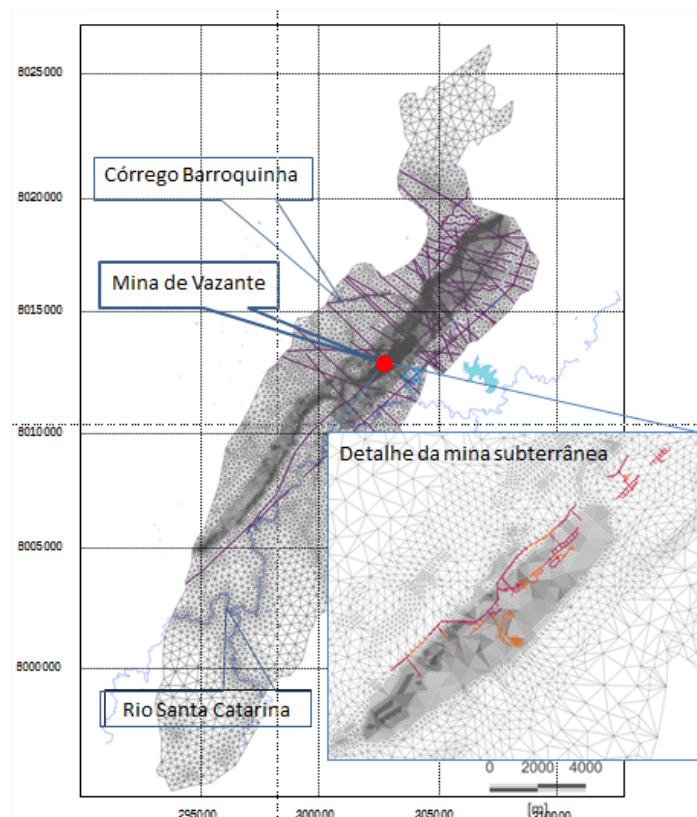


Figura 4.7 - Modelo numérico de fluxo em FEFLOW que inclui a localização da mina de Vazante e as estruturas 2D (Falhas) na situação atual da mina.

Os principais ajustes feitos no modelo numérico existente foram:

1. A revisão dos pontos de calibração do modelo, só levando em consideração os instalados no período de 2013.
2. Revisão das condições de contorno utilizadas para representar o rio Santa Catarina e demais drenagens, assim como das suas restrições.
3. Recalibração das propriedades hidráulicas das unidades hidroestratigráficas do meio poroso contínuo-fraturado, complementada com o balanço hídrico do sistema.
4. Implementação das estruturas discreta para a representação das feições cársticas na região em análise, incluindo análise de sensibilidade para a determinação dos parâmetros que controlam o fluxo nestas estruturas.
5. Recalibração das propriedades hidráulicas das unidades hidroestratigráficas do meio poroso contínuo incluindo a representação das fraturas e das feições cársticas.
6. A revisão do balanço hídrico do sistema atualizada.

A Figura 4.7 apresenta a malha de elementos finitos do modelo numérico em FEFLOW 6.2, e a situação atual da mina de Vazante. Também é possível verificar a localização dos elementos discretos 2D que representam as estruturas geológicas (falhas) mapeadas na região circunjacente à área em estudo. A Figura 4.8 mostra um corte vertical do modelo indicando a distribuição das unidades hidroestratigráficas com os seus respectivos valores de condutividade hidráulica.

Cada um desses itens numerados está sendo discutido nas seguintes seções.

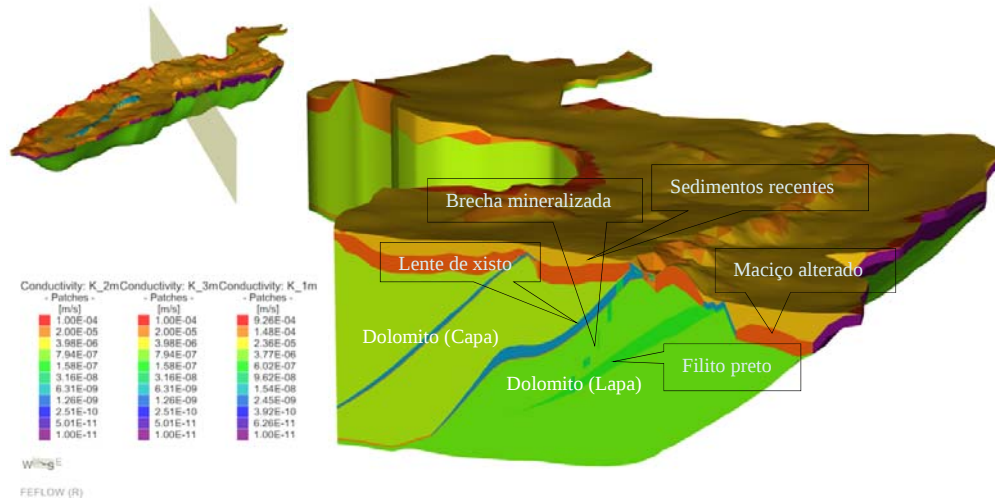


Figura 4.8 – Unidades hidrogeológicas do modelo numérico de fluxo em FEFLOW 6.2.

4.5.1. Revisão dos pontos de calibração

Os ajustes nas cargas hidráulicas dos pontos de calibração constituem um dos critérios para calibração do modelo numérico, sendo utilizados nesse sentido poços e piezômetros que apresentem um registro histórico de medições de nível d'água (convertidas em cargas hidráulicas).

Neste processo foram utilizados no total 135 pontos de controle entre piezômetros e poços instalados no campo (registro de 2013). A distribuição destes (nas respectivas unidades hidrogeológicas na qual foram instalados) é apresentada na Figura 4.9 e detalhado na Tabela 4.4, indicando a quantidade de pontos de controle por unidades hidrogeológicas.

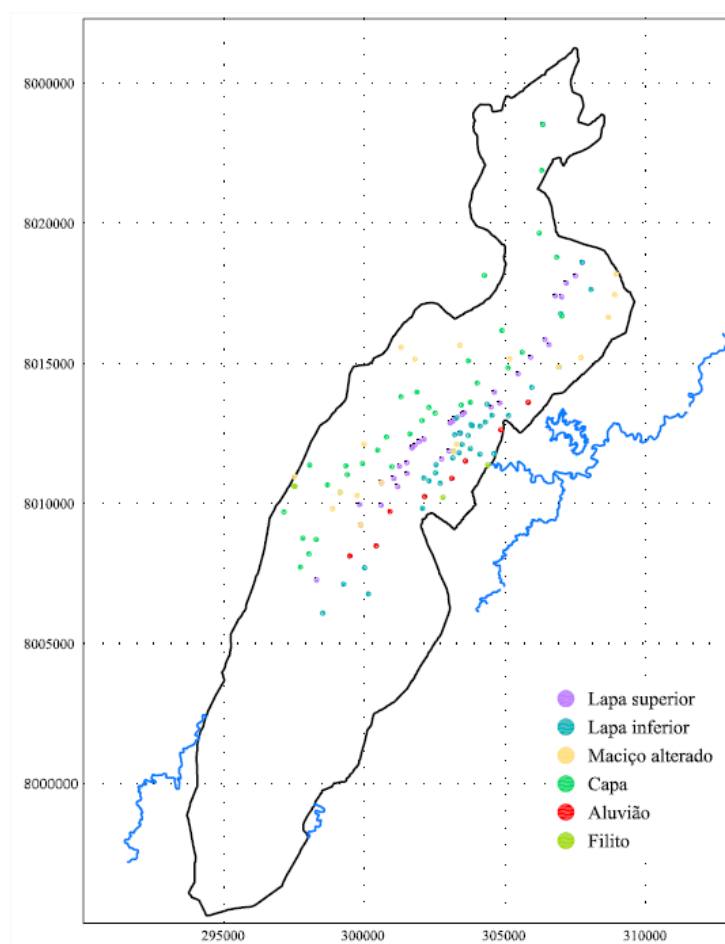


Figura 4.9 - Modelo numérico de fluxo em FEFLOW – Pontos de Calibração 2013.

Tabela 4.4 - Distribuição dos pontos de calibração de cargas hidráulicas

Unidade Hidrogeológica	No. Pontos Calibração	Camada Numérica*
Aluvião	8	2
Maciço Alterado	18	4
Capa	34	8
Lapa Superior	35	19
Filito	3	21
Lapa Inferior	37	25

*Refere-se à camada numérica em que foram inseridos os pontos de calibração, correspondente à respectiva unidade hidrogeológica no modelo.

Para efeito de calibração das cargas hidráulicas no modelo numérico (estado estacionário) considerou-se a média dos níveis d'água correspondentes ao período janeiro - dezembro de 2013 e estes resultados foram verificados com a descarga média da mina. Os resultados da calibração são apresentados no item 4.5.3.

4.5.2.

Revisão e modificação das condições de contorno

Em termos gerais, as condições de contorno anteriormente aplicadas no modelo foram mantidas, incluindo o último avanço da lavra da mina. Contudo, uma modificação essencial foi realizada referente à condição de contorno empregada para representar o rio e a sua restrição. Outras pequenas modificações também foram feitas para corrigir a condição da mina em lugares onde além de se comportarem como um dreno estavam tendo um comportamento de fonte de água, devido a que a sua restrição não estava sendo imposta. Neste sentido, foram adotadas as seguintes condições:

- o Recarga: mantida conforme modelo existente correspondente a 3 zonas de recarga uniforme de alta precipitação, precipitação média e precipitação nula. A recarga é aplicada apenas sobre a camada superior do modelo (C.C. tipo 2). Isto representa uma entrada de água no modelo de 13990 m³/h.
- o Rio Santa Catarina: simulado no modelo anterior como uma C. C Tipo 3 (*Fluid transfer BC*, ver item 2.3.3.4), com um fator limitante de fluxo, que impedia que o rio se compasse como uma fonte infinita de água para o aquífero. Esta condição foi corrigida por representar apenas o fluxo gerado do rio para o aquífero, mas não representando a interconexão do lençol freático entre o rio e o aquífero. Portanto, verificou-se que a condição adequada para ter uma representação mais realista do sistema tanto em termos de fluxo quanto na posição do lençol freático seria a C.C. tipo 1, a qual foi aplicada.
- o Córrego Barroquinha e Lagoa Feia: Na realidade se esta condição for mudada para o tipo usado no caso do rio Santa Catarina, as repostas não apresentariam alterações no fluxo, *i.e.*, a C.C. Tipo 1 e Tipo 3 estariam se comportando da mesma forma desde que ambas têm a restrição de fluxo máximo de zero. Portanto, para manter uma uniformidade na representação do rio foi atribuída a C.C. Tipo 1.
- o A mina subterrânea: foi mantida a C.C. tipo 1 com a sua restrição de fluxo máximo de zero, a qual representa o avanço da lavra como pontos com apenas cargas de elevação, devido a que estes encontram-se em contato com

a atmosfera (pressão =0). Neste caso foi apenas adicionada a restrição em alguns pontos que além de estarem comportando-se como drenos estavam tendo também um comportamento como fonte de água.

4.5.3.

Recalibração do modelo numérico para o meio poroso contínuo-fraturado 2014

Feitos os ajustes mencionados acima, iniciou-se o processo de recalibração (item 2.4) do modelo contínuo-fraturado propriamente dito, aplicada apenas aos materiais geológicos e não às estruturas (falhas), *i.e.*, as propriedades hidráulicas das fraturas (elementos 2D, Lei de Darcy) não foram modificados¹⁰ neste processo.

Este processo de recalibração tem como objetivos principais dois aspectos: a reprodução da vazão atualmente bombeada pela mina (11000 m³/h, de janeiro a dezembro de 2013) e a correspondência entre as cargas hidráulicas simuladas pelo modelo e aquelas medidas em campo. Contudo, esta recalibração deve considerar a resposta observada da modificação das condições de contorno atribuídas para representar o rio Santa Catarina, córrego Barroquinha e da Lagoa Feia, que modificaram, ou melhor, incrementaram numericamente o fluxo no rio.

Um dos resultados da calibração foi o incremento na vazão do rio para a mina, que alcançou um valor de 3600 m³/h. Este seria um valor mais próximo ao registrado no campo, sendo que antes o rio aportava aproximadamente 400 m³/h para a mina.

Neste estudo de mina subterrânea, a condutividade hidráulica das unidades hidrogeológicas é o parâmetro hidráulico a ser modificado, usando o método de Tentativa e Erro (Item 2.4.1.1). Este processo de ajuste é realizado sob o contínuo controle da vazão atual bombeada da mina, estimada em 11000m³/h.

A Tabela 4.5 apresenta um sumário dos parâmetros recalibrados no modelo ao 2014, comparando estes com os parâmetros correspondentes à calibração anterior (Votorantim, 2013).

¹⁰ As características de espessura, condutividade, armazenamento e compressibilidade destas estruturas foram mantidas do modelo anterior.

Tabela 4.5 - Parâmetros hidrodinâmicos considerados no modelo de fluxo (modificado da Votorantim, 2013)

Unidade Hidrogeológica	Modelo calibrado (Votorantim, 2013)			Modelo recalibrado ao 2014		
	Cond. Hidráulica (k_x : m/s)	(Ss: 1/m) ¹	Anisotr. (k_h : k_v)	Cond. Hidráulica (k_x : m/s)	(Ss: 1/m) ¹	Anisotr. (k_h : k_v)
Sedimentos recentes (Aluvião)	4,00E-05	1,00E-04	10:1	4,60E-05	1,00E-04	10:1
Dolomito carstificado	1,00E-04	1,00E-04	1:1	1,00E-04	1,00E-04	1:1
Dolomito (Capa)	4,00E-06	1,00E-04	1:1	4,00E-06	1,00E-04	1:1
Xisto	1,00E-08	1,00E-04	1:1	1,04E-08	1,00E-04	10:1
Dolomito (Lapa superior)	1,00E-06	1,00E-04	1:1	1,39E-06	1,00E-04	1:1
Zona da brecha	1,11E-07	1,00E-04	1:1	1,00E-07	1,00E-04	1:1
Filito preto	4,00E-07	1,00E-04	1:1	4,00E-07	1,00E-04	1:1
Dolomito (Lapa inferior)	1,00E-06	1,00E-04	1:1	1,39E-06	1,00E-04	1:1
Estruturas (Falhas)	9,00E-02	1,00E-04	---	9,00E-02	1,00E-04	---

Conforme se observa na tabela acima, poucas modificações nas unidades hidrogeológicas foram necessárias com relação à calibração anterior. As modificações consistiram no: incremento da condutividade hidráulica dos sedimentos recentes (aluvião) de $4,0 \times 10^{-5}$ m/s para $4,60 \times 10^{-5}$ m/s, mantendo seu nível de anisotropia; incremento na condutividade hidráulica do Dolomito (Lapa superior) de $1,0 \times 10^{-6}$ m/s para $1,39 \times 10^{-6}$ m/s, mantendo a isotropia; e um leve incremento na condutividade hidráulica do Xisto, de $1,00 \times 10^{-8}$ m/s para $1,04 \times 10^{-8}$ m/s, mudando também o nível de anisotropia de 1:1 para 10:1. Essas modificações buscaram replicar não apenas os níveis d'água e fluxos observados, como a própria natureza do maciço rochoso, onde a matriz apresenta uma baixa condutividade hidráulica e o fluxo de água subterrânea ocorre preferencialmente pelas estruturas geológicas (neste caso, as falhas). Cabe a pena salientar que a partir desta análise foi observado que a unidade Dolomito (Lapa) é o material que rege o comportamento do modelo hidrogeológico.

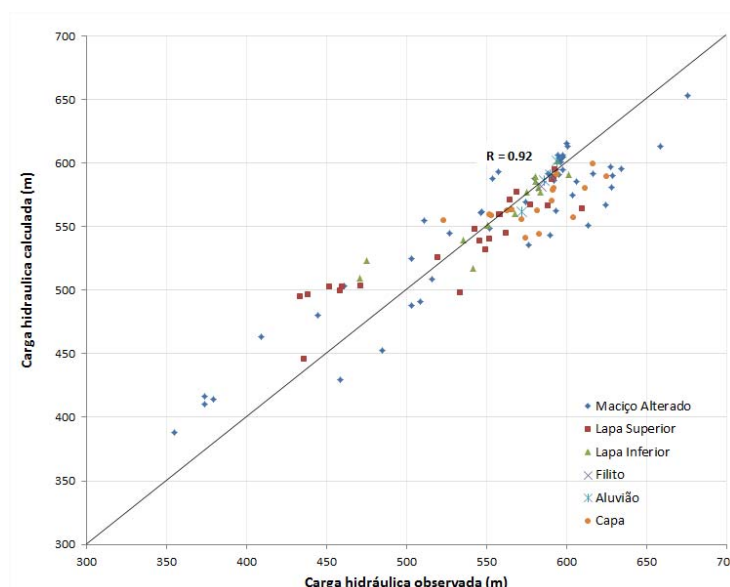


Figura 4.10 - Curva de calibração entre níveis medidos e calculados pelo modelo.

A curva de calibração do modelo para a mina atual (2014) é apresentada na Figura 4.10, onde é notada uma correspondência razoável entre as cargas hidráulicas medidas e simuladas. Os maiores desvios são observados na área da mina, onde as escavações aumentam consideravelmente a heterogeneidade do maciço devido ao grande alívio de tensões ao qual estão constantemente submetidos.

Os erros correspondentes, de acordo com a avaliação estatística foram os seguintes: $RMS = 26,34$ (Raiz média quadrática) $MAE = 20,24$ (Erro meio absoluto). Estes métodos de cálculo estão descritos no item 2.4.3.2. Os residuais obtidos (diferença entre nível observado e nível simulado) variam entre 0,29 m e 62,39 m. Estes resultados apresentam uma melhora em relação ao modelo Votorantim (2013).

A Tabela 4.6 mostra o balanço de massa obtido para a mina atual, após o processo de recalibração e a Figura 4.11 apresenta a superfície potenciométrica simulada.

Tabela 4.6 - Balanço de massa para a simulação da mina atual

Entrada	m ³ /h	Saída	m ³ /h
Recarga	12377,42	Rio Santa Catarina e Córrego Barroquinha	5016,08
Rio Santa Catarina	3639,17	Mina	11000,50
Total	16016,58	Total	16016,58

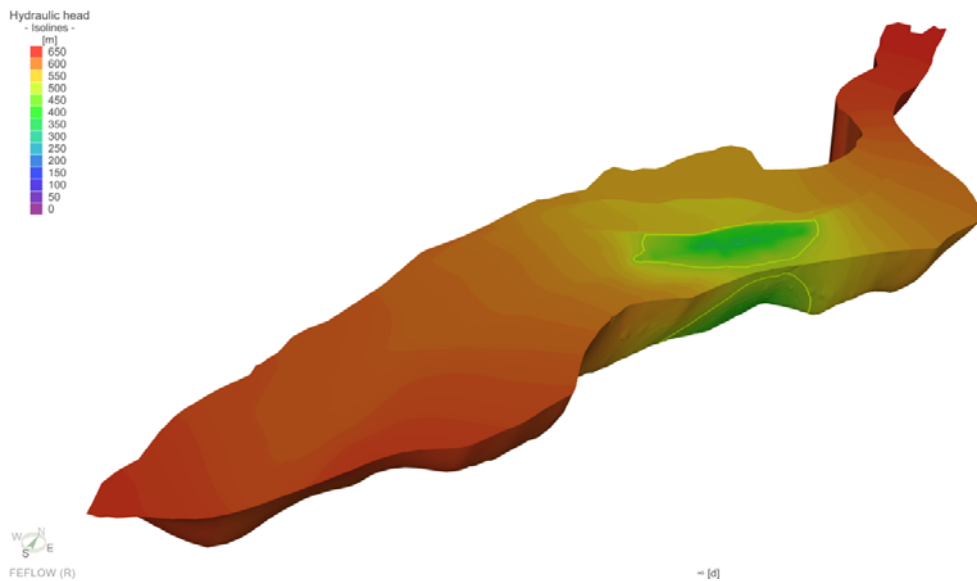


Figura 4.11 - Superfície potenciométrica simulada para a mina atual (Cota 326).

4.5.4. Implementação de elementos discretos 1D como feições cársticas

O incremento de dolinas na região da mina de Vazante pode estar relacionado com o rebaixamento do lençol freático, que se encontra em expansão, devido ao avanço da mina, sob o rio Santa Catarina (Figura 4.12, Figura 4.5). O surgimento destas formações representa um risco às operações em curso, dadas as consequências potencialmente severas de uma conexão direta em grande escala entre o rio e as escavações subterrâneas.

De acordo com a DHI Brasil (Guiguer *et al.*, 2013), três caminhos preferenciais de fluxo foram identificados através dos testes com traçadores realizados ao longo do rio Santa Catarina, realizados com o intuito de encontrar possíveis perdas de fluxo do rio para a mina através destes condutos. Segundo esses resultados, a vazão aproximada do fluxo do rio que perde para a mina é em torno de 3650 m³/h.

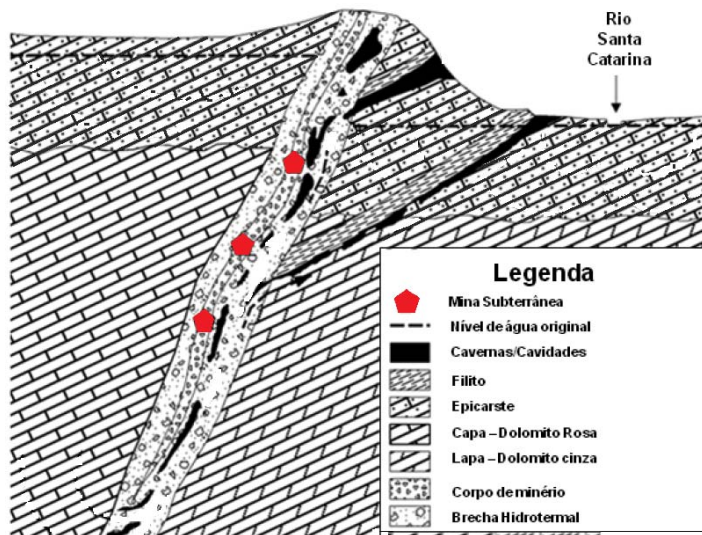


Figura 4.12 – Representação esquemática das feições cársticas na região da mina de Vazante (Bittencourt & Reis, 2012).

Estas formações geológicas estão sendo inseridas neste modelo numérico como elementos discretos 1D do tipo *Arbitrary node* (Figura 4.13) e posteriormente resolvidas em conjunto como o meio poroso contínuo, sendo os cálculos de fluxo nestes elementos baseados na Lei de Manning e no princípio das equações de fluxo básicas. Levando em consideração que as características discretas apenas incrementam a condutividade hidráulica nos nós conectados a estes elementos. A Figura 4.1 mostra as novas estruturas mapeadas (linhas amarelas) a serem consideradas no modelo de recalibração 2014.

Caracterização dos elementos discretos 1D (*Arbitrary Node*)

De acordo com o descrito nas condicionantes geológicas (item 4.2.2), as dolinas observadas no campo apresentaram diâmetros de até 1 metro na região superficial (Carste desenvolvido, Figura 4.2) e tendem a diminuir com a profundidade. Estas características são referência importante no momento de considerar a inclusão das feições cársticas no modelo numérico.

Uma análise de sensibilidade foi realizada para avaliar o comportamento do fluxo do sistema quando estas estruturas são consideradas no modelo. Esta análise indicará o incremento do fluxo que será infiltrado ao aquífero através destes elementos, ao mesmo tempo o rio deve manter uma perda de fluxo de 3600 m³/h para o aquífero.

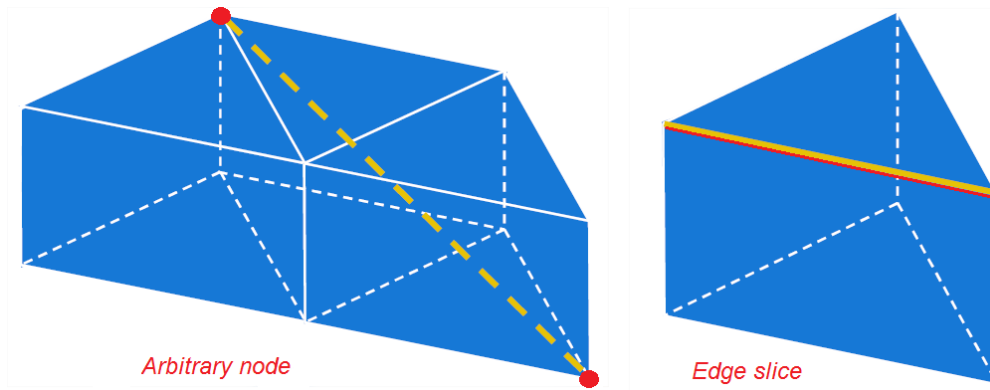


Figura 4.13 - Representação numérica dos elementos discreto 1D no FEFLOW: *Arbitrary node* e *Edge slice*. (DHI-Wasy, 2014)

Desde que no modelo numérico estes elementos são governados pela equação de Manning o incremento do fluxo nestas estruturas é verificado para diferentes diâmetros (áreas) e coeficiente de rugosidade Manning-Strickler, com o objetivo de verificar o aumento na vazão e de atribuir-lhes características geométricas-hidráulicas, em concordância com o observado e registrado no campo.

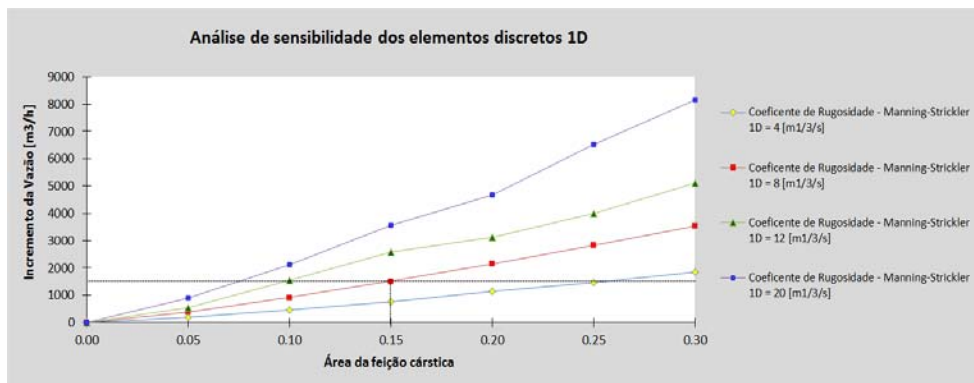


Figura 4.14 - Análise de sensibilidade para a determinação das variáveis que regem o comportamento de fluxo no interior dos elementos 1D (Feições cársticas).

Como mostrado na Figura 4.14, a variação do diâmetro e do coeficiente de rugosidade Manning-Strickler destas estruturas reflete-se no incremento da vazão de maneira proporcional. Inicialmente, a faixa de diâmetro analisada foi de 0 - 0,8m, com coeficientes de rugosidade variando entre 4 e 20. O objetivo inicial foi de verificar o aporte total destas estruturas na geração de um fluxo adicional que estas provocam no sistema, tendo como valor fixo a vazão que o rio descarga no aquífero de 3650 m³/h. Verificou-se então que um valor de 0,8m de diâmetro para diferentes coeficientes de rugosidade aumentam enormemente o valor da vazão,

sendo o coeficiente de rugosidade a variável mais influente nos resultados do sistema. Esta análise inicial serviu para corrigir os limites de análise destas variáveis, onde a faixa foi limitada para diâmetros de até 0,6m (área de 0,3m²) e coeficiente de rugosidade de até 8 (Figura 4.14), calculando, desta forma, um incremento do fluxo (nas feições cársticas) de 3490 m³/h.

A partir destes resultados, os elementos discretos estão sendo caracterizados com diâmetros de 0,44 m (área de 0,15 m²) e coeficiente de rugosidade Manning Strickler de 8, resultando em um incremento total de fluxo de entrada de 1528 m³/h para o sistema, o qual indicaria um valor razoável, que poderia ser justificado, primeiro, porque a seção transversal nestas feições diminui com a profundidade, levando em conta que os diâmetros observados no campo foram de até 1m; e segundo, porque um coeficiente de rugosidade Manning-Strickler de 8 poderia ser equivalente a tubulações preenchidas corroídas sem manutenção, gerando assim uma alta resistência à movimentação do fluxo.

4.5.5.

Recalibração do modelo numérico contínuo-fraturado considerando as feições cársticas

Uma vez inseridas estas feições cársticas no modelo numérico, este resultará em um fluxo descompensado, devido à presença destes elementos discretos, *i.e.*, com um excesso de 1528 m³/h, como indicado no item anterior. Este excesso de fluxo deve ser corrigido devido a que a região do rio (que a partir de agora abrange o rio mais as feições cársticas) deverá transmitir um fluxo de apenas 3650 m³/h para o aquífero. Este processo de ajuste requer uma recalibração das unidades hidrogeológicas para poder equilibrar novamente o fluxo esperado do rio para o aquífero, onde o meio poroso em geral deverá ter uma diminuição da sua condutividade devido à inserção destes elementos.

Para este segundo estágio de recalibração tanto as estruturas discretas (falhas) quanto as condições de contorno do modelo já vêm corrigidas (do estágio de recalibração anterior) e as feições cársticas estão sendo inseridas¹¹. Assim sendo, este processo contempla o ajuste do fluxo da região do rio para o aquífero

¹¹ No estágio anterior foram separadas as influências das fraturas e do meio poroso mais feições cársticas. Logo, as propriedades do meio poroso eram uma média entre o meio poroso real e as feições cársticas (como se fosse um meio equivalente).

em um total de 3650 m³/h, distribuídos em 2 parcelas, uma parcela correspondente ao conjunto de feições cársticas de 1528 m³/h e a outra parcela correspondente ao aporte só do rio de 2122 m³/h. Novamente, para obter o balanço hídrico do sistema as condutividades hidráulicas das unidades hidrogeológicas serão ajustadas, sempre controlando que a vazão atual bombeada da mina, estimada em 11000m³/h, não se modifique.

A Tabela 4.7 apresenta um sumário dos parâmetros finais recalibrados no modelo, comparando estes com os parâmetros aplicados na recalibração anterior.

Tabela 4.7 - Parâmetros hidrodinâmicos considerados no modelo de fluxo com feições cársticas.

Unidade Hidrogeológicas	Modelo recalibrado ao 2014 (sem feições cársticas)			Modelo recalibrado ao 2014 (com feições cársticas)		
	Cond. Hidráulica (kx: m/s)	(Ss: 1/m) ¹	Anisotr. (kh:kv)	Cond. Hidráulica (kx: m/s)	(Ss: 1/m) ¹	Anisotr. (kh:kv)
Sedimentos recentes (Aluvião)	4,60E-05	1,00E-04	10:1	2,90E-05	1,00E-04	10:1
Dolomito carstificado	1,00E-04	1,00E-04	1:1	8,1E-05	1,00E-04	1:1
Dolomito (Capa)	4,00E-06	1,00E-04	1:1	1,16E-06	1,00E-04	1:1
Xisto	1,04E-08	1,00E-04	10:1	5,78E-09	1,00E-04	10:1
Dolomito (Lapa superior)	1,39E-06	1,00E-04	1:1	8,10E-07	1,00E-04	1:1
Zona da brecha	1,00E-07	1,00E-04	1:1	1,11E-07	1,00E-04	1:1
Filito preto	4,00E-07	1,00E-04	1:1	4,00E-07	1,00E-04	1:1
Dolomito (Lapa inferior)	1,39E-06	1,00E-04	1:1	8,10E-07	1,00E-04	1:1
Estruturas (Falhas)	9,00E-02	1,00E-04	---	9,00E-02	1,00E-04	---

Conforme mostrado na tabela acima, sutis modificações nas unidades hidrogeológicas foram realizadas (com relação à recalibração anterior que não levava em conta as feições cársticas).

A curva de calibração final do modelo para a mina atual que considera as feições cársticas (2014) é apresentada na Figura 4.15, onde é novamente notada uma correspondência razoável entre as cargas hidráulicas medidas e simuladas. Valores de erros RMS =25,90, assim como MAE =20,13, ficaram dentro da faixa aceitável para modelagens numéricas. Os residuais obtidos (diferença entre nível observado e nível simulado) variam entre 0,47 m e 62,07 m.

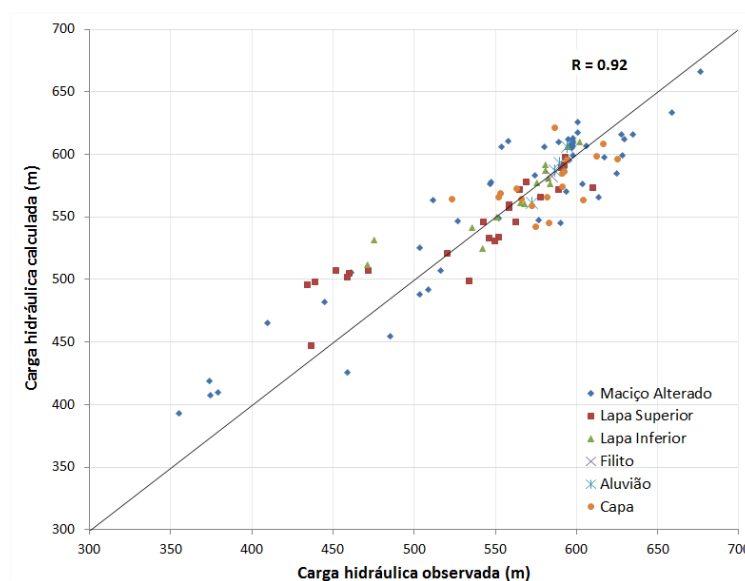


Figura 4.15 - Curva de calibração entre níveis medidos e calculados pelo modelo com feições cársticas.

A Tabela 4.8 mostra o balanço de massa obtido para a mina atual. A Figura 4.16 mostra a superfície potenciométrica simulada final.

Tabela 4.8 - Balanço de massa para a simulação da mina atual, considerando caminhos cársticos.

Entrada	m3/h	Saída	m3/h
Recarga	13031,67	Rio Santa Catarina e Córrego Barroquinha	5682,00
Rio Santa Catarina	3650,29	Mina	11000,50
Total	16681,96	Total	16682,50

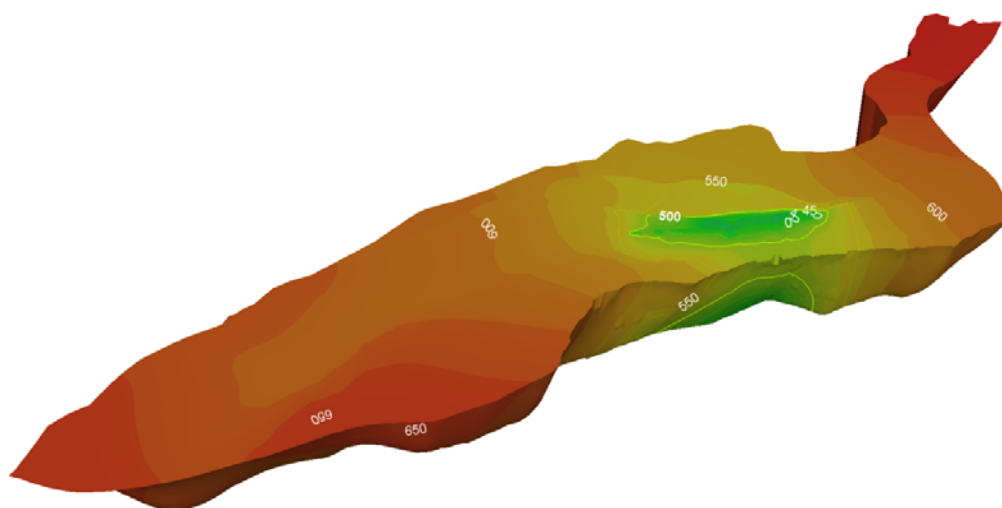


Figura 4.16 - Superfície potenciométrica simulada para a mina atual (Cota 326) considerando as feições cársticas no modelo.

4.6.

Cenários de comportamento de fluxo subterrâneo

Uma vez que o modelo numérico foi calibrado com e sem a implementação dos caminhos cársticos (item 4.5.4), avaliações de comportamento de fluxo são realizadas para ambos os casos para destacar a influência destas estruturas no padrão de fluxo das águas subterrâneas, já que estas geram fluxos preferenciais cujo fluxo descarga na mina.

Como analisado neste estudo de caso, o problema central está na infiltração d'água que descarga na mina, que pode ter uma porcentagem de aporte da água do rio. É importante também verificar o volume ou vazão de água que o rio Santa Catarina perde para o aquífero, e a parcela de contribuição das feições cársticas neste aspecto, principalmente na região de maior infiltração do rio. Neste contexto, quatro cenários de comportamento de fluxo são a seguir verificados: (1) sem considerar as feições cársticas; (2) sem considerar estes caminhos cársticos mas impermeabilizando a faixa do rio que está perdendo água para o aquífero; (3) considerando a presença destes caminhos cársticos e; (4) considerando estes caminhos cársticos e impermeabilizando o rio.

4.6.1.

Cenário 1: Fluxo subterrâneo sem considerar as feições cársticas

Os resultados desta análise de fluxo, sem a implementação destes caminhos cársticos, podem ser mais bem examinados em uma seção do modelo¹² (Figura 4.17) que passe pelo rio¹³ na região de maior infiltração de água para o sistema. Neste sentido, verifica-se a posição do lençol freático da mina atual (Figura 4.18), a região do rio que aporta fluxo para a mina (Figura 4.19) e as trajetórias de fluxo, em especial, aquelas do rio para a mina (Figura 4.20).

¹² A principal recarga do domínio é devido à precipitação (*rainfall*) e é delimitada em 3 regiões principais: de alta, baixa e praticamente sem precipitação.

¹³ A trajetória do rio é delimitada por pontos contínuos, cujas cores indicam as intensidades de fluxo que entram e saem do domínio.

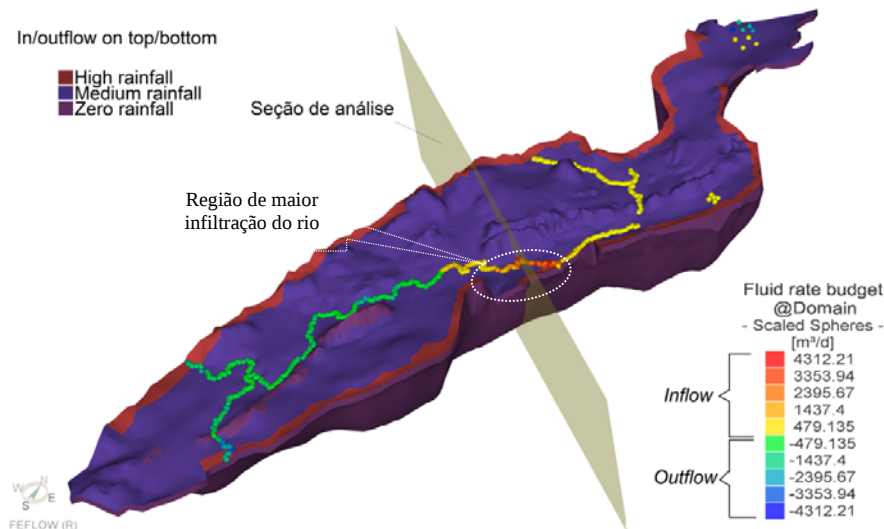


Figura 4.17 - Localização da seção transversal a ser analisada para os cenários 1 e 2 de análise de fluxo.

A Figura 4.18 é a seção de análise que indica a posição atual da mina e do lençol freático. Observa-se que a linha freática conecta-se com o rio (pontos cheios amarelos), o qual indica uma representação mais realista da sua posição, produto da modificação da condição de contorno (do Tipo 3 para Tipo 1) imposta no rio (item 4.5.2).

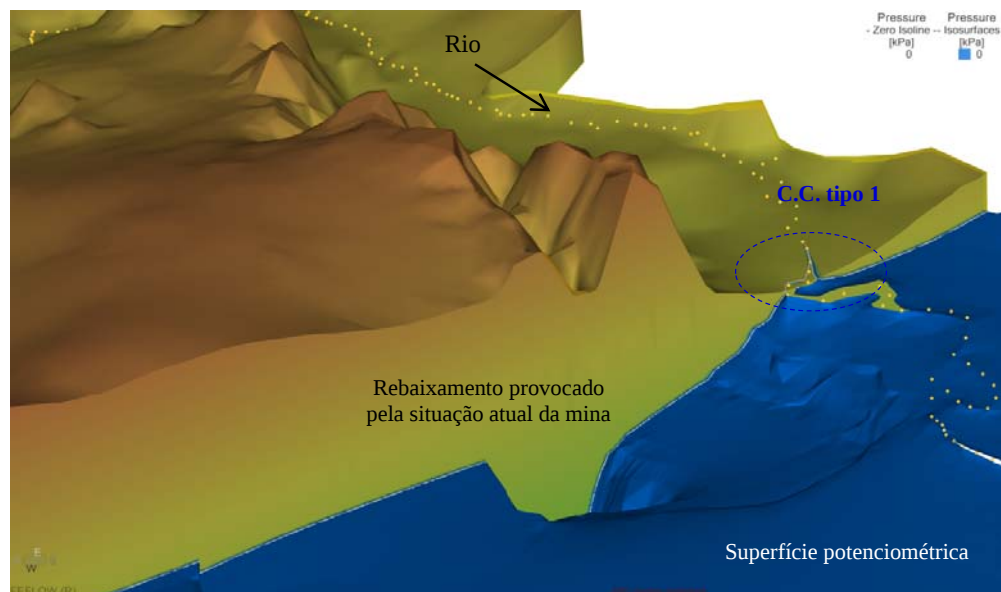


Figura 4.18 - Cenário 1: Superfície do lençol freático gerada pelas condições de contorno impostas no rio e na mina.

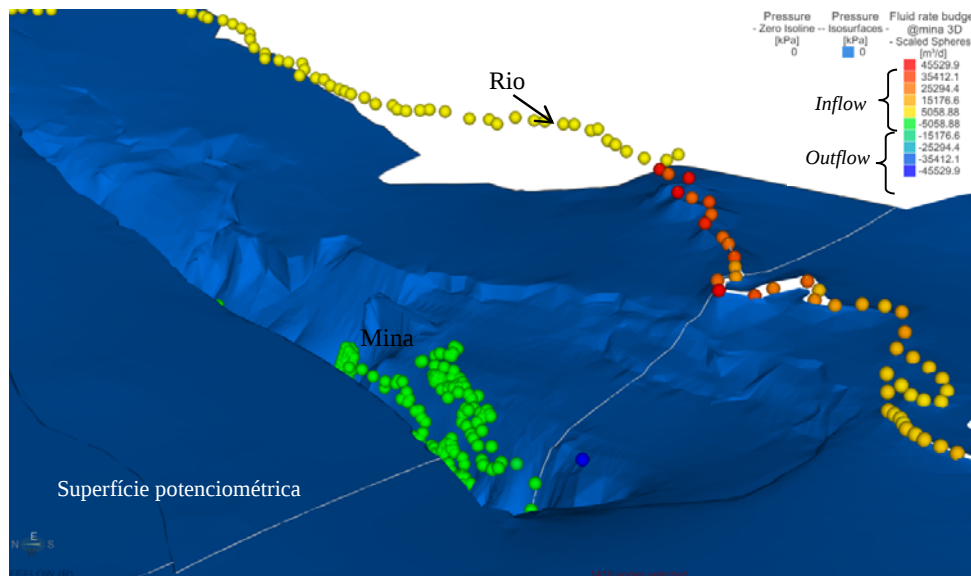


Figura 4.19 - Cenário 1: Intensidades de fluxo de recarga pelo rio e descarga na mina, para seu posterior bombeamento.

A Figura 4.19 é um *close-up* da região de maior infiltração do rio para o domínio, de comprimento aproximado de 2 km, como ilustrado na Figura 4.17. Nesta figura se indicam também as intensidades de fluxo de entrada *-inflow-* (nos nós) do rio para o modelo e a intensidade do fluxo de saída *-outflow-* através dos nós que estão representando à mina subterrânea.

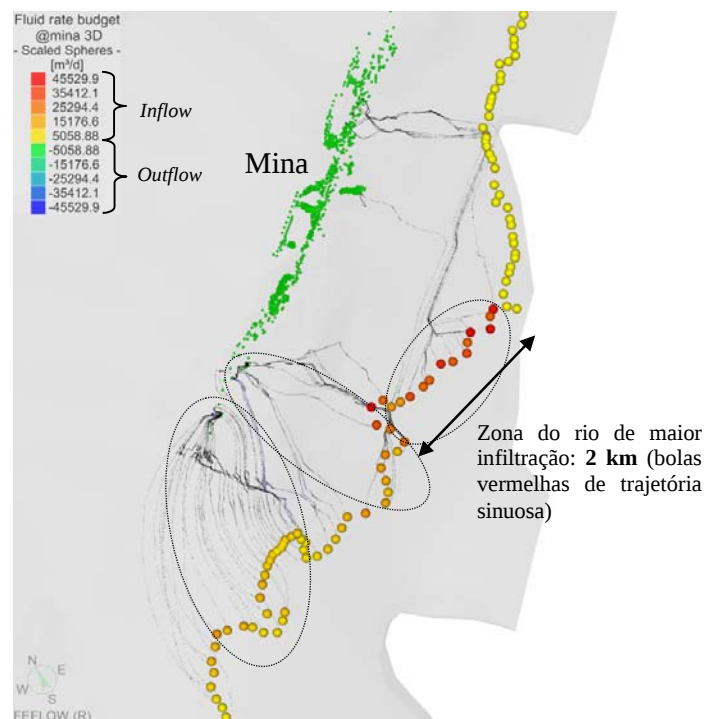


Figura 4.20 - Cenário 1: Trajetórias de fluxo (linhas de cor preto) do rio para a mina.

A Figura 4.20 ilustra as trajetórias das partículas que seguem desde o rio para a mina, verificando, dessa forma, que o rio está aportando água para o aquífero (e mina) a partir de regiões particulares. A partir desta figura também pode-se identificar com maior clareza os 2 km de comprimento do rio (do E 304340 N 8011562 ao E 303080 N 8010928) que apresenta a maior taxa de infiltração para o aquífero. Isto é importante porque uma das alternativas propostas a partir desta análise seria a impermeabilização parcial do rio, que abrangia apenas o comprimento de maior infiltração.

4.6.2.

Cenário 2: Fluxo subterrâneo sem as feições cársticas e impermeabilizando o rio

Uma alternativa como sistema de controle das águas seria a impermeabilização da superfície (item 3.4.1), de tal forma que o aporte desta fonte (rio) seja diminuído ao máximo possível. A partir do comprimento total de infiltração (Figura 4.21), que é em torno de 6,3 km, a primeira opção seria a impermeabilização do rio nesse comprimento, e como segunda opção seria impermeabilizar apenas os 2 km (Figura 4.23) correspondentes à região de infiltração máxima. Estas duas alternativas de impermeabilização estão sendo avaliadas e comparadas a seguir, para verificar a solução mais viável.

Opção (A) Impermeabilização do rio no comprimento total de infiltração

A partir dos resultados numéricos, a impermeabilização do rio elimina a infiltração nesses 6,3 km (faixa identificada no Cenário 1), porém, cria uma nova região de infiltração no rio (águas abaixo), de menor comprimento (0,72 km) que inicialmente era de exfiltração, tal como se mostra na Figura 4.22. Os valores de fluxo de entrada que o rio perde para o aquífero se reduziu de 3650 m³/h para 747 m³/h (80%) após o processo de impermeabilização.

Mas também destaca-se a importância que há em quantificar qual a vazão que o conjunto -rio e aquífero- descarga na mina subterrânea. Em uma primeira instância se pensaria que a redução seria na mesma proporção que a redução da vazão que tem o rio para o aquífero. Contudo, a redução conseguida do fluxo de descarga na mina é diferente, refletida só na redução de 11000 para 9020 m³/h (18%), isto devido a que se bem o sistema está tendo uma redução do fluxo de

entrada por parte do rio, o mesmo está tendo um incremento de recarga por parte das águas subterrâneas para a mina.



Figura 4.21 – Cenário 2: Representação esquemática do tramo do rio impermeabilizado (impermeabilização total)

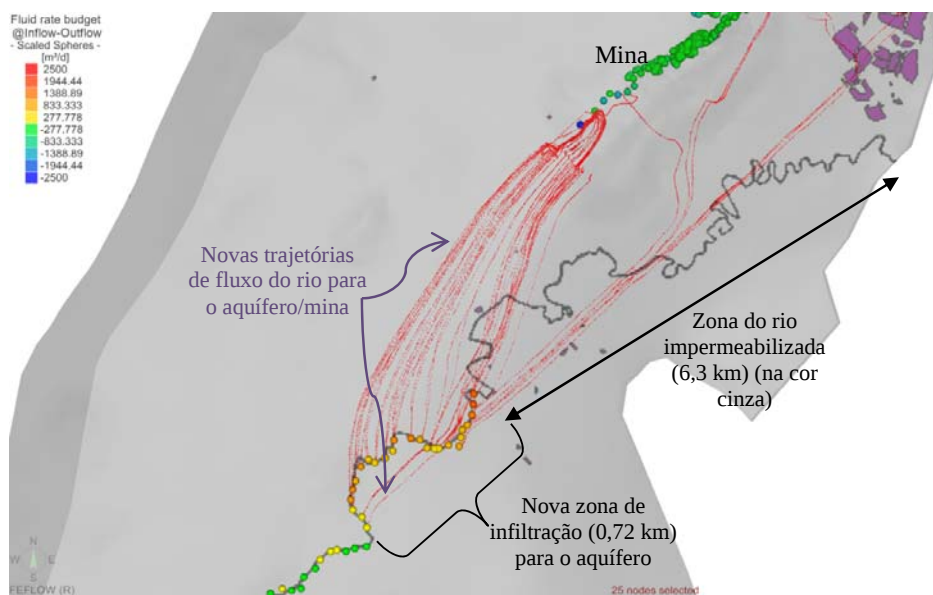


Figura 4.22 - Cenário 2: Zona de impermeabilização total do rio (6,3 km)

Opção (B) Impermeabilização do rio no comprimento parcial de infiltração

Como no caso da Opção (A), neste caso também se verificaram os resultados quando a impermeabilização do rio fosse realizada parcialmente, abrangendo apenas 2 km correspondentes à faixa de maior infiltração, como mostrado na Figura 4.20. Os resultados desta análise que impermeabiliza uma faixa de infiltração do rio também cria uma nova região (à jusante do tramo

impermeabilizado) com taxas de infiltração de intensidades maiores do que tinha antes (pois a infiltração já existia), de aproximadamente 1km de comprimento, como mostrado na Figura 4.24. O fluxo que o rio perde para o aquífero reduziu de 3650 para 2550 m³/h (30%). Contudo, o fluxo que ambos, rio e aquífero aportam para a mina se reduziu de 11000 para 10022 m³/h (8%).



Figura 4.23 - Cenário 2: Representação esquemática do tramo do rio impermeabilizado (impermeabilização parcial)

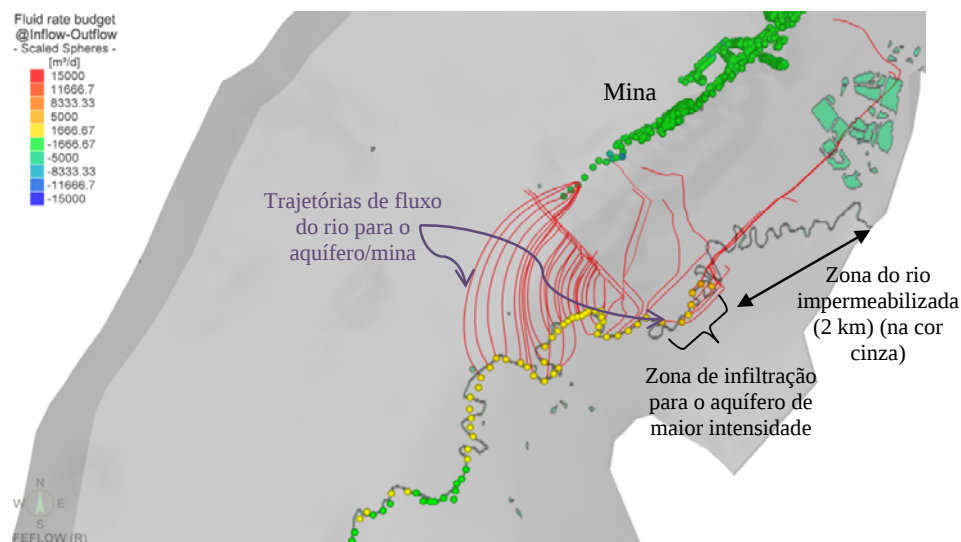


Figura 4.24 - Cenário 2: Zona de impermeabilização parcial do rio (2 km)

4.6.3.

Cenário 3: Fluxo subterrâneo considerando feições cársticas

Uma vez que as feições cársticas foram adicionadas explicitamente e o modelo numérico foi recalibrado (item 4.5.5), é possível avaliar a dinâmica do

fluxo deste sistema. O primeiro alvo desta análise é comparar a diferença destes resultados como aqueles que não consideraram estes caminhos preferenciais, e seguidamente, verificar a faixa do rio a ser impermeabilizada, como uma solução atenuante ao volume de água que se descarga na mina. Neste sentido, a avaliação dos resultados é realizada para a mesma seção transversal do cenário 1 (Figura 4.25).

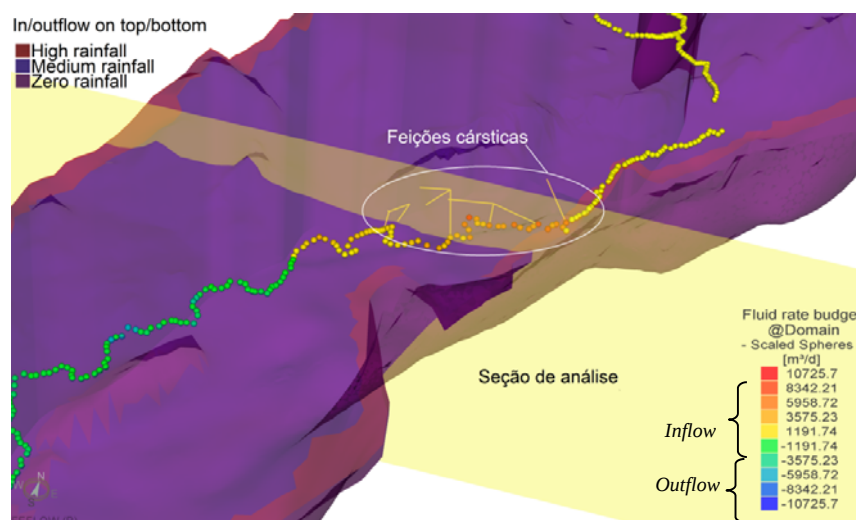


Figura 4.25 – Localização das feições cársticas no domínio e da seção de análise para os cenários 3 e 4.

De acordo com a análise de sensibilidade realizado no item 4.5.4, as feições cársticas estariam aportando 42% do fluxo que o rio perde para o aquífero. Se bem o efeito do aporte do rio para o aquífero (considerando ou não feições cársticas) é o mesmo, a análise que contempla as feições cársticas é mais realista porque permite identificar não só os caminhos preferenciais como fontes discretizadas (setas pretas na Figura 4.26) assim como também a faixa o rio de maior infiltração de uma forma mais legítima.

A partir desta análise verificou-se que a faixa crítica de infiltração do rio é maior, produto da posição destas feições cársticas nessa região. Esta faixa, que no Cenário 1 (item 4.6.1) era de 2km, nesta análise se incrementou para 4,5 km, devido a que estas feições estão moderadamente espalhadas ao longo do rio e atuam como pontos discretos de grandes infiltrações (Figura 4.27). A implementação destas feições cársticas, mais uma vez, melhoram o modelo por fornecer resultados mais confiáveis, principalmente, se algum processo de atenuação (de alto custo) tem de ser executado.

As posições das feições cársticas, nas coordenadas UTM, implementadas no modelo numérico estão listadas na Tabela 4.9 baseados no trabalho de Guiguer *et al.*, 2013.

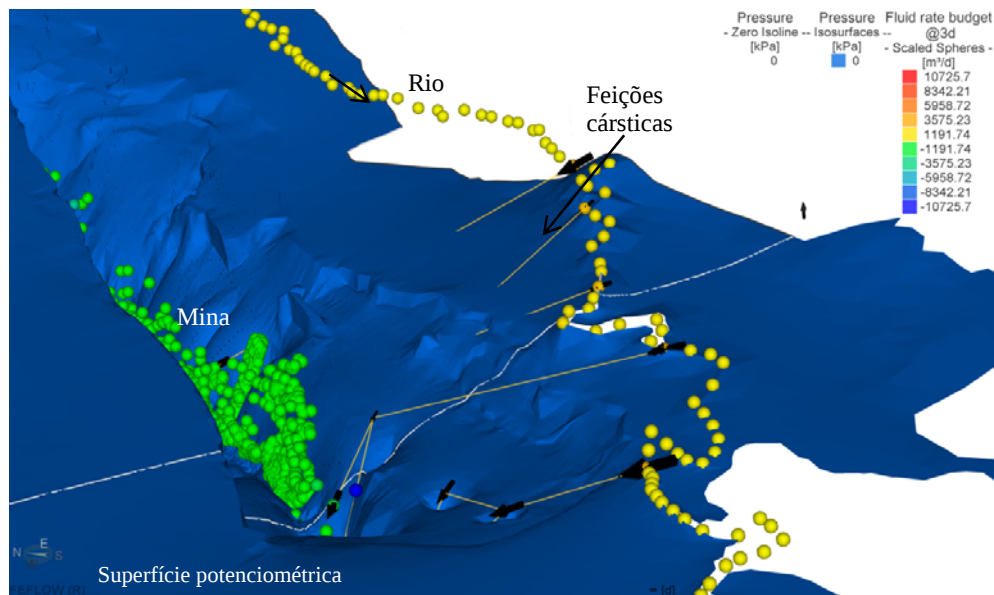


Figura 4.26 – Cenário 3: Características do fluxo influenciado através das feições cársticas.

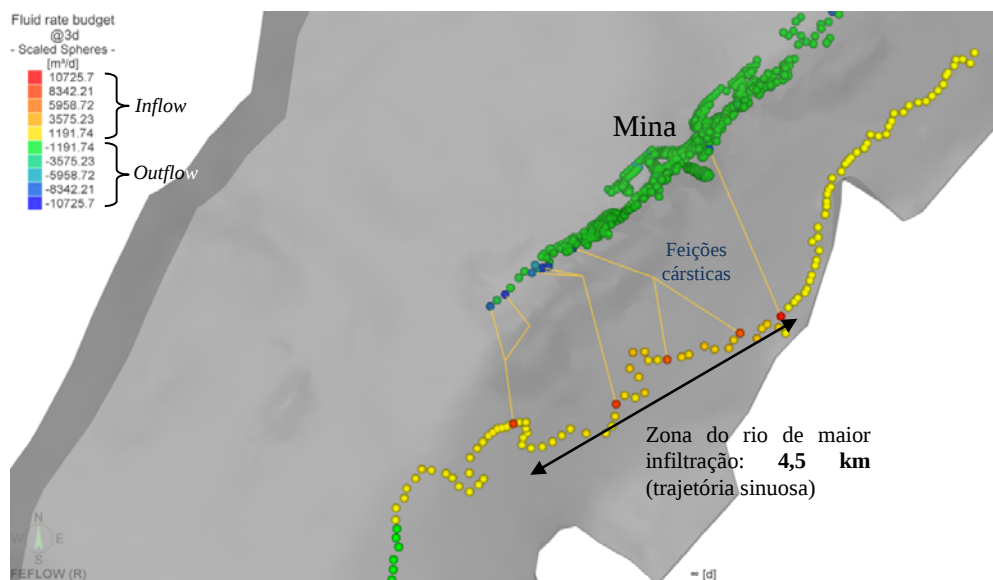


Figura 4.27 – Cenário 3: Faixa do rio de maior infiltração para o aquífero que inclui os caminhos preferenciais de fluxo.

Como verificado da análise de sensibilidade, o aporte que o sistema rio mais feições cársticas descarregam no aquífero é dividido duas parcelas, uma de 1528

m³/h (42%) das feições cársticas e 2072 m³/h (58%) do rio, dando um total de 3650 m³/h.

Tabela 4.9 - Localização UTM das feições cársticas no modelo numérico.

Coordenadas UTM	Fluxo de infiltração (m ³ /h)
E304395 8011662N	358
E304010 8011494N	240
E303311 8011249N	236
E302821 8010823N	290
E301834 8010646N	404

4.6.4.

Cenário 4: Fluxo subterrâneo considerando feições cársticas e impermeabilizando o rio

Da mesma forma como foi abordado no Cenário 2, neste caso a impermeabilização do rio no comprimento total e parcial do trecho de infiltração é também verificada, como o intuito de diminuir essa fonte de água (rio) ao máximo possível. No caso do comprimento parcial equivalente a 4,5 km de comprimento (identificado no Cenário 3), maior que no caso do Cenário 2 (2 km). Neste cenário o comprimento é maior devido a que as feições cársticas estão moderadamente distanciadas ao longo do tramo de infiltração.

Opção (A) Impermeabilização do rio no comprimento total de infiltração

A impermeabilização do rio ao longo de toda a faixa de infiltração (6,3 km) gerou uma nova região de infiltração de 1 km (à jusante do rio) de comprimento que anteriormente era região de exfiltração, como mostra na Figura 4.28. Os valores de vazão que o rio aporta para o aquífero diminuíram de 3650 para 325 m³/h (91% de redução) e no caso do fluxo que é descarregado na mina (águas do rio mais do aquífero) este mudou de 11000 para 8472 m³/h (23% de redução).

Opção (B) Impermeabilização do rio no comprimento parcial de infiltração

No caso da impermeabilização parcial do rio na faixa de maior infiltração, correspondente a 4,5 km, os valores de vazão que o rio aporta para o aquífero diminuíram de 3650 para 1043 m³/h (71%) e no caso do fluxo que é descarregado na mina (águas do rio mais do aquífero) este mudou de 11000 para 8835 m³/h (20%).

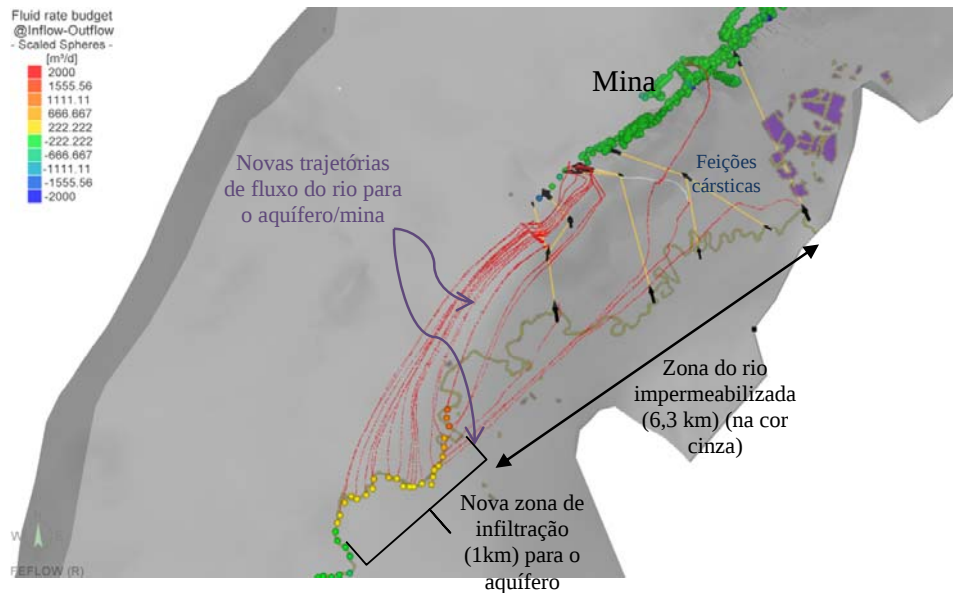


Figura 4.28 - Cenário 4: Zona de impermeabilização total do rio (3,6 km)

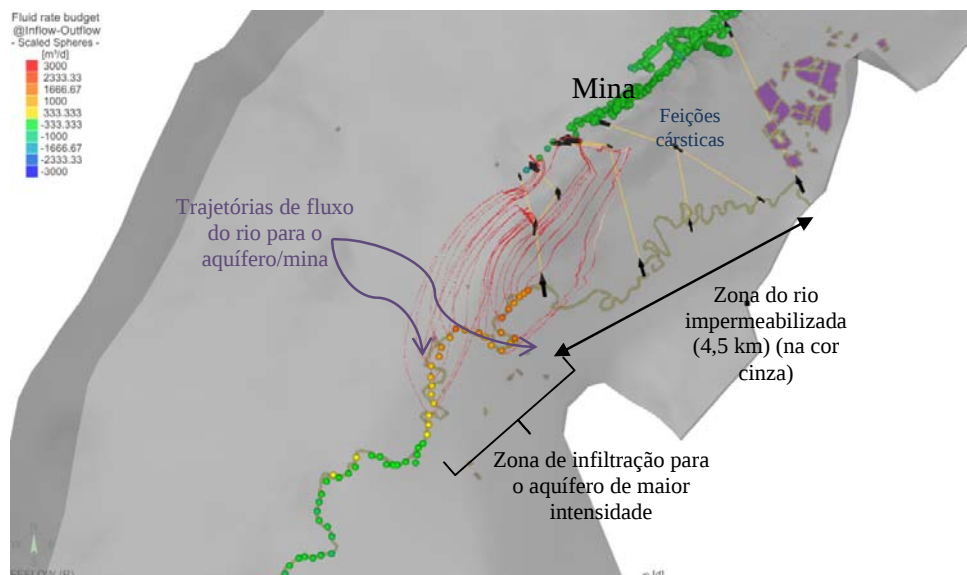


Figura 4.29 - Cenário 4: Zona de impermeabilização parcial do rio (4,5 km)

A partir destas análises feitas no Cenário 4 cabe observar que a eficiência do processo de impermeabilização no rio deve ser avaliada tanto técnica como economicamente. Os resultados mostraram uma redução de até 91% na vazão que o rio perde para o aquífero e de 23% como fluxo de descarga na mina (rio mais águas do aquífero), isto quando a impermeabilização dos 6,3 km é aplicada (faixa de infiltração total), porém, impermeabilizando apenas a faixa mais crítica (de maiores taxas de infiltração) de até 4,5 km a redução é de até 71% na vazão que o

rio perde para o aquífero e de 20% de redução como fluxo que descarga na mina (rio mais águas do aquífero). Esta diferença de 3% do fluxo que descarga na mina, que é o principal interesse, quando a faixa de infiltração do rio é impermeabilizada parcialmente, é de baixa significância. Porém, em termos econômicos, essa diferença no comprimento a ser impermeabilizando que pode economizar até 2 km deste procedimento é muito atraente. Uma análise comparativa econômica deveria ser feita para avaliar a redução desses 3% na impermeabilização do rio ou se seria melhor bombeá-lo.

4.6.5. Resumo dos resultados dos cenários

A seguir apresenta-se um resumo dos resultados referentes aos cenários em estudo.



Figura 4.30 – Comparação dos resultados das vazões de descarga dos cenários com e sem feições para o caso da Mina subterrânea.

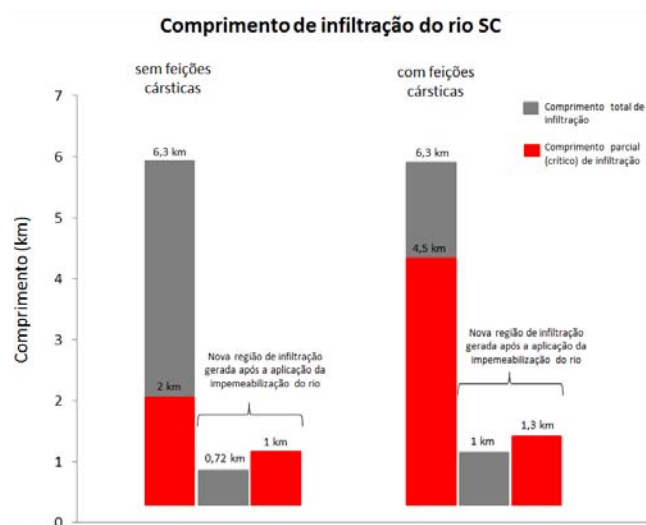


Figura 4.31 - Comparação dos resultados dos comprimentos de infiltração dos cenários com e sem feições para o caso da Mina subterrânea.