



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Sophia Cavalcante Varela

**Modelagem das Interações Entre as Águas Subterrâneas e Superficiais em um
Aquífero Cárstico sob o Regime de Bombeamento de uma Mina Subterrânea**

FLORIANÓPOLIS

2023

Sophia Cavalcante Varela

**Modelagem das Interações Entre as Águas Subterrâneas e Superficiais em um
Aquífero Cárstico, sob o Regime de Bombeamento de uma Mina Subterrânea**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Dr. Davide Franco

Co-orientador: Prof. Dr. Nilson Guiguer

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Varela, Sophia

Modelagem das Interações Entre as Águas Subterrâneas e Superficiais em um Aquífero Cárstico sob o Regime de Bombeamento de uma Mina Subterrânea / Sophia Varela ; orientador, Davide Franco, coorientador, Nilson Guiguer, 2023.

144 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Interação das águas subterrâneas e superficiais. 3. Modelagem de águas subterrâneas. 4. Ambiente cárstico. I. Franco, Davide. II. Guiguer, Nilson. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Sophia Cavalcante Varela

**Modelagem das Interações Entre as Águas Subterrâneas e Superficiais em um
Aquífero Cárstico, sob o Regime de Bombeamento de uma Mina Subterrânea**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 15 de dezembro de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Alexandra Finotti, Dr.(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Rodrigo Sérgio de Paula, Dr.(a)
Universidade Federal de Minas Gerais

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof.(a) Davide Franco, Dr.
Orientador(a)

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus orientadores, Prof. Davide Franco e Prof. Nilson Guiguer, por todo o apoio e orientação, que foram fundamentais para a conclusão desse trabalho.

Agradeço também ao Edmar Araújo e à Nexa Resources, por terem colaborado comigo e fornecido as informações necessárias para a realização dessa pesquisa.

Um agradecimento especial para o meu noivo, Christian Preis, pois sem o seu apoio eu provavelmente não teria concluído essa dissertação.

Gostaria agradecer novamente ao Nilson Guiguer, também como meu chefe, afinal foi quem me convenceu a iniciar essa trajetória do mestrado e sempre me deu todo o suporte possível para que eu o concluísse. Nesse âmbito, também agradeço aos meus colegas da Water Services and Technologies, pelo apoio durante esse período do mestrado.

À DHI também ofereço meus sinceros agradecimentos, pela disponibilização das licenças gratuitas dos software, que me possibilitou fazer essa pesquisa e adquirir todos esses aprendizados.

Por fim, agradeço a minha família, de sangue e de coração, que sempre me apoiou, mesmo durante os momentos mais difíceis.

RESUMO

Estima-se que entre 9% e 25% da população global dependa em grande parte ou inteiramente das águas subterrâneas obtidas em zonas cársticas. No entanto, seu funcionamento, desenvolvimento e nível de fragilidade permanecem em grande parte desconhecidos, pois precisam de técnicas específicas de exploração e abordagens de modelagem. Um exemplo de zona cárstica pode ser encontrado no município de Vazante, no estado de Minas Gerais, Brasil, que se localiza em uma área cárstica explorada pela indústria da mineração subterrânea desde o ano de 1989. Na superfície, no trecho próximo à mina, o rio Santa Catarina seca durante o período de estiagem desde 2014. Neste contexto, o presente estudo buscou avaliar de forma integrada as interações entre as águas subterrâneas e superficiais em um ambiente cárstico, sob influência do rebaixamento causado pela mina subterrânea, a partir do acoplamento do modelo hidrogeológico em *FEFLOW* e o modelo hidrodinâmico em *Mike Hydro River*. Dessa forma, foi possível representar as dinâmicas de fluxo que levaram ao secamento do rio no ano de 2021. A calibração dos modelos acoplados para a vazão no rio Santa Catarina foi satisfatória, com um índice KGE de 0,72 na estação a montante da influência da mina, e de 0,77 na estação sob influência direta do rebaixamento da mina. A representação do trecho próximo da mina onde o leito seca se mostrou um desafio, visto que a vazão nesse trecho é influenciada diretamente pelo escoamento nos condutos cársticos que conectam o rio à mina subterrânea. Observa-se que as taxas de infiltração aumentam nesse trecho, onde há um nível maior de fraturamento do meio cárstico. Nesse trecho, os dados observados mostraram que a taxa de infiltração mensal média foi de 2.834 m³/h, variando entre 411 m³/h e 7.200 m³/h no período seco de 2021. O modelo acoplado apresentou a vazão infiltrada média de 706 m³/h pelo leito do rio (difuso) e 7.898 m³/h pelos condutos cársticos (pontual), resultando em um trecho seco médio de 590 m e máximo de 8,2 km, durante o período seco de 2021. Por fim, o estudo realizado demonstrou a aplicabilidade do acoplamento dos modelos de águas subterrâneas e superficiais, por meio do plugin *PiMIKE1D* para a representação de baixas vazões, em um estudo cuja dinâmica é controlada pela alta heterogeneidade hidrogeológica do ambiente cárstico. Apesar de a demanda computacional para a execução desse acoplamento ter sido considerada alta, conclui-se que essa metodologia pode ser aplicada para a avaliação integrada de águas superficiais e subterrâneas em ambientes hidrogeológicos complexos, onde a avaliação e/ou gestão integrada dos recursos hídricos muitas vezes é essencial e pouco abordada.

Palavras-chave: Interação das águas subterrâneas e superficiais. Modelagem de águas subterrâneas. Ambiente cárstico. FEFLOW. Acoplamento com Mike Hydro River.

ABSTRACT

It is estimated that between 9% and 25% of the global population relies mainly or entirely on groundwater obtained from karst zones. However, their functioning, development and level of fragility remain largely unknown since they require specific exploration techniques and modeling methods. An example of a karst zone can be found in the city of Vazante, in the state of Minas Gerais, Brazil, which is located in a karst area exploited by an underground mining industry since 1989. On the surface, close to the mine, the Santa Catarina River has dried up during the dry season since 2014. The present study used a coupling of the hydrogeological model in FEFLOW and the hydrodynamic model in Mike Hydro River to analyze in a comprehensive way the interactions between groundwater and surface water in a karst environment, influenced by the lowering caused by the underground mine. In this way, it was possible to represent the flow dynamics and the river falling dry in the year 2021. The calibration of the coupled models for the flow in the Santa Catarina River was satisfactory, with a KGE index of 0.72 at the station upstream of the influence of the mine, and 0.77 at the station under the direct influence of the water table lowering. The representation of the river falling dry proved to be a challenge, because the flow in this section is directly influenced by the flow in the karst conduits that connect the river to the underground mine. The infiltration rates increase in this stretch, where there is a higher level of fracturing of the karst environment. In this section of the river, the observed data showed that the average monthly infiltration rate was 2,834 m³/h, varying between 411 m³/h and 7,200 m³/h in the dry period of 2021. The coupled model presented an average infiltration flow of 706 m³/h through the riverbed and 7,898 m³/h through the karst conduits, resulting in an average dry stretch of 590 m and a maximum of 8.2 km, during the dry period of 2021. Ultimately, the study demonstrated the applicability of groundwater and surface water coupling using the PiMIKE1D plugin, to simulate low flows, in a study where dynamics is controlled by the high hydrogeological heterogeneity of the karst environment, which models karst conduits as discrete features. It is concluded that, despite the large computational cost associated with this coupling, this methodology can be applied to the integrated assessment of surface and groundwater in complex hydrogeological environments, where the integrated assessment of water resources is often essential yet understudied.

Keywords: Surface-groundwater interactions. Groundwater modeling. Karst. FEFLOW. Coupling with Mike Hydro River.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama da geomorfologia hidrocarstica.....	23
Figura 2 – Modelo conceitual das interações entre as águas subterrâneas e superficiais em um sistema cárstico.....	26
Figura 3 – Descrição esquemática do processo de carstificação e sua influência no comportamento hidrodinâmico da vazão na nascente cárstica.....	27
Figura 4 – Seção do canal com o grid do Mike11.....	32
Figura 5 – Representação da condição de contorno Tipo 1.....	34
Figura 6 – Representação da condição de contorno Tipo 2.....	35
Figura 7 – Representação da condição de contorno Tipo 3.....	36
Figura 8 – Aplicações das feições discretas no FEFLOW.....	37
Figura 9 – Princípios básicos do acoplamento com o plugin PiMIKE1D.....	39
Figura 10 – Escopo da modelagem numérica.....	41
Figura 11 – Fluxograma metodológico geral da pesquisa.....	42
Figura 12 – Mapa de Localização da área de estudo.....	46
Figura 13 – Mapa Geológico da área do entorno do empreendimento.....	48
Figura 14 – Mapa de localização das seções hidrogeológicas.....	53
Figura 15 – Seção hidrogeológica A-A'.....	54
Figura 16 – Seção hidrogeológica C-C'.....	54
Figura 17 – Arranjo tridimensional do relevo, evidenciando, em amarelo, o limite esquerdo da bacia sedimentar dolomítica; em azul, o curso d'água, e em vermelho, a extensão máxima do rio Santa Catarina sujeita ao secamento.....	56
Figura 18 – Níveis de desenvolvimento das feições cársticas.....	57
Figura 19 – a. Infiltração por gotejamento da porosidade secundária, b. infiltração por fraturas, c. infiltração por condutos cársticos.....	58
Figura 20 – Mapa Hipsométrico da bacia hidrográfica.....	59
Figura 21 – Perfil longitudinal do rio principal.....	61
Figura 22 – Localização das estações linimétricas e estação pluviométrica.....	61
Figura 23 – Médias anuais de precipitação, entre 1991 e 2017.....	62
Figura 24 – Média da precipitação mensal comparada à evaporação média mensal.....	62
Figura 26 – Comparação do monitoramento fluviométrico nas estações Montanhosa (montante do trecho sujeito ao secamento) e Rochedo (jusante do trecho sujeito ao secamento).....	64

Figura 27 – Vazão média mensal bombeada comparada à precipitação mensal entre 1990 e 2021.	65
Figura 28 – Localização de dois sumidouros, onde foi feita a injeção de um dos traçadores.	66
Figura 29 – Localização dos piezômetros na área de estudo.	68
Figura 30 – Fluxograma do modelo hidrodinâmico no Mike Hydro River.	69
Figura 31 – Gráfico de dispersão da validação dos dados de vazão obtidos a partir dos linígrafos e do <i>Flow-Tracker</i> para as estações Ranchinho, Rochedo e Carranca.	73
Figura 32 – Domínio do modelo hidrodinâmico no MHR.	74
Figura 33 – Seções Transversais primárias do modelo no MHR.	77
Figura 34 – Seções Transversais adicionais levantadas a partir da batimetria.	78
Figura 35 – Trechos de delimitação do coeficiente de rugosidade de Manning.	80
Figura 36 – Esquema conceitual do modelo hidrodinâmico.	86
Figura 37 – Vazões médias mensais das estações linimétricas, calculadas a partir das curvas-chave.	86
Figura 38 – Estimativa do balanço hídrico conceitual do modelo hidrodinâmico considerando máxima contribuição de escoamento superficial pela área de contribuição das sub-bacias hidrográficas.	88
Figura 39 – Comparativo do nível (m) e vazão (m ³ /d), para os dados observados e simulados: a. na estação Pinheiro; e b. na estação Ranchinho.	90
Figura 40 – Curva de Permanência das estações: a. Pinheiro; b. Ranchinho, a partir dos dados de vazão simulados e observados para o ano de 2021.	92
Figura 41 – Principais componentes do modelo hidrogeológico, na camada 1.	96
Figura 42 – Unidades hidrogeológicas do modelo numérico e Seção Transversal A e B.	96
Figura 43 – Localização do trecho seco do rio no início do período seco, em 30/05/2021, com o total de 1,7 km, e no final do período seco, em 25/10/2021, com o total de 5,2 km (máximo); além dos condutos cársticos representados no modelo.	99
Figura 44 – <i>Box plot</i> da avaliação mensal do trecho seco do rio Santa Catarina no ano de 2021.	100
Figura 45 – Taxa de infiltração calculada para o trecho entre a estação Ranchinho e o sumidouro Bambuzal no período seco.	101
Figura 46 – Discretização do <i>in</i> e <i>out transfer rate</i> do modelo calibrado.	105

Figura 47 – Área transversal dos contudos cársticos no modelo calibrado.....	105
Figura 48 – Comparativo do nível (m) e vazão (m ³ /d), para os dados observados e simulados, considerando o acoplamento entre as águas superficiais e subterrâneas: a. na estação Pinheiro; e b. na estação Ranchinho.	107
Figura 49 – Curva de Permanência das estações: a. Pinheiro; b. Ranchinho, a partir dos dados de vazão simulados e observados para o ano de 2021, considerando o acoplamento entre as águas subterrâneas e superficiais.	108
Figura 50 – Curva de Permanência dos pontos de referência no trecho do rio sujeito ao secamento; sendo um ponto a cada km do rio, a contar a partir do sumidouro Bambuzal, no sentido de montante.	109
Figura 51 – Trecho seco simulado no rio Santa Catarina no dia 05/05/2021, de 2,3 km.	109
Figura 52 – Máximo trecho seco simulado no rio Santa Catarina no dia 15/11/2021, de 8,2 km.	110
Figura 53 – Vazões médias simuladas na mina de Vazante, nos condutos cársticos e, especificamente no Tímpano.	111
Figura 54 – Comparação da infiltração ao longo do leito do rio (difusa) e pelos condutos cársticos, para o trecho entre Ranchinho e Bambuzal.....	112
Figura 55 – Infiltração ao longo do leito do rio no trecho entre Ranchinho e Bambuzal	112
Figura 56 – a. Vista de montante da estação Carranca no Ribeirão Carranca; e b. Vista de jusante da estação Carranca no Ribeirão Carranca.....	124
Figura 57 – Seção Transversal da estação Carranca computada no modelo numérico.	124
Figura 58 – Curva chave da estação Carranca, considerada para o cálculo das condições de contorno no modelo numérico.....	125
Figura 59 – a. Vista de montante da estação Guariroba 2 no Córrego Guariroba.; e b. Vista de jusante da estação Guariroba 2 no Córrego Guariroba.....	125
Figura 60 – Seção Transversal da estação Guariroba 2 computada no modelo numérico.....	126
Figura 61 – Curva chave da estação Guariroba 2, considerada para o cálculo das condições de contorno no modelo numérico.....	126
Figura 62 – a. Vista de montante da estação Carrapato no Ribeirão Carrapato; e b. Vista de jusante da estação Carrapato no Ribeirão Carrapato.	127

Figura 63 – Seção Transversal da estação Carrapato computada no modelo numérico.	127
Figura 64 – Curva-chave da estação Carrapato, considerada para o cálculo das condições de contorno no modelo numérico.....	128
Figura 65 – a. Vista de montante da Estação Pinheiro, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Vista de jusante da Estação Pinheiro, no rio Santa Catarina.....	128
Figura 66 – Seção Transversal da estação Pinheiro computada no modelo numérico.	129
Figura 67 – Curva-chave da estação Pinheiro.	129
Figura 68 – a. Vista de montante da Estação Ranchinho, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Vista de jusante da Estação Ranchinho, no rio Santa Catarina	130
Figura 69 – Seção Transversal da estação Ranchinho computada no modelo numérico.....	130
Figura 70 – Curva-chave da estação Ranchinho.	130
Figura 71 – a. Vista de montante da Estação Montanhesa, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Vista de jusante da Estação Montanhesa, no rio Santa Catarina	131
Figura 72 – Seção Transversal da estação Montanhesa computada no modelo numérico.....	131
Figura 73 – a. Vista de montante da Estação Rochedo, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Vista de jusante da Estação Rochedo, no rio Santa Catarina..	132
Figura 74 – Seção Transversal da estação Rochedo computada no modelo numérico.	132
Figura 75 – Curva-chave da estação Rochedo, considerada para o cálculo das condições de contorno no modelo numérico.....	133
Figura 76 – a. Vista de montante da Estação RPPN, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Vista de jusante da Estação RPPN, no rio Santa Catarina	133
Figura 77 – a. Mapa geológico do modelo; e b. Mapa hipsométrico do domínio do modelo.	135
Figura 78 – Mapas potenciométricos da área do modelo em a. Final do período seco, em outubro de 2019; e b. Final do período chuvoso, em março de 2020.	137
Figura 79 – Representação da malha numérica do modelo, com a distribuição espacial das unidades hidroestratigráficas modeladas.	138

Figura 80 – Estruturas rúpteis regionais consideradas no modelo.....	140
Figura 81 – Feições discretas locais consideradas no modelo: a) estruturas rúpteis locais de alto e médio potencial hidrogeológico; e b) condutos cársticos potencialmente conectantes entre o rio Santa Catarina e a mina subterrânea.	141
Figura 82 – Correlação entre as cargas hidráulicas calculadas e as observadas nos piezômetros (setembro de 2015).....	143
Figura 83 – Correlação entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas nos piezômetros (abril de 2016).....	143

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição das feições discretas do FEFLOW.	37
Quadro 2– Potencial hidrogeológico das formações na área de estudo.	50
Quadro 3 – Descrição das unidades hidrogeológicas e respectivo comportamento hidrodinâmico.	51
Quadro 4 – Principais dados de entrada do modelo.	69
Quadro 5 – Comparação das vantagens e desvantagens da modelagem hidrodinâmica em 1D ou 2D/3D.	71
Quadro 6 – Características das seções transversais das estações linimétricas	82
Quadro 7 – Critérios para a aprovação da calibração e performance do modelo.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características morfométricas da bacia hidrográfica de estudo.	59
Tabela 3 – Localização e disponibilidade dos dados linimétricos. Em negrito constam as estações utilizadas como condições de contorno do modelo hidrodinâmico.....	63
Tabela 4 – Localização e disponibilidade dos fluviométricos, medidos com o <i>Flow-Tracker</i> . Em negrito consta o principal sumidouro do sistema.	63
Tabela 5 – Disponibilidade hídrica considerando a perda d'água pelo rebaixamento.	65
Tabela 6 – Distribuição dos piezômetros por unidade hidrogeológica na Mina de Vazante.	68
Tabela 7 – Correlação de Pearson para a validação dos dados de vazão obtidos a partir dos linígrafos e <i>Flow-Tracker</i> para as estações Carranca, Ranchinho e Rochedo.	73
Tabela 8 – Coeficiente de Manning (n) para cada trecho.....	82
Tabela 9 – Descrição das curvas-chave consideradas no modelo.....	84
Tabela 10 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas para 2021 e o período seco de 2021. Vazões calculadas a partir das curvas-chave das estações.	87
Tabela 11 – Coeficiente de Manning (n) do modelo hidrodinâmico calibrado	89
Tabela 12 – Índice KGE da estação Pinheiro, correspondente ao Trecho A, do modelo calibrado.....	90
Tabela 13 – Índice KGE da estação Ranchinho, correspondente ao Trecho B, do modelo calibrado	91
Tabela 14 – Condutividade hidráulica e armazenamento específico das unidades hidrogeológicas modeladas.....	97
Tabela 15 – Índice KGE da estação Pinheiro e Ranchinho, referente à calibração dos modelos acoplados.	106
Tabela 16 – Resultados da simulação.	111
Tabela 17 – Parâmetros físicos dos elementos discretos inseridos no modelo.	141
Tabela 18 – Valores calibrados de condutividade hidráulica das unidades hidrogeológicas e armazenamento específico.	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas;

COPASA – Companhia de saneamento de Minas Gerais;

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

Interações SW-GW – Interações entre as águas superficiais e subterrâneas

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

KGE – Índice de Eficiência de Kling-Gupta

MDE – Modelo Digital de Elevação

MHR – Mike Hydro River

MSE – Erro Quadrático Médio

NSE – Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais

SWAT – Soil and Water Assessment Tool

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVO GERAL.....	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	GESTÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA MINERAÇÃO	21
2.2	HIDROGEOLOGIA EM AMBIENTES CÁRSTICOS	22
2.2.1	Interações entre as águas superficiais e subterrâneas	25
2.2.2	Modelagem numérica em ambientes cársticos	27
2.3	MODELAGEM INTEGRADA DAS INTERAÇÕES ENTRE AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS	28
2.4	PRINCÍPIOS DOS MODELOS NUMÉRICOS UTILIZADOS	30
2.4.1	Mike Hydro River	30
2.4.2	FEFLOW	32
2.4.2.1	Equação geral de fluxo de águas subterrâneas	33
2.4.2.2	Condições de contorno	34
2.4.2.3	Representação das feições discretas	36
2.4.3	Plugin PiMIKE1D	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS GERAIS	40
3.1	FLUXOGRAMA METODOLÓGICO	40
3.1.1	Etapa 1: Modelagem hidrodinâmica	42
3.1.2	Etapa 2: Acoplamento e Calibração	42
3.1.3	Etapa 3: Avaliação	45
3.2	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	45
3.2.1	Contexto hidrogeológico local	47
3.2.1.1	Condicionantes geológicas e hidrogeológicas.....	47
3.2.1.2	Condicionantes geomorfológicas.....	55
3.2.1.3	Feições Cársticas	56

3.2.2	Caracterização hidrológica da área de estudo.....	58
3.2.2.1	Avaliação Climática	62
3.2.2.2	Vazões nos cursos d'água.....	63
3.2.2.3	Vazões bombeadas na mina	65
3.2.2.4	Contribuição de fluxo do rio Santa Catarina para a mina	66
3.2.2.5	Piezometria.....	67
4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO RIO SANTA CATARINA.....	69
4.1	MATERIAIS E MÉTODOS ESPECÍFICOS.....	69
4.1.1	Resolução Espacial e Temporal.....	70
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72
4.2.1	Validação dos dados observados dos linígrafos e do <i>Flow-tracker</i>.....	72
4.2.2	Construção do modelo hidrodinâmico	73
4.2.2.1	Hidrografia, topobatimetria e seções transversais	75
4.2.2.2	Definição do coeficiente de rugosidade de Manning	79
4.2.2.3	Condições de contorno e iniciais	83
4.2.3	Balço hídrico do modelo hidrodinâmico	85
4.2.4	Calibração e resultados do modelo hidrodinâmico.....	88
4.3	CONCLUSÕES.....	92
5	MODELAGEM INTEGRADA DAS INTERAÇÕES ENTRE AS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS	94
5.1	MATERIAIS E MÉTODOS ESPECÍFICOS.....	94
5.1.1	Resumo do modelo conceitual e modelo numérico de águas subterrâneas.....	94
5.1.2	Calibração do modelo acoplado.....	97
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	99
5.2.1	Avaliação das taxas de infiltração e do trecho seco do rio Santa Catarina	99
5.2.2	Acoplamento do modelo hidrodinâmico e do modelo hidrogeológico	101

5.2.2.1	Alterações no modelo hidrogeológico para o acoplamento	101
5.2.2.2	Testes do acoplamento e premissas adotadas	103
5.2.3	Calibração dos modelos acoplados.....	104
5.2.4	Outros resultados do modelo calibrado.....	108
5.2.4.1	Avaliação do trecho seco de rio.....	108
5.2.4.2	Vazões bombeadas na mina	110
5.2.4.3	Vazão infiltrada ao longo do leito do rio e pelos condutos cársticos.....	111
5.2.5	Limitações da Modelagem	112
5.3	CONCLUSÕES.....	113
6	DISCUSSÃO GERAL.....	115
7	CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso estratégico para a indústria da mineração. A viabilidade técnica e econômica dessa atividade depende da gestão adequada dos recursos hídricos, o que exige conhecimento do contexto hidrológico e hidrogeológico local e regional (ANA & IBRAM, 2006; BICHUETI et al., 2014; SZCZEPIŃSKI, 2019; MUDD, 2020). Para realizar a gestão dos recursos hídricos na mineração, são fundamentais os estudos de modelagem do fluxo de águas subterrâneas, com o objetivo de simular o comportamento hidrogeológico ao longo do tempo e avaliar as soluções mais adequadas a serem empregadas em cada etapa da mina (ANA & IBRAM, 2006; SZCZEPIŃSKI, 2019).

A gestão sustentável também se faz necessária em ambientes cársticos, onde os recursos hídricos estão sob crescente pressão. Estimativas diferentes mostram que entre 9% e 25% da população global dependa em grande parte ou inteiramente das águas subterrâneas obtidas de ambientes cársticos (FORD; WILLIAMS, 2007; STEVANOVIĆ, 2019). No entanto, seu funcionamento, desenvolvimento e nível de fragilidade permanecem em grande parte desconhecidos, pois precisam de técnicas específicas de exploração e abordagens de modelagem (ANDREO, 2012).

A dinâmica de fluxos em um meio cárstico é marcada pela dualidade no escoamento subsuperficial, nas vazões e nos processos de infiltração, pautada pelas diferenças de fluxo na matriz e nos condutos cársticos (KIRALY, 1998). Esse é um processo cuja representação numérica é complexa, tanto pela heterogeneidade do meio, quanto pela dificuldade em se obter dados para a representação espacial dos principais elementos que direcionam e armazenam o fluxo no carste. Os modelos de simulação cárstica devem representar adequadamente os processos cársticos para fornecer previsões robustas, e as informações disponíveis devem ser suficientes para determinar os parâmetros do modelo (HARTMANN et al., 2014).

Neste contexto, o presente estudo foi realizado na região do município de Vazante, Minas Gerais - Brasil, que se localiza em uma região cárstica explorada pela indústria da mineração subterrânea desde o ano de 1989. A mina subterrânea de Vazante, da Nexa Resources, está situada abaixo do rio Santa Catarina, localizado em uma bacia sedimentar dolomítica com feições cársticas bastante desenvolvidas. A mina chega a bombear até 15.000 m³/h de água para manter o rebaixamento do nível d'água subterrânea necessário para a sua operação, que chega a uma profundidade

de cerca de 250 m. Na superfície, no trecho próximo à mina, o rio Santa Catarina seca durante o período de estiagem, desde 2014. Estima-se que no mínimo 42% do fluxo bombeado na mina seja oriundo do rio, infiltrado principalmente por meio de condutos cársticos (WATER SERVICES AND TECHNOLOGIES, 2020).

Como a mina ainda está em constante expansão e aprofundamento, é necessário ter uma ferramenta que permita a previsão do comportamento das águas subterrâneas e das águas superficiais, em específico do rio Santa Catarina, permitindo, assim, seu devido controle e estudos de medidas de mitigação dos efeitos adversos. Dentre os softwares de modelagem integrada com possibilidade de maior discretização da componente subterrânea, o software FEFLOW acoplado ao software MIKE11 (ou o seu sucessor, o Mike Hydro River) está entre os mais usados (BARTHEL; BANZHAF, 2016). Os principais fatores limitantes da modelagem integrada são a disponibilidade de dados e recursos computacionais (BARTHEL; BANZHAF, 2016; GUNDUZ; ARAL, 2016).

O acoplamento do software FEFLOW e Mike 11 foi abordado em outros estudos. Contudo, durante a elaboração dessa pesquisa, não se obteve conhecimento da utilização dessa metodologia em um estudo de caso voltado para vazões mínimas, com o intuito de representar os processos de secamento do rio, especialmente em ambiente cárstico. De qualquer modo, em vista da heterogeneidade hidrogeológica observada, que é um desafio para a modelagem numérica, essa metodologia apresenta grande potencial para representar a situação observada em campo, em vista da flexibilidade do FEFLOW.

O presente estudo, portanto, buscou avaliar de forma integrada as interações entre as águas subterrâneas e superficiais em um ambiente cárstico, sob influência do rebaixamento causado pela mina subterrânea de Vazante, por meio do acoplamento entre os softwares FEFLOW e Mike Hydro River.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar de forma integrada as interações entre as águas subterrâneas e superficiais em um ambiente cárstico, sob influência do rebaixamento causado por uma mina subterrânea.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estimar a infiltração de água do rio Santa Catarina na região da mina de Vazante;
- b) Simular a hidrodinâmica do rio Santa Catarina;
- c) Simular a vazão e o trecho seco no rio Santa Catarina, sob as condições atuais de bombeamento da mina subterrânea;
- d) Comparar a vazão infiltrada ao longo do rio de forma difusa e pontual (condutos cársticos); e
- e) Avaliar a aplicabilidade do acoplamento entre os modelos *FEFLOW* e *Mike Hydro River* para ambientes com hidrogeologia complexa/heterogênea.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GESTÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA MINERAÇÃO

A interação entre os recursos hídricos e a mineração ocorre em diversos processos da operação, desde a exploração da jazida, o tratamento e beneficiamento do minério, até as etapas de fechamento e pós-fechamento das minas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2006; BICHUETI et al., 2014; SPITZ; TRUDINGER, 2019). A água é um recurso indispensável para essas atividades, muitas vezes sendo requerida em grandes quantidades. Por isso, se faz necessária a sua gestão adequada, identificando e mitigando os riscos associados aos recursos hídricos, ecossistemas e comunidades (MUDD, 2020).

Dados os muitos processos que envolvem o gerenciamento dos recursos hídricos em uma mina, pode ser um desafio manter um monitoramento preciso do uso da água nessas atividades. Portanto, as minas dependem do desenvolvimento de um balanço hídrico para alcançar um equilíbrio sustentável entre o abastecimento de água, o consumo e os riscos ambientais e operacionais. Por isso, muitas empresas integram as ferramentas de gestão da água com outras ferramentas operacionais e financeiras (INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING & METALS, 2012). Por esse mesmo motivo, a ANA - (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2006) aponta que a água é um recurso estratégico para a mineração, sendo a viabilidade técnica e econômica dessa atividade dependente da gestão adequada dos recursos hídricos.

Para realizar a gestão dos recursos hídricos na mineração, são fundamentais os estudos de modelagem do fluxo de águas subterrâneas para prever o comportamento do meio ao longo do tempo e avaliar as soluções mais adequadas a serem empregadas em cada etapa da mina, incluindo o seu descomissionamento (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2006).

Os métodos de modelagem hidrogeológica são amplamente utilizados na mineração desde o início de sua aplicação. A modelagem de fluxo de águas subterrâneas pode representar questões regionais, como o sistema aquífero, e locais, correspondente à área de escavação da mina. A modelagem numérica é usada durante cada estágio da operação da mina, com o objetivo de fornecer previsões confiáveis do fluxo de água (SZCZEPIŃSKI, 2019). Dessa forma, é possível obter informações que auxiliam na tomada de decisão sobre as soluções e tecnologias a

serem adotadas para permitir as condições operacionais para o avanço da lavra da mina.

Da mesma forma, modelos hidrológicos e hidráulicos têm sido fundamentais na gestão destes recursos hídricos. Porém, a modelagem de água superficial e de águas subterrânea tem sido feita tradicionalmente de forma separada, com raras exceções de aplicação de modelos integrados. No caso da mina de Vazante, esta integração é fundamental para a devida representação da interação entre a vazão no rio Santa Catarina e as vazões adentrando a mina em função do rebaixamento do aquífero.

Por fim, cabe ressaltar que o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico em todo o mundo, especialmente o aumento do consumo e da urbanização, levam a uma demanda cada vez maior pelas matérias-primas fornecidas pela mineração (KHOBRADE, 2020; MUDD, 2020; SPITZ; TRUDINGER, 2019), o que aumenta a pressão em cima dos recursos. Portanto, buscando a sustentabilidade deste setor industrial, é essencial que o uso dos recursos hídricos seja planejado e bem dimensionado.

2.2 HIDROGEOLOGIA EM AMBIENTES CÁRSTICOS

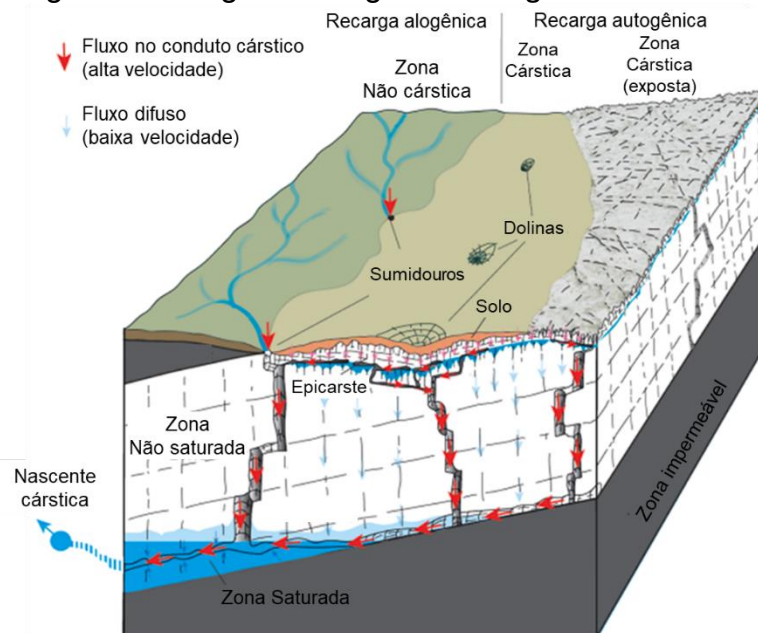
As paisagens cársticas são caracterizadas por uma geomorfologia e hidrologia específica, que surgem de uma combinação da alta solubilidade da rocha e porosidade secundária (fraturas) bem desenvolvida. Tais áreas são caracterizadas por riachos com talvegues profundos, cavernas, dolinas, afloramentos rochosos estriados e nascentes ou surgências volumosas (FORD; WILLIAMS, 2007).

Ford; Williams (2007), uma das literaturas mais citadas em relação a ambientes cársticos, estima que cerca de 20 a 25% da população global dependa em grande parte ou inteiramente das águas subterrâneas obtidas em zonas cársticas. Esses recursos estão sob crescente pressão e necessitam de gestão sustentável (ANDREO, 2012) (FORD; WILLIAMS, 2007). Já Stevanović (2019), estimou que o número de consumidores de água oriundas de ambientes cársticos em 2016 foi de 678 milhões ou 9,2% da população mundial. Segundo Goldscheider et al. (2020) esse valor é baseado em um banco de dados global mais detalhado e uma análise mais elaborada. Portanto, esta estimativa recente é provavelmente mais realista.

Globalmente, 15,2% da superfície terrestre (não coberta por gelo) é caracterizada pela presença de rochas carbonáticas. A maior porcentagem de regiões cársticas está na Europa (21,8%), seguida pela América do Norte (19,6%), Ásia (18,6%), África (13,5%), Austrália e Oceania (6,2%) e América do Sul (4,3%) (GOLDSCHIEDER et al., 2020).

A Figura 1 apresenta um diagrama da geomorfologia hidrocarstística. As formas de relevo cársticas ocorrem em rochas carbonáticas devido à dissolução da rocha na água oriunda da precipitação. Formas de superfície, como os afloramentos rochosos estriados, dolinas e sumidouros, são produzidas pela infiltração de água na rocha. Eixos verticais, cavernas (vadosas ou freáticas) e grandes nascentes estão relacionados ao escoamento da água e a sua saída do sistema.

Figura 1 – Diagrama da geomorfologia hidrocarstística.



Fonte: Retirado de (JEANNIN et al., 2021)

Do ponto de vista hidrológico, a precipitação infiltra-se através da cobertura vegetal e dos solos na camada superior da rocha, que podem ter diferentes graus de intemperização, o epicarste. Uma parte das águas da precipitação retorna à atmosfera através da evapotranspiração. Em alguns casos, as águas superficiais podem formar um pequeno córrego ou até mesmo um rio, que é descontinuado, pois sua vazão flui para um sumidouro, e o rio seca. Isso ocorre pois o processo de infiltração pode ocorrer de forma concentrada (sumidouros e dolinas), além de ocorrer por meio da

infiltração nos solos e fratura/matriz das rochas (FORD; WILLIAMS, 2007; HARTMANN et al., 2014; JEANNIN et al., 2021).

Com relação à recarga do aquífero cárstico, quando é originada dentro do próprio sistema cárstico é tida como autogênica, e quando tem sua origem em regiões não cársticas, é denominada recarga alogênica. A recarga alogênica aumenta a formação de dolinas e sumidouros nas proximidades do rio, especialmente durante as cheias, quando as águas superficiais fluem em altas vazões para os sumidouros (BAILLY-COMTE; JOURDE; PISTRE, 2009).

O epicarste distribui água parcialmente em direção a condutos verticais que levam a água diretamente para a zona freática. Outra parte da água fica armazenada no epicarste e escoam lentamente para as camadas inferiores do carste, por meio de fraturas e fissuras. Em alguns pontos, a água é drenada novamente pela rede de canais cársticos, que drena eficientemente o maciço rochoso, e conduz a água na saída do sistema cárstico, que compõe uma nascente cárstica (FORD; WILLIAMS, 2007; HARTMANN et al., 2014; JEANNIN et al., 2021).

Existem três tipos de porosidades em sistemas cársticos: (1) microporos que se desenvolvem durante a gênese da rocha carbonática, a porosidade primária, (2) pequenas fissuras e fraturas que se desenvolvem devido a processos tectônicos, a porosidade secundária; e (3) grandes fraturas e condutos que se desenvolvem devido a carstificação, que também forma parte da porosidade secundária. As duas primeiras são geralmente chamadas de matriz, enquanto a última se refere aos condutos cársticos. Esses três tipos de porosidade resultam em uma forte heterogeneidade da movimentação e interação da água na superfície e no subsolo (BAKALOWICZ, 2005).

Portanto, os aquíferos cársticos têm características complexas e originais que os tornam muito diferentes de outros aquíferos: elevada heterogeneidade criada e organizada pelo fluxo das águas subterrâneas; grandes vazios, altas velocidades de fluxo de até várias centenas de m/h, altas vazões, de até algumas dezenas de m³/s (BAKALOWICZ, 2005). No geral, o comportamento hidrológico dos sistemas cársticos mostra uma dualidade em seu processo e dinâmica de armazenamento, que pode ser dividida em (KIRALY, 1998):

- a. Dualidade de processos de infiltração e recarga: difusivo, infiltração lenta e recarga na matriz, concentrado, infiltração rápida e recarga nos condutos cársticos;
- b. Dualidade no escoamento subsuperficial: baixa velocidade de escoamento na matriz e alta velocidade de escoamento nos condutos cársticos; e

- c. Dualidade nas condições de vazão: vazões baixas e contínuas durante os períodos secos, quando o sistema é dominado pelo escoamento por meio da matriz; e vazões altas, com alta variabilidade temporal, durante eventos de chuva, quando o escoamento ocorre também de forma significativa por meio dos condutos.

2.2.1 Interações entre as águas superficiais e subterrâneas

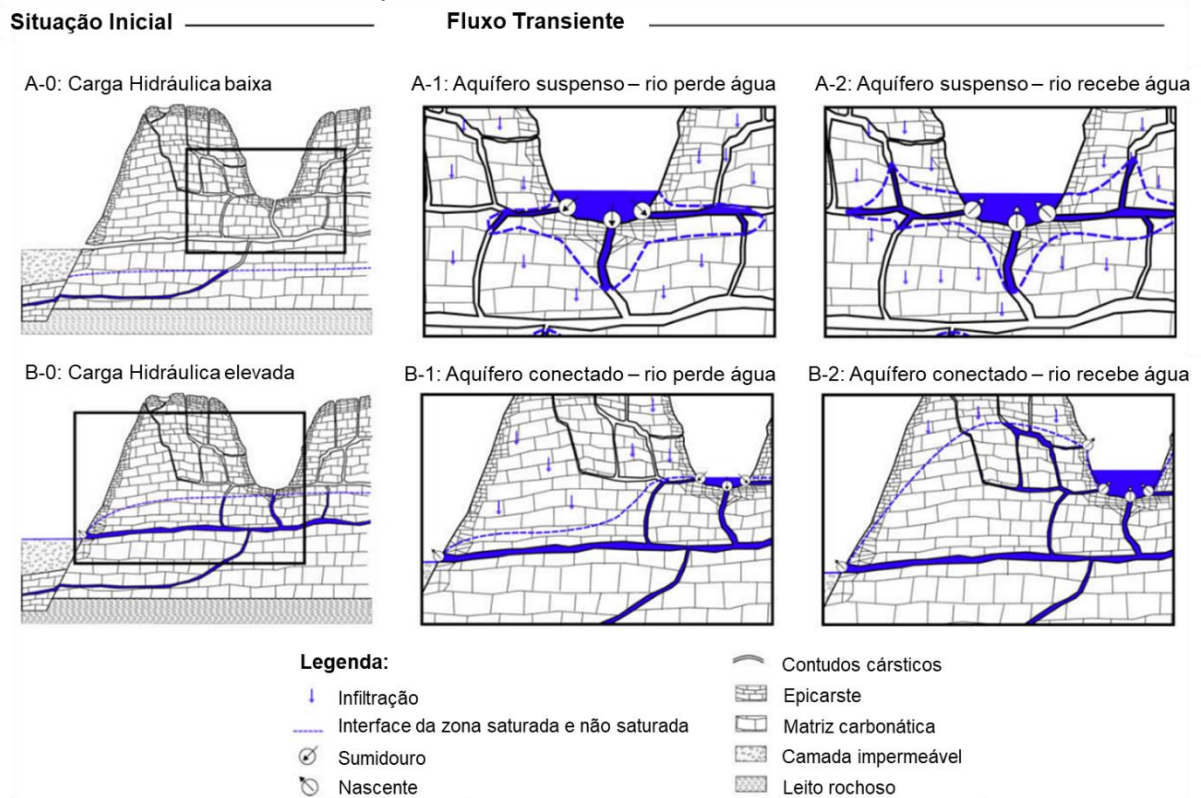
De maneira geral, Brunke; Gonser (1997) resume as interações entre as águas superficiais e subterrâneas, considerando aquíferos porosos. Sob condições de baixa precipitação, o fluxo de base, proveniente das águas subterrâneas, alimenta o curso d'água na maior parte do ano (rio como condição de efluente). Em contraste, em condições de alta precipitação, o escoamento superficial e o interfluxo aumentam gradativamente, levando a pressões hidráulicas mais altas nos trechos inferiores do curso d'água, o que faz com que o rio mude da condição de efluente para afluente, infiltrando suas margens e recarregando o aquífero.

Durante a cheia, o curso d'água perde água pela infiltração nas margens, o que reduz o nível da cheia e recarrega o aquífero. O volume desse armazenamento de margem depende da duração, altura e forma do hidrograma de cheia, bem como da transmissividade e capacidade de armazenamento do aquífero. Durante a estação seca, a liberação de água armazenada compensa a diminuição da vazão do curso d'água. Em alguns trechos do rio, a água liberada pelo armazenamento nas margens, originada pelo escoamento das cheias, excede a vazão oriunda do lençol freático sob condições de fluxo de base. Assim, sucessivas descargas e recargas do aquífero têm um efeito tampão nos regimes de escoamento dos rios (BRUNKE; GONSER, 1997).

No que tange as interações entre as águas subterrâneas e superficiais em ambientes cársticos, do ponto de vista localizado e avaliando eventos de alta precipitação, Bailly-Comte; Jourde; Pistre (2009) apresenta um modelo conceitual, ilustrado na Figura 2. O modelo conceitual considera a resposta do sistema a eventos consecutivos de precipitação a partir de duas condições iniciais de carga hidráulica: A0 – baixa; B0 – elevada. A Figura 2 ilustra os casos A-1 e B-1 para o primeiro pico de cheia, após um evento de alta precipitação; e A-2 e B-2 para o segundo pico de cheia, após outro evento de precipitação, quando o solo já está saturado. Na situação em que a carga inicial é baixa (A), apenas o sistema local é considerado, visto que a recarga proveniente da precipitação gera um aquífero suspenso. Já nos casos em que

a carga inicial é elevada (B), considera-se um sistema de fluxo maior, denominado sistema de fluxo intermediário, para os quais tanto a recarga do aquífero como do rio devem ser considerados. Este sistema de fluxo leva em conta o excesso de capacidade de vazão nos condutos cársticos. (BAILLY-COMTE; JOURDE; PISTRE, 2009). Pode-se verificar, portanto, que para a representação do modelo conceitual B, em que a carga hidráulica inicial é elevada, necessita-se de uma maior discretização na representação da heterogeneidade do meio cárstico, com a adequada representação dos condutos cársticos, dados que são complexos de serem obtidos.

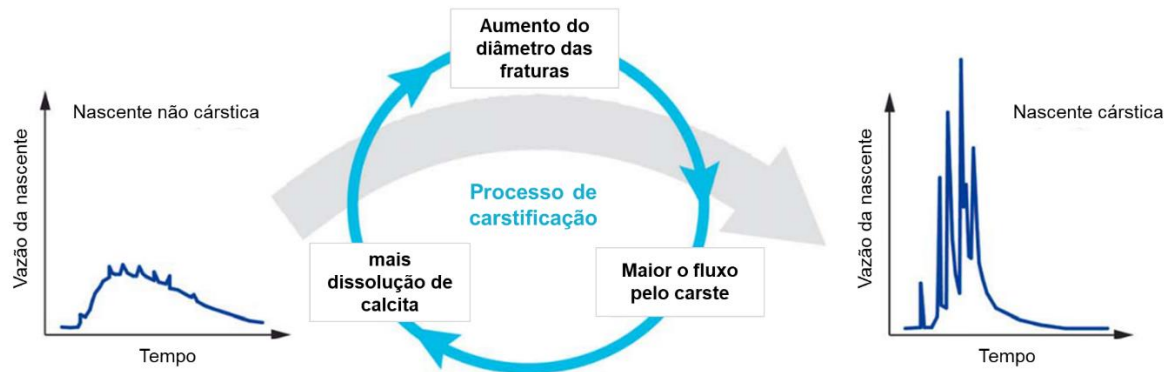
Figura 2 – Modelo conceitual das interações entre as águas subterrâneas e superficiais em um sistema cárstico.



Fonte: Retirado de (BAILLY-COMTE; JOURDE; PISTRE, 2009)

Além disso, cabe ressaltar que as dolinas nos leitos de rios podem atuar como sumidouros ou surgências de acordo com o gradiente hidráulico entre as águas superficiais e subterrâneas (BAILLY-COMTE; JOURDE; PISTRE, 2009). A Figura 3 ilustra o comportamento das vazões do curso d'água em ambientes cársticos.

Figura 3 – Descrição esquemática do processo de carstificação e sua influência no comportamento hidrodinâmico da vazão na nascente cárstica.



Fonte: Retirado de (HARTMANN et al., 2014).

O processo de carstificação se inicia com taxas lentas e começa a se ampliar quando a dissolução da rocha causa fraturas mais amplas, permitindo maior fluxo. Isso leva, portanto, a maior dissolução da rocha, o que, por sua vez, aumenta o tamanho da fratura, e assim por diante. Pela mesma razão, a carstificação é um processo seletivo. As fraturas que são inicialmente apenas um pouco mais largas do que outras têm fluxo inicial e taxas de dissolução de calcita mais altas e, portanto, crescem mais rapidamente do que as fraturas mais estreitas. Como resultado, a carstificação transforma a rocha carbonática fraturada em um aquífero cárstico que inclui uma rede hierarquicamente organizada de fraturas abertas, condutos e cavernas conectadas hidraulicamente, às vezes drenadas por apenas uma nascente principal (HARTMANN et al., 2014). Dessa forma, a vazão nas nascentes passa a ter um hidrograma característico, como ilustrado na Figura 3.

2.2.2 Modelagem numérica em ambientes cársticos

Os modelos de simulação cárstica são aplicados em estudos de evolução cárstica, na caracterização de sistemas cársticos, na modelagem da qualidade da água, avaliação de vulnerabilidade e na previsão de recursos hídricos. Esses modelos devem representar adequadamente os processos cársticos para fornecer previsões robustas. Para isso, é necessária uma alta quantidade de informações, de modo que seja possível determinar os parâmetros do modelo. Cabe ressaltar que esses parâmetros podem não ser estáveis no tempo (HARTMANN et al., 2014).

Em função da complexidade da modelagem de fluxo de águas subterrâneas em ambiente cársticos, existem diversas abordagens de simulação. JEANNIN et al.

(2021), fez um estudo comparando diversas dessas abordagens, embora aplicadas a um estudo de caso simplificado.

A abordagem da modelagem distribuída mostra uma alta sofisticação na representação de processos cársticos. Dentre elas, especialmente a abordagem CDC (“*combined discrete-continuum approach*”), é bastante robusta, uma vez que considera a matriz como um meio contínuo no qual os condutos cársticos são incorporados como elementos discretos. Desta forma, a influência dos condutos cársticos nos níveis de água subterrânea na matriz pode ser calculada em toda a extensão do sistema cárstico (HARTMANN et al., 2014). O modelo realizado na mesma área de estudo, por Ninanya et al. (2018), é um exemplo deste tipo de aplicação.

Por fim, segundo HARTMANN et al. (2014), há a necessidade de desenvolver ferramentas de simulação adequadas que façam melhor uso dos dados disponíveis e de aplicar essas ferramentas em escalas maiores para permitir o gerenciamento sustentável da água e evitar ameaças à segurança hídrica. Essa demanda continua relevante e um desafio para a modelagem nos dias atuais.

2.3 MODELAGEM INTEGRADA DAS INTERAÇÕES ENTRE AS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E SUPERFICIAIS

A definição de modelagem integrada é bastante abrangente em termos dos processos considerados no sistema e a forma da sua representação. Muitas vezes possui um foco maior do que a interface de águas superficiais e subterrâneas, podendo, por exemplo, considerar o crescimento de plantas, modelos atmosféricos, entre outros, de acordo com diferentes métodos para a representação física desses processos (BARTHEL; BANZHAF, 2016).

A modelagem integrada de águas superficiais e subterrâneas pode ser categorizada de acordo com diferentes características, tais como: os processos do ciclo hidrológico considerados, o tipo de representação conceitual desses processos, como e quais processos são representados de forma explícita e quais são representados como condição de contorno, a discretização do modelo e escalas temporais, o modo de acoplamento dos modelos, entre outros (BARTHEL; BANZHAF, 2016).

Atualmente, os principais fatores limitantes da modelagem integrada são a disponibilidade de dados e recursos computacionais, uma limitação ainda mais significativa para modelos com acoplamento total dos processos físicos, chamados de *'fully coupled'* (BARTHEL; BANZHAF, 2016; GUNDUZ; ARAL, 2016). Estes modelos consideram o ciclo hidrológico como um meio contínuo e, portanto, consideram os processos físicos de maneira integrada e simultânea, sem a necessidade de uma interface ou condições de contorno externas entre eles. Dessa forma, elimina-se problemas relacionados ao uso de diferentes conceitos que são aplicados para diferentes “compartimentos hidrológicos”.

Já os modelos *'loosely coupled'*, ou em tradução literal “fracamente acoplados”, consideram o acoplamento entre diferentes modelos numéricos para representar a interação entre dois ou mais “compartimentos hidrológicos”. Há diversos *software* com diferentes formas de acoplamento e diferentes processos que podem ser considerados (hidrológicos, hidráulicos, etc). Entre eles, cabe ressaltar o GSFLOW, o SWAT-MODFLOW e o Mike SHE, utilizados geralmente para estudos regionais (BARTHEL; BANZHAF, 2016).

É mais comum que os modelos regionais integrados sejam baseados em modelos de águas superficiais e não em modelos de águas subterrâneas. Dentre os sistemas *'loosely coupled'* com uma representação das águas superficiais e detalhamento das águas subterrâneas, o MIKE SHE ou o FEFLOW acoplado ao MIKE11 são, aparentemente, os mais usados para estudos regionais (BARTHEL; BANZHAF, 2016). Segundo (LEWANDOWSKI; MEINIKMANN; KRAUSE, 2020), a grande variedade de metodologias de modelagem e a vasta gama de aplicações distintas podem indicar a necessidade de padronizar as abordagens para estudos recorrentes, principalmente a nível prático.

A modelagem das interações entre águas superficiais e subterrâneas com o acoplamento do software Mike Hydro River (ou o seu antecessor, MIKE11) com o FEFLOW, solução aplicada no presente estudo, já foi abordada outras vezes na literatura e com diferentes aplicações. Durante a realização desta pesquisa, foram levantados os seguintes estudos de acoplamento entre os dois software:

- DIBAJ et al. (2021) acoplou o Mike11 ao FEFLOW com o objetivo de fazer a gestão hídrica da intrusão de cunha salina. Segundo os autores, o modelo acoplado desenvolvido foi a primeira ferramenta integrada detalhada para a avaliação da interação das águas superficiais e

subterrâneas, com a capacidade de contribuir para a restauração, reabilitação e gestão da rede fluvial.;

- VRZEL et al. (2019) estudou a reposta do aquífero às mudanças climáticas. Esse modelo incluiu o acoplamento do FEFLOW com o WaSiM e MIKE 11;
- MONNINKHOFF et al. (2014) fez um estudo de caso de recuperação do lençol freático em cava de mineração acoplando os dois modelos; e
- KNAPTON et al. (2009) apresentou dois modelos regionais em zonas cársticas, mas considerando a hidrogeologia como meio poroso equivalente. Segundo o autor, essa abordagem de modelagem acoplada fornece uma ferramenta analítica poderosa para estudar cenários de mudanças climáticas e planejamento integrado de recursos hídricos.

Os estudos mencionados acima apresentam avanços em termos de modelagem numérica dentro do ambiente científico. Cabe ressaltar, contudo, que não foi encontrado nenhum estudo que considerou a heterogeneidade cárstica, como representada nessa pesquisa, e que estudou o impacto de atividades antrópicas nas interações das águas superficiais e subterrâneas, levando ao secamento do curso d'água superficial, como proposto no presente estudo.

2.4 PRINCÍPIOS DOS MODELOS NUMÉRICOS UTILIZADOS

2.4.1 Mike Hydro River

O Mike Hydro River é um modelo hidrodinâmico unidimensional para rios e canais, que pode considerar a qualidade da água, como o transporte de sedimentos. O modelo resolve as equações de Saint Venant integradas na vertical. Essas equações são deduzidas do princípio de conservação de massa (ou continuidade) e da conservação da quantidade de movimento. Além disso, o modelo é composto também pelas condições de contorno, que representam os processos nos limites do modelo, e pelas condições iniciais.

A formulação das equações de Saint Venant utilizadas no Mike Hydro River considera as seguintes premissas (DHI, 2017):

- i. o fluxo é unidimensional, não há aceleração de água perpendicular à direção do fluxo;

- ii. a água é incompressível e homogênea, ou seja, a variação na densidade é insignificante;
- iii. a declividade do fundo é pequena, de forma que o cosseno do ângulo que forma com o horizontal possa ser considerado como 1;
- iv. os comprimentos da onda são grandes em comparação com a profundidade da água. Isso garante que o fluxo em todos os pontos possa ser considerado como tendo uma direção paralela para o fundo, ou seja, as acelerações verticais podem ser negligenciadas e pode ser assumida a variação hidrostática de pressão ao longo da vertical;

A derivação das equações de conservação da massa e conservação da quantidade de momento nas Equações de Saint Venant podem ser consultadas no Manual de Referência do Mike 1D (DHI, 2017). As equações resultantes são apresentadas abaixo:

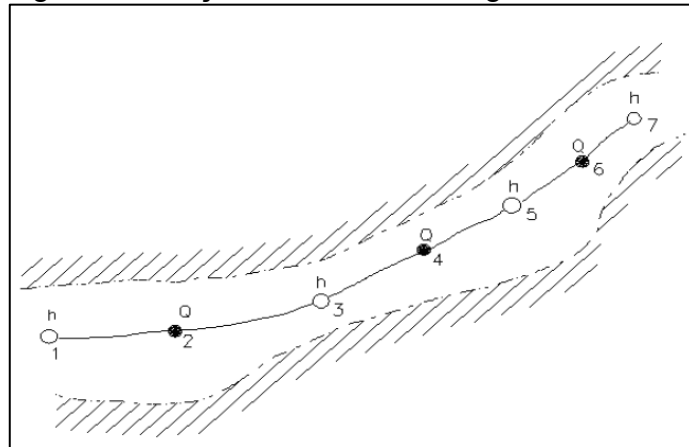
$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{n^2 g |Q|}{AR^{4/3}} = 0 \quad (2)$$

Onde Q é a vazão [L^3/T], A é a área molhada da seção transversal [L^2], q_x é o fluxo lateral (L^3/TL), h é o nível d'água acima do fundo (L), n é o coeficiente de Manning ($\frac{T}{L^3}$), R é o raio hidráulico [L], g é a aceleração da gravidade (L^2/T) e α é o coeficiente de distribuição da quantidade de momento.

A transformação das equações de conservação da massa e conservação da quantidade de movimento, para um conjunto de equações de diferenças finitas implícitas é realizado em uma grade computacional que consiste em pontos Q (vazão) e H (nível d'água) alternados, ou seja, pontos onde a vazão Q e nível de água H , respectivamente, são calculados em cada passo de tempo, como mostra a Figura 4. A grade computacional é gerada automaticamente pelo modelo a partir do traçado do rio. A distância entre os pontos H (H-Points) é inserida pelo usuário, podendo ser variável ao longo do trecho modelado. Os pontos Q (Q-points) são sempre colocados a meio caminho entre os pontos H (H-Points) vizinhos. A convenção denota que a vazão será positiva na direção x positiva (DHI, 2017).

Figura 4 – Seção do canal com o grid do Mike11.



Fonte: Retirado de (DHI, 2017).

2.4.2 FEFLOW

O FEFLOW é um software de modelagem hidrogeológica desenvolvido pela DHI para simulação de fluxo e transporte de contaminantes em 2D ou 3D, em meios porosos e fraturados, podendo simular tanto a zona saturada como não saturada. Também possibilita a simulação com densidades variáveis e transporte de solutos e de calor.

O FEFLOW utiliza o método dos Elementos Finitos para resolver as equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo e transporte de solutos e calor em subsuperfície. Esse método garante uma flexibilidade na malha do modelo para representar geologias e condicionantes hidrogeológicas complexas, pois os elementos da malha são triangulares ou tetraédricos. De acordo com (SZCZEPÍŃSKI, 2019), esse software é um dos mais utilizados para estudos hidrogeológicos na mineração.

O FEFLOW, assim como os demais modelos matemáticos que descrevem o fluxo de águas subterrâneas, é derivado de dois princípios básicos: conservação de massa e a lei de Darcy (BEAR; H-D CHENG, 2010; FITTS, 2013; ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). O modelo matemático para o fluxo de água subterrânea consiste em:

- i. uma equação governante (a equação geral de fluxo de águas subterrâneas, derivada da lei de Darcy e da conservação da massa) que representa os processos dentro do domínio do problema;
- ii. condições de contorno que representam processos ao longo de seus limites; e

- iii. para problemas dependentes do tempo (transientes), condições iniciais que especificam os valores das variáveis dependentes no início da simulação

O modelo utiliza uma formulação da equação geral de fluxo de águas subterrâneas para calcular a carga hidráulica nos nós (pontos discretos da malha espacial) para cada passo de tempo.

2.4.2.1 Equação geral de fluxo de águas subterrâneas

A equação geral de fluxo de águas subterrâneas (3), apresentada abaixo é a forma mais usada na modelagem hidrogeológica. Essa equação, assim como qualquer representação matemática, necessita de simplificações para representar o meio hidrogeológico. Nesse caso, considera-se as seguintes premissas: o fluxo de um fluido de fase única (água líquida), em densidade constante, e em um meio poroso contínuo, de acordo com a lei de Darcy (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

A equação geral do fluxo de águas subterrâneas utilizada pelo FEFLOW permite o fluxo em todas as direções, o fluxo transiente ($\frac{\partial h}{\partial t} \neq 0$), anisotropia do meio, fluxo em fluido de diferente densidade, fluxo dentro de condutos cársticos e fluidos bifásicos. Contudo, para simplificação, apresenta-se a equação geral de águas subterrâneas na sua formulação mais básica, em que considera que os eixos de condutividade hidráulica estejam alinhados com as direções das coordenadas, não considera o fluxo em água de outra densidade, fluxo dentro de condutos cársticos ou fluidos com outras fases:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W^* \quad (3)$$

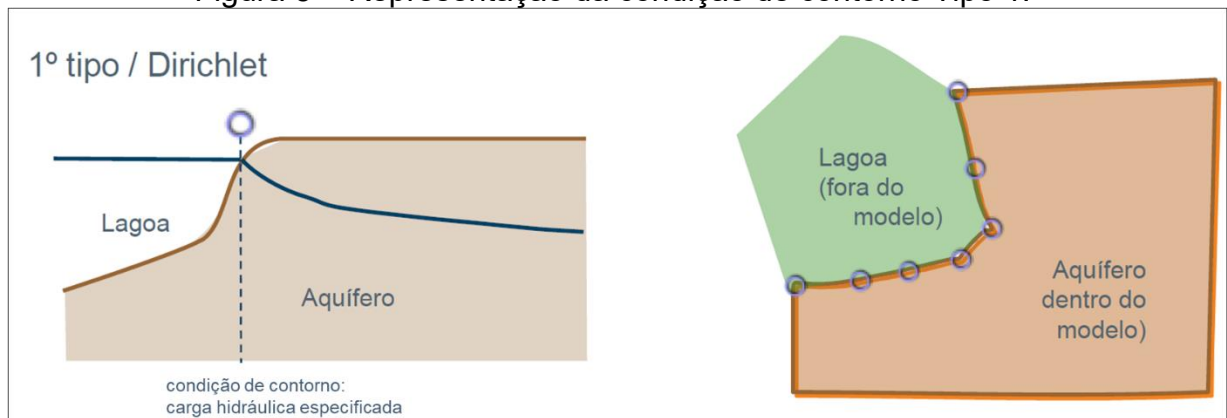
Onde K_x , K_y e K_z são os valores de condutividade hidráulica nas direções x , y e z [L/T]; h é a carga potenciométrica [L]; W^* é o fluxo volumétrico de fontes ou sumidouros [$1/T$]; S_s é o armazenamento específico do material poroso [$1/L$]; e T é o tempo.

2.4.2.2 Condições de contorno

As condições de contorno podem ser classificadas em três tipos:

- i. Tipo 1 – Condição de carga hidráulica especificada (condição de Dirichlet): a carga hidráulica ao longo de uma fronteira, ou nos nós internos do modelo, é conhecida e especificada, podendo variar no tempo e espaço. Essa condição é aplicada, por exemplo, em corpos d'água em que os valores de carga hidráulica são conhecidos e não são afetados pelos níveis de águas subterrâneas, como por exemplo o mar ou uma lagoa de porte suficiente. O avanço da lavra de uma mina subterrânea também pode ser considerado com uma condição de carga hidráulica especificada, nesse caso, variável no tempo e no espaço. A Figura 5 ilustra a condição de contorno Tipo 1.

Figura 5 – Representação da condição de contorno Tipo 1.



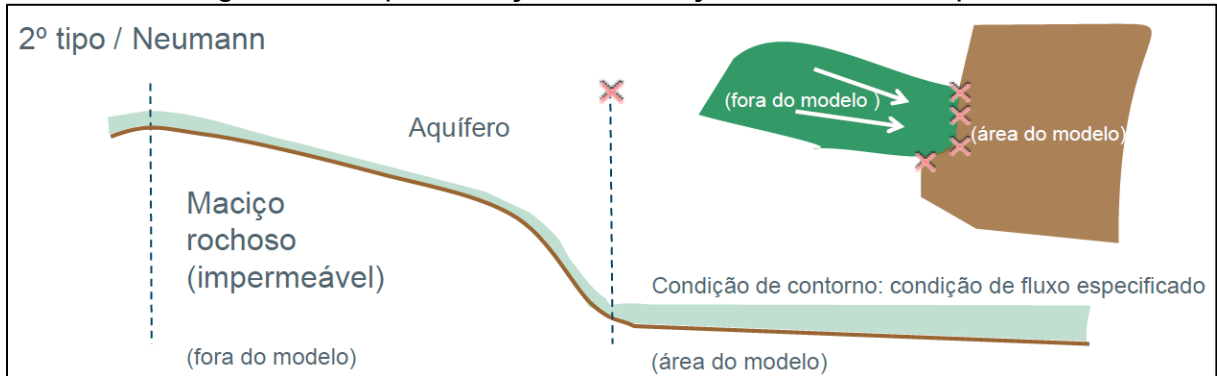
Fonte: Retirado de DHI (2018).

- ii. Tipo 2 – Condição de fluxo especificado (condição de Neumann): utilizada quando se conhece o fluxo adentrando ou saindo de uma determinada fronteira; a carga hidráulica será calculada internamente usando a Lei de Darcy. Pode ser utilizada para representar áreas de recarga ou de descarga na fronteira superior ou inferior do modelo. Em particular, a condição de fluxo zero, comumente aplicada nos limites de modelos quando se tem um divisor de águas subterrâneas ou para contornos impermeáveis, também é considerada uma condição tipo 2 ($q = 0$). A Figura 6 ilustra a condição de contorno Tipo 2.

Segue a expressão numérica da condição de fluxo especificado, considerando a face $\Delta y \Delta z$ do modelo:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = -\frac{q_x}{K_x} \quad (4)$$

Figura 6 – Representação da condição de contorno Tipo 2.



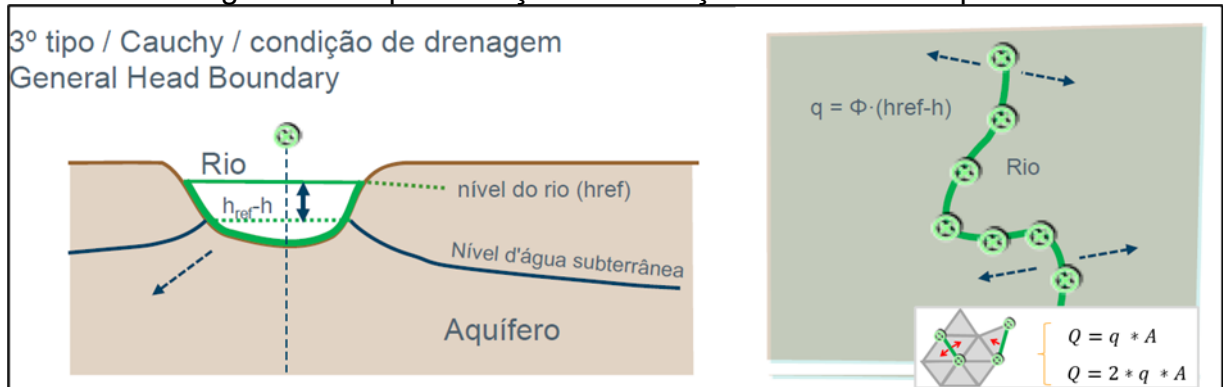
Fonte: Retirado de DHI (2018).

- iii. Tipo 3 – Condição de fluxo dependente da carga hidráulica (condição de Cauchy): o fluxo é calculado a partir da lei de Darcy, considerando como gradiente hidráulico a diferença entre a carga hidráulica externa ao modelo, especificada, e a carga hidráulica calculada pelo modelo no nó do elemento ou célula em questão ou no nó mais próximo. Este tipo de condição de contorno também é denominado de condição de contorno mista porque relaciona a carga conhecida a um fluxo. Essa condição de contorno é aplicada, por exemplo, quando se conhece a carga hidráulica a uma distância além do limite do modelo (a partir de mapas potenciométricos, por exemplo), ou também quando se tem cursos d'água semipermeáveis. É a partir dessa condição de contorno que o modelo hidrogeológico no FEFLOW acopla-se ao modelo hidrodinâmico dos rios do Mike Hydro River. A Figura 7 ilustra a condição de contorno Tipo 3, no caso da representação de um rio com a condição de contorno tipo 3. Segue a expressão numérica da condição de fluxo dependente da carga hidráulica, considerando a face $\Delta y \Delta z$ do modelo:

$$q_x = \frac{K'}{b'} (h_{ref} - h_{i,j,k}) \quad (5)$$

onde $h_{i,j,k}$ é a carga hidráulica calculada no nó da célula do modelo; h_{ref} é a carga hidráulica especificada no limite do modelo, na face $\Delta y \Delta z$, e a razão $\left(\frac{K'}{b'}\right)$ representa a condutância do leito do rio, onde K' representa a condutividade hidráulica relativa ao leito do rio, e b' representa a espessura do leito do rio.

Figura 7 – Representação da condição de contorno Tipo 3.



Fonte: Retirado de DHI (2018)

Os três tipos de condições de contorno podem variar no tempo para simulações transientes.

2.4.2.3 Representação das feições discretas

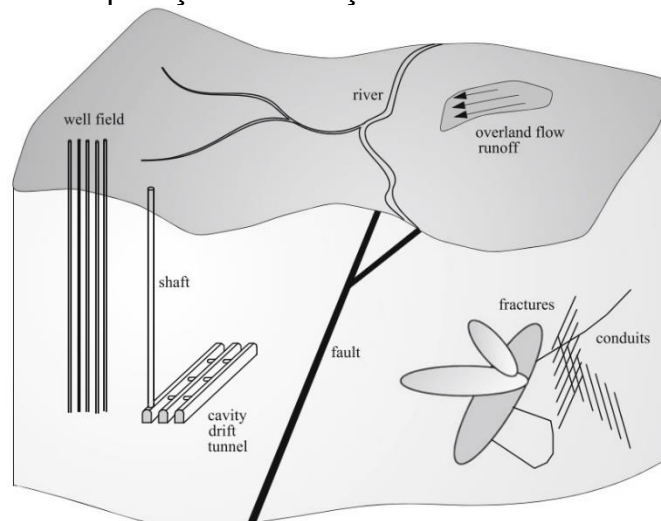
No FEFLOW, a geometria tridimensional do meio subterrâneo pode ser combinada com feições 1D ou 2D interconectadas. O método de elementos finitos permite que a malha tridimensional do meio poroso possa considerar também elementos 1D (canais, por exemplo) ou 2D (fraturas, por exemplo), como apresenta a Figura 8. O Quadro 1 apresenta as aplicações típicas para cada uma das feições discretas disponíveis no FEFLOW, bem como às leis do movimento do fluido aplicáveis.

Quadro 1 – Descrição das feições discretas do FEFLOW.

Dimensão da Feição Discreta	Aplicações	Leis do movimento do fluido aplicáveis
1D plana (freática, não-freática)	Canais, rios, túneis	Darcy; Hagen-Poiseuille; Manning-Strickler
1D tubular (freática, não-freática)	Poços de bombeamento, shaft, duto cárstico, dreno, cavidade, furos de sondagem	
2D, plana (não-freática)	Fraturas, falhas	Darcy; Hagen-Poiseuille;
2D, plana (freática)	Escoamento superficial	Manning-Strickler

Fonte: Adaptado de (DIERSCH, 2014).

Figura 8 – Aplicações das feições discretas no FEFLOW.



Fonte: Retirado de (DIERSCH, 2014)

2.4.3 Plugin PiMIKE1D

Segundo (MONNINKHOFF et al., 2014), os problemas hidrodinâmicos relevantes na mineração, como a modelagem de estruturas hidráulicas, de ondas de choque, a realocação de cursos d'água em função da cava, entre outros, podem ser replicadas de forma mais precisa utilizando o plugin de acoplamento do FEFLOW com o software de modelagem hidrodinâmica em rios, Mike Hydro River.

O plugin PiMIKE1D permite o acoplamento para modelos de fluxo de águas subterrâneas em FEFLOW de aquíferos confinados e não confinados, considerando

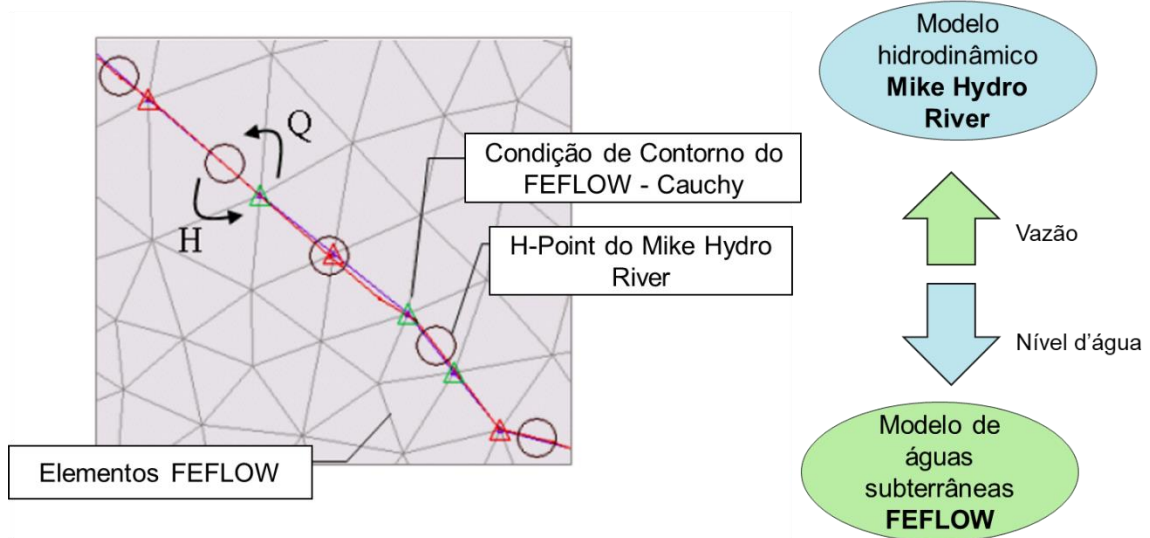
o meio saturado e não saturado, a modelos hidrodinâmicos dos rios no Mike Hydro River. O modelo no FEFLOW deve ser construído em 3D e com malha estruturada. O funcionamento se dá apenas para modelos transientes, tanto do FEFLOW quanto do Mike Hydro River, (MONNINKHOFF et al., 2014).

Esse plugin foi lançado em novembro de 2021, é o sucessor do antigo plug in lfmMIKE 11. Até a finalização dessa pesquisa, não se teve conhecimento de estudos realizados utilizando esse novo plugin.

O acoplamento do FEFLOW e Mike Hydro River é realizado de forma não iterativa, por meio das condições de contorno de terceiro tipo (tipo Cauchy) no FEFLOW. Ou seja, antes de cada passo de tempo, o FEFLOW obtém os valores de nível de água do passo de tempo anterior do Mike Hydro River. Esses dados são considerados como o nível d'água do rio nos nós acoplados, considerados na condição de contorno do tipo Cauchy. Após cada passo de tempo, as vazões calculadas pelo FEFLOW para esses nós do acoplamento são exportadas para os Q-Points do Mike Hydro River (pontos para o armazenamento dos dados de vazão) como uma condição de contorno lateral pontual (Q_base). O Mike Hydro River calculará seu intervalo de tempo quantas vezes forem necessárias para atingir o passo de tempo real do FEFLOW. Quando o passo de tempo for correspondente, os níveis d'água reais dos H-Points serão armazenados e o FEFLOW poderá iniciar o próximo passo de tempo (MONNINKHOFF, 2014). A Figura 9 ilustra os princípios básicos desse acoplamento.

Cabe ressaltar que a densidade de H-Points e de nós com a condição de contorno tipo Cauchy para o acoplamento deve ser representativa, uma vez que o H-Point do Mike Hydro River é atribuído ao nó mais próximo do FEFLOW com a condição de contorno, e não por interpolação. Além disso, para evitar erros no balanço de massa, recomenda-se a utilização do passo de tempo máximo de 6h.

Figura 9 – Princípios básicos do acoplamento com o plugin PiMIKE1D.



Fonte: Retirado de (MONNINKHOFF, 2014)

3 MATERIAIS E MÉTODOS GERAIS

3.1 FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

Para avaliar as interações entre as águas superficiais e subterrâneas na área de estudo, representando as dinâmicas de fluxo que levam ao secamento do rio no período seco, a metodologia utilizada foi de acoplamento de um modelo hidrogeológico previamente existente, desenvolvido no *software* FEFLOW pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (2021), ao modelo hidrodinâmico dos rios, que foi desenvolvido na presente pesquisa no *software* Mike Hydro River. Ambos os softwares são consolidados e amplamente utilizados no mercado e no meio acadêmico.

O resumo do modelo hidrogeológico existente em FEFLOW é apresentado no Apêndice B. A primeira versão desse modelo foi elaborada em 2009, com o intuito de prever o desaguamento necessário para a operação da mina a longo prazo. Desde então, esse modelo numérico vem sendo atualizado e aprimorado, de acordo com a obtenção de novas informações de campo e dados de monitoramento; e já foi tema de diferentes estudos, como de Araújo et al., (2016) e Ninanya et al. (2018).

A escolha do *software* FEFLOW, versão 7.5, para a elaboração desse modelo se deu por diferentes razões fundamentadas na sua utilização do Método dos Elementos Finitos, dentre elas: a flexibilidade da malha para representar a hidrogeologia complexa, com a capacidade de representar a variação pronunciada do nível d'água em função da hidrogeologia; a possibilidade de refinamento em zonas específicas da malha, bem como a capacidade de representar as fraturas e condutos cársticos como feições discretas, que são condicionantes dominantes na região (IPT, 2021).

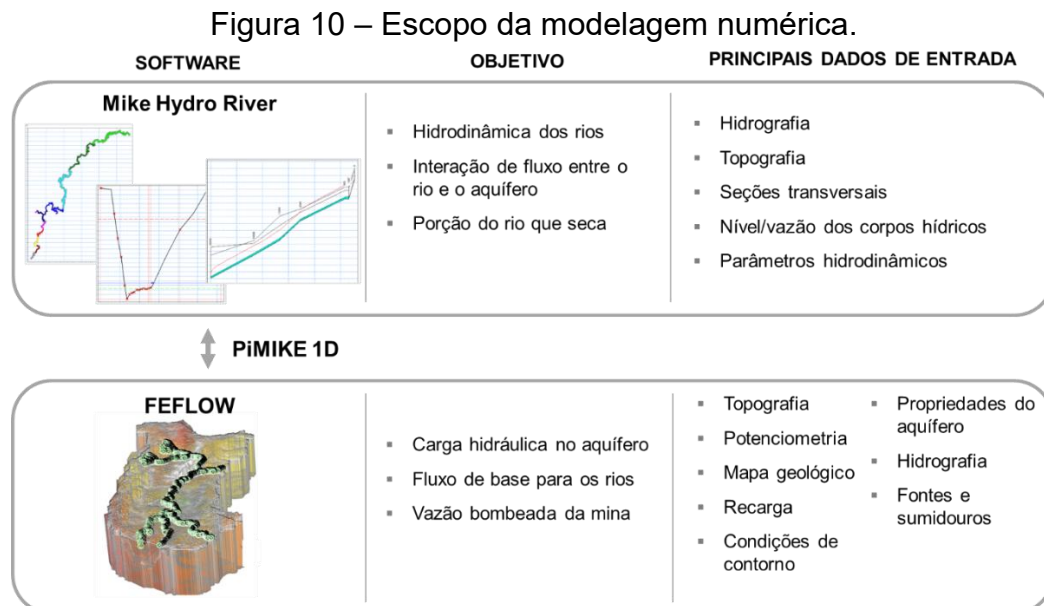
Para o objetivo da presente pesquisa, de avaliar as interações entre as águas superficiais e águas subterrâneas, as condicionantes hidrogeológicas e a representação das feições cársticas são fundamentais para simular a dinâmica de fluxo entre o rio e a mina. Por isso, optou-se por utilizar o modelo FEFLOW já existente, que representa essa particularidade da área de estudo, e acoplá-lo com um modelo hidrodinâmico dos rios, que foi desenvolvido na presente pesquisa no *software* Mike Hydro River (MHR). A seleção dessa metodologia para a pesquisa se baseou no foco do interesse do estudo, que está nos processos físicos ocorridos entre o leito do

rio e as águas subterrâneas, em representar as condições que levam o rio a secar (interações SW-GW) no ambiente cárstico, sob influência do bombeamento da mina.

O Mike Hydro River é um software unidimensional (1D), que pode ser acoplado ao FEFLOW por meio do plugin PiMIKE1D. O processo de acoplamento foi descrito no Subcapítulo 2.4.3 deste documento.

A utilização do Mike Hydro River, que é unidimensional, ao invés de uma solução bidimensional, foi selecionada pelos seguintes fatores: pouca relevância do fluxo perpendicular ao eixo do rio em relação ao fluxo ao longo do eixo do rio; disponibilidade de dados limitada, baixa necessidade computacional, além da possibilidade de simplificação do escoamento em função das seções serem relativamente regulares e estreitas em comparação com o comprimento do corpo hídrico, com gradientes espaciais relativamente similares e baixos.

A Figura 10 apresenta o escopo simplificado da modelagem numérica, com os dados de entrada e os objetivos de cada modelo no presente estudo. Em função, principalmente, da demanda computacional do acoplamento, além da disponibilidade de dados, os modelos foram executados para o período de um ano, 2021.

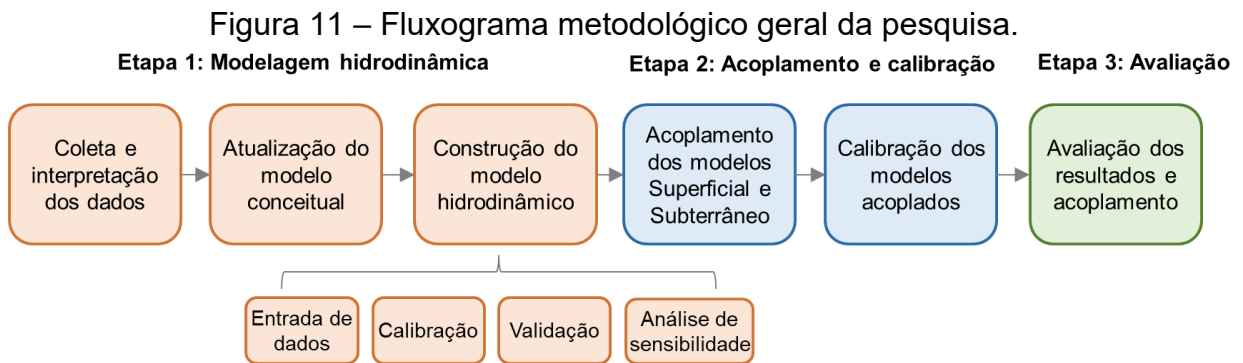


Fonte: elaborado pela autora

O fluxograma metodológico geral do presente estudo é apresentado na Figura 11. Para o presente trabalho, a metodologia da modelagem numérica foi dividida em três etapas, sendo elas:

- i. Etapa 1: Modelagem hidrodinâmica;
- ii. Etapa 2: Acoplamento e Calibração; e

iii. Etapa 3: Avaliação



Fonte: elaborado pela autora

3.1.1 Etapa 1: Modelagem hidrodinâmica

A etapa 1 corresponde à modelagem hidrodinâmica, que compreende a coleta e interpretação dos dados, atualização do modelo conceitual e a construção do modelo hidrodinâmico no Mike Hydro River (versão 2022, atualização 1). Esse modelo foi desenvolvido considerando as particularidades necessárias para o acoplamento ao modelo do FEFLOW (versão 7.5) e calibrado para os dados observados em uma estação a montante da área de influência da mina. Os materiais e métodos específicos e os resultados dessa etapa do estudo são apresentados no Capítulo 4.

3.1.2 Etapa 2: Acoplamento e Calibração

A segunda etapa do estudo consistiu no acoplamento dos modelos de águas superficiais e subterrâneas e a calibração do sistema integrado. Ambos os modelos foram calibrados separadamente, antes de realizar o acoplamento. Antes de fazer o acoplamento, foi realizada a validação do modelo hidrogeológico e alterações necessárias para o acoplamento.

A calibração do modelo é possivelmente a etapa mais importante no processo de modelagem porque ajuda a estabelecer a legitimidade dos modelos conceituais e numéricos. É com base no modelo calibrado que as simulações de previsão são executadas (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

A calibração do modelo considera as seguintes atividades:

- i. Seleção das variáveis de calibração: as variáveis de calibração são os parâmetros utilizados para comparar a simulação do modelo com os dados medidos em campo e, dessa forma, estabelecer a representatividade do modelo em relação a situação real (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).
- ii. Variação dos parâmetros e comparação dos valores medidos e simulados: consiste em ajustar os valores dos parâmetros iniciais do modelo (condutividade hidráulica, recarga, porosidade efetiva, entre outros) a partir da execução do modelo de forma sequencial até que as observações de campo sejam suficientemente correspondidas pelo modelo e os valores dos parâmetros finais sejam razoáveis. A avaliação desse ajuste é feita usando métodos quantitativos e qualitativos (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).
- iii. Avaliação dos parâmetros obtidos: os valores finais dos parâmetros utilizados na calibração, são validados para garantir que esses resultados estão coerentes com os valores esperados segundo o modelo conceitual e literatura. Essa etapa também pode incluir uma análise de sensibilidade desses parâmetros (BEAR; H-D CHENG, 2010).

Normalmente, é necessário ajustar e rodar o modelo diversas vezes para obter uma calibração aceitável. A variação dos parâmetros e comparação dos valores medidos e simulados pode ser dividida em duas etapas. A primeira etapa busca melhorar o ajuste do modelo por meio de tentativa e erro manual, na qual o modelador altera manualmente os valores dos parâmetros, roda o modelo e avalia os resultados de saída após cada execução. A segunda etapa usa códigos de computador que automatizam o processo de variação dos parâmetros e comparação entre os dados simulados e calculados. Em ambos os casos, após rodar o modelo, a avaliação da calibração é feita usando métodos quantitativos e qualitativos (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). No presente estudo, a calibração foi realizada apenas pelo método manual em função da alta parametrização e complexidade do modelo.

O erro quadrático médio (MSE) e a eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), versão normalizada do MSE, são os dois critérios mais utilizados para calibração e avaliação de modelos hidrológicos com os dados observados (GUPTA et al., 2009)

No entanto, o MSE dá maior ênfase à correspondência de tempo e forma do que na correspondência de média e variabilidade. Devido à essa compensação, o MSE pode melhorar o tempo/forma às custas dos erros de média e variabilidade (SINGH, 2017). O critério NSE, por outro lado, é conhecido por dar muito peso aos

períodos de cheias, e por outro lado ser menos sensível no que diz respeito à simulação de baixos níveis de água (JEANNIN et al., 2021).

Em função disso, o índice de Eficiência de Kling-Gupta (KGE) (GUPTA et al., 2009), desenvolvido a partir da decomposição do NSE e do MSE, tem se tornado uma alternativa cada vez mais popular, uma vez que coloca igual ênfase na correspondência dos componentes de média, variabilidade e forma de tempo (SINGH, 2017).

O KGE é constituído a partir de três parâmetros (GUPTA et al., 2009):

- i. a correlação linear entre vazões simuladas e observadas (r);
- ii. a razão entre os desvios padrões das vazões simuladas e observadas (α); e
- iii. o erro tendencial (*bias*) entre as vazões simuladas e observadas (β), representada pela razão entre os fluxos médios simulados e médios observados

O KGE é definido pela seguinte equação:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (6)$$

Os valores do KGE variam de $-\infty$ a 1. O KGE = 1 representa a consistência perfeita entre as vazões simuladas e observadas. As simulações podem ser consideradas satisfatórias com valores de KGE maiores ou iguais a 0,6 (PATIL; STIEGLITZ, 2015). Jeannin et al. (2021), definiu as seguintes classes de eficiência na calibração por meio do KGE:

- Excelente: $> 0,85$
- Boa: $0,75 - 0,85$
- Regular: $0,5 - 0,75$
- Mediana: $0,25 - 0,5$
- Ruim: $< 0,25$

Durante o processo de calibração, foram avaliados os resultados de cargas hidráulicas no aquífero, vazões superficiais, taxas de infiltração distribuída, vazão nos condutos cársticos e vazão na mina. A calibração dos modelos acoplados foi realizada a partir dos parâmetros de condutância do leito do rio, área da seção transversal dos condutos cársticos e armazenamento eficaz (Sy). A calibração foi realizada para o

período seco, a partir de duas estações limimétricas localizadas no rio Santa Catarina e dos dados observados do trecho seco do rio, para o ano de 2021.

3.1.3 Etapa 3: Avaliação

A última etapa da pesquisa consistiu na avaliação dos resultados da modelagem, obtidos a partir do acoplamento dos modelos. Entre eles, cabe ressaltar o trecho seco do rio, a avaliação da infiltração pelo leito do rio e pelos condutos cársticos, além das vazões simuladas na mina. Além disso, nessa etapa, foram tratadas as dificuldades e limitações do modelo e do acoplamento realizado.

3.2 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à sub-bacia hidrográfica em que está inserida a mina de Vazante e o domínio do modelo hidrogeológico, totalizando uma área de aproximadamente 780 km². A mina localiza-se a cerca de 380 km de Belo Horizonte e 190 km de Uberlândia. A Figura 12 apresenta a localização da área de estudo.

A Mina de Vazante, pertencente à Nexa Resources, está em operação desde a década de 60, explorando dois tipos de minério de zinco: o minério secundário, constituído principalmente por calamina, lavrado a céu aberto, e o minério primário, representado por willemita, explotado por lavra subterrânea e a céu aberto. A operação na mina subterrânea de Vazante teve início em 1989, com a necessidade de promover o rebaixamento do nível d'água subterrânea para drenar as frentes de lavra. A operação da mina subterrânea possui alta complexidade do ponto de vista hidrogeológico em função das galerias estarem desenvolvidas em rochas carbonáticas do Grupo Vazante, que apresentam elevado estado de carstificação (BITTENCOURT; DOS REIS NETO, 2012).

Figura 12 – Mapa de Localização da área de estudo.



Fonte: elaborado pela autora.

O desaguamento da mina promove o rebaixamento do nível d'água necessário para a exploração da lavra, podendo obter vazões de até 15.000 m³/h e um rebaixamento de nível de cerca de 250 m. Esse desaguamento da mina ocorre a partir de um sistema de drenagem subterrânea gravitacional, utilizando a própria mina como estrutura de drenagem principal associada a um sistema de bombeamento instalado em seu interior (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

Em 2014, registrou-se um período de estiagem em que, pela primeira vez, um trecho do rio Santa Catarina, que até então era um rio perene, secou nas proximidades da mina. Um estudo realizado em 2018 apresentou que o secamento do leito do rio

nesse ano foi restrito a um pequeno trecho, mas tomou maiores proporções nos períodos de estiagem dos anos seguintes, culminando na máxima extensão no ano de 2017, quando secou cerca de 8,50 km de leito do rio. O secamento do rio Santa Catarina tem como aspecto ambiental a infiltração da água, que associada à redução dos índices pluviométricos acentuou a condição de rio influente, que cede água ao aquífero (TRUST, 2018).

A descrição da área de estudo, apresentada a seguir, está dividida em duas partes: a descrição hidrogeológica local e caracterização hidrológica da bacia de estudo.

3.2.1 Contexto hidrogeológico local

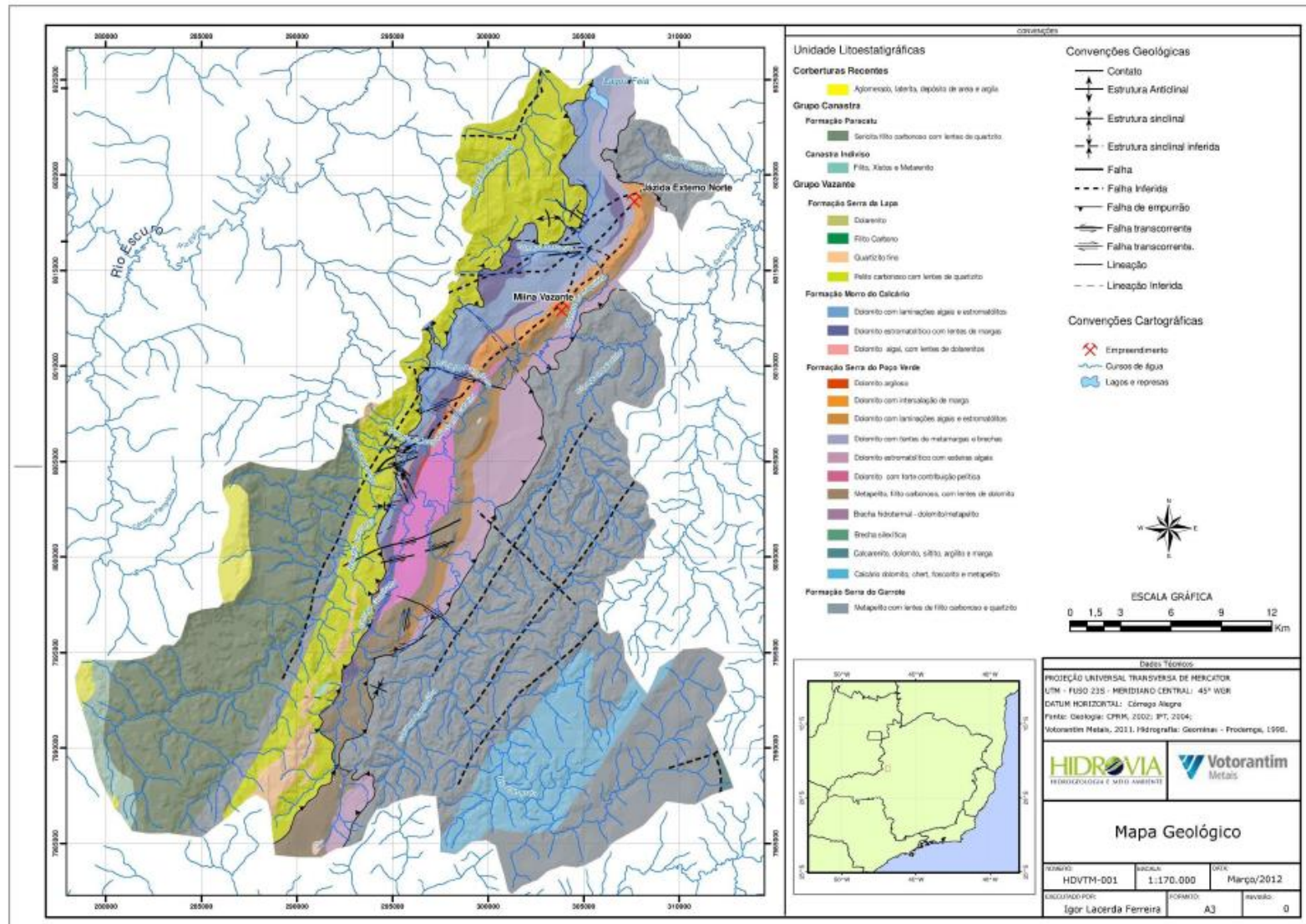
A Mina de Vazante está inserida em um contexto hidrogeológico em que o ambiente cárstico e os processos tectônicos que atuaram na área comandam a dinâmica de circulação hídrica e suas relações com a morfologia do relevo, resultando na ocorrência de feições típicas deste ambiente, tais como surgências, sumidouros e cavernas (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

Diversos estudos foram realizados na área de estudo com foco na geologia, geomorfologia e hidrogeologia. Estes estudos, em conjunto com os dados compilados na rede de monitoramento da área de influência do empreendimento foram compilados por Pessoa; Fernandes; Kimura (2012) e são brevemente discutidos neste capítulo, com o objetivo de estabelecer uma base de conhecimento integrada para subsidiar a descrição do modelo conceitual de fluxo de águas subterrâneas e sua interação com as feições cársticas e as águas superficiais.

3.2.1.1 Condicionantes geológicas e hidrogeológicas

As condicionantes geológicas compiladas por Pessoa; Fernandes; Kimura (2012) consideram as seguintes bases: informações de cunho regional apresentadas pela CPRM, de 2002; informações em escala de detalhe e semi-detalhe apresentadas no estudo de cooperação técnica com o Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, além dos estudos detalhe elaborados por empresas de consultorias e os estudos interpretados pela equipe de exploração mineral da Nexa Resources. A Figura 13 apresenta o Mapa Geológico do entorno da área de estudo.

Figura 13 – Mapa Geológico da área do entorno do empreendimento.



Fonte: (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

Segundo Dardenne (2000), e sintetizado por BITTENCOURT; DOS REIS NETO (2012), na área de estudo, o Grupo Vazante apresenta quatro unidades:

1. Formação Lapa: sequência de filitos intercalados a camadas de quartzitos finos e filitos quartzosos com raras intercalações de metadolomitos;
2. Formação Morro do Calcário: metadolomitos, metadolarenitos, metadolomitos estromatolíticos e brechas;
3. Formação Poço Verde: ardósias e margas intercaladas a camadas de metadolomitos e
4. Formação Serra do Garrote: constituída de filitos carbonosos e filitos quartzosos.

O potencial hidrogeológico das formações supracitadas foi sintetizado no Quadro 2. As formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário exercem papel fundamental no progresso e evolução do carste, em função do contraste de permeabilidade, podendo atuar como barreiras hidráulicas, restringindo e/ou concentrando a circulação da água subterrânea em zonas preferenciais (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012). A zona de falha de Vazante, que hospeda o corpo mineralizado, separa essas formações em dois aquíferos, Capa e Lapa, denominados de acordo com a sua relação espacial com o minério willemita.

A partir desse contexto geológico, Pessoa; Fernandes; Kimura (2012) definiu cinco unidades hidrogeológicas principais:

- i. Cobertura colúvio-aluvionar
- ii. Dolomitos: topo de epicarste e compartimentos da Capa, Lapa Superior e Lapa Inferior;
- iii. Corpo Brechado;
- iv. Aquitardo/Filito Preto; e
- v. Aquitardo/Xistos.

O rebaixamento do nível d'água nas imediações da mina influencia cada um dos sistemas aquíferos de maneira diferenciada. O Quadro 3 sintetiza a descrição dessas unidades hidrogeológicas, bem como o seu comportamento hidrodinâmico, com base no monitoramento sistemático do nível d'água nos poços e suas relações com o regime de bombeamento da mina, apresentados por (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

Quadro 2– Potencial hidrogeológico das formações na área de estudo.

Formação	Potencial Hidrogeológico	Propriedades	Relação com a drenagem	Classificação
Serra do Garrote	Baixíssimo	Baixa condutividade hidráulica; Baixa recarga	Caráter intermitente	Aquicludes / zonas não aquíferas
Serra da Lapa	Algum potencial hidrogeológico, principalmente nas faixas de ocorrência de quartzitos e dolomitos	Permite alguma condição de recarga	Caráter dual, trechos intermitentes e perenes	Zonas aquíferas pobres intercaladas com zonas não aquíferas
Serra do Poço Verde e Morro do Calcário	Potencial variável	Contraste de permeabilidade	Pode atuar como barreiras hidráulicas, restringindo e/ou concentrando a circulação da água subterrânea em zonas preferenciais	Zonas aquíferas associadas às zonas de aquíferos pobres e/ou não aquíferas

Fonte: (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

Quadro 3 – Descrição das unidades hidrogeológicas e respectivo comportamento hidrodinâmico.

(continua)

Unidade Hidrogeológica	Subdivisão da Unidade Hidrogeológica	Descrição	Comportamento Hidrodinâmico (1989-2012)
Sedimentos recentes	Coberturas aluviais e coluviais	Constituídos de areias, cascalhos basais, silte e argila, com permeabilidade e porosidade primárias relativamente altas. Contribuem com fluxo para o sistema cárstico-fissural dolomítico subjacente pela transmissão vertical descendente das águas pluviais de infiltração.	A variação do nível d'água subterrânea é puramente controlada pela variação da precipitação ao longo do ano hidrológico. Não há interferência aparente desenvolvida em função do rebaixamento de nível d'água.
Dolomitos	Capa (a oeste do Corpo Brechado)	Conforma a bacia sedimentar dolomítica. Estes dolomitos encontram-se localmente carstificados. A zona de epicarste, no seu horizonte de topo imediatamente subjacente aos depósitos coluviais, tem em geral elevada permeabilidade, sobretudo nas faixas associadas a fraturamentos e sob maior espessamento em profundidade. As zonas de maior grau de carstificação (as mais permeáveis), encontram-se nos horizontes de menores profundidades, até a cota 500m.	Variações em função da precipitação, porém de maneira mais tênue que aquela verificada nas coberturas aluviais e coluviais. Há uma tendência de rebaixamento uniforme ao longo do tempo, acompanhando o incremento de vazão bombeada na mina.
	Lapa Superior (a leste do Corpo Brechado e interface basal com o Filito Preto de baixa permeabilidade)		Variações em função da precipitação, porém de maneira mais tênue. Há uma tendência de rebaixamento uniforme ao longo do tempo, acompanhando o incremento de vazão bombeada na mina.
	Lapa Inferior (a leste do Corpo Brechado e com interface de topo com o citado Filito Preto)		Configuram-se em uma resposta à infiltração imediata de águas provenientes do transbordamento da calha do rio Santa Catarina. Representa a percolação de águas pluviais/fluviais ao longo do espaço anelar do piezômetro, indicando que as entradas de água não estão totalmente isoladas. Indica uma condição de alta conexão da região de Lapa Inferior com a área da mina teoricamente isolada pela camada de filito preto.

Quadro 3 – Descrição das unidades hidrogeológicas e respectivo comportamento hidrodinâmico.

(conclusão)

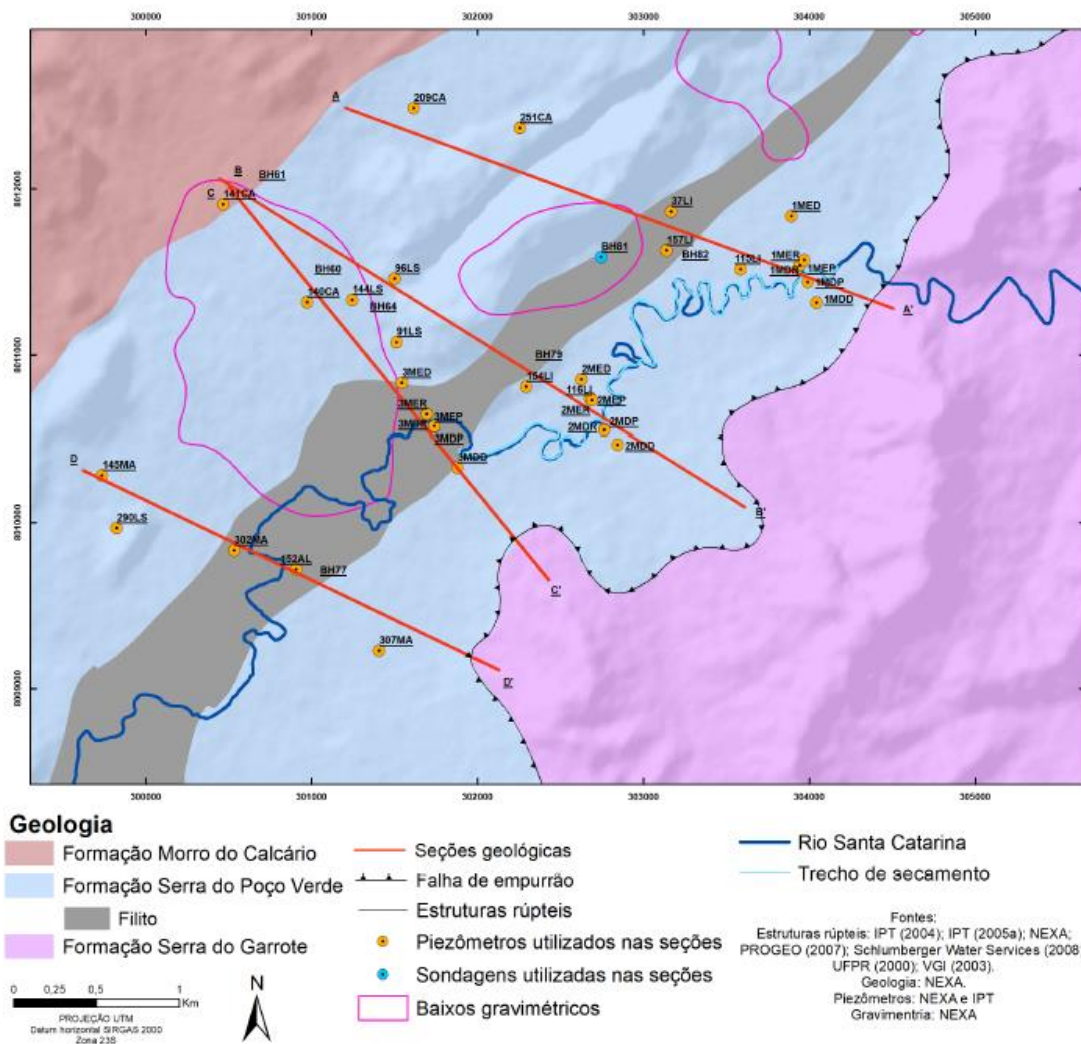
Unidade Hidrogeológica	Subdivisão da Unidade Hidrogeológica	Descrição	Comportamento Hidrodinâmico (1989-2012)
Corpo Brechado	Zona mineralizada da Falha de Vazante	O corpo de minério é pouco permeável, embora as zonas brechadas ao redor do corpo de minério, mapeadas no interior da mina, sugiram uma condutividade hidráulica maior. No contato do Corpo Brechado com os dolomitos, ocorrem zonas de dissolução cárstica de expressão significativa, com alta condutividade hidráulica, associadas a fraturamentos transversais NW;	Refletem o comportamento imposto pelo desaguamento, pois estão na zona mineralizada da mina e no centro do cone de rebaixamento produzido. Há uma tendência de diminuição de cota de nível d'água ao longo do tempo muito clara e acompanha os incrementos de vazão necessários para permitir o avanço da lavra.
Filito Preto	Aquitardo	É um aquitardo de geometria lenticular que separa os compartimentos da Lapa Superior e Lapa Inferior. Atua como barreira natural de fluxo subterrâneo por ter uma ocorrência contínua ao longo da direção geral de acamamento SW-NE, salvo descontinuidades de ruptura, transversais, em alguns sítios.	Unidade impermeável; não apresenta qualquer tendência de diminuição de cota relacionada ao rebaixamento de nível d'água na mina.
Xistos	Aquitardo	Também são aquitardos, representados por corpos lenticulares de xistos, pouco permeáveis situados a oeste da zona mineralizada, intercalados entre os dolomitos da capa, com atitude similar, com direção SW-NE e mergulho para oeste.	-

Fonte: (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

A Figura 14 apresenta o mapa de seções hidrogeológicas, onde destacam-se a Seção A (Figura 15), que passa próximo ao sumidouro Bambuzal, à nordeste da mina, e a Seção C (Figura 16), localizada próximo à estação Ranchinho, que está contida em um baixo gravimétrico, localizada na porção sul-sudeste da mina.

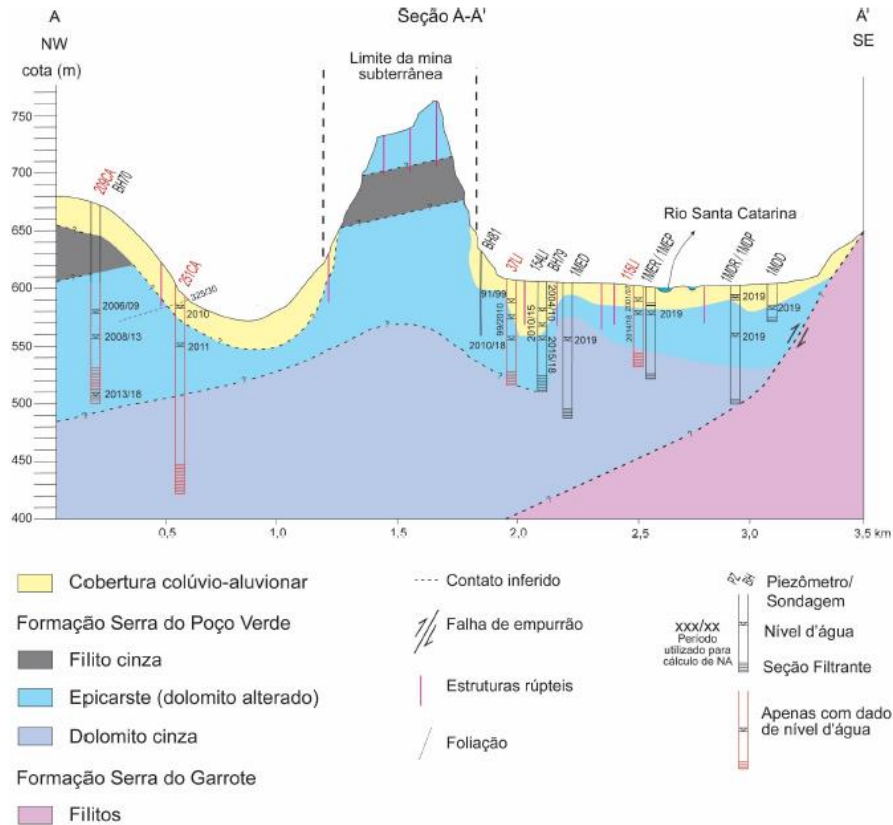
Na seção A-A' os depósitos colúvio-aluvionares apresentam espessuras variáveis, da ordem de 20 m a 30 m, enquanto que as espessuras do epicarste variam de 25 m. Na seção C-C', que está contida na área do baixo gravimétrico, a cobertura colúvio-aluvionar apresenta as maiores espessuras no extremo noroeste das duas seções, da ordem de 60 m, adelgaçando-se para sudeste, sendo as menores espessuras desta cobertura verificadas junto ao vale do rio Santa Catarina, e continua diminuindo para sudeste (IPT, 2020). Nessa seção, a espessura inferida do epicarste varia em torno de 50m próximo ao rio Santa Catarina.

Figura 14 – Mapa de localização das seções hidrogeológicas.



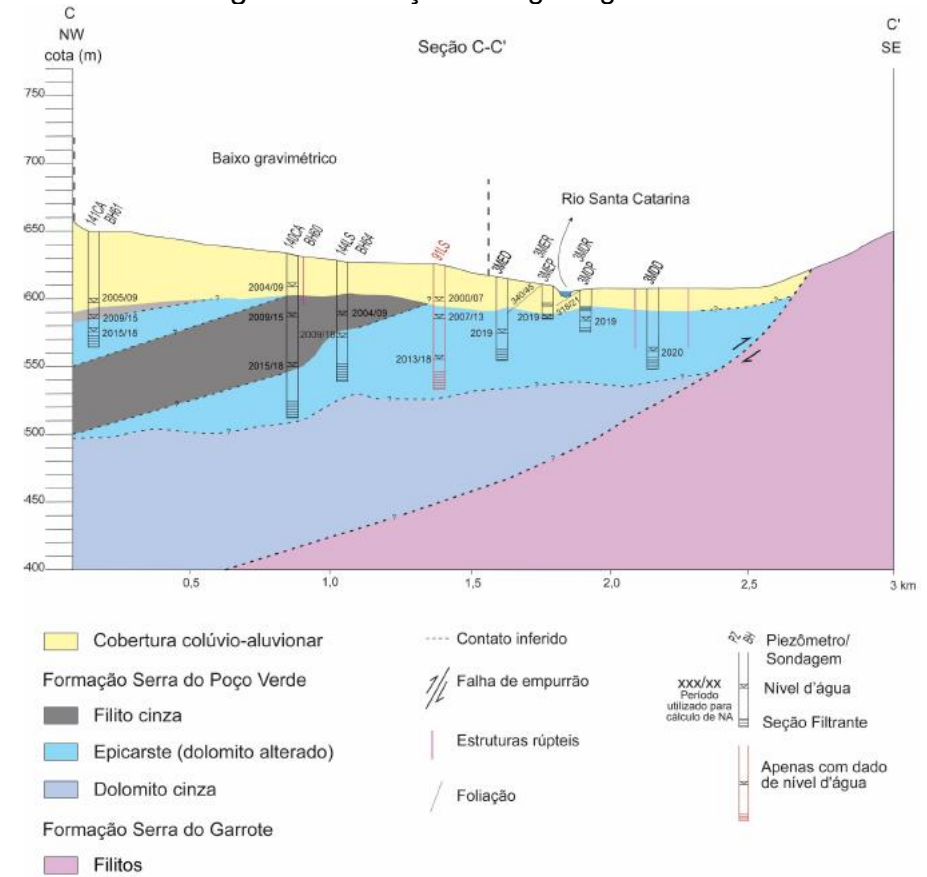
Fonte: (IPT, 2020).

Figura 15 – Seção hidrogeológica A-A'.



Fonte: (IPT, 2020)

Figura 16 – Seção hidrogeológica C-C'.



Fonte: (IPT, 2020)

3.2.1.2 Condicionantes geomorfológicas

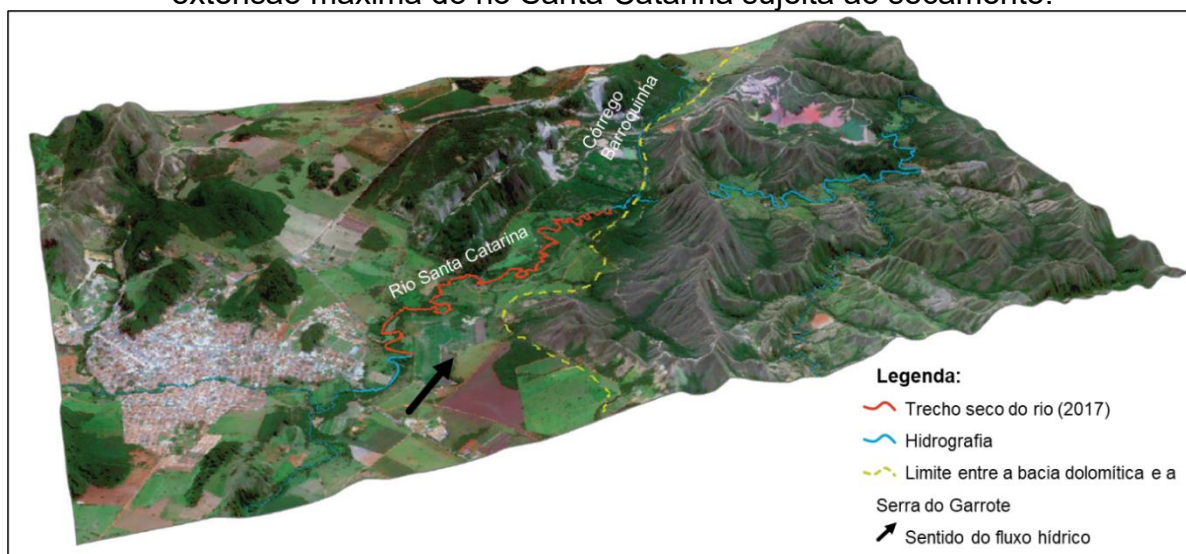
De acordo com Pessoa; Fernandes; Kimura (2012), do ponto de vista regional, o arcabouço morfológico primário é resultante do forte controle estrutural das falhas de direção NE. Posteriormente, a rede de drenagem de menor ordem vem sendo entalhada nas direções E-W e NW.

Na área de estudo, a bacia sedimentar dolomítica encontra-se capeada por colúvios, que possuem espessura variável, desde poucos metros até pouco mais de uma centena de metros. Os sedimentos mais grosseiros ficam depositados junto ao pé da encosta e os mais finos são carregados para os locais mais distantes e depositados nas áreas de menor declividade (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

As águas pluviais incidentes sobre os filitos escoam quase que totalmente para o interior da bacia sedimentar dolomítica, devido à pequena capacidade de retenção das águas nestas áreas (em função principalmente das altas declividades e pequena espessura de solos). Então, estas águas são infiltradas rapidamente ao atingirem o sopé das encostas, restringindo o avanço do canal de drenagem. Em alguns locais os canais de drenagem estão limitados, ou terminam em uma dolina ou *sinkhole* (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

O trecho onde o rio Santa Catarina está sujeito ao secamento termina na confluência com o Córrego Barroquinha, que corresponde ao limite entre a bacia sedimentar dolomítica e a Serra do Garrote. A Figura 17 apresenta o arranjo tridimensional do relevo, com destaque para o limite entre a bacia sedimentar dolomítica e a Serra do Garrote, em amarelo, bem como a máxima extensão do trecho seco do rio, em vermelho, observada em 2017. Nessa figura, também é possível observar o ponto de confluência do rio Santa Catarina com o córrego Barroquinha, onde ocorre o estrangulamento do rio Santa Catarina junto à serra do Garrote, dada a superimposição da intersecção de falhas de direção NE e E-W (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

Figura 17 – Arranjo tridimensional do relevo, evidenciando, em amarelo, o limite esquerdo da bacia sedimentar dolomítica; em azul, o curso d’água, e em vermelho, a extensão máxima do rio Santa Catarina sujeita ao secamento.



Fonte: Adaptado de (TRUST, 2018).

3.2.1.3 Feições Cársticas

Segundo, Pessoa; Fernandes; Kimura (2012), as principais feições cársticas encontradas na área de estudo são as seguintes:

- i. dolinas e sumidouros (ou *sinkholes*), que indicam zonas preferenciais de infiltração de águas superficiais;
- ii. os condutos e surgências (ou ressurgências), que indicam os locais onde os sistemas cársticos são drenados; e,
- iii. as cavernas, que constituem feições desenvolvidas pela circulação de águas em direções preferenciais.

O controle de dolinas e sumidouros e de condutos e surgências está fortemente condicionado às zonas de contato entre filitos e dolomitos, as quais ocorrem geralmente marcadas por falhas de direção NE. Assim, de maneira geral, percebe-se que estas feições cársticas estão associadas a zonas de grande contraste litológico, marcadas por direções preferenciais de fluxo de águas superficiais e subterrâneas.

A área de estudo apresenta três horizontes distintos de desenvolvimentos das feições cársticas locais (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012):

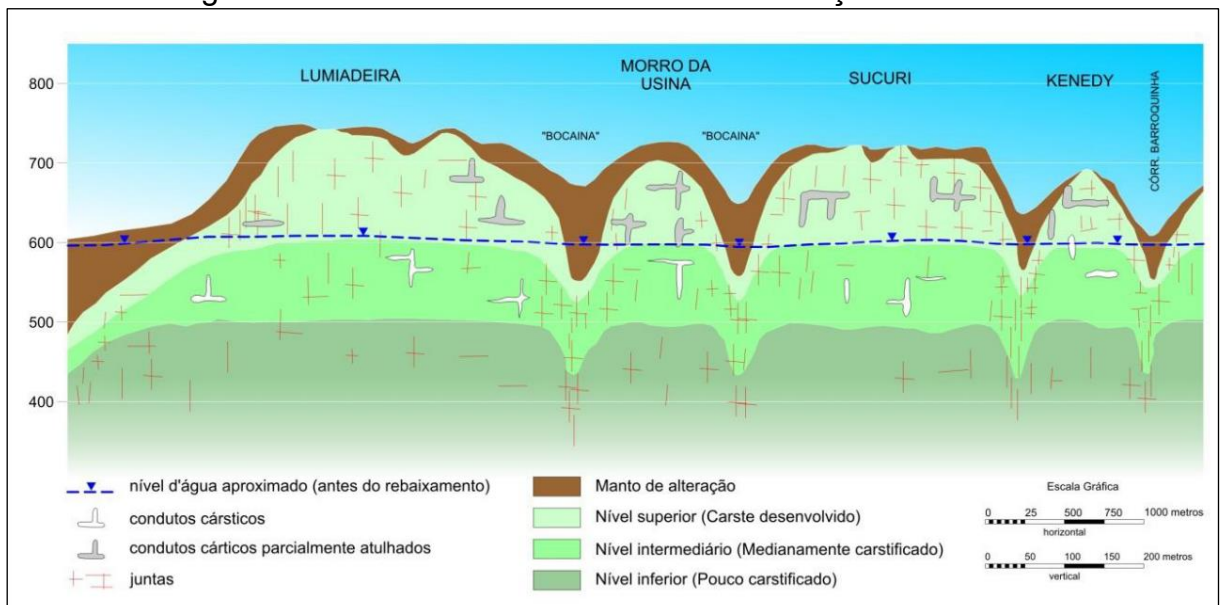
- i. Nível superior (carste desenvolvido): porção do maciço rochoso que está acima do nível d’água natural (600 metros). É o nível de maior evolução do carste, evidenciado

pela existência de grutas, grandes fendas de dissolução, abatimentos, *sinkholes* e etc, com cavidades de tamanho maior do que 15m. A circulação de água se dá pela percolação de águas superficiais através da zona vadosa, em rota de recarga para o sistema aquífero cárstico.

- ii. Nível intermediário: considera a porção do maciço rochoso entre as cotas 500m e 600m, onde o processo cárstico encontra-se em desenvolvimento. Neste nível, as descontinuidades abertas devido à dissolução química ocorrem com maior frequência, marcando a posição de condutos e surgências de águas subterrâneas, com cavidades entre 15 e 10m de tamanho.
- iii. O nível inferior trata-se de porção do maciço rochoso situado abaixo da cota 500m, onde a carstificação é incipiente. O meio comporta-se como fissural e, com exceção das zonas influenciadas por grandes estruturas rúpteis, não ocorrem grandes condutos cársticos como aqueles encontrados no nível intermediário, e o tamanho das cavidades é menor do que 5m.

A Figura 18 apresenta os três horizontes de desenvolvimento das feições cársticas locais, enquanto a Figura 19 ilustra algumas das feições cársticas encontradas na mina.

Figura 18 – Níveis de desenvolvimento das feições cársticas.



Fonte: (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012)

Figura 19 – a. Infiltração por gotejamento da porosidade secundária, b. infiltração por fraturas, c. infiltração por condutos cársticos.



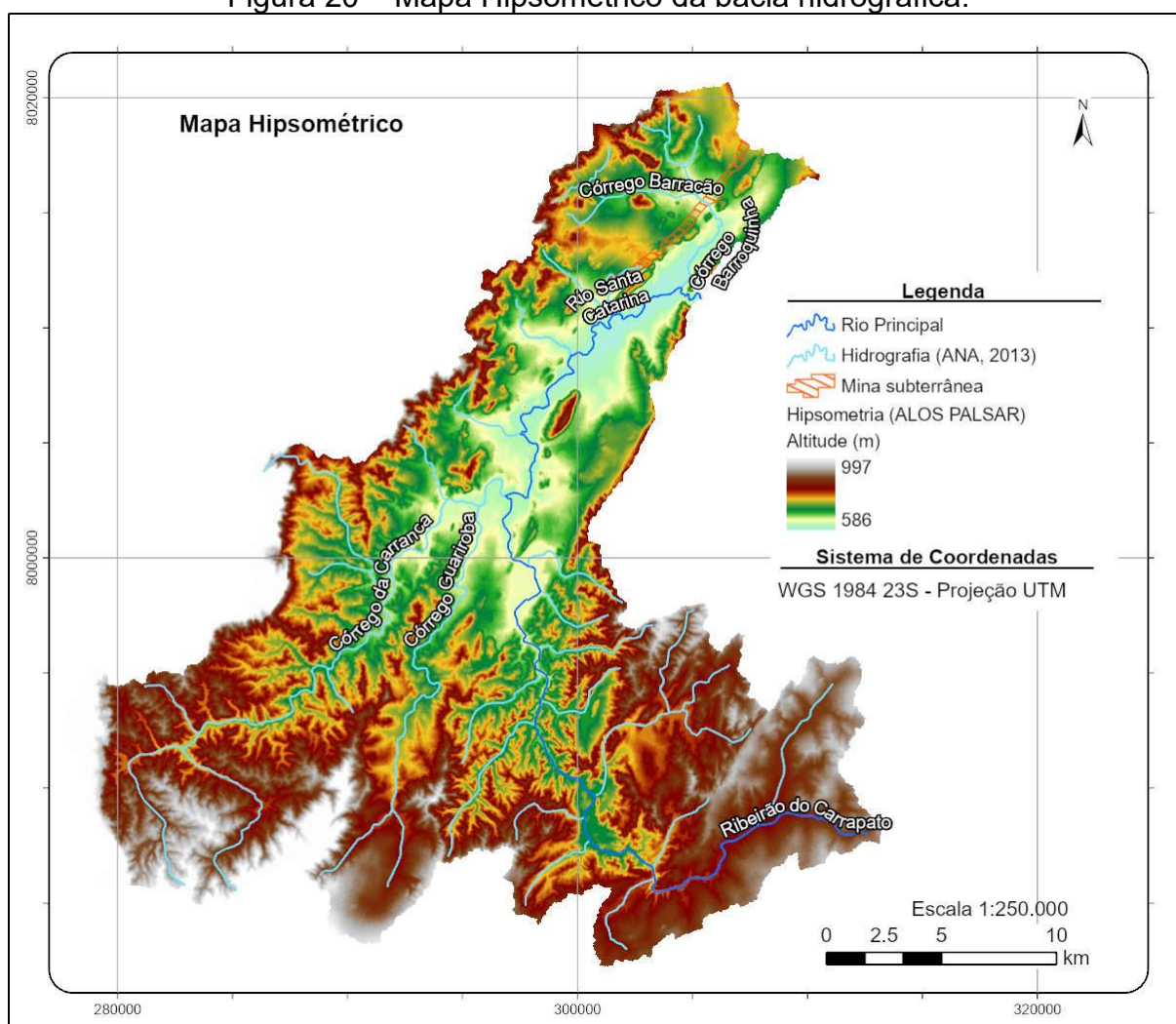
Fonte: Nexa Resources.

3.2.2 Caracterização hidrológica da área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Santa Catarina possui uma área de 633 km², abrangendo o município de Vazante e Lagamar. A bacia possui formato alongado, no sentido SO-NE.

O curso d'água principal possui uma extensão de 55 km e a sua declividade média é de 0,0016 m/m. As maiores declividades são encontradas na região da cabeceira. Na porção central e de jusante da bacia, a declividade do rio Santa Catarina é menos acentuada, apresentando uma média de 0,00086 m/m. A Figura 20 apresenta o mapa hipsométrico da bacia, bem como os cursos hídricos, com destaque para o rio principal. As principais características da bacia são apresentadas na Tabela 1. Tanto o Fator de Forma quanto o Coeficiente de Compacidade indicam que é uma bacia com pouca propensão a sofrer grandes enchentes.

Figura 20 – Mapa Hipsométrico da bacia hidrográfica.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 1 – Características morfométricas da bacia hidrográfica de estudo.

Características morfométricas da bacia	
Área da bacia (km ²)	633
Extensão do rio principal (km)	55
Declividade média (m/m)	0.0016
Perímetro (km)	250
Fator de Forma - Kf	0.21
Coeficiente de Compacidade - Kc	2.78
Densidade de Drenagem (km/km ²)	0.42
Características do rio Santa Catarina	
Extensão (km)	26.6
Declividade média (m/m)	0.00086
Índice de meandramento	2,2

Fonte: elaborado pela autora.

Os contornos da bacia, principalmente na porção sul e sudeste, são caracterizados por substrato de litologias de baixa permeabilidade, que condicionam

a ocorrência de um relevo serrano, com fortes declividades e solos pouco espessos. Em função disso, caracteriza-se por uma rede de drenagem mais densa, mais alta energia em vales encaixados. A maioria é efêmero, cujas nascentes são geralmente pontuais e, em muitos casos, intermitentes. Portanto, caracteriza-se por possuir alto coeficiente de escoamento superficial, elevada densidade de drenagem e baixa infiltração. O padrão de drenagem é às vezes treliça, às vezes retangular, controlado por falhas ou fraturas, e o escoamento é exorréico (TRUST, 2018).

Já a porção norte e central da bacia, que se caracteriza pela bacia sedimentar dolomítica, se configura por um amplo plano cárstico, com morros residuais. Como abordado anteriormente, esta região possui alta permeabilidade, caracterizada pelos depósitos aluviais e coluviais, com as feições cársticas bastante desenvolvidas. Possui baixo gradiente de declividade em função do relevo local e as taxas de escoamento superficial são menores, já que a infiltração é elevada. De acordo com (TRUST, 2018), a densidade de drenagem é baixa, os diversos cursos d'água são intermitentes ou desaparecem em sumidouros, com escoamento endorréico, e possuem um padrão de drenagem dendrítico (ou arboreste). Os poucos cursos d'água que atravessam este compartimento comumente têm suas nascentes localizadas ou no compartimento das rochas impermeáveis da Serra do Garrote ou nos morros residuais da bacia sedimentar dolomítica e apresentam vales rasos. Neste trecho, o próprio rio Santa Catarina apresenta-se meandrante, bastante sinuoso e com meandros abandonados.

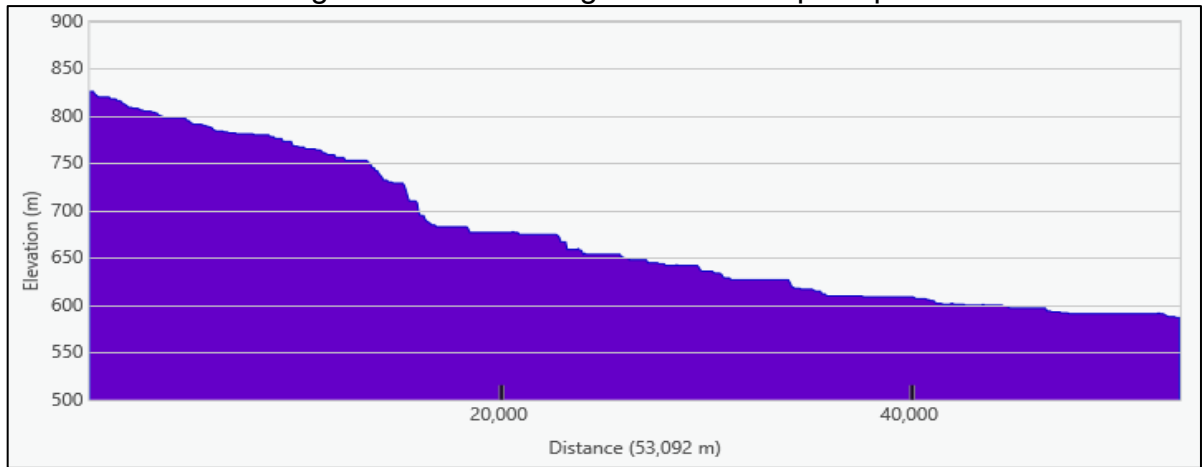
O rio Santa Catarina é perene, de 5ª ordem, e se forma da confluência do ribeirão do Carrapato e o córrego da Carranca. Próximo à exutória do modelo hidrodinâmico, há a confluência pela margem esquerda com o córrego Barroquinha. O Córrego Barroquinha recebe uma parte da vazão bombeada na mina, da ordem de 1.200 m³/h.

A Figura 21 apresenta o perfil longitudinal do rio principal, obtida a partir do MDT da ALOS (resolução de 12,5m). A partir, aproximadamente, do quilometro 30, tem-se representado o perfil do rio Santa Catarina.

Na bacia de estudo, a Nexa possui uma rede de monitoramento que conta com uma estação pluviométrica e onze estações linimétricas, nas quais a vazão é calculada por curvas-chave. Além disso, há doze pontos, principalmente no rio Santa Catarina, onde a vazão nos corpos d'água também é medida com *Flow-tracker*, de

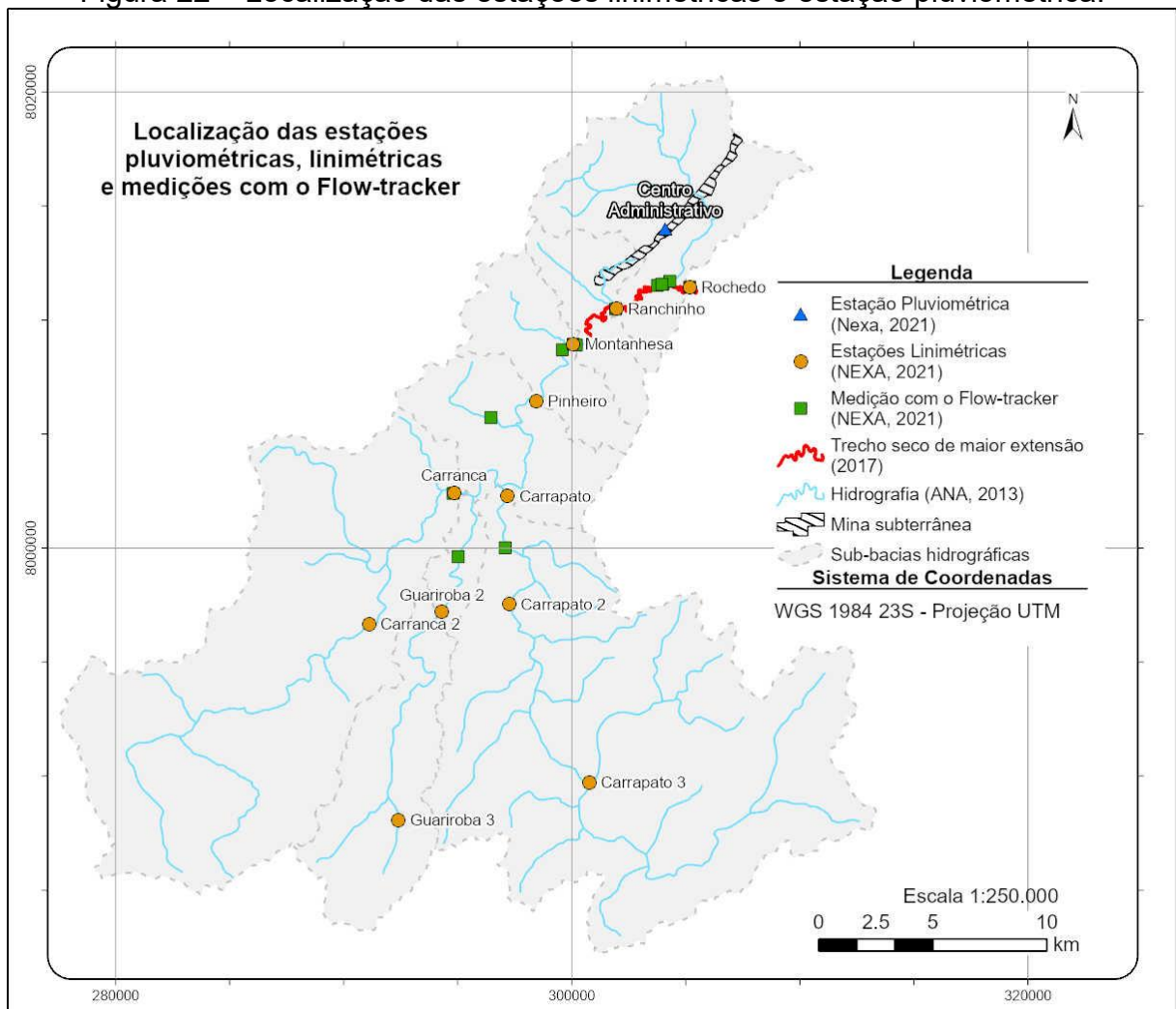
modo a complementar o monitoramento. A Figura 22 apresenta a localização dos instrumentos de monitoramento hidrológicos na área de estudo.

Figura 21 – Perfil longitudinal do rio principal.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 22 – Localização das estações linimétricas e estação pluviométrica.

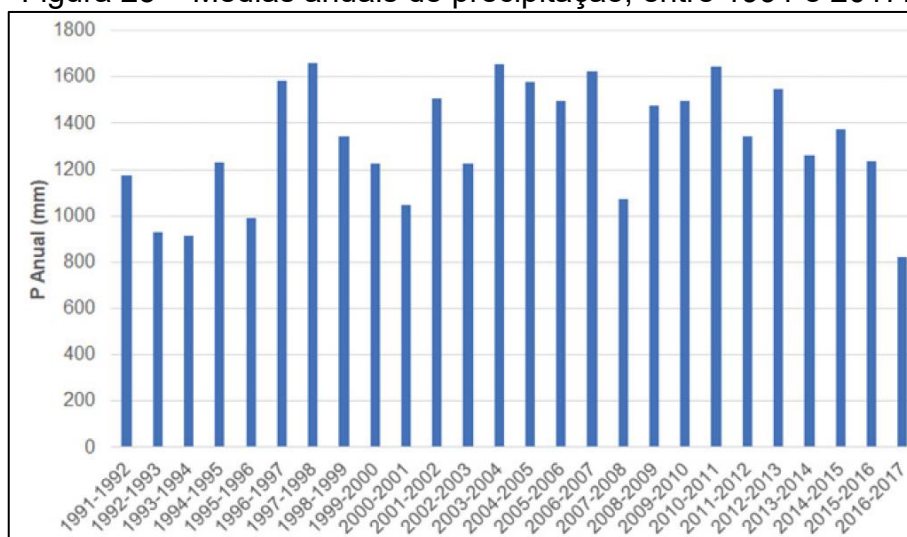


Fonte: elaborado pela autora.

3.2.2.1 Avaliação Climática

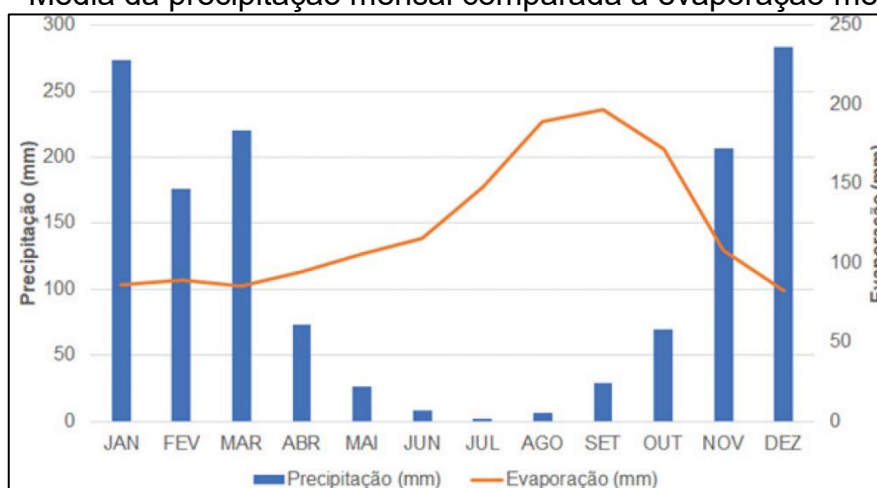
O regime de chuvas na região de Vazante é tipicamente tropical, com precipitação total anual normalmente entre 1250 e 1500 mm, como se pode observar pela Figura 23. O desvio pluviométrico médio anual em relação à normal geralmente fica em torno 15 e 20% (TRUST, 2018). A variabilidade entre o período chuvoso (novembro a março) e seco (abril a outubro) é significativa, como mostra a Figura 24. A porcentagem de precipitação máxima em três meses consecutivos fica entre 50 e 55%. A precipitação máxima geralmente ocorre em dezembro ou janeiro, enquanto o mínimo normalmente ocorre em julho (TRUST, 2018).

Figura 23 – Médias anuais de precipitação, entre 1991 e 2017.



Fonte: (TRUST, 2018).

Figura 24 – Média da precipitação mensal comparada à evaporação média mensal.



Fonte: (TRUST, 2018).

3.2.2.2 Vazões nos cursos d'água

O domínio do modelo hidrodinâmico abrange sete estações linimétricas da Nexa, que são descritas na Tabela 2. Essas estações possuem a medição do nível com frequência de 30 min, com o respectivo cálculo da vazão por meio de curvas-chave. Além destas, foram levantados na área do modelo hidrodinâmico, doze pontos com histórico de monitoramento fluviométrico com *Flow-tracker*. Estes possuem um período de monitoramento, na sua maioria, desde 2013 até hoje, com medições quinzenais. Cabe ressaltar que essas medições não representam adequadamente os eventos de maiores cheias do rio, em função da dificuldade de medição nessas situações. As Tabela 2 e Tabela 3 apresentam, respectivamente, a localização das estações linimétricas e das medições com o *Flow-tracker*.

Tabela 2 – Localização e disponibilidade dos dados linimétricos. Em negrito constam as estações utilizadas como condições de contorno do modelo hidrodinâmico.

Local	Estação Linimétrica	X (E)	Y (N)	Período de monitoramento
		WGS 1984 23S - Projeção UTM		
Afluentes	Carranca	294.837	8.002.440	Jun/18 - hoje
	Guariroba 2	294.359	7.997.178	Mai/19 - hoje
	Carrapato	297.127	8.000.057	Jun/18 - hoje
Rio Santa Catarina	Pinheiro	297.462	8.006.398	Jun/19 - hoje
	Montanhesa	300.052	8.008.987	Mai/13 – Abr/20
	Ranchinho	301.940	8.010.499	Mai/13 - hoje
	Rochedo	305.453	8.011.284	Mai/13 - hoje

Fonte: NEXA Resources (2021)

Tabela 3 – Localização e disponibilidade dos fluviométricos, medidos com o *Flow-Tracker*. Em negrito consta o principal sumidouro do sistema.

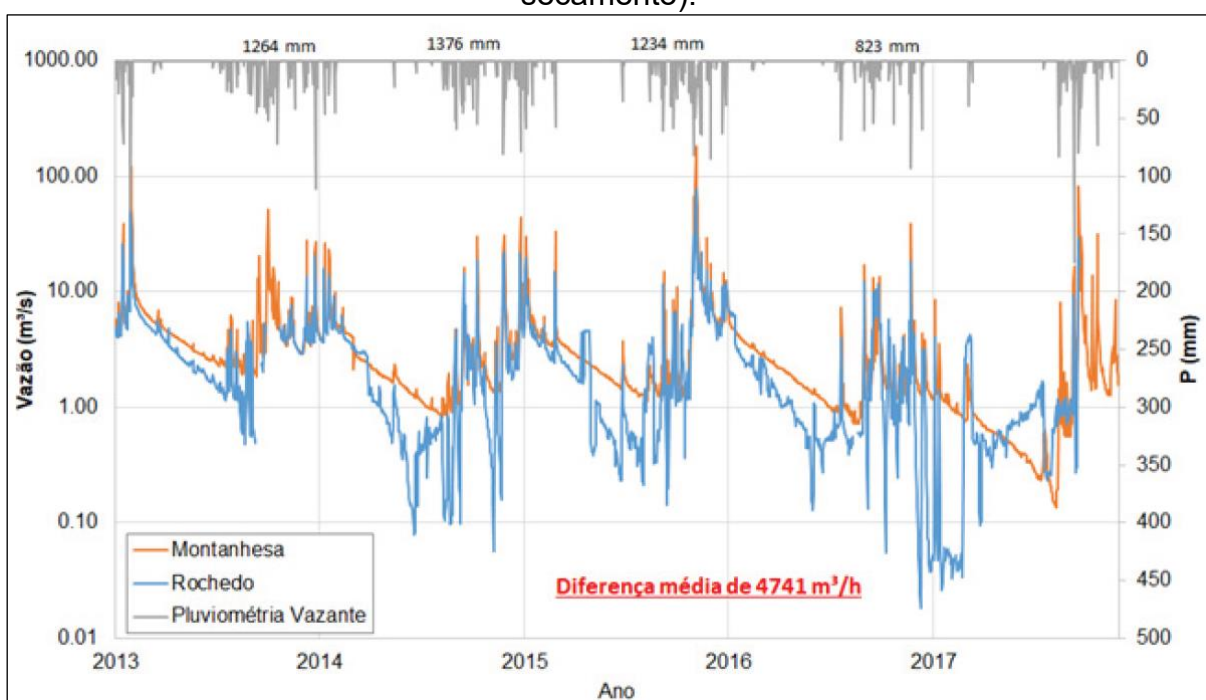
Local	Medição Flow-Tracker	X (E)	Y (N)	Cota (m)	Período de monitoramento
		WGS 1984 23S - Projeção UTM			
Montante	Ribeirão Carranca	294.837	8.002.440	620	2005 - 2020
	Córrego Guariroba	295.068	7.999.668	638	2005 - 2021
	Rio Carrapato	297.127	8.000.057	620	2005 - 2020
	Córrego da Mata	296.503	8.005.771	620	2005 - 2021
Rio Santa Catarina	Praíinha	299.636	8.008.742	600	2005 - 2021
	Montanhesa	300.106	8.008.986	-	2013 - 2019
	Copasa	300.203	8.008.904	-	2020 - 2021
	Bertoldo (atual Ranchinho)	301.971	8.010.529	590	2005 - 2021
	Poço Verde	303.808	8.011.561	589	2005 - 2021
	Vau (acima do Bambuzal)	303.952	8.011.560	-	2014 - 2021
	Bambuzal	304.044	8.011.619	585	2005 - 2021
Rochedo	305.214	8.011.490	590	2005 - 2021	

Fonte: Nexa Resources (2020).

A influência do bombeamento na mina ocorre no rio Santa Catarina, no trecho a jusante da estação Montanhese até a estação Rochedo. Em um estudo de regionalização de vazões entre a estação Montanhese e estações das bacias hidrográficas adjacentes, verificou-se que até o fim da estiagem de 2017, a estação de Montanhese não sofreu influência do rebaixamento operado pela Nexa (TRUST, 2018).

A Figura 25 compara os dados das estações Montanhese e Rochedo. Segundo o estudo de TRUST (2018), a diferença média entre as vazões nas estações Montanhese e o Módulo III, próximo de Rochedo, é de 4.741 m³/h o que evidencia a influência do rebaixamento operado pela Nexa no trecho entre as duas seções.

Figura 25 – Comparação do monitoramento fluviométrico nas estações Montanhese (montante do trecho sujeito ao secamento) e Rochedo (jusante do trecho sujeito ao secamento).



Fonte: (TRUST, 2018).

Por fim, TRUST (2018) fez os levantamentos da concessão das outorgas e cadastros de insignificante uso na área de estudo e calculou a oferta hídrica, considerada como 50% da $Q_{7,10}$, de acordo com a Portaria SEMAD/IGAM nº 1548/2012. No caso da Seção Módulo III, na confluência do rio Santa Catarina com o Córrego Barroquinha, próximo à estação Rochedo, a oferta hídrica considerada foi de -2.437 m³/h, em função do déficit hídrico de 4.741 m³/h, observado entre esta seção e a seção Montanhese. Então, a partir da oferta hídrica, e considerando as outorgas e

cadastros insignificantes, obteve-se a disponibilidade hídrica para as seções Montanhesa e Módulo III, de 1.350 m³/h e -3.227 m³/h, respectivamente. Esses resultados são resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Disponibilidade hídrica considerando a perda d'água pelo rebaixamento.

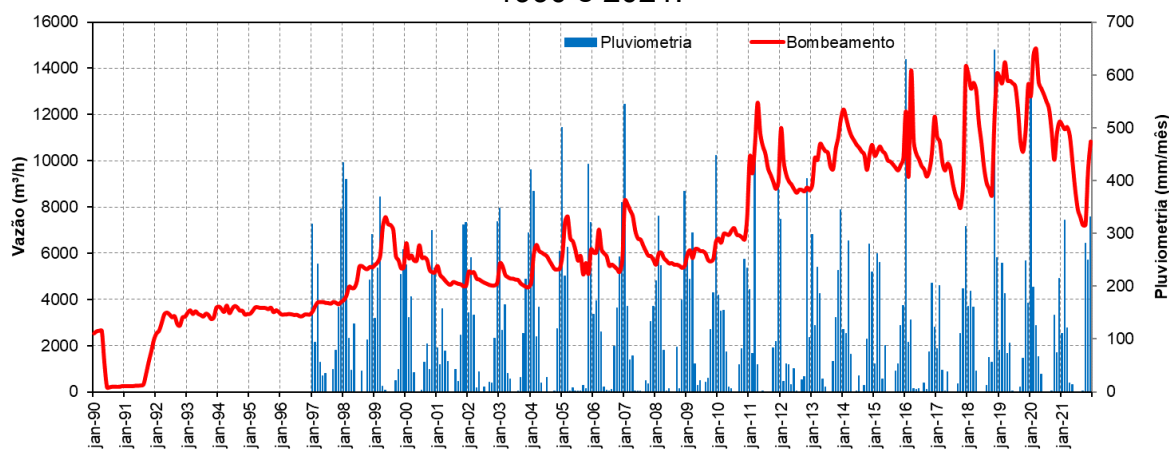
Seção	Q _{7,10} (m ³ /s)	Oferta Hídrica (m ³ /h)	Outorgas (m ³ /h)	Cadastros Insignificantes (m ³ /h)	Disponibilidade Hídrica (m ³ /h)
Montanhesa	1,13	2.034	450	234	1.350
Módulo III (próximo à Rochedo)	1,28	-2.437	547	243	-3.227

Fonte: (TRUST, 2018)

3.2.2.3 Vazões bombeadas na mina

O monitoramento da vazão bombeada nas galerias da mina se iniciou em 1990, com o início da exploração na mina subterrânea. A Figura 26 apresenta a relação entre a precipitação e a taxa de bombeamento mensal desde 1990 até 2020. No início da operação, a vazão média era de 3.400m³/h (1992 até 1996), após o período de adaptação do sistema de desaguamento. Atualmente, a vazão média (dos últimos 5 anos) é de cerca de 11.200 m³/h. No ano de 2021, a vazão média bombeada foi mais baixa, resultando em 9.528 m³/h.

Figura 26 – Vazão média mensal bombeada comparada à precipitação mensal entre 1990 e 2021.



Fonte: NEXA Resources (2022).

A vazão bombeada sofre influência da sazonalidade e do avanço de lavra. Com relação ao ano hidrológico, as taxas de bombeamento podem apresentar um aumento de mais de 50% no período chuvoso em relação ao período seco. Quando ocorre a interceptação de fraturas, evidencia-se um aumento significativo nas taxas de bombeamento, que está relacionado ao processo de drenagem do maciço rochoso. Após esse processo, uma parte da vazão adicional é mantida pelo aporte de águas subterrâneas advindo da reserva renovável, ou seja em função da recarga de águas pluviais (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012).

3.2.2.4 Contribuição de fluxo do rio Santa Catarina para a mina

Entre dezembro de 2019 e janeiro de 2020 foi realizado um estudo no rio Santa Catarina, na porção adjacente à mina de Vazante, com o objetivo de caracterizar a dinâmica de fluxos subterrâneos entre o rio e a mina, a partir de traçadores corantes (WATER SERVICES AND TECHNOLOGIES, 2020), para complementar um estudo realizado em 2013, da DHI & GeoHydros, com o mesmo objetivo. A Figura 27 apresenta um dos sumidouros identificados durante as atividades de campo.

Figura 27 – Localização de dois sumidouros, onde foi feita a injeção de um dos traçadores.



Fonte: (WATER SERVICES AND TECHNOLOGIES, 2020).

O estudo concluiu que a contribuição mínima do fluxo do rio para o meio cárstico é da ordem de pelo menos 8.000 m³/h, pois essa foi aproximadamente a vazão máxima registrada na estação de monitoramento Ranchinho durante o período em que a totalidade do rio estava sendo drenada no trecho entre essa estação e o sumidouro identificado na figura acima. A taxa máxima de bombeamento da mina durante o mesmo período foi de 18.706 m³/h. A porcentagem mínima de água do rio no deságue da mina deve ser, portanto, de 42,8%. Essa é, provavelmente, a vazão mínima que infiltra, porque a perda de água pelo leito do rio provavelmente aumenta quando ele flui com vazões mais altas, à medida que as dolinas adjacentes ao canal do rio ficam inundadas com o aumento do nível do rio (WATER SERVICES AND TECHNOLOGIES, 2020).

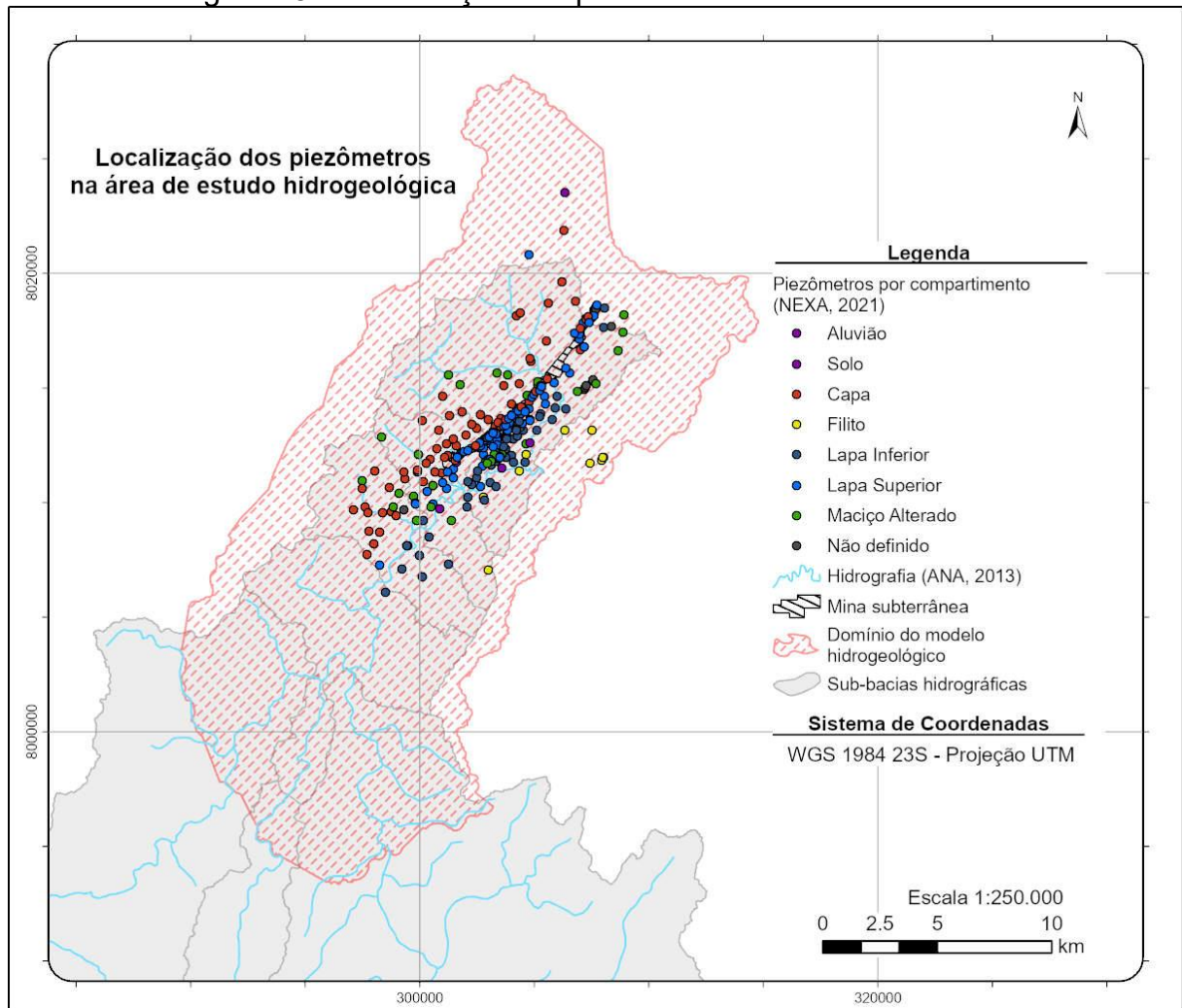
O estudo também demonstrou que os pontos discretos de infiltração no rio não estão necessariamente conectados diretamente aos caminhos de fluxo por fraturas que conduzem água diretamente para a mina. Em vez disso, alguns resultados indicam que o fluxo infiltrado pelo sumidouro entrou no armazenamento no aquífero superficial e / ou epicarste, e depois foi drenado para o aquífero fraturado subjacente durante um período de tempo relativamente extenso (WATER SERVICES AND TECHNOLOGIES, 2020).

3.2.2.5 *Piezometria*

Desde 1989, a operação na mina passou a depender do processo de rebaixamento do nível d'água para permitir a extração do minério. Por isso, a Nexa possui um monitoramento hidrogeológico bastante extenso, tanto em rede de monitoramento quanto em período monitorado, contando com cerca de 300 piezômetros. A Figura 28 apresenta a localização dos piezômetros na área de estudo, enquanto a Tabela 5 apresenta a quantidade de piezômetros instalados por unidade hidrogeológica.

De acordo com Frasa (1991 apud (PESSOA; FERNANDES; KIMURA, 2012)), considera-se o nível de base regional do aquífero na cota 590 m, ou seja, antes do início do bombeamento na mina subterrânea. Atualmente, o nível d'água mínimo se encontra próximo da cota 340 m, o que representa um rebaixamento máximo de 250 m.

Figura 28 – Localização dos piezômetros na área de estudo.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 5 – Distribuição dos piezômetros por unidade hidrogeológica na Mina de Vazante.

Unidade Hidrogeológica	Nº de Piezômetros
Aluvião	11
Capa	73
Filito	11
Lapa Inferior	69
Lapa Superior	91
Maciço Alterado	31
Não definido	13
Solo	1

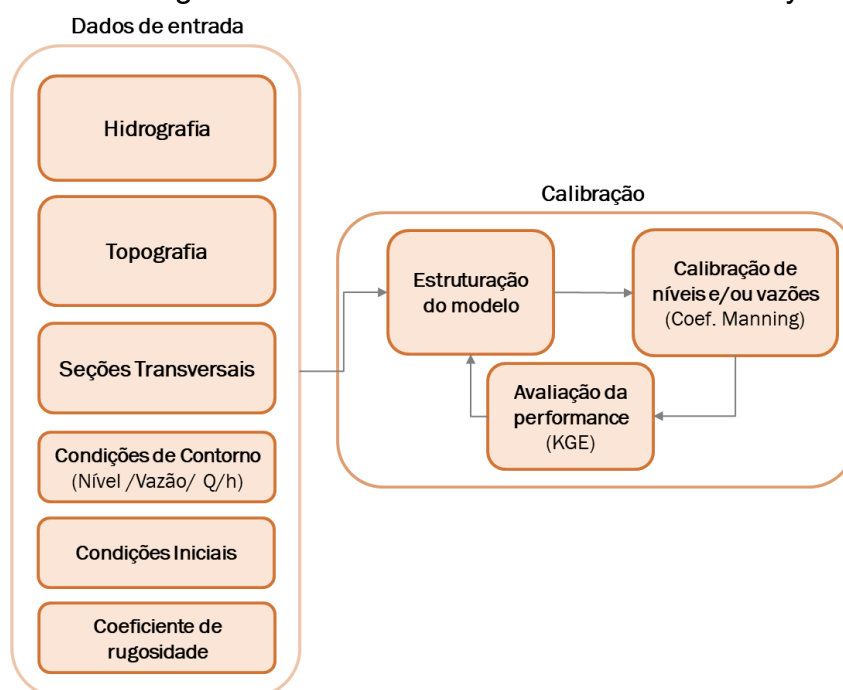
Fonte: elaborado pela autora.

4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO RIO SANTA CATARINA

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS ESPECÍFICOS

A construção do modelo hidrodinâmico está resumida na Figura 29, bem como os principais dados considerados no modelo hidrodinâmico são descritos no Quadro 4.

Figura 29 – Fluxograma do modelo hidrodinâmico no Mike Hydro River.



Fonte: elaborado pela autora.

Quadro 4 – Principais dados de entrada do modelo.

Informação	Descrição	Fonte
Topografia	- Curvas de Nível, do levantamento VANT a laser (resolução de 1m) - Batimetria no rio SC - MDE ALOS PALSAR (resolução 12,5 m)	NEXA (2018) ASF (2021)
Hidrografia	- Mesma considerada no modelo FEFLOW	NEXA (2021)
Seções transversais	- Relatório de instalação de 7 réguas linimétricas;	NEXA (2013); NEXA (2018); NEXA (2019)
Descrição do leito do rio	- Relatório de instalação de 7 réguas linimétricas;	NEXA (2013); NEXA (2018); NEXA (2019)
Nível dos corpos d'água	- 6 Estações linimétricas (frequência de 30 min)	NEXA (2021)

Fonte: elaborado pela autora.

A vazão foi calculada pela curva-chave de cada estação, a partir dos dados de nível, obtidos por telemetria, com a frequência de 30 min. Considerando a disponibilidade de dados nas estações e a demanda computacional para a execução dos modelos acoplados, definiu-se o período de modelagem de um ano, 2021.

Nessa etapa, o modelo hidrodinâmico foi calibrado desconsiderando o acoplamento com o FEFLOW, ou seja, sem considerar a componente hidrogeológica. A calibração foi realizada para o Coeficiente de Rugosidade de Manning, e considerou apenas a estação Pinheiro, que não sofre influência direta da mina, embora esteja localizada em ambiente cárstico. Os resultados do modelo foram validados com as vazões simuladas para a estação Ranchinho, localizada em área sob influência da mina, de modo a avaliar se a vazão excedente nessa estação ficou coerente com os valores estimados para a infiltração para o meio subterrâneo.

4.1.1 Resolução Espacial e Temporal

A resolução espacial e temporal do modelo são correlacionadas e influenciam na construção do modelo. Visando obter uma estabilidade computacional, que reflete na precisão e eficiência do modelo, deve-se ajustar esses dois parâmetros em concordância.

De acordo com (ZHEN-GANG, 2008), a escolha da resolução espacial deve se pautar em dois fatores: a extensão em que ocorrem gradientes espaciais e a extensão de análise desses gradientes de acordo com os objetivos do estudo.

Os modelos hidrodinâmicos podem potencialmente realizar a simulação do fluxo do rio em níveis unidimensionais (1D) ou bi/tridimensionais (2D/3D). Se a variação do sistema em uma dimensão pode ser considerada insignificante ou pode ser representada por valores médios, é possível desconsiderar essa dimensão no modelo. Contudo, cabe ressaltar que toda simplificação leva a uma perda de informação, que pode ser relevada desde que se garanta a resolução adequada dos gradientes espaciais dos níveis d'água (ZHEN-GANG, 2008).

Nos casos em que a simplificação dimensional é fundamentada, os modelos hidrodinâmicos 1D são significativamente úteis devido à sua precisão em descrever o comportamento hidráulico de córregos e rios naturais, bem como a exigência de baixo tempo de computação e possibilidade de utilizar dados de campo relativamente escassos (JAHANDIDEH-TEHRANI et al., 2020). Por outro lado, como pode ser visto

no Quadro 5, os modelos 2D/3D são mais capazes de representar batimetria e topografia fluviais detalhadas e simular as condições hidrodinâmicas em sistemas fluviais complexos (CHEN; LIU, 2017).

Quadro 5 – Comparação das vantagens e desvantagens da modelagem hidrodinâmica em 1D ou 2D/3D.

Modelo	Vantagens	Desvantagens
Unidimensional (1D)	Baixa exigência computacional Baixa exigência de dados Baixo custo Preciso na modelagem de rios naturais largos desde que não complexos	Pouca eficiência para rios largos em sistemas complexos Pouca eficiência em canais artificiais complexos Não fornece de informações muito detalhadas, em função dos dados de entrada
Bi ou tridimensional (2D/3D)	Representação batimétrica precisa Mapeamento preciso de inundação de enchentes Mais eficiência na modelagem de canais artificiais Fornecimento de saídas com maior resolução temporal e espacial	Alto tempo de computação Alta necessidade de dados Configuração demorada Alto custo

Fonte: Adaptado de (JAHANDIDEH-TEHRANI et al., 2020).

Considerando o objetivo do presente estudo, optou-se por utilizar um modelo unidimensional, uma vez que a variação em 2D não seria significativa. Outros fatores que embasaram essa decisão foram a baixa exigência de dados e computacional, visto que o acoplamento com o modelo hidrogeológico possui uma alta demanda computacional.

Não há diretrizes formais para selecionar a resolução temporal. A duração de uma simulação dependente do tempo pode variar de semanas a anos. Um requisito básico é que as simulações sejam longas o suficiente para eliminar o efeito das

condições iniciais do modelo. Isso garante que os erros nas condições iniciais não afetem significativamente os resultados do modelo (ZHEN-GANG, 2008). Segundo o autor, a resolução temporal geralmente é determinada pelos seguintes fatores:

- i. tamanho da área de estudo;
- ii. condições de fluxo e características de transporte de água;
- iii. processos de qualidade da água de interesse;
- iv. disponibilidade de dados medidos; e
- v. necessidades de apoio à tomada de decisões.

O modelo foi executado apenas para o ano de 2021 em função da demanda computacional do acoplamento ao modelo hidrogeológico. Os dados de entrada foram consolidados para a escala diária e a análise dos resultados foi realizada para os resultados diários e para as médias móveis de sete dias dos resultados da vazão.

Segundo Jahandideh-tehrani et al., (2020), a etapa mais importante da construção do modelo hidrodinâmico 1D é a definição de condições de contorno precisas, incluindo condições de montante e jusante. Especificamente para modelos cujo objetivo é modelar o nível de água projetado, Warmink et al., (2011) afirma que as incertezas nesse caso são dominadas pelas fontes que não mudam entre a calibração e a previsão. Neste caso, a vazão a montante e a equação de rugosidade empírica para o canal principal têm a maior influência na incerteza dos níveis de água modelados (WARMINK et al., 2011).

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.2.1 Validação dos dados observados dos linígrafos e do *Flow-tracker*

Os dados observados das estações linimétricas foram validados com os dados medidos pelo *Flow-tracker* para as estações que possuem medições nos mesmos locais, sendo elas: Carranca, Ranchinho e Rochedo. A estação Montanhese, apesar de também apresentar as medições contíguas no mesmo local foi desconsiderada por não possuir medições em 2021. Destaca-se que esta validação é importante para avaliar a confiabilidade dos dados observados utilizados na etapa de calibração do modelo. As curvas-chave das estações linimétricas, que foram utilizadas para o cálculo da vazão, são apresentadas no Apêndice A.

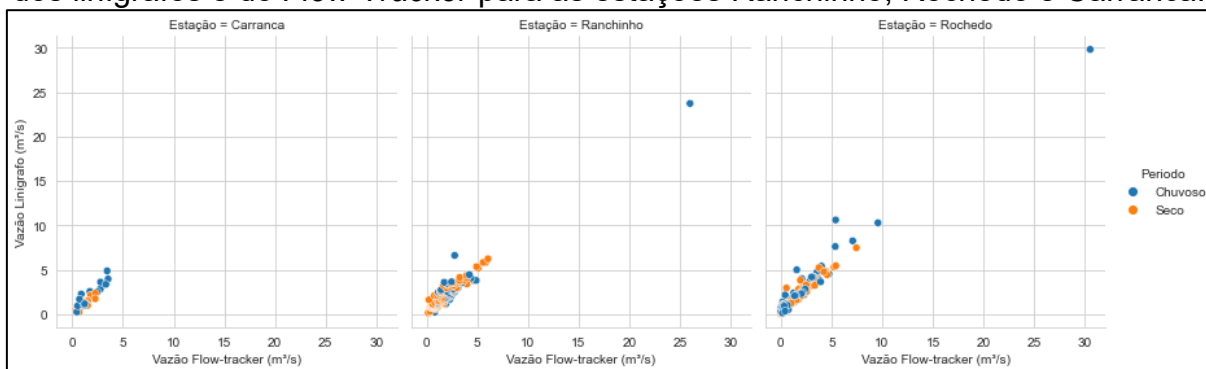
As três estações apresentaram uma boa correlação entre os dados, como mostra a Tabela 6, indicando que os dados de vazão obtidos pelas curvas-chave nas estações linimétricas estão coerentes com os dados medidos pelo *Flow-tracker*. A Figura 30 mostra a correlação dos dados no gráfico de dispersão, apresentando uma boa correlação tanto para o período seco quanto chuvoso. Cabe ressaltar o evento do dia 09 de dezembro de 2020, em que foram registradas vazões bastante significativas pelo *Flow-tracker*, em que a curva-chave nos linígrafos de Ranchinho e Rochedo representaram adequadamente as vazões medidas.

Tabela 6 – Correlação de Pearson para a validação dos dados de vazão obtidos a partir dos linígrafos e *Flow-Tracker* para as estações Carranca, Ranchinho e Rochedo.

Estação	Número de pontos	Correlação de Pearson
Carranca	43	0,93
Ranchinho	141	0,96
Rochedo	189	0,98

Fonte: elaborado pela autora.

Figura 30 – Gráfico de dispersão da validação dos dados de vazão obtidos a partir dos linígrafos e do *Flow-Tracker* para as estações Ranchinho, Rochedo e Carranca.



Fonte: elaborado pela autora.

4.2.2 Construção do modelo hidrodinâmico

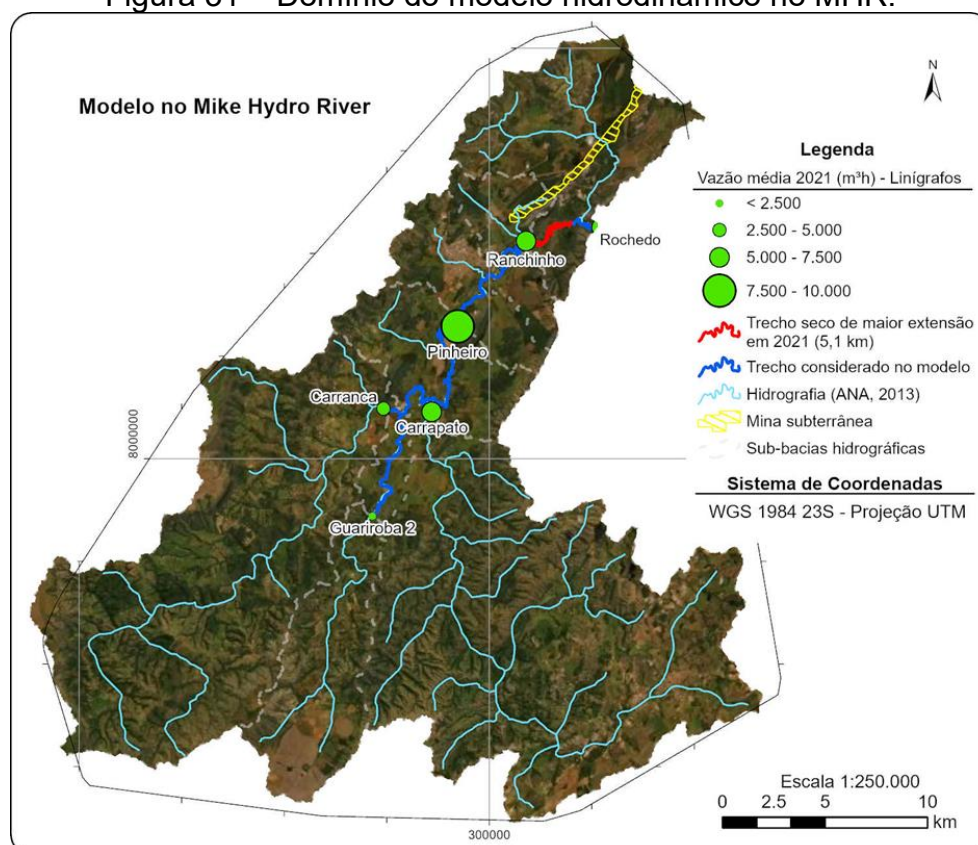
A Figura 31 apresenta o domínio do modelo no Mike Hydro River (MHR), com a localização das estações linimétricas e as vazões médias monitoradas no ano de 2021. O modelo abrange uma área de 635 km².

O modelo considera três estações de montante, Carranca, Guariroba 2 e Carrapato, e uma estação de jusante, a estação Rochedo. As estações Pinheiro e

Ranchinho foram utilizadas para a calibração e validação do modelo, sendo a primeira representativa da porção do rio que não sofre impacto direto do bombeamento da mina, e a segunda já no trecho de rio sujeito ao secamento. A estação Montanhese não foi considerada para a calibração ou validação, pois não apresenta dados monitorados no período simulado.

O passo de tempo definido para o modelo não acoplado foi de 10 segundos e posteriormente, na etapa de acoplamento foi diminuído para 2 s, para garantir a estabilidade dos modelos acoplados. A resolução espacial do modelo hidrodinâmico foi definida como 50 m. Essa definição é uma etapa importante para garantir o acoplamento adequado. A validação dessa resolução foi realizada junto à malha do FEFLOW, de modo que a malha do MHR não tivesse ficado grosseira ou demasiadamente detalhada.

Figura 31 – Domínio do modelo hidrodinâmico no MHR.



Fonte: elaborado pela autora.

A modelagem do rio Santa Catarina configura um desafio do ponto de vista hidrodinâmico em função de duas condicionantes, ambas relacionadas aos aspectos físicos da bacia.

O primeiro ponto corresponde à morfometria do canal. O rio Santa Catarina apresenta um elevado índice de meandramento e a geometria do canal está em constante transformação, dificultando a sua representação fidedigna. Um dos maiores desafios nos modelos hidrodinâmicos é a falta de dados precisos para representar adequadamente as variações espaciais na geometria do canal (por exemplo, forma do canal, inclinação e comprimento) (SALEH et al., 2013). Cabe ressaltar que, segundo Saleh et al. (2013), a descrição longitudinal dos perfis de nível do leito tem um impacto maior na simulação dos níveis de água do que as formas transversais.

Em segundo lugar, o rio está localizado em uma região cárstica bastante desenvolvida, como apresentado no Capítulo 3.2.1, e possui perdas de água significativas para o meio subterrâneo, tanto difusa como pontual, por fraturas e condutos cársticos. Esse processo se acentua na região próximo à mina, de maior nível de fraturamento. Essa infiltração não uniforme, ainda mais em uma condição fora do equilíbrio, em função das atividades antrópicas, torna complexa a modelagem, visto que não se sabe com exatidão a magnitude dessas vazões e não se conhecem todos os pontos de infiltração.

A primeira questão abordada foi discutida nos resultados deste Capítulo, enquanto a segunda questão foi discutida na continuidade do estudo, no Capítulo 5.

A vazão de montante foi definida em função das curvas chave das estações. O coeficiente de rugosidade de Manning ao longo do rio, tanto da calha principal quanto da calha secundária foi determinado de acordo com a metodologia da USGS (ARCEMENT; SCHNEIDER, 1989), a partir da descrição de relatórios de campo. Esse parâmetro foi ajustado durante o processo de calibração, como recomendado por Saleh et al., (2013).

4.2.2.1 Hidrografia, topobatimetria e seções transversais

Como citado anteriormente, a definição do traçado do rio e das seções transversais foi um desafio nesse estudo, visto que o rio tem um alto índice de meandramento e tem seu curso alterado com o passar do tempo. Por isso, diferentes bases de dados, de diferentes datas, possuem o traçado distinto. Em função disso, foi realizada a consolidação entre as informações de diferentes anos.

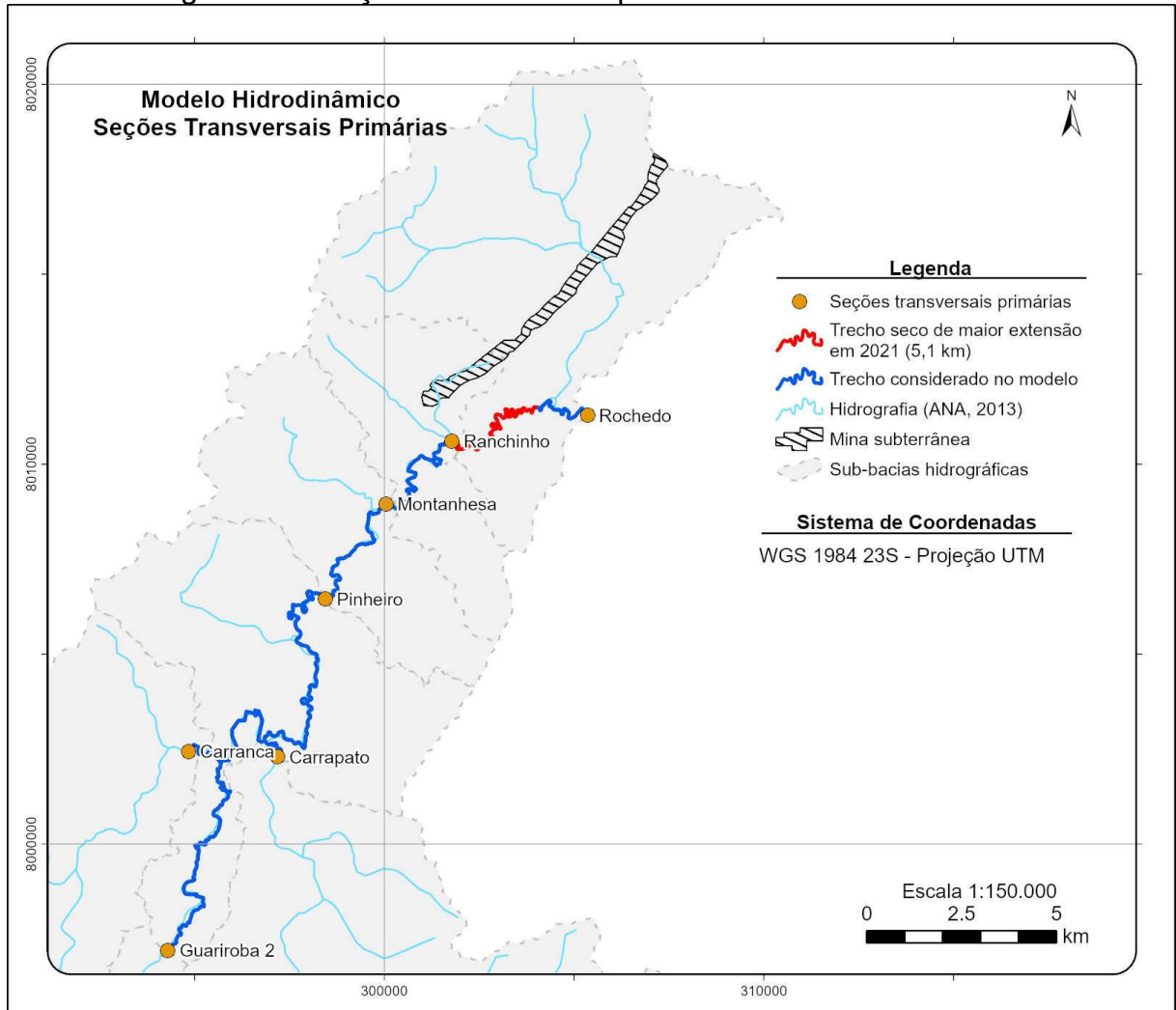
A hidrografia utilizada foi exportada do FEFLOW, uma vez que os nós da malha do FEFLOW e o grid do Mike Hydro River devem coincidir espacialmente entre os modelos, para garantir o correto acoplamento.

Além disso, a área de estudo considera 55 km de hidrografia, mas possui apenas 7 seções transversais levantadas. Essas seções consideram, em sua maioria, apenas a calha principal do rio e não a calha secundária. As seções transversais de Guariroba 2 e Pinheiro foram elaboradas em junho de 2019, enquanto as de Carranca e Carrapato foram levantadas em junho de 2018. As seções transversais de Montanhesa, Ranchinho (antigo Bertoldo) e Rochedo são as mais antigas, datadas de 2013. A Figura 32 apresenta a localização das 7 seções transversais primárias consideradas no modelo do MHR. Os traçados das seções transversais primárias podem ser consultados no Apêndice A.

Destas seções primárias foi obtida a geometria do canal. As cotas das seções foram obtidas a partir da consolidação das diferentes bases de dados topográficos e batimétricos. Na porção de montante, onde não se tem informações detalhadas, foi considerado o MDE Alos Palsar como base, que possui uma resolução espacial pouco discretizada, de 12,5 m. Na região do rio Santa Catarina, considerou-se as informações do levantamento VANT a laser realizado pela NEXA em 2018, que possui uma resolução espacial de 1m.

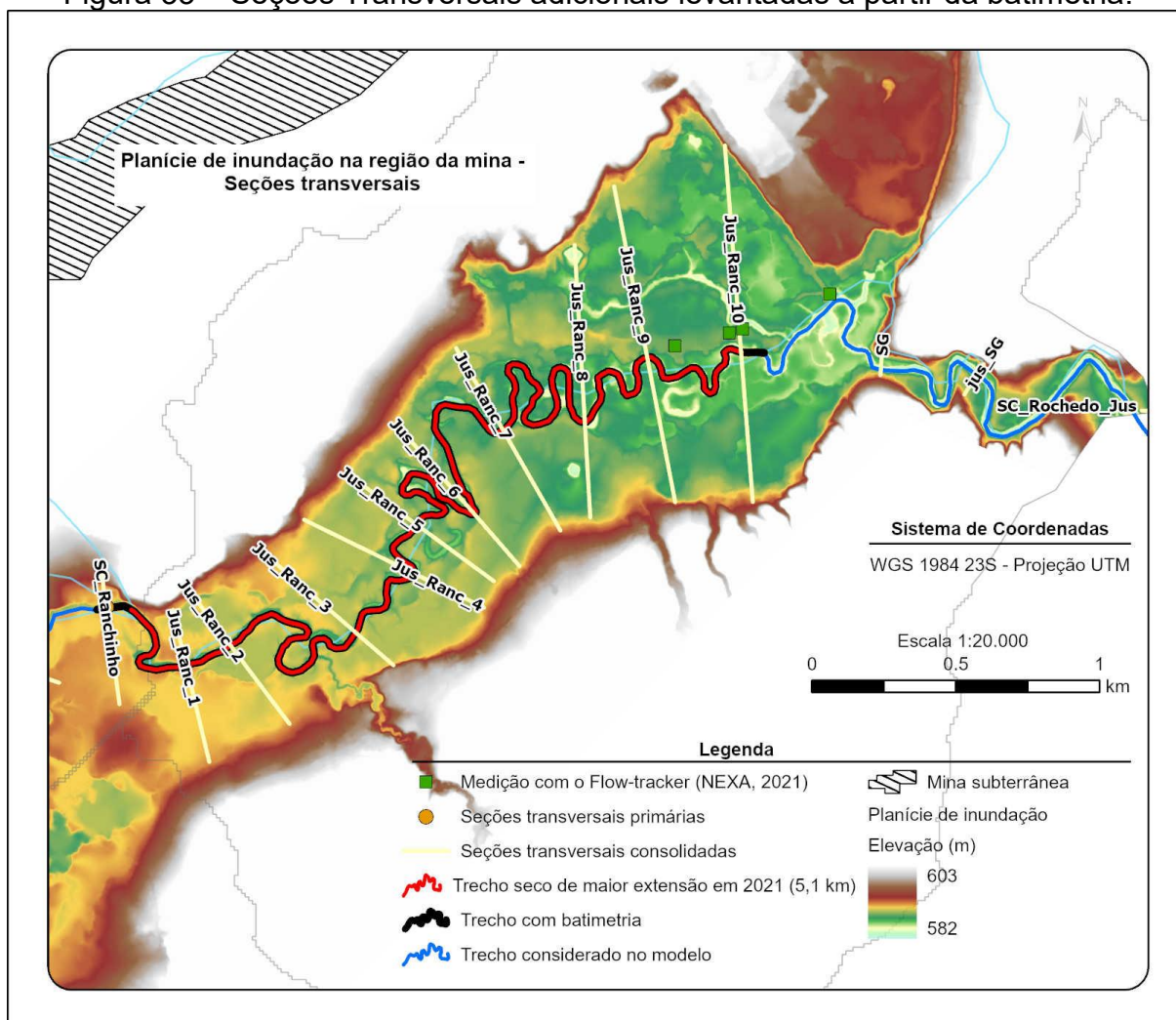
Ainda assim, na região de justante do rio Santa Catarina, entre as estações Ranchinho e Rochedo, foram considerados os dados batimétricos levantados pela NEXA, também em 2018. Essa região é o foco do estudo, pois é onde se localiza a porção do rio mais próxima à mina e onde se observa o trecho seco durante os períodos de estiagem. Portanto, nesse trecho, foram levantadas, a partir da batimetria, 11 seções transversais adicionais, com uma distância média entre si de cerca de 800 m. A Figura 33 apresenta as seções transversais adicionais, obtidas por meio dos dados batimétricos na região de maior interesse do estudo. Cabe ressaltar que a seção Jus_Ranc_10 está localizada em um ponto de grande interesse, pois passa pelo sumidouro mais expressivo da área, chamado de Bambuzal.

Figura 32 – Seções Transversais primárias do modelo no MHR.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 33 – Seções Transversais adicionais levantadas a partir da batimetria.



Fonte: elaborado pela autora.

A fim de aumentar o detalhamento do trecho do rio localizado entre as estações de Ranchinho e Rochedo, foram interpoladas outras 5 seções transversais em pontos de grande importância para o modelo, onde não havia dados primários ou secundários. As 5 seções transversais interpoladas localizam-se a jusante do córrego Carrapato, Guariroba e Carranca, a montante do rio Santa Catarina; além de uma seção adicional na confluência do córrego Guariroba com o Carranca.

Portanto, foi considerado um total de 23 seções transversais no modelo. Todas as seções passaram por um processo de validação e, principalmente as seções obtidas pelo relatório de instalação da régua linimétrica, tiveram sua margem secundária ampliada a partir dos dados topográficos do MDE, quando verificado nos dados monitorados que o nível d'água ultrapassa o nível registrado pelo levantamento topobatimétrico. Além disso, posteriormente, a cota de todas as seções foi validada e

compatibilizada com as elevações inseridas no FEFLOW, de modo a garantir o funcionamento correto do acoplamento entre os *software*.

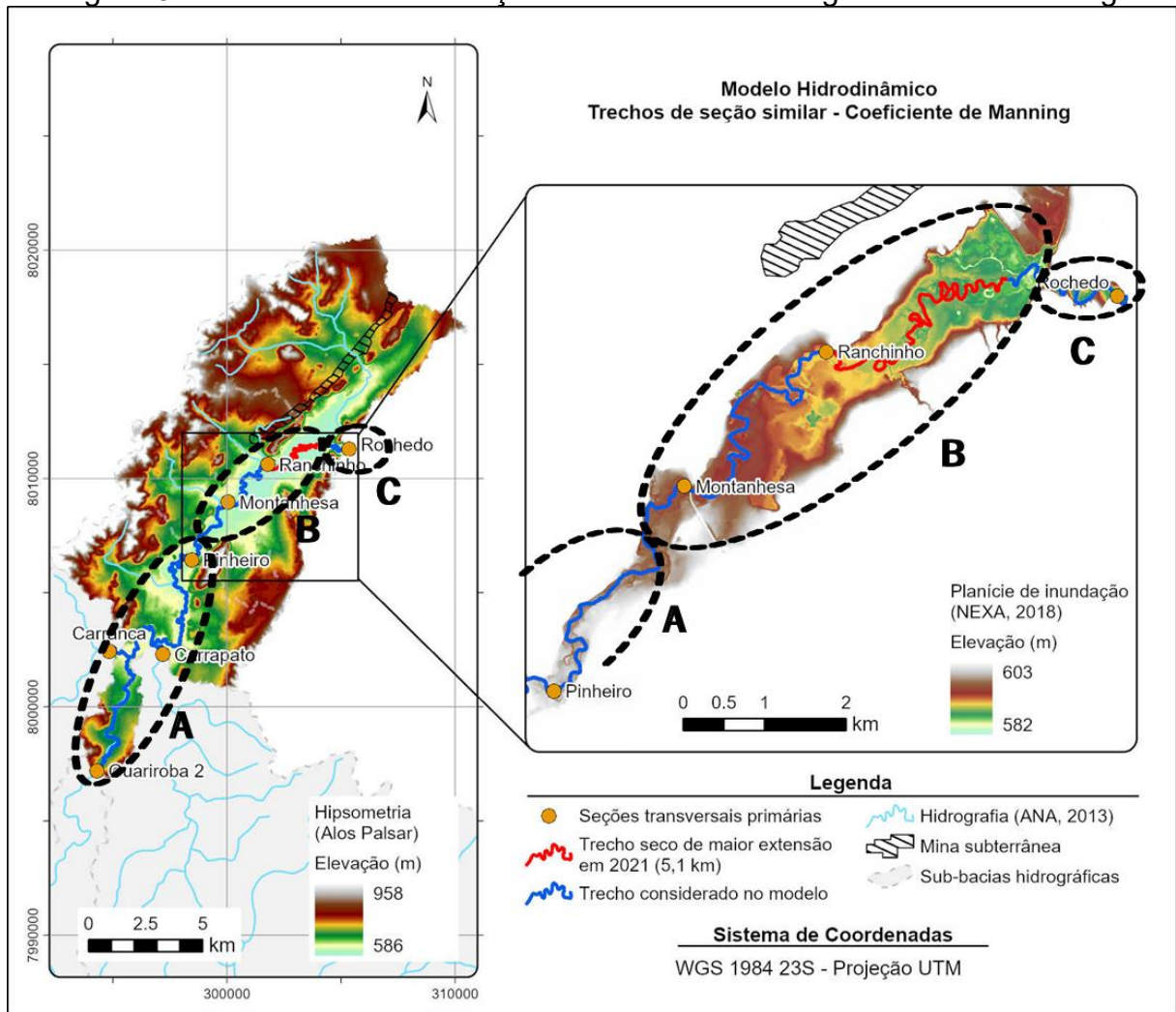
4.2.2.2 Definição do coeficiente de rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade, neste estudo considerado como o Coeficiente de Manning (n), foi obtido com base na metodologia da USGS (ARCEMENT; SCHNEIDER, 1989), a partir da descrição dos relatórios de instalação das réguas linimétricas e imagens de satélite. Para isso, a área de estudo foi segmentada em três trechos, como apresenta a Figura 34. O que delimitou os trechos A e B foi o início da região que possui a bacia de inundação mais proeminente, sendo essa a região com as seções transversais mais extensas. A delimitação entre os trechos B e C se deu no início da Serra do Garrote, onde há um afunilamento das seções.

Como o trecho B possui a planície de inundação ampla, para a definição do Coeficiente de Manning esse trecho teve a área da seção subdividida entre canal principal e planície de inundação. Para os demais trechos, A e C, foi determinado um Coeficiente de Manning uniforme para a seção.

O Quadro 6 apresenta as características das seções de cada trecho, compiladas dos relatórios de instalação das réguas linimétricas disponibilizados. Foram disponibilizados os relatórios de 4 seções: das estações Carranca e Carrapato, correspondentes ao Trecho A; da seção de Ranchinho (antiga estação Bertoldo) do Trecho B; e o relatório da seção Rochedo, correspondente o Trecho C. Para esse trecho, considerou-se também a descrição da estação RPPN, que se localiza a jusante de Rochedo, a cerca de 3 km, visto que o relatório de Rochedo não apresentou a ficha descritiva. As demais seções não possuíam um relatório de instalação e/ou sua ficha descritiva. No Apêndice A, são apresentadas as fotografias disponibilizadas do local de cada estação linimétrica, no dia da instalação da régua.

Figura 34 – Trechos de delimitação do coeficiente de rugosidade de Manning.



Fonte: elaborado pela autora.

Os relatórios das 4 seções não dispunham de uma descrição detalhada das características das seções. De qualquer modo, segundo os relatórios, as seções levantadas, independente do trecho, apresentavam características semelhantes, conformação retilínea, com o fundo uniforme, e com a natureza do leito e de ambas as margens de silte arenoso. Em todos os casos, ambas as margens apresentavam inclinação média e mata ciliar. Todas as estações estão dentro da bacia sedimentar dolomítica. O Quadro 6 resume as características das seções inventariadas.

Os valores determinados para o coeficiente de Manning em cada trecho são apresentados na Tabela 7, bem como as faixas de variação. Em função da descrição de campo, considerou-se os trechos A e C como similares em termos das características da seção. A pequena variação em termos do n se deu em função de o trecho C, com um n de 0,046, possuir um índice de meandramento maior do que o

trecho A, com um n de 0,040. Já no trecho B, foi considerado inicialmente um valor de n de 0,045 para a calha principal e de 0,050 para a planície secundária. Os valores mais elevados para a planície secundária podem ser atribuídos à maior densidade de vegetação e obstrução da seção.

Esses valores estão próximos aos valores das tabelas da metodologia sugerida por Porto (2006), que, para essas características da seção, sugere o coeficiente de Manning entre 0,035 e 0,050. Além disso, os valores obtidos foram comparados com os valores de n de diversos exemplos disponibilizados no portal da USGS, no seguinte caminho: <https://wwwrcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/Indirects/nvalues/index.htm>. Não foram encontrados outros estudos na região de interesse com a definição do coeficiente de Manning para validação dos valores obtidos. Por fim, cabe ressaltar que esses valores foram posteriormente ajustados durante o processo de calibração.

Quadro 6 – Características das seções transversais das estações linimétricas

Estação	Trecho	Características da seção				Características das margens						Data da instalação
		Natureza do Leito	Fundo	Conformação	Regime	MD Natureza	MD Vegetação	MD Inclinação	ME Natureza	ME Vegetação	ME Inclinação	
Carranca	A	Silte e Areia	Regular	Retilíneo	Permanente	Silto arenoso	Mata Ciliar	Média	Silto arenoso	Mata Ciliar	Média	Jun/18
Carrapato	A	Silte e Areia	Regular	Retilíneo	Permanente	Silto arenoso	Mata Ciliar	Média	Silto arenoso	Mata Ciliar	Média	Jun/18
Bertoldo*	B	(não consta)	Regular	Retilíneo	Permanente	Silto arenoso	Mata Ciliar	Média	Silto arenoso	Mata Ciliar	Média	Jan/13
RPPN**	C	Silte e Areia	Regular	Retilíneo	Permanente	Silto arenoso	Mata Ciliar	Média	Silto arenoso	Mata Ciliar	Média	Abr/17

*A estação Bertoldo foi convertida na Estação Ranchinho

**Não foi encontrada a ficha descritiva da estação Rochedo. Por isso, foi considerada a descrição da estação RPPN, que se encontra a 3 km a jusante da estação Rochedo, no rio Santa Catarina, como base.

Tabela 7 – Coeficiente de Manning (n) para cada trecho.

Trecho	Coeficiente de Manning (n)	Faixa de variação do Coeficiente de Manning (n)
A – Calha principal	0,040	0,035 – 0,062
B – Calha principal	0,045	0,039 – 0,062
B – Planície de inundação	0,050	0,040 – 0,077
C – Calha principal	0,046	0,039 – 0,062

Fonte: elaborado pela autora.

4.2.2.3 Condições de contorno e iniciais

As condições de contorno de montante e jusante foram obtidas a partir das estações linimétricas instaladas na área de estudo. Os dados de vazão foram calculados por meio das curvas-chave. Os dados de telemetria, que possuem uma frequência de medição de 30 min, foram primeiramente convertidos para vazão e, em seguida, consolidados para a escala diária. Cabe ressaltar que esses dados foram validados com outras medições realizadas nos mesmos pontos por meio de *flow-tracker*, como apresentado no item 4.2.1.

A Figura 31 apresenta as 3 estações de montante, Carranca, Guariroba 2 e Carrapato, e a estação de jusante, Rochedo. Nas 3 estações de montante, a condição de contorno inserida foi a de vazão, com os valores diários obtidos por meio das curvas-chave. Já para a condição de jusante, na estação rochedo, foi inserida a condição Q-h, que condiz à própria curva-chave.

As curvas-chave utilizadas constam no Apêndice A, juntamente com as demais informações de cada seção transversal. Cabe ressaltar que as medições de vazão consideradas para a elaboração das curvas-chave geralmente correspondem à baixas vazões, visto que foram medidas com *flow-tracker* ou micromolinete e, em eventos de cheia, por vezes não foi possível fazer as medições por questões de segurança. Portanto, o trecho da curva correspondente às vazões mais altas possuem maior incerteza associada.

Além disso, as réguas linimétricas das seções de montante foram instaladas recentemente e, por isso, possuem menor período de consolidação das curvas. A Tabela 8 apresenta o descritivo resumido das curvas-chave consideradas para as condições de contorno do modelo. Adicionalmente, apresenta-se as características da estação considerada para a calibração do modelo hidrodinâmico, a estação Pinheiro.

As curvas-chave das estações de montante foram elaboradas considerando um período de medição entre 1 e 2 anos, com a média de 20 medições para a elaboração de cada curva. Estas apresentam um erro médio de 20% no cálculo da vazão, em relação às vazões medidas, e o coeficiente de Pearson variou entre 0,86 e 0,94. Cabe destacar que a estação Carranca possui apenas 6 dados pois houve uma alteração na seção em março de 2020.

Tabela 8 – Descrição das curvas-chave consideradas no modelo

Estação	Nº de medições	Período monitorado	Pearson	Erro médio (%)	Erro médio para o período seco (%)
Carranca	6	mar/20 – jul/21	0,86	17	19
Guariroba 2	13	mai/19 – mai/20	0,94	21	19
Carrapato	41	jul/18 – mai/20	0,93	22	22
Pinheiro	12	mai/19 – nov/20	0,98	9	9
Rochedo (h>0,35m)	62	fev/13 – jun/19	0,97	10	9
Rochedo (h≤0,35m)	22	out/2019 – jun/21	0,81	21	17

Fonte: elaborado pela autora.

A estação de jusante, Rochedo apresenta uma curva para níveis menores ou iguais a 35 cm, e outra curva para níveis maiores do que 35 cm. As curvas são baseadas em distintos períodos de monitoramento, sendo que a segunda possui 62 medições, enquanto a primeira possui apenas 22. Em função disso, a curva chave para vazões maiores possui um erro associado menor, de 10%, enquanto a curva chave para vazões baixas, foco do presente estudo, apresenta um erro médio de 21%.

A variação do erro avaliado para o período completo ou apenas período seco não foi significativa. Isso pode ser atribuído ao fato de que não foi possível fazer medições em dias com picos de vazão significativos, em função dos riscos de segurança associados à medição com o *flow-tracker*. Por isso, não há medições para os picos de vazão e, portanto, o período chuvoso não está representado de forma fidedigna nessas curvas. De qualquer modo, para o objetivo dessa pesquisa, que seria fundamentalmente avaliar o período seco, a falta de representação dos picos de vazão não deve influenciar significativamente.

A estação Pinheiro, utilizada para a calibração, foi a que apresentou o menor erro médio das vazões medidas e calculadas pela curva-chave, de 9%. Esse é um fator importante considerando que essa estação foi utilizada para a calibração. Contudo, cabe ressaltar que ela foi elaborada para um nível máximo de 81 cm. Quando comparada com alguns níveis monitorados em 2021, acima de 1m, essa curva chave apresentou erros da ordem de 33%

Na área de estudo, sabe-se que o rio Santa Catarina e os seus afluentes, no domínio do modelo, estão situados na bacia sedimentar dolomítica e, portanto, há significativas trocas de fluxo com o meio subterrâneo. Mais especificamente na área focal

desse estudo, na porção entre as estações Ranchinho e Rochedo, próximos à mina, o rio Santa Catarina serve constantemente como recarga do aquífero. Contudo, por se tratar de um meio cárstico, esse não é um fluxo distribuído uniformemente ao longo do canal, mas possui diversos canais preferencias por meio dos sumidouros, fraturas e fissuras. Esses elementos foram representados no modelo hidrogeológico a partir de diversos levantamentos realizados na área, como descrito no Capítulo 3.2. Portanto, essa dinâmica de fluxo entre as águas superficiais e subterrâneas, principalmente, na região próximo à mina, não foi representada no modelo superficial, quando executado de forma separada.

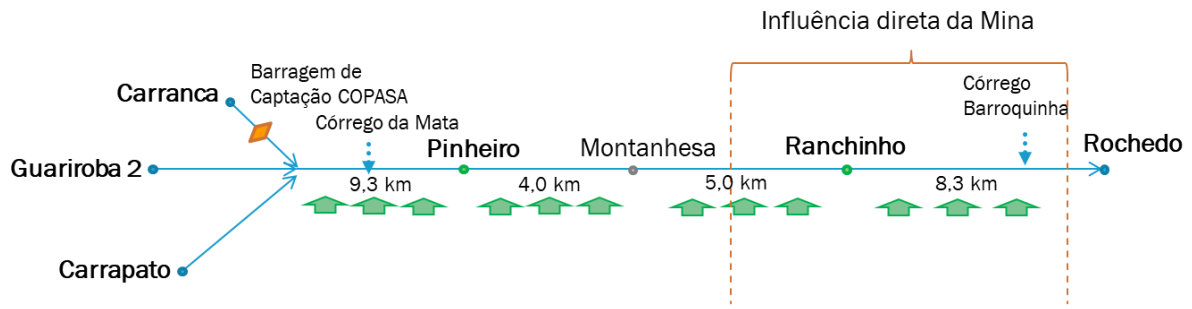
Por fim, as condições iniciais do modelo foram inseridas como os dados de vazão obtidos por meio das curvas-chave, para o dia 01 de janeiro de 2021.

4.2.3 Balanço hídrico do modelo hidrodinâmico

A Figura 35 apresenta o modelo conceitual simplificado da área de estudo em termos do balanço hídrico, enquanto a Figura 36 apresenta as vazões médias dos últimos 3 anos das estações avaliadas na modelagem hidrodinâmica. Como áreas empilhadas, tem-se as estações de montante do modelo, Carranca, Carrapato e Guariroba 2, essa última com uma contribuição 60% menor do que a média das demais. A jusante do modelo, tem-se a estação Rochedo. Em 2019 e 2020, pode-se avaliar que no período de cheia as vazões de montante se equipararam à vazão em Rochedo, mas no ano simulado isso não ocorreu. Além disso, em todo o período, nos períodos de seca, a vazão em Rochedo sempre esteve menor do que a soma das estações de montante, evidenciando as perdas de água por infiltração para o meio cárstico.

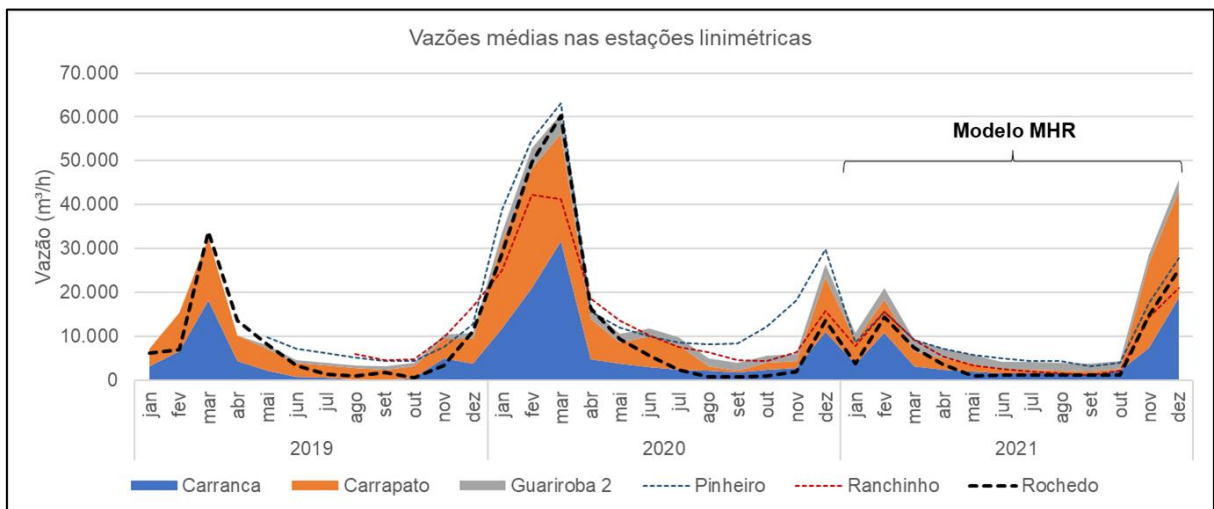
Além disso, em traçados pontilhados, ainda na Figura 36, pode-se observar a estação Pinheiro, antes da influência direta da mina, e Ranchinho, já sob influência direta na mina.

Figura 35 – Esquema conceitual do modelo hidrodinâmico.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 36 – Vazões médias mensais das estações linimétricas, calculadas a partir das curvas-chave.



Fonte: elaborado pela autora.

Como apresentado na Tabela 9, para o ano simulado, de 2021, a soma da entrada das vazões médias de montante é de 12.277 m³/h, enquanto a vazão de saída, em Rochedo, tem a média de 6.214 m³/h, representado um déficit de 6.063 m³/h no trecho modelado. Especificamente no rio Santa Catarina, na área de maior interesse, entre Pinheiro e Rochedo, tem-se o déficit de 246 m³/h/km do rio entre Pinheiro e Ranchinho, e de 104 m³/h/km do rio entre Ranchinho e Pinheiro. Para o período seco, tem-se valores similares, de 253 m³/h/km do rio e 135 m³/h/km do rio, respectivamente.

O estudo elaborado por TRUST (2018), como apresentado no item 3.2.2, obteve resultados mais expressivos. Analisando dados históricos, entre 2013 e 2017, o estudo mostrou uma diferença de 4.741 m³/h entra as estações Montanhesa e Módulo III, próximo à Rochedo. Segundo essa informação, tem-se uma infiltração aproximada de 360 m³/h/km nesse trecho, cerca de 100% maior do que a infiltração

estimada para o ano de 2021. Essa análise considerou as vazões outorgadas e por cadastros insignificantes, que somaram 684 m³/h para a estação Montanhosa e 790 m³/h para a estação Módulo III.

Outro estudo, elaborado por Water Services And Technologies, (2020), atestou a infiltração de 8.000 m³/h a partir da estação Ranchinho até um sumidouro localizado a 4,03 km à jusante, o que implica em uma taxa de infiltração de 1.985 m³/h/km. Essa taxa, se aplicada à toda extensão de maior interesse, entre Ranchinho e Rochedo (8,2 km), implicaria em uma vazão infiltrada de 16.278 m³/h. A Figura 27 apresenta o sumidouro no dia da medição em questão.

Cabe ressaltar que essa perda não é distribuída uniformemente ao longo da extensão do rio, uma vez que há sumidouros e fraturas que direcionam o fluxo de forma pontual e significativa.

Tabela 9 – Comparação das vazões médias, máximas e mínimas para 2021 e o período seco de 2021. Vazões calculadas a partir das curvas-chave das estações.

Estação	2021			Período seco de 2021 (abril a outubro)		
	Vazão média (m ³ /h)	Vazão máxima (m ³ /h)	Vazão mínima (m ³ /h)	Vazão média (m ³ /h)	Vazão máxima (m ³ /h)	Vazão mínima (m ³ /h)
Carranca	4.567	103.488	712	1.679	4.248	712
Carrapato	5.630	137.226	0*	1.102	3.478	0*
Guariroba 2	2.080	10.410	1.335	1.918	2.488	1.335
Pinheiro	9.286	118.133	2.604	4.795	8.495	2.604
Ranchinho	7.076	60.251	411	2.520	7.733	411
Rochedo	6.214	96.481	424	1.394	17.562	424

* A estação Carrapato possui dados de 5 dias em que o nível d'água monitorado ficou abaixo do limite da curva-chave. Fonte: elaborado pela autora.

A análise realizada acima desconsiderou o aporte de vazões por escoamento superficial da área de contribuição das sub-bacias intermediárias, que representam 27% da área total do modelo. Por isso, foi realizada uma estimativa do modelo conceitual do balanço hídrico considerando o aporte do escoamento superficial pela contribuição da área das sub-bacias.

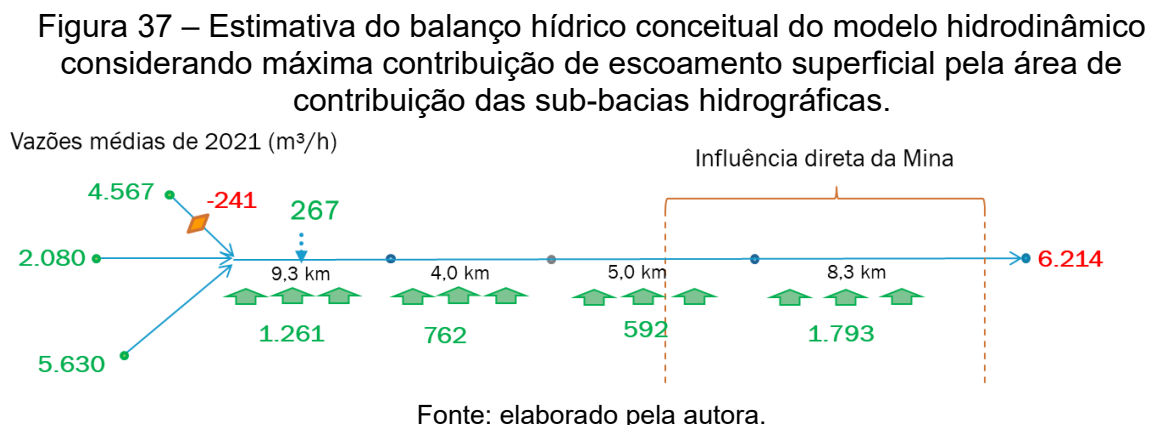
Para isso, utilizou-se o método racional, pois o objetivo foi de apresentar a máxima vazão provocada pela precipitação média anual de 2021, observando, portanto, o déficit hídrico mínimo provocado pela infiltração de água para o meio cárstico. O método racional foi desenvolvido para bacias hidrográficas pequenas e,

portanto, apresenta limitações na sua aplicação para o presente estudo, cuja bacia apresenta 633 km². Ele foi considerado em função da simplicidade de sua aplicação, de modo a fornecer uma estimativa da contribuição do escoamento superficial.

O coeficiente de deflúvio considerado foi de 0,18, baseado em uma análise retroativa das sub-bacias de montante, por meio do método racional. Esse valor está de acordo com o estudo hidrológico apresentado por TRUST (2018), que determinou o coeficiente de deflúvio médio para os anos hidrológicos entre 2013 e 2017 para a estação Montanhesa (que se localiza aproximadamente no meio da bacia de estudo), também de 0,18.

A partir dos dados de outorgas, apresentados por TRUST (2018), foram identificadas 4 outorgas de captação superficial na área modelada. Delas, apenas o barramento de captação da COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais), localizado no Córrego Carranca, foi considerado, por ter uma vazão maior constante anualmente e maior do que 100 m³/h. A outorga (Portaria nº 3455/2012), concede a captação de 241,2 m³/h no rio Santa Catarina, com a duração de 17h/dia.

Por fim, a Figura 37 apresenta a estimativa do balanço hídrico conceitual, considerando o escoamento superficial da área de contribuição das sub-bacias. Considerando esse cenário, a infiltração máxima de água para o meio cárstico seria da ordem de 10.200 m³/h.



4.2.4 Calibração e resultados do modelo hidrodinâmico

O modelo foi calibrado a partir do coeficiente de rugosidade de Manning, pelo processo de tentativa e erro. Nessa etapa, a calibração foi realizada considerando

apenas o KGE da estação Pinheiro, uma vez que esta é a única estação que não sofre influência direta do rebaixamento da mina.

Como o modelo considera os dados diários, os picos dos eventos de cheia não foram considerados. Nessas condições de análise, o nível supera a calha principal do rio Santa Catarina apenas em 5 dias, unicamente para a estação Ranchinho. Em função disso, de modo a simplificar o modelo e o processo de calibração, o coeficiente de Manning foi considerado como uniforme na calha principal e secundária do rio, também no Trecho B. Os valores do Coeficiente de Manning do modelo calibrado são apresentados na Tabela 10.

A Figura 38 apresenta os resultados simulados de nível e vazão, em comparação aos dados observados para a estação Pinheiro, a esquerda (a), e para a estação Ranchinho, a direita (b). O erro no balanço de massa dessa simulação foi de 0%.

De maneira geral, as curvas apresentaram comportamento aderente às vazões monitoradas para o período seco. No período chuvoso, os eventos de chuva mais extremos tiveram os picos de vazão superestimados. Como esperado, de maneira geral, as vazões simuladas estão superestimadas, uma vez que ainda não foi considerada a infiltração para o meio subterrâneo.

Tabela 10 – Coeficiente de Manning (n) do modelo hidrodinâmico calibrado

Trecho	Coeficiente de Manning (n)	Faixa de variação do Coeficiente de Manning (n)
A – Calha principal	0,040	0,035 – 0,062
B – Calha principal e secundária	0,050	0,039 – 0,077
C – Calha principal	0,046	0,039 – 0,062

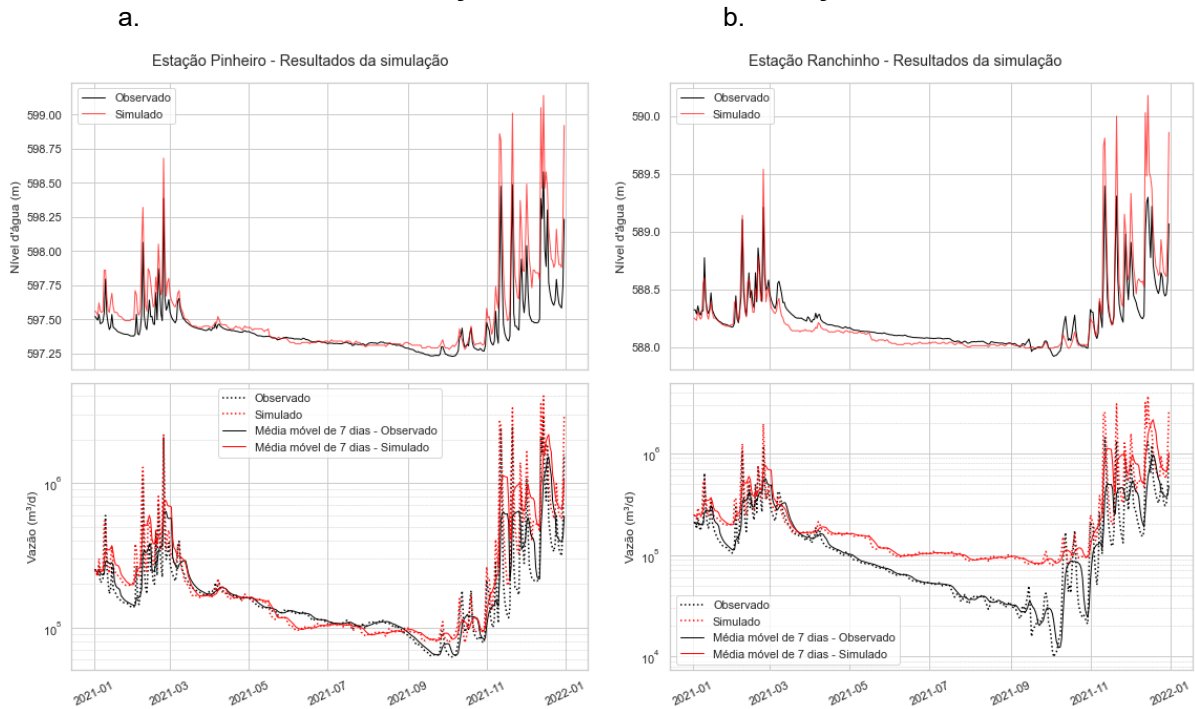
Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 11 apresenta o índice KGE da estação Pinheiro, calculado para o período completo, 2021, e apenas do período seco, entre abril e outubro de 2021. Os valores obtidos, respectivamente foram de 0,43 e 0,87.

Avaliando as componentes do KGE, observa-se que a correlação linear foi considerada satisfatória, de 0,93 para 2021, e 0,89 para o período seco. Já a componente β (erro tendencial) evidencia que a média simulada está 33% maior do

que a observada para o ano de 2021, e apenas 1% menor do que a observada para o período seco. Isso pode ocorrer em função de o modelo não acoplado não considerar as perdas de água para o meio cárstico, o que também ocorre na região da estação Pinheiro. Além disso, a componente α indica que o desvio padrão simulado é 46% maior do que o observado para 2021, e 9% menor do que o observado no período seco. Esses resultados evidenciam que o modelo está bem calibrado para o período seco. As discrepâncias obtidas considerando o período chuvoso podem ser atribuídas aos dados de entrada, em função das curvas-chave.

Figura 38 – Comparativo do nível (m) e vazão (m³/d), para os dados observados e simulados: a. na estação Pinheiro; e b. na estação Ranchinho.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 11 – Índice KGE da estação Pinheiro, correspondente ao Trecho A, do modelo calibrado

Período	KGE	r	α	β
2021	0,43	0,93	1,46	1,33
Seco (abr/21 a out/21)	0,87	0,89	0,91	0,99

Fonte: elaborado pela autora.

O KGE da estação Ranchinho, apresentado na Tabela 12, como esperado, teve um resultado insatisfatório do ponto de vista da calibração, pois não considerou

as perdas de água para o meio subterrâneo, com um KGE de 0,10. De qualquer modo, pode-se avaliar que a correlação entre as vazões simuladas e observadas foi satisfatória, tanto para o ano, quanto no período seco, foram de 0,90. A componente β evidencia que as vazões simuladas estão maiores do que as observadas em 87% para o período seco.

Tabela 12 – Índice KGE da estação Ranchinho, correspondente ao Trecho B, do modelo calibrado

Período	KGE	r	α	β
2021	-0,28	0,90	2,05	1,73
Seco (abr/21 a out/21)	0,10	0,90	0,81	1,87

Fonte: elaborado pela autora.

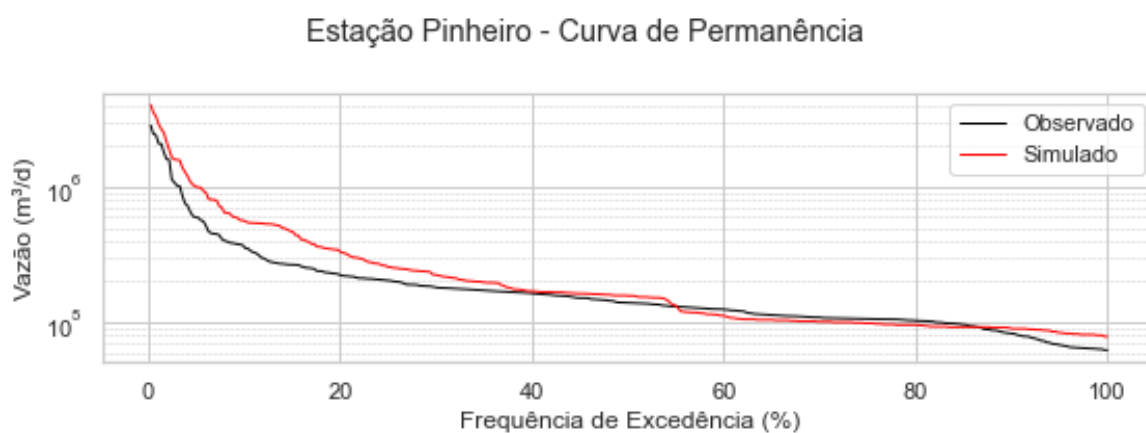
A Figura 39 apresenta a curva de permanência dos dados observados e simulados, também para ambas as estações, realizadas a partir dos dados diários de vazão. As curvas foram traçadas na escala logarítmica do eixo vertical com o intuito de destacar as faixas de vazões mais baixas, objetivo de análise deste estudo. O período de seca é representado pelas vazões mais baixas, sendo considerado como as vazões com frequência de igualdade ou excedência acima de 50%.

Para a estação Pinheiro, usada para a calibração, verifica-se que os resultados para as vazões médias, entre 40% e 85% de frequência de excedência, a simulação se mostrou bastante coerente. Os desvios, nos quais a simulação apresenta vazões maiores do que as observadas se encontram nos extremos da curva. Esse aspecto era esperado, visto que, para as vazões mais altas, a incerteza dos dados observados é maior, em função da elaboração das curvas-chave e, para as vazões menores, a desconsideração das perdas para o meio cárstico se tornam mais visíveis. A diferença média entre as vazões observadas e simuladas no período seco é de 96 m³/h.

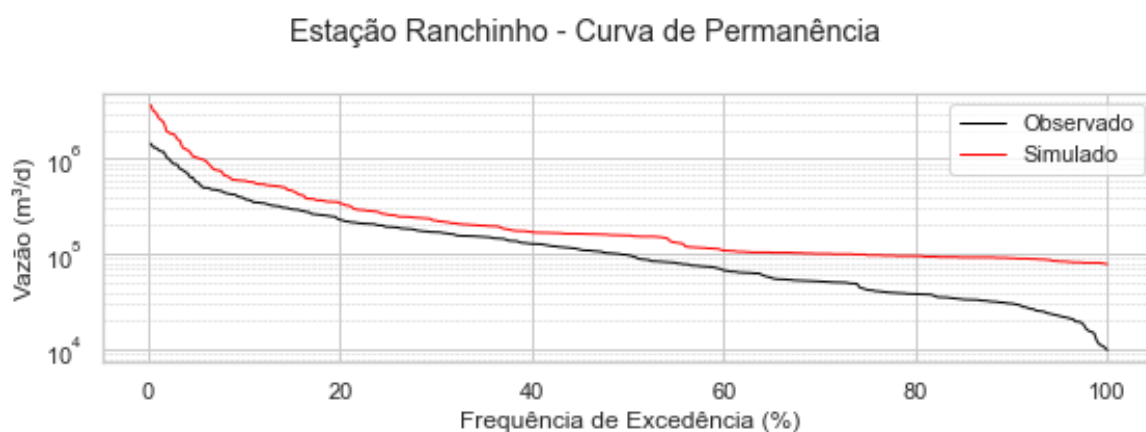
Já para a estação Ranchinho, o reflexo de não considerar a interação como meio subterrâneo fica mais evidente, apresentando uma diferença média de 2.181 m³/h no período seco. Esses resultados podem ser explicados pelo não acoplamento com o meio subterrâneo, pois estão coerentes com a estimativa de taxas de infiltração supracitadas.

Figura 39 – Curva de Permanência das estações: a. Pinheiro; b. Ranchinho, a partir dos dados de vazão simulados e observados para o ano de 2021.

a.



b.



Fonte: elaborado pela autora.

4.3 CONCLUSÕES

O balanço hídrico foi realizado com o objetivo de estimar a infiltração de água do rio para o meio cárstico, principalmente na região próxima à mina. Com base na estimativa realizada e bibliografia levantada, a vazão infiltrada ao longo do trecho modelado varia entre 6.063 m³/h e 10.200 m³/h, sendo a estimativa de infiltração no trecho mais próximo à mina, entre Ranchinho e Bambuzal, variando entre 411 m³/h e 7.200 m³/h no período seco.

A calibração do modelo hidrodinâmico se mostrou um desafio sem a consideração das perdas por infiltração para o meio cárstico. Observa-se que as perdas de água para o meio poroso primário e secundário aumenta na região mais

próxima à mina, entre Ranchinho e Rochedo, evidenciado pelo aumento do índice de meandramento do rio e pelo aumento no nível de fraturamento.

A vazão simulada na estação Pinheiro obteve uma calibração mediana para o ano de 2021 com o índice KGE de 0,43, e excelente para o período seco, com o índice KGE de 0,87 e o β (erro tendencial) de apenas 1%. Esse resultado indicou que as perdas por infiltração até esse ponto do rio não são muito significativas.

O resultado da calibração para a estação Ranchinho apresentou um KGE de 0,10 para o período seco. A média das vazões simuladas nessa estação foi 87% maior do que as observadas no período seco, o que configura uma diferença de 2.180 m³/h, que teria infiltrado para o meio cárstico. Esse valor está coerente com a avaliação do balanço hídrico.

Além disso, a calibração também não considerou as perdas de água para o meio cárstico por meio da porosidade secundária nos condutos cársticos. No curso d'água modelado, fica clara a influência do sumidouro Bambuzal, de jusante para montante, visto que ali que se iniciam os trechos secos, que com o andamento do período seco, se estendem no sentido de montante. Essa é uma evidência da clara influência do meio subterrâneo no escoamento superficial. Destaca-se, neste caso, a importância de considerar a componente subterrânea em estudos hidrológicos em ambientes cársticos.

Por fim, cabe ressaltar que o modelo foi calibrado considerando, primordialmente, o período seco, foco das análises deste estudo. Além disso, as curvas-chave foram elaboradas sem medições em eventos decorrentes de altas precipitações e, portanto, os dados observados de vazão também não representam os eventos de vazões altas com segurança. Caso pretenda-se fazer um modelo que represente adequadamente as vazões altas recomenda-se a atualização das curvas-chave com medições de vazões nos períodos de cheia e durante os eventos de vazões altas. Uma possibilidade seria a instalação de vertedores nas seções, de modo a facilitar essa medição.

Para a redução das incertezas associadas à construção do modelo hidrodinâmico, recomenda-se a obtenção de alguns dados adicionais: a. o levantamento de mais seções transversais na porção de montante, com o levantamento das cotas topográficas nas seções novas e nas pré-existentes; e b. consideração da contribuição de vazão lateral pela área de contribuição das sub-bacias.

5 MODELAGEM INTEGRADA DAS INTERAÇÕES ENTRE AS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS ESPECÍFICOS

O presente capítulo refere-se à revisão do modelo numérico de águas subterrâneas e o seu acoplamento ao modelo de águas superficiais, cujo desenvolvimento foi discutido no Capítulo 4.

O modelo hidrogeológico conceitual e numérico no software FEFLOW foi desenvolvido e fornecido pela NEXA para ser utilizado no presente estudo. O acoplamento foi realizado utilizando o *plugin* PiMIKE1D, cujo funcionamento foi apresentado no Capítulo 2.4.3.

5.1.1 Resumo do modelo conceitual e modelo numérico de águas subterrâneas

Neste capítulo é apresentado o resumo do modelo conceitual e modelo numérico hidrogeológico desenvolvido por (IPT, 2021), no que tange os aspectos relevantes para a avaliação do acoplamento com a componente de águas superficiais. A descrição completa do modelo numérico consta no Apêndice B.

A Figura 40 apresenta as principais componentes do modelo hidrogeológico, relevantes para as discussões acerca das interações entre as águas subterrâneas e superficiais. O rio Santa Catarina, na porção modelada, encontra-se na bacia sedimentar dolomítica, onde a condutividade hidráulica horizontal da cobertura colúvio-aluvionar varia entre $2,2e^{-6}$ m/s e $2,9e^{-4}$ m/s e a condutividade hidráulica vertical varia entre $2,2e^{-7}$ m/s e $2,9e^{-5}$ m/s (camada 1 do modelo). Nessa camada, o armazenamento específico (S_s) da bacia sedimentar dolomítica varia entre $7,5e^{-5}$ 1/m e $1,9e^{-5}$ 1/m.

O modelo considera diversas estruturas rúpteis de médio e alto potencial levantadas na área estudo, tanto as regionais como as locais, mais próximas à mina. Esses elementos, apresentados na Figura 40a foram representados no modelo numérico como Feições discretas 2D considerando a formulação de Darcy, ou seja, considera-se que estão preenchidos pelo meio poroso, apresentando fluxo laminar.

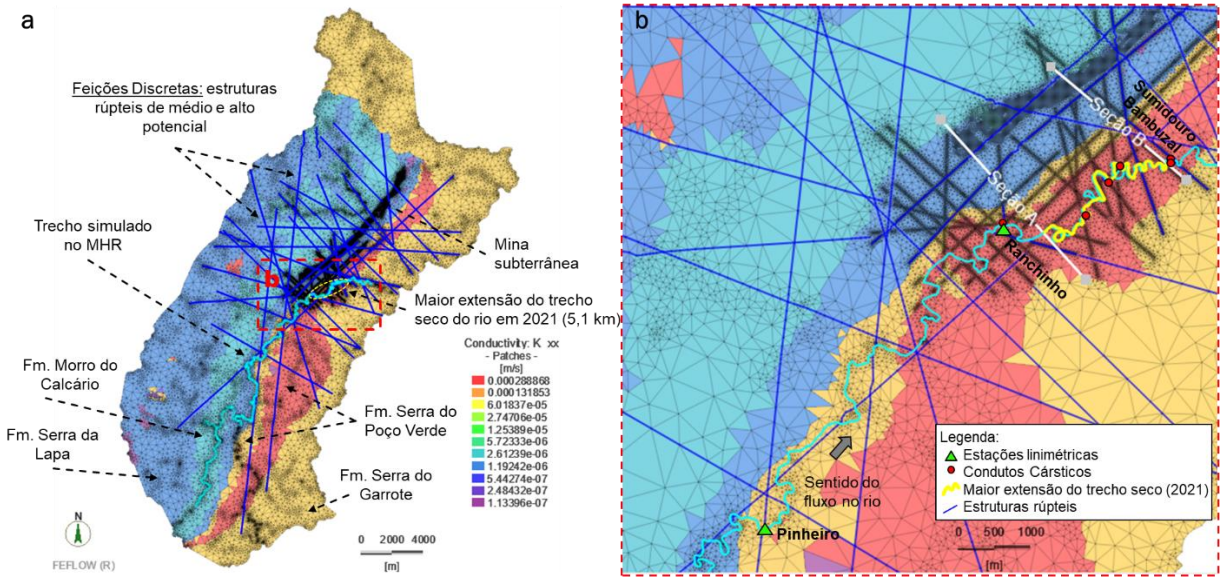
Os primeiros modelos conceituais realizados para a região da mina de Vazante consideravam o meio cárstico de forma mais simplificada, como meio poroso

equivalente, que representasse os parâmetros hidrogeológicos médios do carste, de modo que o modelo fosse calibrado sem a necessidade de discretização dos condutos cársticos. Esse modelo foi posteriormente atualizado buscando representar a heterogeneidade do meio cárstico, incluindo a representação dos condutos cársticos levantados ao longo do rio Santa Catarina. Esse nível de detalhe incluiu maior complexidade para o modelo e maior demanda computacional para a modelagem, mas se mostrou necessário para a simulação dos processos que levam ao secamento do rio.

O modelo conceitual mais recente considera 6 condutos cársticos, que conectam o rio diretamente à mina. Esses elementos foram representados no modelo numérico como Feições discretas 1D considerando a formulação de Manning-Strickler e, portanto, como condutos parcialmente preenchidos por fluido e não preenchidos pelo meio poroso. Os condutos cársticos estão localizados nos trechos de rio sujeito a secamento, destacado em amarelo, e são ilustrados na Figura 40b.

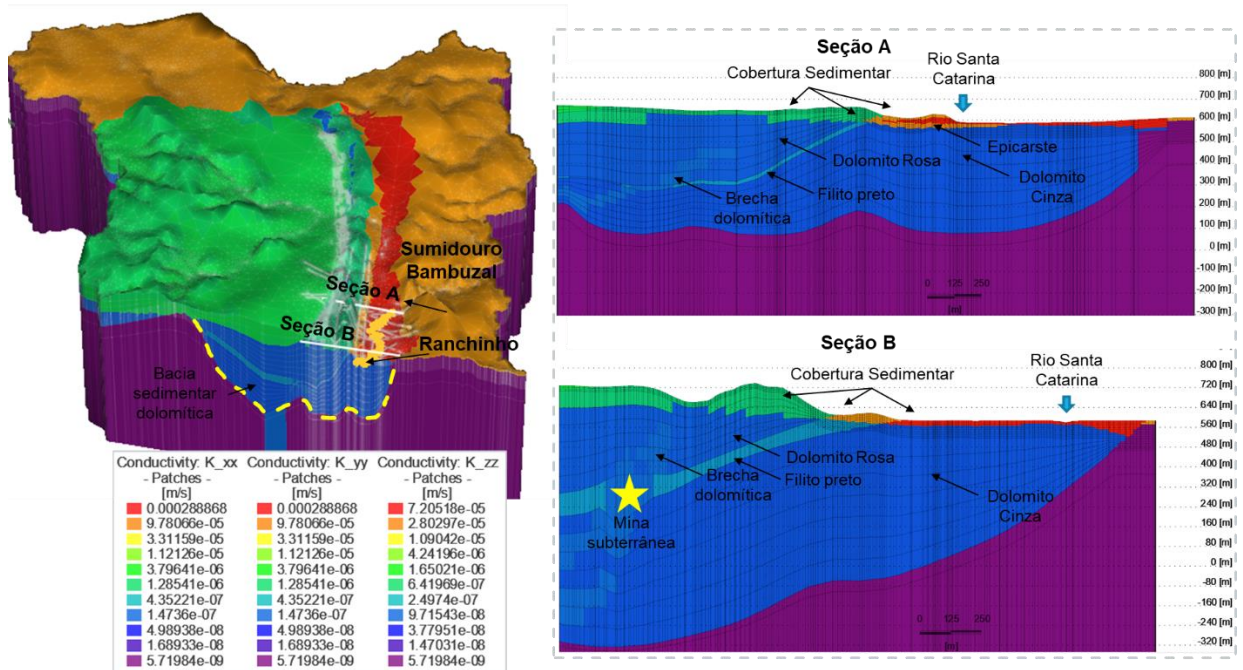
A Figura 41 apresenta o modelo numérico em 3D, além das seções transversais A e B, com a descrição das unidades hidrogeológicas consideradas, e os respectivos valores de condutividade hidráulica horizontal e vertical. Na cobertura colúvio aluvionar, a condutividade hidráulica horizontal varia entre $2,2 \times 10^{-6}$ m/s e $2,9 \times 10^{-4}$ m/s e a condutividade hidráulica vertical varia entre $2,2 \times 10^{-7}$ m/s e $2,9 \times 10^{-5}$ m/s. Já na bacia sedimentar dolomítica, o modelo calibrado apresentou a condutividade hidráulica horizontal e vertical da ordem de $1,5 \times 10^{-7}$ m/s, incluindo a camada de filito preto. A unidade hidrogeológica com maior condutividade hidráulica na bacia sedimentar é o epicarste, com a condutividade hidráulica vertical e horizontal de $7,2 \times 10^{-5}$ m/s. A tabela também apresenta os valores de armazenamento específico, que variou entre $1,9 \times 10^{-5}$ 1/m e $8,2 \times 10^{-6}$ 1/m no modelo numérico.

Figura 40 – Principais componentes do modelo hidrogeológico, na camada 1.



Fonte: elaborado pela autora. Informações retiradas de (IPT, 2021)

Figura 41 – Unidades hidrogeológicas do modelo numérico e Seção Transversal A e B



Fonte: elaborado pela autora. Informações retiradas de (IPT, 2021)

Tabela 13 – Condutividade hidráulica e armazenamento específico das unidades hidrogeológicas modeladas.

Unidade hidrogeológica	Condutividade hidráulica horizontal (m/s)	Condutividade hidráulica vertical (m/s)	Armazenamento específico (1/m)
Cobertura – Morro do Calcário	2,2e ⁻⁶	2,2e ⁻⁷	7,5e ⁻⁵
Cobertura – Dolomito Rosa	1,2e ⁻⁶	1,2e ⁻⁷	8,2e ⁻⁶
Cobertura - Filito Preto	9,3e ⁻⁵	9,3e ⁻⁶	5,8e ⁻⁵
Cobertura – Dolomito Cinza	2,9e ⁻⁴	2,9e ⁻⁵	1,9e ⁻⁵
Brecha dolomítica	1,5e ⁻⁷	1,5e ⁻⁷	2,1e ⁻⁵
Dolomito Rosa	1,2e ⁻⁷	1,2e ⁻⁷	9,1e ⁻⁵
Dolomito Cinza	1,1e ⁻⁷	1,1e ⁻⁷	1,9e ⁻⁵
Filito Preto	2,6e ⁻⁷	2,6e ⁻⁷	6,4e ⁻⁵
Epicarste	7,2e ⁻⁵	7,2e ⁻⁵	4,7e ⁻⁵
Formação Serra do Garrote	5,7e ⁻⁹	5,7e ⁻⁹	2,1e ⁻⁵
Cobertura Serra do Garrote	8,9e ⁻⁵	8,9e ⁻⁶	2,1e ⁻⁵
Formação Serra da Lapa	1,2e ⁻⁶	1,2e ⁻⁶	2,1e ⁻⁵

Fonte: elaborado pela autora. Informações retiradas de (IPT, 2021)

5.1.2 Calibração do modelo acoplado

A aprovação da calibração e performance do modelo deve ser baseada em uma série de medidas, necessárias para demonstrar que o modelo é robusto, simula o balanço hídrico conforme necessário e é consistente com o modelo conceitual no qual se baseia. Muitas dessas medidas podem ser aplicadas não apenas na etapa de calibração, mas também na etapa de previsão do modelo (BARNETT, 2012). O Quadro 7 apresenta um resumo dos critérios que foram utilizados para a avaliação da calibração na modelagem hidrogeológica.

Cabe ressaltar que na modelagem de águas subterrâneas é aconselhável utilizar todos os dados na calibração do modelo, em função do grande número de variáveis, não sendo comum manter parte dos dados para a validação do modelo (DOHERTY; HUNT; TONKIN, 2010).

Quadro 7 – Critérios para a aprovação da calibração e performance do modelo.

Medida de performance	Critério	Etapa Metodológica Aplicável
<p>Convergência do modelo O modelo deve convergir de modo que a variação máxima nas cargas hidráulicas entre as iterações aceitavelmente pequena.</p>	O critério de convergência de iteração deve ser uma ou duas ordens de magnitude menor do que o nível de precisão exigido nas previsões das cargas hidráulicas. Nesse modelo, considerou-se como 1 cm.	Calibração (2) e Previsão (3)
<p>Balanco hídrico O modelo deve demonstrar uma precisão no balanço hídrico, tanto em modelos estacionários como transitórios. O erro do balanço hídrico é a diferença entre a entrada total prevista e a saída total prevista, incluindo mudanças no armazenamento, dividida pela entrada ou saída total e expressa como uma porcentagem.</p>	Buscou-se um valor inferior a 1% em todos os passos de tempo e cumulativamente ao longo de toda a simulação. Idealmente, o erro deve ser muito menor. Um erro de > 5% é considerado como inaceitável e geralmente indica algum tipo de erro na forma como o modelo foi configurado.	Calibração (2) e Previsão (3)
<p>Medidas qualitativas Os resultados do modelo devem fazer sentido e ser consistentes com o modelo conceitual. Os contornos das cargas hidráulicas, hidrogramas e padrões de fluxo devem ser razoáveis e semelhantes aos previstos, com base nas medições. Os parâmetros calibrados devem ser realistas, ser consistentes com o modelo conceitual e com as expectativas baseadas em sistemas hidrogeológicos semelhantes.</p>	As medidas qualitativas se aplicam durante a calibração, quando as comparações podem ser feitas com o histórico de medições e, também, durante as previsões, quando ainda há necessidade de consistência com as expectativas. Não existe uma medida específica de sucesso. Uma avaliação subjetiva é necessária quanto à razoabilidade dos resultados do modelo, em relação a observações e expectativas. Deve-se relatar sobre as medidas qualitativas relevantes e discutir as razões para consistência e inconsistência com as expectativas.	Calibração (2) e Previsão (3)
<p>Medidas quantitativas A qualidade do ajuste entre o modelo e as medições históricas pode ser quantificada, usando diferentes métricas estatísticas. Foram consideradas: RMS (raiz do valor quadrático médio), SRMS (raiz do valor quadrático médio normalizada), para a calibração das cargas hidráulicas no modelo hidrogeológico, e o KGE (Eficiência de Kling-Gupta) para as vazões do modelo hidrodinâmico.</p>	As medidas quantitativas se aplicam durante a calibração. Estatísticas de qualidade de ajuste são descritores úteis, mas não devem ser necessariamente usados para definir alvos. A qualidade do ajuste das cargas hidráulicas é apenas uma parte de uma função objetivo regularizada - a outra se relaciona ao acordo entre as estimativas dos parâmetros e as estimativas anteriores, portanto, nesta situação, os dois componentes da função objetivo devem ser relatados. O RMS esperado para a calibração das cargas hidráulicas no aquífero foi o mesmo do modelo anterior, próximo de 15 m; e o KGE mínimo para a consideração do modelo hidrodinâmico como razoavelmente calibrado, de 0,5.	Calibração (2)

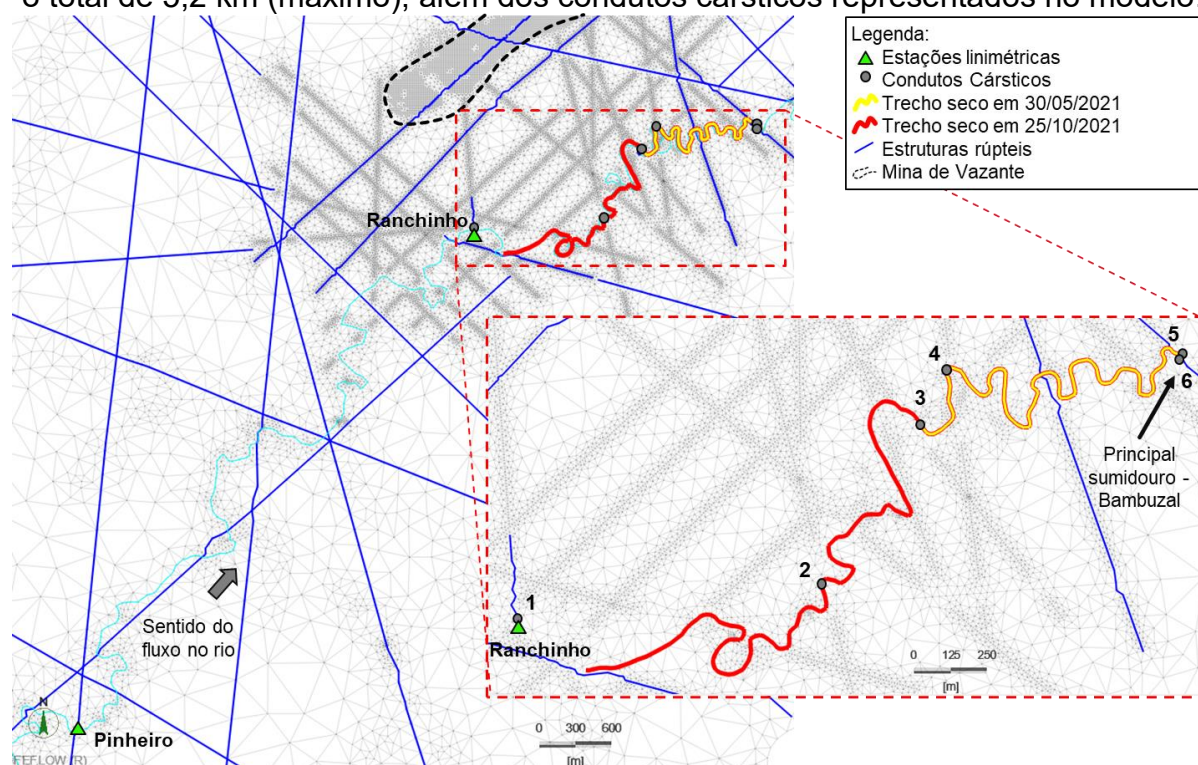
Fonte: Adaptado de (BARNETT, 2012).

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.2.1 Avaliação das taxas de infiltração e do trecho seco do rio Santa Catarina

A extensão do trecho seco do rio Santa Catarina foi monitorada diariamente em 2021, com alguma extensão seca observada em 219 dias. A Figura 42 ilustra o trecho seco do rio no início e no final do período seco, em 30 de maio e 25 de outubro, respectivamente.

Figura 42 – Localização do trecho seco do rio no início do período seco, em 30/05/2021, com o total de 1,7 km, e no final do período seco, em 25/10/2021, com o total de 5,2 km (máximo); além dos condutos cársticos representados no modelo.



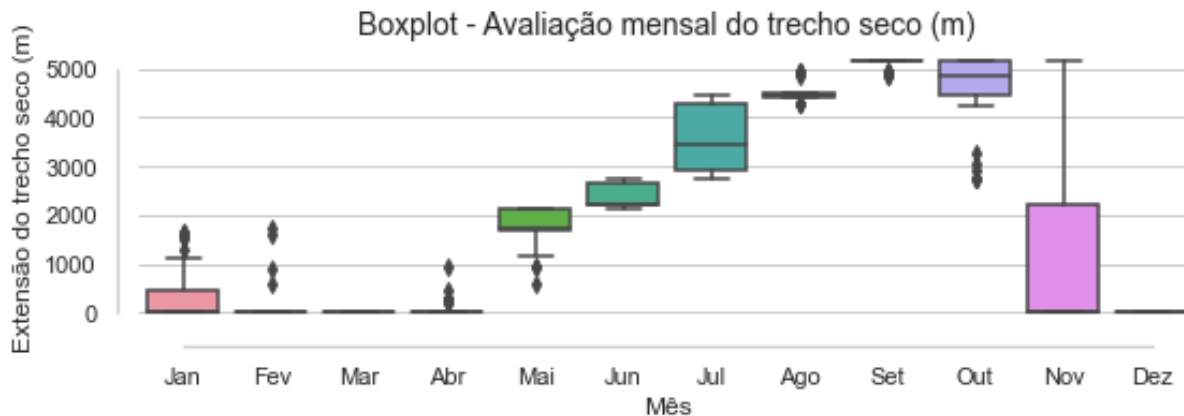
Fonte: elaborado pela autora

A extensão média do trecho seco do rio no período chuvoso foi de 332 m, enquanto no período seco foi de 3,1 km. Em 30 de maio, no início do período seco, observou-se que o trecho seco tinha 1,7 km, iniciando-se no local do sumidouro 3 e finalizando no sumidouro Bambuzal, principal sumidouro localizado na área. Já no final do período seco, em 25 de outubro, a extensão do trecho observada foi a máxima de 2021, com o total de 5,2 km, se iniciando cerca de 500 a jusante da estação Ranquinho e finalizado também no sumidouro Bambuzal.

A Figura 43 apresenta um *Box Plot* dos dados referentes aos trechos secos do ano de 2021. No período chuvoso, entre novembro e março, o rio Santa Catarina apresentou apenas 29 dias com trechos secos, sendo 14 em novembro, principalmente na primeira quinzena, quando a média de extensão do trecho seco foi de 3,3 km. O outro período mais relevante ocorreu em janeiro, no qual por 11 dias o rio apresentou um trecho seco de 1 km em média. Em dezembro e março, não houve nenhuma observação de trecho seco.

No início do período seco, em abril, apenas nos seis últimos dias foram registrados trechos secos no rio. De maio a outubro, todos os dias apresentam algum comprimento de trecho seco, com a média de 3,6 km. A extensão máxima do trecho seco do rio foi observada entre 05 de setembro e 11 de outubro. A extensão do trecho seco foi de 5,2 km em todo o período monitorado, com exceção de dois dias. No período subsequente, entre 16 de outubro e 01 de novembro, em cinco dias, observou-se essa mesma extensão do leito do rio seco.

Figura 43 – *Box plot* da avaliação mensal do trecho seco do rio Santa Catarina no ano de 2021.

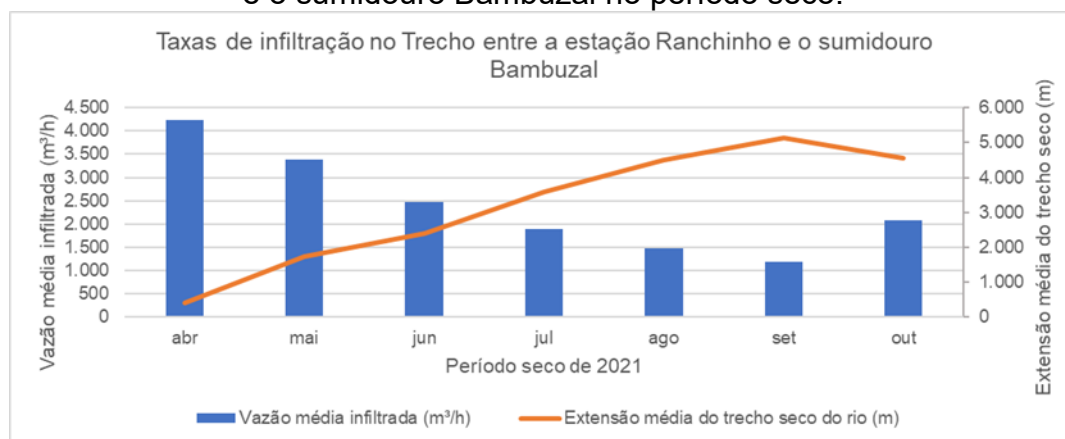


Fonte: elaborado pela autora

Durante o período seco, foi calculada a taxa de infiltração entre Ranchinho e Bambuzal a partir da vazão observada em Ranchinho, apresentada na Figura 44. A taxa máxima de infiltração ocorre no início do período seco, quando as vazões médias em Ranchinho são maiores, com uma média de 4.227 m³/h, o que equivale a 101.448 m³/d. A taxa de infiltração atingiu o seu ponto mínimo em setembro, com a média de 1.179 m³/h ou 28.296 m³/d, juntamente com a maior extensão de trecho seco, com o comprimento médio de 5,128 km. A média infiltrada no período seco foi de 2.148 m³/h, ou 51.551 m³/d. Esse valor foi corroborado pelo modelo hidrodinâmico (não acoplado),

que apresentou a diferença entre a vazão observada e simulada em Ranchinho de 2.180 m³/h.

Figura 44 – Taxa de infiltração calculada para o trecho entre a estação Ranchinho e o sumidouro Bambuzal no período seco.



Fonte: elaborado pela autora.

5.2.2 Acoplamento do modelo hidrodinâmico e do modelo hidrogeológico

O modelo hidrogeológico conceitual e numérico no software FEFLOW foi desenvolvido e fornecido pela NEXA para ser utilizado no presente estudo. Para garantir o correto acoplamento com o modelo hidrodinâmico superficial, foram necessárias algumas alterações, como apresentado a seguir.

5.2.2.1 Alterações no modelo hidrogeológico para o acoplamento

O modelo hidrodinâmico do rio e o modelo hidrogeológico possuem escalas temporais e discretização espacial diferentes entre si. Para garantir o acoplamento adequado entre os modelos, foram realizados os seguintes ajustes no modelo hidrogeológico:

- a. Revisão da malha: a malha do modelo FEFLOW pré-existente foi revisada na tentativa de manter os triângulos mais próximos do equilátero. Além disso, ao longo do rio, a malha foi refinada nos elementos em que foi necessário descrever melhor o traçado do rio, de modo que a condição de *Fluid Transfer* fosse aplicada à face vertical (e não horizontal). O diâmetro médio do elemento do FEFLOW ao longo dos rios no trecho acoplado possui 46 m. Ao longo do rio Santa Catarina, no trecho acoplado, a média

do diâmetro do elemento possui 44 m, sendo o mínimo de 7 m e o máximo de 184 m. Em função desse valor médio, definiu-se a discretização espacial do modelo hidrodinâmico como 50 m. Cabe ressaltar que elementos muito pequenos na malha do FEFLOW podem causar instabilidade no modelo, assim como os demasiadamente grandes em relação ao grid do MHR, podem gerar dificuldades no acoplamento e erros no balanço de massa.

- b. Por motivos de estabilidade numérica, o modelo original era executado como aquífero confinado. No entanto esta configuração não corresponde à realidade já que na configuração aquífero confinado a espessura saturada é julgada como constante e também são ignoradas as contribuições da drenagem dos poros pois só o armazenamento específico (S_s) é considerado, ignorando-se a porosidade eficaz (S_y). Na realidade o nível do lençol freático é livre para abaixar ou subir, variando assim a espessura saturada e drenando os poros. Assim, no presente estudo, foi feita uma melhoria no modelo alterando-se essa configuração para aquífero não confinado, com o método de simulação de fluxo Standard, que utiliza a equação de fluxo de águas subterrâneas para o meio saturado, considerando a zona vadosa por uma pseudo-saturação. O valor da porosidade eficaz (S_y) inserido foi de 0,2.
- c. As condições de contorno das drenagens superficiais e nos limites do domínio do modelo estavam representadas como condição de contorno de 3º tipo, Cauchy, com uma restrição de fluxo máximo de $0 \text{ m}^3/\text{d}$, ou seja, permitia apenas fluxo de base para o rio e não a recarga do aquífero pelo rio. Essa condição foi simplificada para uma condição de Seepage Face, que atua da mesma forma, com duas simplificações: a carga hidráulica determinada não é mais imposta na condição e passou a ser a elevação; e agora desconsiderou-se a condutância do leito do rio como restrição de fluxo. Essa simplificação não era necessária, mas foi realizada com o intuito de evitar problemas numéricos e instabilidade, uma vez que o acoplamento com o MHR também se dá pela condição de contorno tipo 3. Cabe ressaltar que isso não era necessário, pois durante o processo de acoplamento seleciona-se o conjunto de nós aos quais deve-se realizar o acoplamento e, portanto, esse tipo de problema não é esperado. Entretanto, como o modelo apresenta instabilidade, essa condição de contorno foi alterada para simplificar, como medida preventiva.
- d. O passo de tempo do FEFLOW máximo foi inicialmente considerado com 6h, para evitar erros no balanço de massa. O passo de tempo no modelo hidrodinâmico foi diminuído para 2 s, para evitar instabilidade no acoplamento.

5.2.2.2 Testes do acoplamento e premissas adotadas

- Zona não saturada: Para o acoplamento dos dois modelos, como apresentado, o modelo numérico hidrogeológico foi executado como aquífero livre. Os testes iniciais, portanto, mesmo antes do acoplamento, foram referentes à modelagem da zona não saturada. Foram realizados testes considerando a zona não saturada por meio da equação de Richards, de acordo com a equação de Van Genuchten e Van Genuchten modificado. O modelo se mostrou instável ao ser executado com ambas as equações, mesmo considerando o $\delta = 1$ (para a equação de Van Genuchten modificado), o que implicaria em uma relação linear entre a condutividade hidráulica relativa e a saturação. Não foi possível obter resultados satisfatórios com tempo de execução viável. O tempo de execução dos modelos acoplados nesses testes variou entre 1 dia e 6 dias, considerando um passo de tempo máximo de 10 dias. Por esse motivo, a zona não saturada foi modelada com a solução standard do FEFLOW, como supracitado.
- Passo de tempo e demanda computacional: A demanda computacional exigida para a execução dos modelos acoplados se mostrou um desafio durante esse estudo. É recomendado que o passo de tempo máximo para o modelo hidrogeológico seja de 6h, para evitar erros no balanço de massa. Contudo, a execução de cada simulação dentro dessa configuração tardaria quase 3 dias, o que tornaria inviável essa pesquisa. Por isso, foi considerado o passo de tempo adaptativo no FEFLOW, com o máximo de 7 dias, de modo a minimizar os erros no balanço de massa, mas executar o modelo em um período viável (16 horas). Cabe ressaltar que testes preliminares apontaram possíveis diferenças nas taxas de infiltração ao longo do rio de até 20% em função dessa diferença no passo de tempo máximo do modelo hidrogeológico.
- Cargas hidráulicas iniciais: o teste inicial do acoplamento consistiu em executar o modelo por dois anos consecutivos para avaliar o comportamento das cargas hidráulicas. Esse teste apontou que o modelo hidrogeológico ficou mal calibrado após os ajustes necessários para garantir o acoplamento. A principal hipótese do motivo seria em função da alteração das configurações para aquífero livre. Em função disso, o foco da avaliação dos resultados da presente pesquisa passou a ser localmente, voltado para o processo de infiltração da água no meio cárstico. Para essa finalidade, considerou-se uma situação similar à situação A, referente ao modelo conceitual das

interações entre as águas superficiais e subterrâneas em ambientes cársticos, em que a carga hidráulica inicial é relativamente baixa, e durante a infiltração forma-se um aquífero supenso, não conectado ao aquífero livre. Portanto, considerou-se o nível d'água 30m abaixo da situação original, que seria o limite da incerteza associada à calibração inicial do modelo hidrogeológico (Figura 82 do Apêndice B).

5.2.3 Calibração dos modelos acoplados

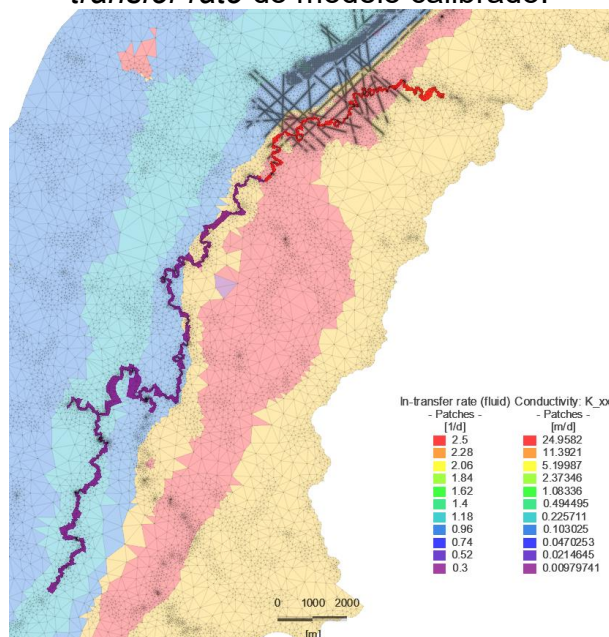
A calibração dos modelos acoplados foi realizada por tentativa e erro, em etapas, com base nos parâmetros referentes à interação entre as águas superficiais e subterrâneas e parâmetros do meio cárstico. Para isso, considerou-se duas componentes:

- a. Infiltração difusa ao longo do leito do rio, ajustada por meio do parâmetro da condutância do leito do rio (*in transfer rate* e *out transfer rate* no FEFLOW, equivalente ao *groundwater leakage* do MHR); e
- b. Infiltração pontual por meio dos condutos cársticos, ajustada por meio da área transversal dos 06 condutos.

As Figura 45 e Figura 46 apresentam os valores finais desses parâmetros, considerados nos modelos calibrados.

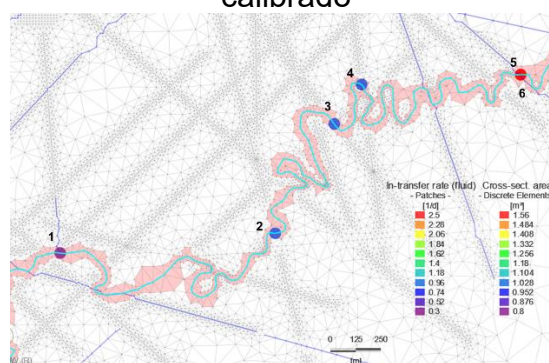
Como apresentado na Figura 45, a condutância do leito foi dividida em duas regiões, a região de montante, com a condutância de 0,3 1/d e a de jusante, com 2,5 1/d, que se inicia juntamente no trecho de maior condutividade hidráulica da Serra do Poço Verde. Apesar de o levantamento *in loco*, durante a instalação das réguas linimétricas, ter apresentado que em toda a extensão do rio modelada o leito e as margens são silto arenosas, com as mesmas características, essas duas regiões foram determinadas em função de três premissas: a maior condutividade da cobertura sedimentar nesse trecho, o maior índice de estruturas rúpteis locais e o maior índice de meandramento do rio nessa região, o que indicam que ali o leito pode ser mais permeável, inclusive porque o traçado do rio se altera de tempos em tempos.

Figura 45 – Discretização do *in* e *out transfer rate* do modelo calibrado.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 46 – Área transversal dos contudos cársticos no modelo calibrado



Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 42 demonstrou que os condutos estão relacionados com o escoamento no rio, e a sua representação é determinante para representar os trechos secos do rio. Com base nos dados levantados com a Nexa, o sumidouro de Bambuzal é o mais significativo, que foi representado como dois condutos, o 05 e 06. O conduto 06, juntamente com o conduto 04, deságuam na mina em um local denominado Tímpano, cuja vazão observada gira em torno de 19.000 m³/d e 84.000 m³/d. Com base nessas informações foi determinada a área das seções transversais, como apresentado na Figura 46.

O modelo foi calibrado para garantir os melhores ajustes no período de seca, entre abril e outubro, considerando as estações Pinheiro e Ranchinho. Por isso, a avaliação foi pautada no KGE do período seco. A Tabela 14 apresenta os resultados do KGE para cada uma das estações, bem como como as suas componentes. A Figura 47 apresenta o comparativo de níveis e vazões entre os dados observados e simulados para cada uma das estações.

Tabela 14 – Índice KGE da estação Pinheiro e Ranchinho, referente à calibração dos modelos acoplados.

Estação	Período	KGE	r	α	β
Pinheiro	2021	0,47	0,93	1,46	1,26
	Seco (abr/21 - out/21)	0,72	0,82	0,85	0,86
Ranchinho	2021	-0,23	0,82	2,20	1,36
	Seco (abr/21 - out/21)	0,77	0,81	1,07	0,88

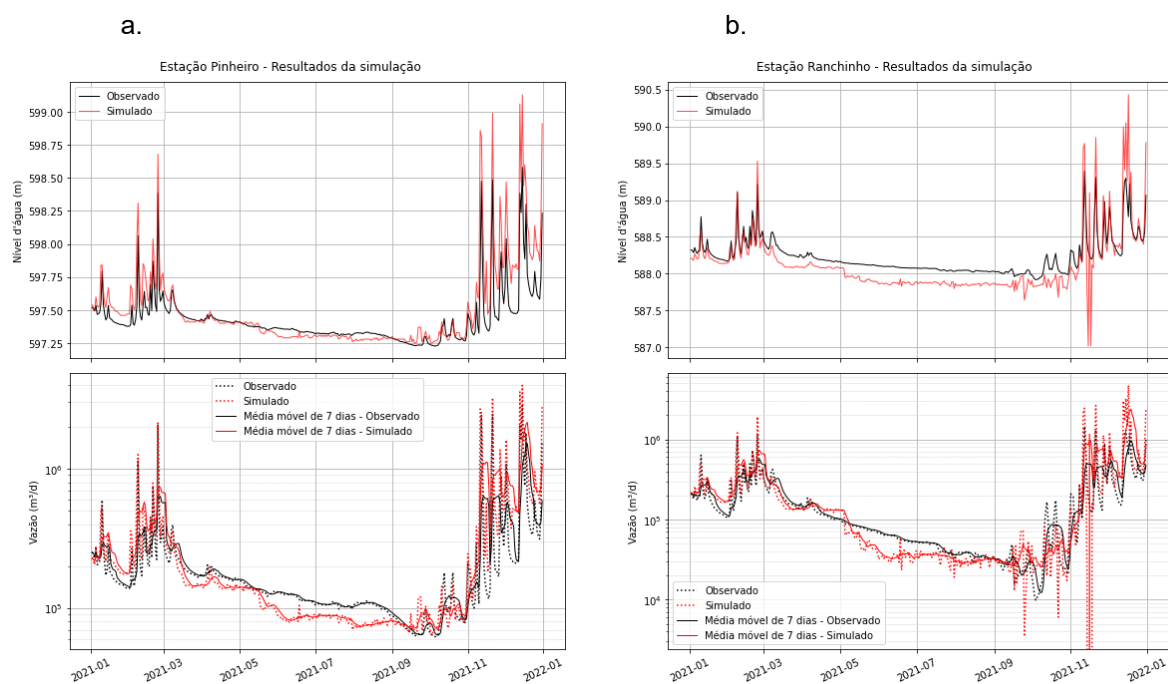
Fonte: elaborado pela autora.

Para o período seco, a estação Pinheiro obteve o índice KGE de 0,72 e Ranchinho obteve 0,77, valores considerados como satisfatórios, levando em consideração a incerteza associada aos dados e processos físicos envolvidos. As componentes do KGE ficaram similares entre as duas estações, com a correlação variando entre 0,81 e 0,82, ainda considerada como satisfatória, embora menor do que com o modelo hidrodinâmico desacoplado. Cabe ressaltar, também, que o β demonstrou que a média das vazões simuladas no período seco está cerca de 13% menor do que as observadas. Isso em valores absolutos representa 16.655 m³/d (694 m³/h) para Pinheiro e 6.984 m³/d (291 m³/h) para Ranchinho.

Já avaliando o período completo, pela componente β observa-se que as médias simuladas estão na média 31% maiores do que as observadas, sendo que no período seco estão menores. Isso refere-se, como pode-se inferir pela Figura 47, à superestimação das vazões simuladas no período chuvoso.

Para o ano de 2021, a calibração da estação Pinheiro, KGE de 0,47, ficou ligeiramente melhor do que simulando com o modelo hidrodinâmico desacoplado, quando o KGE obtido foi de 0,43, sendo que o β era de 1,32. A calibração da estação Ranchinho para o ano de 2021 continua ruim, com o KGE de -0,23, assim como quando simulado o modelo hidrodinâmico desacoplado, que obteve um KGE de -0,26. A componente β diminuiu de 1,72 para 1,36 com o acoplamento, considerando o ano de 2021. Para essa estação, o que comprometeu o resultado do KGE foi a componente α , que obteve o valor de 2,20, possivelmente em função da instabilidade numérica apresentada no período chuvoso.

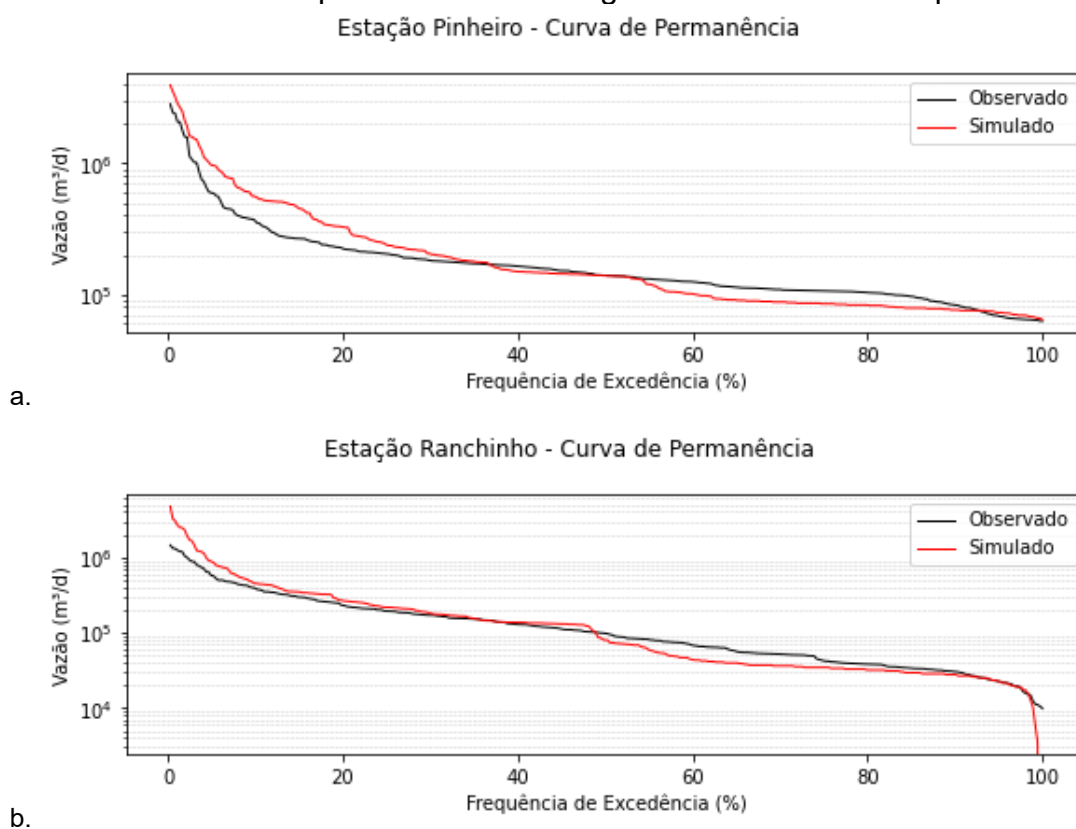
Figura 47 – Comparativo do nível (m) e vazão (m^3/d), para os dados observados e simulados, considerando o acoplamento entre as águas superficiais e subterrâneas: a. na estação Pinheiro; e b. na estação Ranchinho.



Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 48 apresenta as curvas de permanência da estação Pinheiro e Ranchinho, comparando os valores observados e simulados. Observa-se que as curvas simuladas estão próximas às vazões observadas nessas estações, mostrando a boa calibração do modelo. As principais discrepâncias estão nas vazões altas, com a probabilidade menor ou igual a 20% de ocorrência, que não são o foco do presente estudo. Para as vazões médias e baixas, portanto, as curvas se mostram aderentes. A diferença entre o simulado e observado na faixa da Q90 e Q95 para Pinheiro variou de $1.974 \text{ m}^3/\text{d}$ a $4.177 \text{ m}^3/\text{d}$ ($82 \text{ m}^3/\text{h}$ a $174 \text{ m}^3/\text{h}$), e para Ranchinho variou entre $1.331 \text{ m}^3/\text{d}$ e $2.040 \text{ m}^3/\text{d}$ ($55 \text{ m}^3/\text{h}$ a $85 \text{ m}^3/\text{h}$).

Figura 48 – Curva de Permanência das estações: a. Pinheiro; b. Ranchinho, a partir dos dados de vazão simulados e observados para o ano de 2021, considerando o acoplamento entre as águas subterrâneas e superficiais.



Fonte: elaborado pela autora.

5.2.4 Outros resultados do modelo calibrado

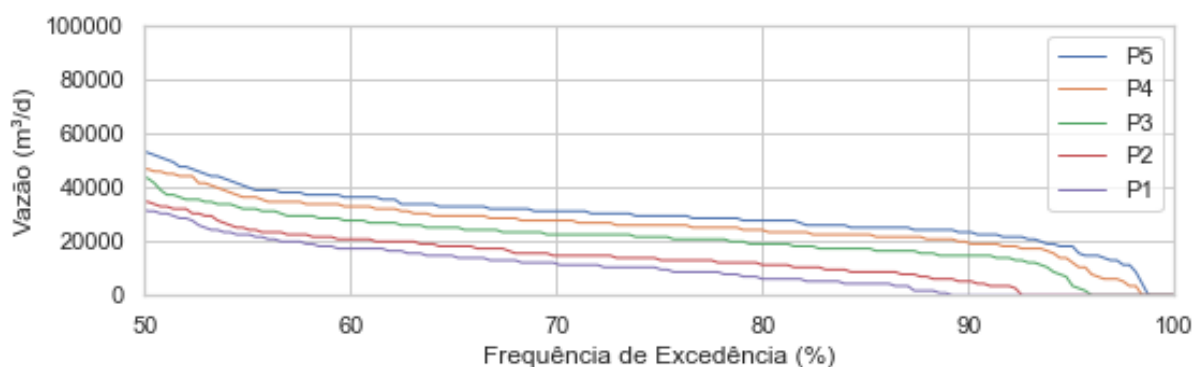
Os resultados do modelo foram validados com os dados observados dos trechos secos do rio, localizados entre a estação Ranchinho e o sumidouro de Bambuzal. Por fim, também foi avaliada a infiltração difusa ao longo do leito do rio, bem como a infiltração nos condutos cársticos. Os resultados das vazões obtidas na mina subterrânea também foram considerados na calibração do acoplamento, embora com menor peso, em função da calibração do modelo hidrogeológico.

5.2.4.1 Avaliação do trecho seco de rio

A Figura 49 apresenta a curva de permanência dos pontos de referência no trecho de rio sujeito ao secamento. Foram inseridos 5 pontos de referência nesse trecho, um ponto a cada 1 km, a contar do sumidouro em Bambuzal, no sentido de jusante para montante.

Os resultados apresentaram que em cerca de 11% do tempo há entre 1 km de trecho seco no rio, o que equivale a 40 dias, quando o observado foi de 202 dias.

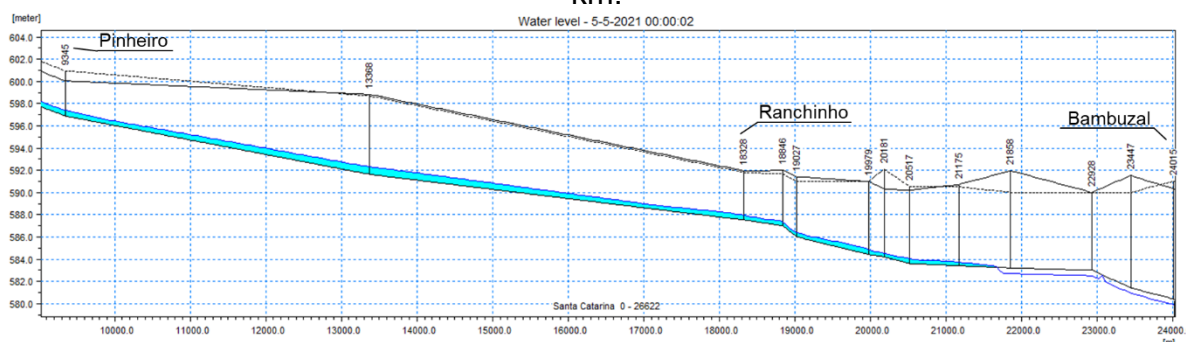
Figura 49 – Curva de Permanência dos pontos de referência no trecho do rio sujeito ao secamento; sendo um ponto a cada km do rio, a contar a partir do sumidouro Bambuzal, no sentido de montante.



Fonte: elaborado pela autora.

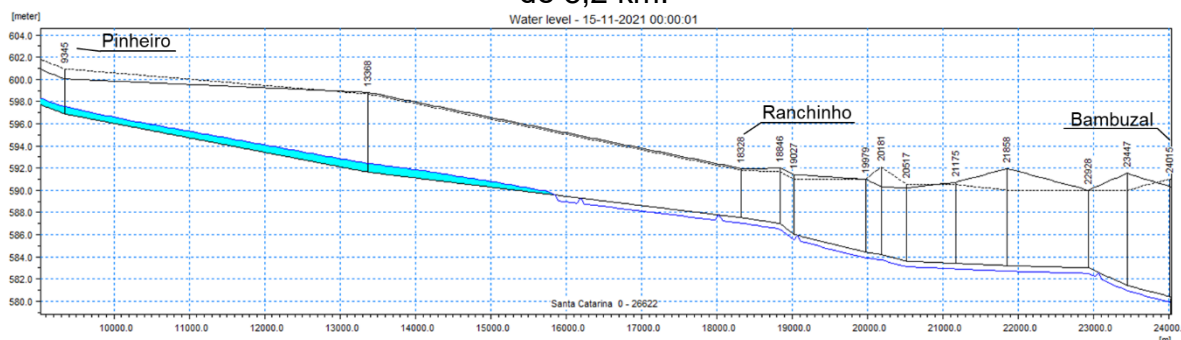
De acordo com os resultados do modelo, o rio Santa Catarina começa a apresentar trechos secos a partir do dia 05 de maio, com a extensão de 2,3 km, como ilustra a Figura 50. Segundo os dados observados, isso ocorreu na última semana de abril, com a média de 396 m. O rio seca de forma intermitente durante todo o período seco. O trecho seco máximo simulado no rio Santa Catarina, apresentado na Figura 51, e foi de cerca de 8,2 km, registrado no dia 15 de novembro, logo após o final do período seco. De acordo com os dados observados, o máximo trecho seco foi observado no final do período seco, até o dia 01 de novembro, com 5,2 km.

Figura 50 – Trecho seco simulado no rio Santa Catarina no dia 05/05/2021, de 2,3 km.



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 51 – Máximo trecho seco simulado no rio Santa Catarina no dia 15/11/2021, de 8,2 km.



Fonte: elaborado pela autora.

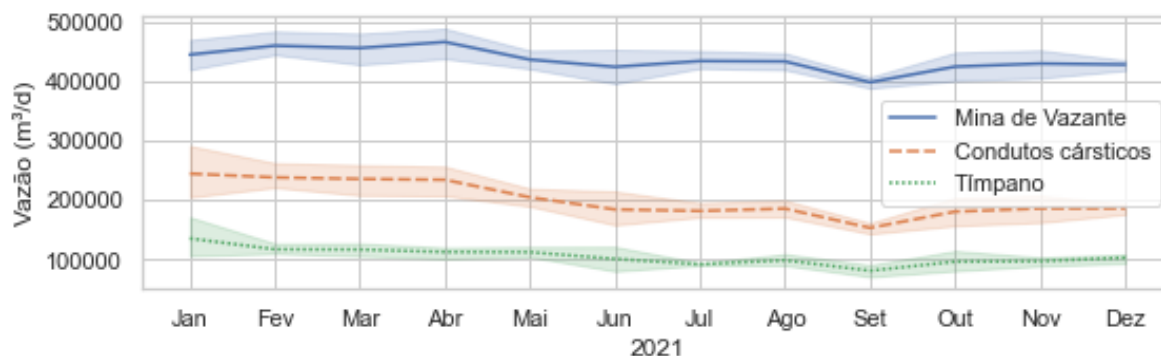
5.2.4.2 Vazões bombeadas na mina

A Figura 52 compara as vazões simuladas na mina de Vazante, com as vazões infiltradas pelos 06 contudos cársticos e, especificamente, as vazões obtidas no Tímpano, correspondentes aos condutos do modelo numérico 04 e 06.

A vazão simulada para a mina de Vazante média foi de 442.833 m³/d (ou 18.451 m³/h) no período chuvoso e 431.617 m³/d (ou 17.984 m³/h) no período seco. Esses valores estão cerca de 91% mais elevados do que o valor médio de 2021, que foi de 9.528 m³/h. Os valores simulados no Tímpano, de 114.146 m³/d (ou 4.756 m³/h) no período seco, e 99.060 m³/d (ou 4.128 m³/h) no período chuvoso ficaram 27% acima do limite superior do valor de referência, entre 19.000 m³/h e 84.000 m³/h.

Esses resultados podem ser atribuídos a falta de calibração do modelo hidrogeológico. De qualquer modo, eles corroboram com estimativas realizadas anteriormente de que a vazão infiltrada pelos condutos cársticos, diretamente do rio, representa entre 42% e 60% das vazões observadas na mina. Os resultados simulados corresponderam a 49% e 44% nos períodos seco e chuvoso, respectivamente. A Tabela 15 apresenta esses resultados.

Figura 52 – Vazões médias simuladas na mina de Vazante, nos condutos cársticos e, especificamente no Tímpano.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 15 – Resultados da simulação.

Resultados da simulação	Período Chuvoso (m³/d)	Período Seco (m³/d)	Período Chuvoso (m³/h)	Período Seco (m³/h)
Vazão na mina de Vazante	442.822	431.617	18.451	17.984
Vazão nos condutos cársticos	216.791	189.561	9.033	7.898
Vazão no Tímpano	114.116	99.060	4.756	4.128
Vazão infiltrada pelo leito do rio (difuso)	79.258	16.943	3.302	706

Fonte: elaborado pela autora.

5.2.4.3 Vazão infiltrada ao longo do leito do rio e pelos condutos cársticos

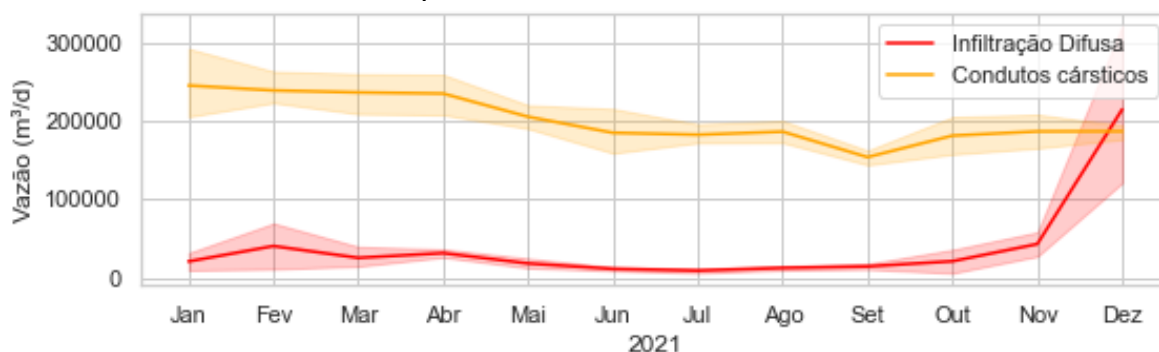
A Figura 53 apresenta a comparação das vazões infiltradas ao longo do leito do rio Santa Catarina (difusa), no trecho entre Ranchinho e Bambuzal, com as vazões infiltradas por meio dos condutos cársticos (pontual). No período seco, a vazão média infiltrada no leito do rio foi de 16.943 m³/d (706 m³/h).

De acordo com os dados observados, a infiltração média observada, considerando a infiltração pelos condutos cársticos, foi de 51.551 m³/d (2.148 m³/h). Desconsiderando 49%, referente à infiltração nos condutos, a estimativa de infiltração pelo leito do rio no período seco de 2021 foi de 26.291 m³/d (1.095 m³/h) no trecho estudado. Portanto, os resultados da simulação da infiltração nesse trecho ficaram 36% abaixo dessa estimativa.

Os resultados do modelo referentes à vazão infiltrada ao longo do leito do rio, de forma difusa, e a infiltração pontual, pelos condutos cársticos, mostram que a infiltração difusa representa apenas 37% da infiltração pontual no período seco. Esses

resultados mostram que a infiltração pelos condutos cársticos é muito relevante para a avaliação das interações entre as águas superficiais e subterrâneas, determinando o escoamento no trecho estudado e refletindo no processo de secamento do rio.

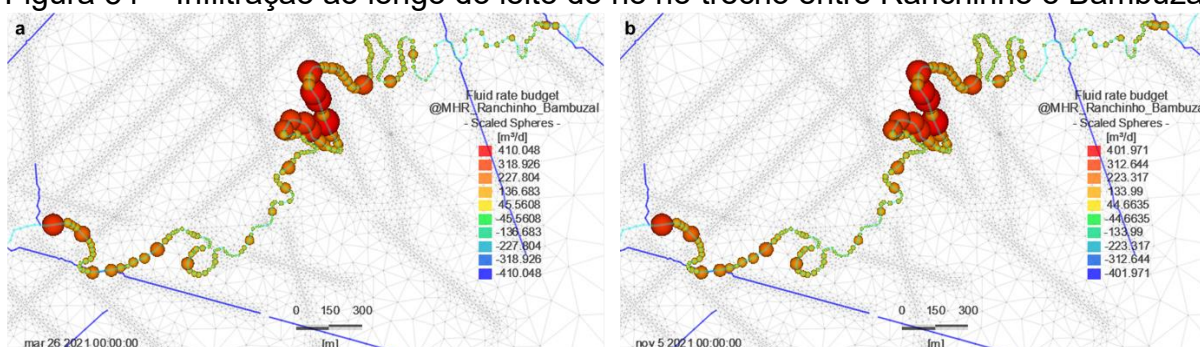
Figura 53 – Comparação da infiltração ao longo do leito do rio (difusa) e pelos condutos cársticos, para o trecho entre Ranchinho e Bambuzal.



Fonte: elaborado pela autora.

Por fim, a Figura 54 apresenta a infiltração difusa ao longo do leito do rio no trecho entre Ranchinho e Bambuzal, sendo a Figura 54a no final do período chuvoso e a Figura 54b no final do período seco. Pode-se aferir que o comportamento da infiltração ao longo do leito do rio apresentou um padrão similar, onde a maior taxa de infiltração localizou-se na porção intermediária do trecho.

Figura 54 – Infiltração ao longo do leito do rio no trecho entre Ranchinho e Bambuzal



Fonte: elaborado pela autora.

5.2.5 Limitações da Modelagem

Primeiramente, cabe ressaltar que o estudo foi realizado com base em 1 ano de dados, o que é um período muito curto para fazer a avaliação de tendências estatísticas. Portanto, as interpretações apresentadas devem ser consideradas como

interpretações “instantâneas”. A execução desse modelo acoplado com um maior período de simulação teria uma demanda computacional muito alta, o que limitou a avaliação aqui realizada.

A demanda computacional, portanto, se mostrou um fator limitante importante. Também foi fator determinante na decisão do passo de tempo a ser utilizado no modelo, o que influenciou no nível de incerteza dos resultados obtidos.

Além disso, como cita Jeannin et al. (2021) e diversos autores de modelagem, provavelmente os melhores modelos são tão bons quanto os dados fornecidos. A representação da heterogeneidade cárstica, como previamente abordado, é um processo complexo, mas importante para se ter resultados mais precisos a nível local. Os parâmetros referentes aos condutos cársticos se mostraram determinantes para a simulação das vazões na mina e do escoamento no rio Santa Catarina, principalmente entre o trecho de Ranchinho e o sumidouro Bambuzal, sujeito ao secamento.

Por fim, o modelo hidrogeológico não muito bem calibrado foi outra limitação do presente estudo. Em função disso, o estudo voltou-se para os processos de infiltração no leito do rio Santa Catarina, com estimativas com maior grau de incerteza no que se refere aos resultados da componente subterrânea. Esse estudo, portanto, não considerou em detalhes os volumes armazenados e a dinâmica que ocorre no epicarste.

5.3 CONCLUSÕES

A simulação das interações entre o rio e o aquífero cárstico nas condições atuais de bombeamento a partir dos modelos acoplados obteve uma calibração satisfatória, com os valores do índice KGE de 0,72 e 0,77 no período seco, para a vazão nas estações Pinheiro e Ranchinho, respectivamente. Além disso, os valores globais das vazões obtidas na mina referentes aos condutos ficaram coerentes com os dados observados. Considerando a complexidade do ambiente deste estudo e a limitação de dados disponíveis, estes resultados obtidos foram considerados muito positivos.

Contudo, o trecho seco do rio não ficou adequadamente representado nesse modelo, uma vez que foi observado um trecho seco médio de 590 m, apenas em 40 dias do ano, e não durante 219 dias, como o observado. A hipótese principal levantada

nesse estudo é que esse resultado seja reflexo dos parâmetros hidrogeológicos não calibrados, e não de problemas referentes ao acoplamento.

Os resultados obtidos apontaram que o acoplamento dos software FEFLOW (versão 7.5) e MIKE Hydro River (versão 2022 atualização 1), por meio do plugin PiMIKE1D, se mostrou uma metodologia eficiente para a modelagem integrada entre as águas superficiais e subterrâneas em ambientes hidrogeológicos complexos e anisotrópicos. Além disso, essa metodologia obteve bons resultados para esse estudo, voltado para as vazões baixas e o processo de secamento do rio, considerando a limitação de dados disponíveis e a complexidade do ambiente estudado. Cabe ressaltar também que, para evitar erros no balanço de massa, este estudo exige uma demanda computacional bastante elevada.

Por fim, no que tange o estudo de caso em questão, a relevância do escoamento pelos condutos cársticos para os valores bombeados na mina já foi objeto de estudos de campo anteriores, mas nunca incorporados em um modelo matemático. Os resultados do modelo corroboraram com os estudos de campo, apontando que 46% da vazão bombeada na mina é proveniente dos condutos cársticos, o equivalente à 216.791 m³/d no período seco e 189.561 m³/d no período chuvoso. Essa dinâmica de escoamento também é determinante para as vazões no rio Santa Catarina, refletindo na extensão dos trechos secos observados, uma vez que a infiltração ao longo do leito do rio, de 16.943 m³/d no período seco, representa apenas 9% da infiltração para os condutos cársticos.

Para a redução das incertezas associadas ao modelo hidrogeológico, recomenda-se um refinamento da calibração, mantendo a configuração do modelo como aquífero livre. Para isso, ressalta-se a importância de avaliar os fluxos de base no rio, de modo a conseguir representar a dinâmica do escoamento no período de seca e, por consequência, o secamento do rio.

Com respeito ao acoplamento dos modelos em si, cabe ressaltar a importância da compatibilidade da hidrografia e das elevações entre os dois modelos. Além disso, a discretização horizontal entre os dois modelos deve estar em concordância, para que não gere erros no balanço de massa, bem como a discretização temporal dos modelos. Recomenda-se, sempre que possível, que esses pontos referentes ao acoplamento sejam tratados em conjunto para os modelos, e não que os modelos sejam feitos de forma independente para posteriormente realizar o acoplamento.

6 DISCUSSÃO GERAL

Nos capítulos anteriores foram discutidas as metodologias e os principais resultados da modelagem hidrodinâmica do rio Santa Catarina e do seu acoplamento ao modelo hidrogeológico, com o objetivo de avaliar as interações entre as águas superficiais e subterrâneas no aquífero cárstico, sob o regime de bombeamento da mina de Vazante.

Primeiramente, cabe ressaltar que o período modelado foi de 1 ano e, portanto, a discussão aqui proposta se refere aos resultados para o ano de 2021, e não a uma avaliação estatística das tendências. A modelagem de um período mais longo ficou impossibilitada, principalmente, em função da demanda computacional para a execução dos modelos acoplados. A disponibilidade de dados também seria uma limitação importante para uma simulação com maior período de tempo.

Outra limitação da demanda computacional foi o passo de tempo máximo do modelo hidrogeológico. Recomenda-se no máximo 6h, mas foi considerado o passo de tempo adaptativo, na tentativa de gerar menores erros no balanço de massa, com o passo de tempo máximo de 7 dias. Isso reduziu o tempo de simulação de alguns dias – de um total de 2 a 6 dias, a depender da configuração do modelo, para questão de horas, entre 10 horas e 20 horas. Isso, contudo, gerou um erro no balanço de massa no modelo hidrodinâmico (águas superficiais) de 5,9% em relação às vazões de entrada. No modelo hidrogeológico, o erro do balanço de massa foi de 0,7%. Os modelos foram executados em um computador com o processador Intel(R) Core (TM) i7-8750H, com 16 GB de memória RAM e placa de vídeo dedicada.

Há um certo grau de incerteza associado aos resultados. Contudo, nos modelos em ambientes cársticos, esse nível de incerteza é esperado. Segundo Hartmann et al., (2014), as dificuldades em coletar informações suficientes sobre as propriedades do sistema cárstico, ou seja, para capturar toda a sua heterogeneidade espacial, e o conteúdo limitado de informações da vazão observada torna a aplicação dos modelos disponíveis atualmente altamente incertos.

Por outro lado, mesmo que os modelos de fluxo de águas subterrâneas usados na mineração tenham limitações relacionadas à incerteza dos parâmetros e condições de contorno, eles ainda fornecem as informações mais abrangentes sobre o sistema de desaguamento da mina e seu impacto ambiental no momento em que

são desenvolvidos. Estes sempre exigirão verificações periódicas com base em novas informações de campo e dados monitorados (SZCZEPÍŃSKI, 2019).

No que tange as vazões modeladas no rio Santa Catarina, considerando as limitações indicadas acima, o modelo representou bem o período de seca, que foi o foco da calibração, com o KGE de 0,72 e 0,77 para as estações Pinheiro e Ranchinho, respectivamente. O período completo, o ano de 2021, obteve uma calibração mediana para a estação Pinheiro, com o KGE de 0,47, e uma calibração ruim para a estação Ranchinho, com o KGE de -0,23. Avaliando a correlação entre as curvas e a razão entre as médias (r e β) os resultados não foram muito discrepantes para a estação Ranchinho. A principal componente que gerou o KGE negativo foi o α , possivelmente em função da instabilidade numérica apresentada no período chuvoso.

Cabe ressaltar que em função das características da precipitação e o hidrograma no rio Santa Catarina, onde se tem um período de chuvoso e de seca muito bem delimitados e contrastantes em termos de volumes hídricos, a calibração desse modelo de modo a representar satisfatoriamente os dois períodos é um desafio.

A condição inicial das cargas hidráulicas no aquífero se mostrou um fator muito relevante para os resultados do acoplamento, podendo causar instabilidade no modelo numérico. Utilizando-se as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo não acoplado, o modelo acoplado não mostrou-se estável e coerente por terem pontos ao longo do rio onde as cargas ficaram muito acima do leito do rio ou muito abaixo, já que a topografia ao longo do leito do rio foi modificada para melhor representar sua declividade. Assim, adotou-se um modelo conceitual onde o nível do aquífero livre ficou sempre abaixo do leito do rio, representando satisfatoriamente a dinâmica observada em Vazante, como apresentado pela calibração do modelo. A instabilidade apresentada pode ocorrer em função das componentes do modelo hidrogeológico, como por exemplo os parâmetros do modelo, que não estão calibrados, ou a malha gerada, que possui uma quantidade considerável de elementos irregulares. A representação das estruturas rúpteis também pode causar essa instabilidade, em função do alto contraste de parâmetros hidrogeológicos entre elas e o meio poroso.

Com relação à calibração do modelo hidrogeológico, Jeannin et al. (2021) menciona que as características do armazenamento do aquífero cárstico são provavelmente relevantes em relação ao fluxo de base e sugere calibrar o fluxo de base primeiro e o fluxo de pico depois. A calibração voltada para o fluxo de base é especialmente importante nesse estudo, visto que influencia diretamente nas vazões

mínimas do rio e o trecho suscetível ao secamento. Esses parâmetros, como o armazenamento específico e a porosidade eficaz, podem ser relacionados com os resultados dos trechos secos do rio na simulação. O modelo demonstrou que a metodologia foi capaz de simular os processos que levam ao secamento do rio, apesar de subestimar o trecho seco. A média simulada do trecho seco no período seco foi de 590 m, com trechos secos apenas em 40 dias do ano, e não durante 219 dias, com a média de 3,1 km, como o observado. A hipótese principal levantada nesse estudo é que esse resultado tenha sido reflexo dos parâmetros hidrogeológicos não calibrados, e não de problemas referentes ao acoplamento.

Por fim, como resultados do modelo, identificou-se que a infiltração ao longo do leito do rio representa 37% da vazão infiltrada nos condutos cársticos, durante o período chuvoso, e apenas 9% no período seco. Por mais que esses resultados possam estar superestimados, considerando-se a vazão resultante na mina mais alta do que a observada, esse resultado indica que a representação dos condutos cársticos é determinante na avaliação dos processos relativos à interação entre as águas superficiais e subterrâneas nesse trecho. Portanto, a sua discretização e parametrização, a partir de estudos de campo, são fundamentais para a elaboração de um modelo capaz de simular possíveis medidas mitigadoras.

7 CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Esse estudo teve como objetivo avaliar de forma integrada as interações entre as águas subterrâneas e superficiais em um ambiente cárstico, sob influência do rebaixamento causado por uma mina subterrânea.

Para isso, o modelo hidrodinâmico do Mike Hydro River foi acoplado ao modelo hidrogeológico, do FEFLOW, por meio do plug in PiMIKE1D. Essa metodologia se mostrou adequada para a avaliação das vazões mínimas e os processos que representam a dinâmica de fluxos entre o rio e a mina em um ambiente cárstico, altamente anisotrópico e com a discretização das feições cársticas como feições discretas 1D e 2D.

Considerando as limitações de dados disponíveis e a complexidade do ambiente estudado, as vazões no rio foram satisfatoriamente calibradas para o período seco de 2021, a partir do KGE de 0,72 e 0,77 nas duas estações consideradas. Embora o trecho seco do rio não tenha sido representado na mesma magnitude que o observado, os resultados demonstraram que o processo de interação entre as águas superficiais e subterrâneas que levam ao seu secamento pode ser representado. O resultado subestimado foi atribuído às limitações desse modelo, como a demanda computacional, disponibilidade de dados e a calibração do modelo hidrogeológico.

Dessa forma, essa metodologia demonstrou que tem a flexibilidade necessária e pode ser aplicável em diferentes tipos de estudos referentes às interações entre as águas superficiais e subterrâneas, inclusive em ambientes complexos como os cársticos, onde a avaliação e/ou gestão integrada dos recursos hídricos muitas vezes é essencial e pouco abordada.

Diante do exposto, são elencadas algumas recomendações, visando a continuação desse estudo:

- Obtenção de mais dados de medição de vazão para a atualização das curvas-chave. Caso o objetivo do modelo seja a previsão anual das vazões, incluindo a avaliação do período chuvoso, é importante realizar medições nos dias de eventos de cheia, para que a curva-chave seja atualizada para considerar vazões altas;
- Melhor representação longitudinal das estações de montante do modelo. Para isso, seria interessante fazer um levantamento topográfico em alguns pontos do rio. Cabe

ressaltar que deve ser mantida a concordância entre as elevações do rio no FEFLOW e no Mike Hydro River.

- Obtenção de novos dados e/ou incorporação dos dados adicionais no modelo conceitual: recarga do modelo hidrogeológico, armazenamento específico e porosidade eficaz, além dos parâmetros dos condutos cársticos, como a área da seção e o número de Manning (M). Cabe ressaltar que o ambiente cárstico está em constante desenvolvimento, ainda mais em função dos gradientes hidráulicos provocados pela mina. Por isso, os parâmetros referentes aos condutos cársticos podem variar de forma transiente.
- Avaliação do modelo conceitual com foco no trecho de rio entre Ranchinho e o sumidouro Bambuzal: a representação dos sumidouros ali é determinante no escoamento do rio e no processo de secamento, como mostram os dados observados. Seria interessante obter a medição de vazão antes e depois dos sumidouros, para incorporar essas informações no modelo.
- Recalibração do modelo numérico: recalibrar o modelo de águas subterrâneas considerando primeiramente os parâmetros que influenciam no fluxo de base do rio. Em seguida, reavaliar a calibração do modelo acoplado e realizar os ajustes necessários.
- Para a calibração do trecho seco, sugere-se realizá-la considerando os trechos de montante para jusante, para calibrar os parâmetros referentes às perdas por infiltração difusa e pontual no rio.
- Executar os modelos na nuvem, em alguma configuração que permita garantir o passo de tempo máximo menor do que o atual, de modo a minimizar os erros no balanço de massa.
- Também é possível adicionar a componente hidrológica à avaliação, considerando o acoplamento entre o MIKE SHE (que inclui a componente de rios, representada pelo Mike Hydro River) e o FEFLOW.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. A gestão dos recursos hídricos e a mineração. p. 334, 2006.
- ANDERSON, M. P. A.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. 2015. 564p.
- ANA & IBRAM. A gestão dos recursos hídricos e a mineração, 2006.
- ANDREO, B. Introductory editorial: Advances in karst hydrogeology. Environmental Earth Sciences, v. 65, n. 8, p. 2219–2220, 2012.
- ARAÚJO, E. E. DE et al. Modelamento Hidrogeológico Regional Em Leapfrog / Feflow Da Região De Vazante , Mg. p. 1–10, 2016.
- ARCEMENT, G. J. JR.; SCHNEIDER, V. R. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains United States Geological Survey Water-supply Paper 2339. U.S. GEOLOGICAL SURVEY WATER-SUPPLY PAPER 2339, 1989.
- BAILLY-COMTE, V.; JOURDE, H.; PISTRE, S. Conceptualization and classification of groundwater-surface water hydrodynamic interactions in karst watersheds: Case of the karst watershed of the Coulazou River (Southern France). Journal of Hydrology, v. 376, n. 3–4, p. 456–462, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.053>>.
- BAKALOWICZ, M. Karst groundwater: A challenge for new resources. Hydrogeology Journal, v. 13, n. 1, p. 148–160, 2005.
- BARNETT, B. Australian groundwater modelling guidelines Sinclair Knight Merz and. 2012. 204p.
- BARTHEL, R.; BANZHAF, S. Groundwater and Surface Water Interaction at the Regional-scale – A Review with Focus on Regional Integrated Models. Water Resources ManagementSpringer Netherlands, , 1 jan. 2016.
- BEAR, J.; H-D CHENG, A. Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport (Theory and Applications of Transport in Porous Media). v.23. 210 p.
- BICHUETI, R.; MADRUGA, L.; GOMES, C.; ROSA, L. O Uso da Água na Mineração: Uma Análise da Produção Científica Internacional. Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 3, n. 2, p. 58–73, 2014.
- BITTENCOURT, C.; DOS REIS NETO, J. M. O sistema cárstico de vazante - Carste em profundidade em metadolomitos do grupo vazante - MG. Revista Brasileira de Geociencias, v. 42, n. 1, p. 1–10, 2012.
- BRUNKE, M.; GONSER, T. The ecological significance of exchange processes

between rivers and groundwater. *Freshwater Biology*, v. 37, n. 1, p. 1–33, 1997.

CHEN, W. B.; LIU, W. C. Modeling the influence of river cross-section data on a river stage using a two-dimensional/ three-dimensional hydrodynamic model. *Water (Switzerland)*, v. 9, n. 3, 2017.

DARDENNE, M. A. The Brasilia Fold Belt. *The Brasilia Fold Belt. Anais.2000.*

DHI. Mike 1D Reference Manual. Simulation, p. 1–334, 2017.

DIBAJ, M. et al. Coupled three-dimensional modelling of groundwater-surface water interactions for management of seawater intrusion in Pingtung Plain, Taiwan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 36, n. June, p. 100850, 2021.

DIERSCH, H.-J. G. FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. 2014. 1018 p.

DOHERTY, J.; HUNT, R.; TONKIN, M. Approaches to Highly Parameterized Inversion : A Guide to Using PEST for Model-Parameter and Predictive-Uncertainty Analysis: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010 – 5211. p. 71, 2010.

FITTS, C. R. (CHARLES R. *Groundwater Science*. 2013. 672 p.

FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst Geomorphology and Hydrology*. 2007. 578 p.

GOLDSCHIEDER, N. et al. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources/Distribución mundial de las rocas carbonatadas y los recursos hídricos kársticos. *Springer*, v. 28, n. 5, p. 1661–1677, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10040-020-02139-5>>.

GUNDUZ, O.; ARAL, M. M. Surface Water–Groundwater Interactions: Integrated Modeling of a Coupled System. Em: *Handbook of Applied Hydrology*. 2016. p. 54.1–54.14.

GUPTA, H. V. et al. Decomposition of the Mean Squared Error & NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology*, p. 37, 2009.

HARTMANN, A. et al. Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. *Rev. Geophys.*, v. 52, n. 218–242, 2014.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING & METALS. *Water management in mining: a selection of case studies*. n. May, 2012.

IPT. *Análise de causas associadas ao processo de “secamento” em trecho do rio Santa Catarina, município de Vazante/MG - Etapa 2 Relatório Parcial 6*, 2020.

IPT. *Análise de causas associadas ao processo de “secamento” em trecho do rio Santa Catarina, município de Vazante/MG - Etapa 2 Relatório Parcial 8*. 2021.

JAHANDIDEH-TEHRANI, M. et al. Hydrodynamic modelling of a flood-prone tidal river using the 1D model MIKE HYDRO River: calibration and sensitivity analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 2, 2020.

JEANNIN, P. Y. et al. Karst modelling challenge 1: Results of hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, v. 600, 1 set. 2021.

KARMAKAR, H. N.; DAS, P. A. Assessment of mining impact on ground and surface waters quality. *International Mine Water Association (IMWA)*, n. 1, p. 93–98, 2012.

KHOBRADE, K. Impact of Mining Activity on environment: An Overview. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, v. 10, n. 05, p. 784–791, 2020.

KIRALY, L. Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach. *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel*, n. 15, p. 77–98, 1998.

KNAPTON, A. et al. Two case studies of the development and implementation of integrated river - groundwater models in the top end of Australia. *Proc. of the 2nd FEFLOW User Conference, Potsdam*, v. 11, 2009.

LANGEVIN, C. D. et al. Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. *USGS: Techniques and Methods 6-A55*, p. 197, 2017.

LEWANDOWSKI, J.; MEINIKMANN, K.; KRAUSE, S. Groundwater-Surface Water Interactions: Recent Advances and Interdisciplinary Challenger. p. 37–56, 2020.

MONNINKHOFF, B. et al. Analyzing the Effects of Groundwater Influenced Flooding of a Large Abandoned Mining Area in Eastern Germany. *IMWA Conference "An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges"*, v. 2018, n. Mil 2006, p. 725–730, 2014.

MONNINKHOFF, B. *IfmMIKE11 2.1 User Manual*. 2014.

MUDD, G. M. Mining and Water Resources. In: *Encyclopedia of the World's Biomes*. Elsevier, 2020. p. 45–54.

NINANYA, H. et al. Analysis of water control in an underground mine under strong karst media influence (Vazante mine, Brazil). *Hydrogeology Journal*, v. 26, n. 7, p. 2257–2282, 2018.

PATIL, S. D.; STIEGLITZ, M. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology*, v. 525, p. 409–417, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.003>>.

PESSOA, P. F. P.; FERNANDES, R. A.; KIMURA, G. Caracterização Hidrogeológica Integrada da Área de Influência da Mina de Zinco da Votorantim Metais, Unidade Vazante/MG. 2012. 101 p.

PORTO, R. DE M. Hidráulica Básica. 4a Edição ed. São Carlos - SP: Publicação EESC-USP, 2006.

SALEH, F. et al. Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1D Saint-Venant hydraulic model at regional scale. *Journal of Hydrology*, v. 476, p. 169–177, 2013.

SINGH, V. P. *Handbook of Applied Hydrology*. 2017. 1383 p.

SPITZ, K.; TRUDINGER, J. *Mining and the Environment - From Ore to Metal*. 2019. 802 p.

STEVANOVIĆ, Z. Karst waters in potable water supply: a global scale overview. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 23, p. 1–12, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9>>.

SZCZEPIŃSKI, J. The significance of groundwater flow modeling study for simulation of opencast mine dewatering, flooding, and the environmental impact. *Water (Switzerland)*, v. 11, n. 4, 2019.

TIBÚRCIO, I. V. R. *Modelagem Hidrológica em Ambiente Cárstico de uma parcela da Bacia do Rio Santa Catarina*. Industry and Higher Education, 2021.

TRUST. *Impactos de Trecho do Rio do Secamento Socioambientais Santa Catarina*. 2018.

VRZEL, J. et al. Hydrological system behaviour of an alluvial aquifer under climate change. *Science of the Total Environment*, v. 649, p. 1179–1188, 2019.

WARMINK, J. J. et al. Identification and Quantification of Uncertainties in a Hydrodynamic River Model Using Expert Opinions. *Water Resources Management*, v. 25, n. 2, p. 601–622, 2011.

WATER SERVICES AND TECHNOLOGIES. *Estudo Hidrogeológico no rio Santa Catarina utilizando Traçadores*. 2020

ZHEN-GANG, J. *Hydrodynamics and Water Quality: Modeling rivers, lakes and estuaries*. 2008. 702 p.

APÊNDICE A – Construção do modelo hidrodinâmico

A seguir, da Figura 55 a

Figura 75, são apresentados os dados referentes à cada uma das seções transversais consideradas na construção do modelo hidrodinâmico. Os dados referem-se às fotografias tiradas em campo na data da instalação da régua linimétrica, bem como as curvas-chave e a seção transversal levantada para cada uma das seções.

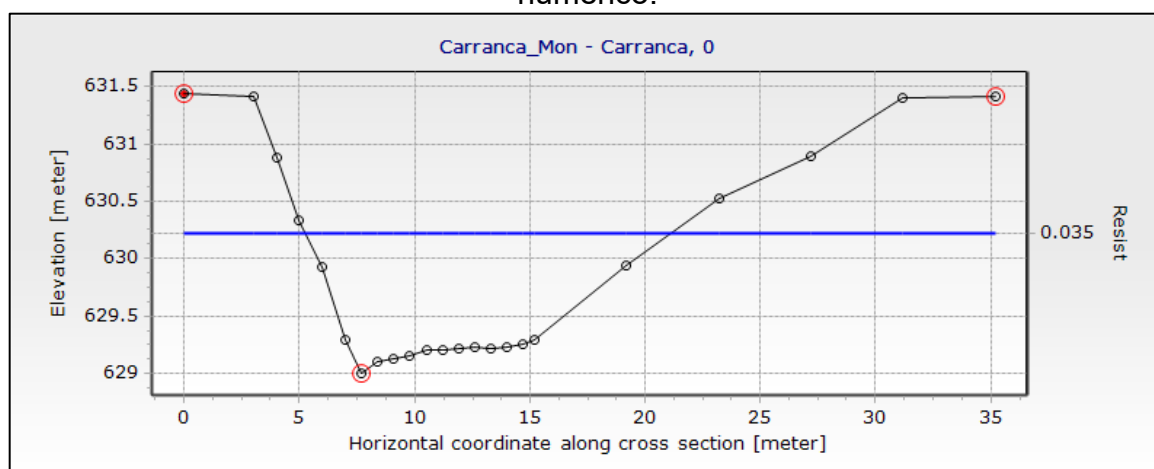
a. Córrego Carranca: Estação Carranca

Figura 55 – a. Vista de montante da estação Carranca no Ribeirão Carranca; e b. Vista de jusante da estação Carranca no Ribeirão Carranca.



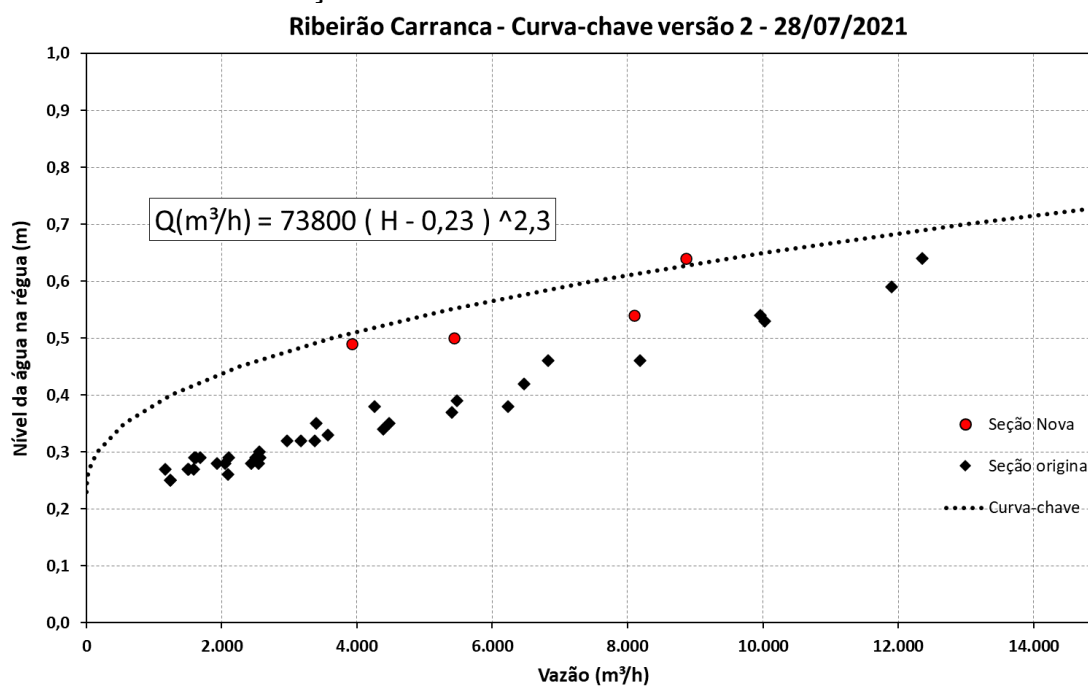
Fonte: Nexa.

Figura 56 – Seção Transversal da estação Carranca computada no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

Figura 57 – Curva chave da estação Carranca, considerada para o cálculo das condições de contorno no modelo numérico.



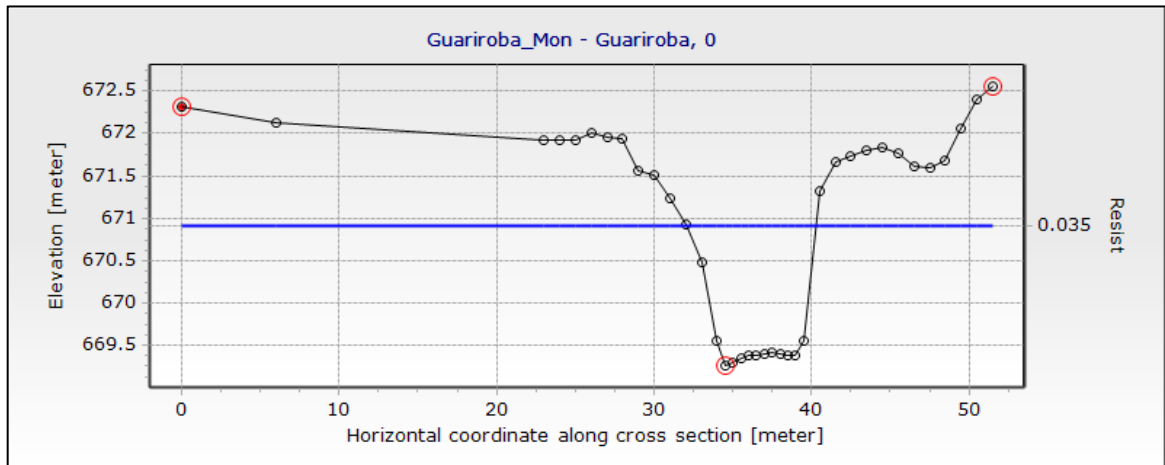
b. Córrego Guariroba: Estação Guariroba 2

Figura 58 – a. Vista de montante da estação Guariroba 2 no Córrego Guariroba.; e b. Vista de jusante da estação Guariroba 2 no Córrego Guariroba.



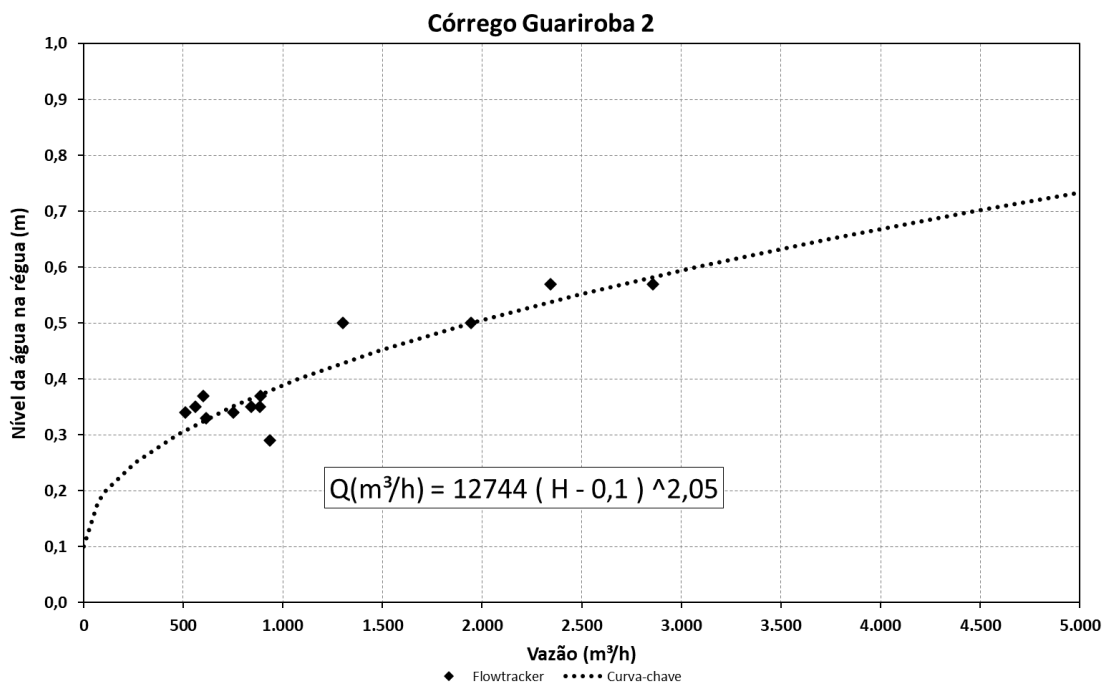
Fonte: Nexa.

Figura 59 – Seção Transversal da estação Guariroba 2 computada no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

Figura 60 – Curva chave da estação Guariroba 2, considerada para o cálculo das condições de contorno no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

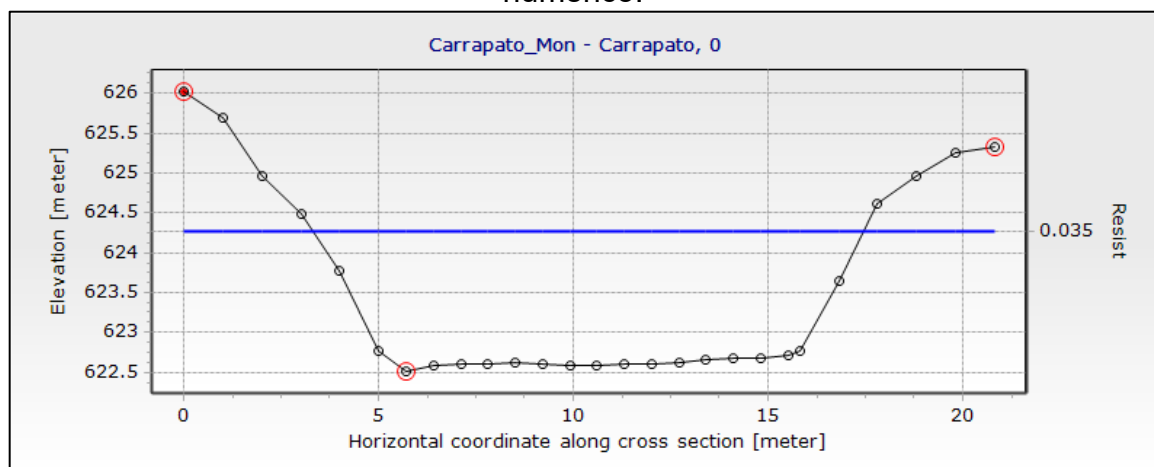
c. Ribeirão Carrapato: Estação Carrapato

Figura 61 – a. Vista de montante da estação Carrapato no Ribeirão Carrapato; e b. Vista de jusante da estação Carrapato no Ribeirão Carrapato.



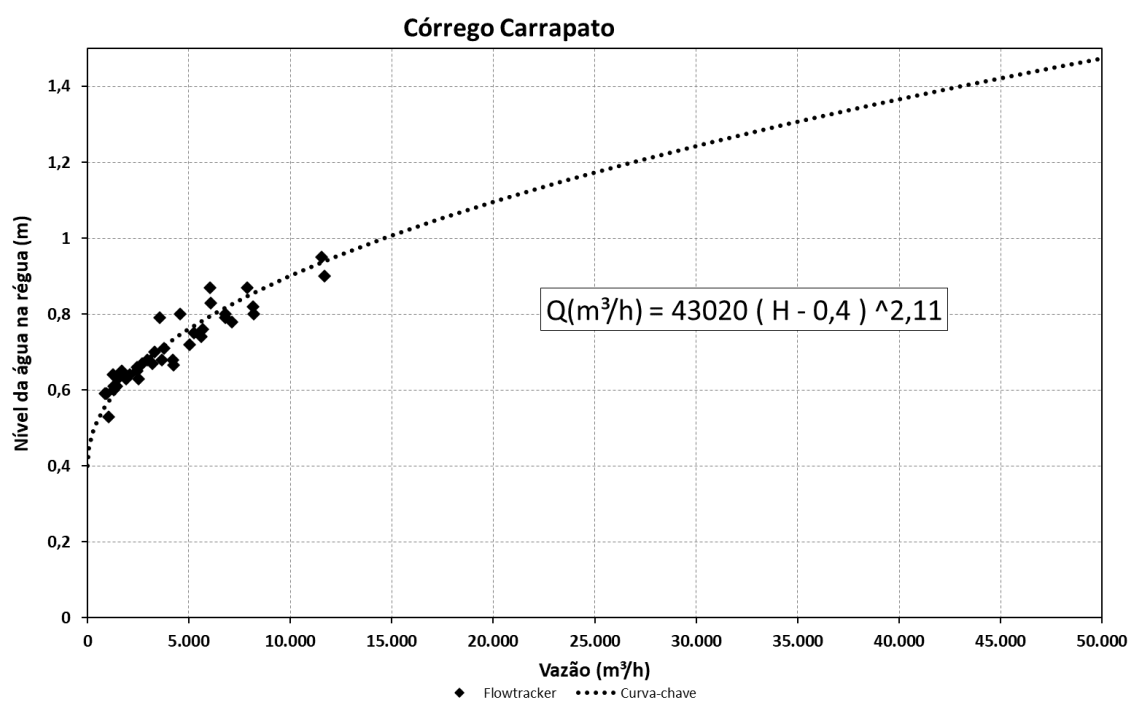
Fonte: Nexa.

Figura 62 – Seção Transversal da estação Carrapato computada no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

Figura 63 – Curva-chave da estação Carrapato, considerada para o cálculo das condições de contorno no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

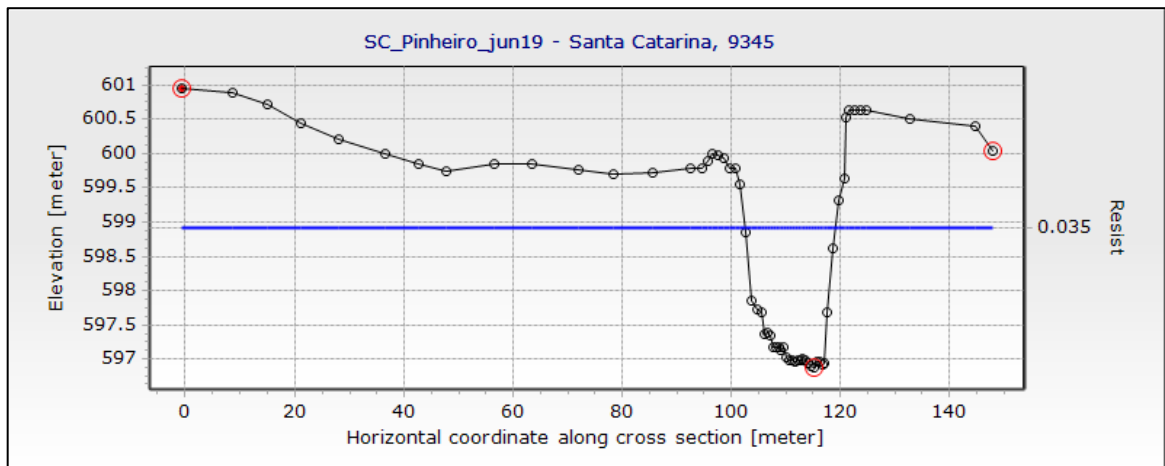
d. Rio Santa Catarina: Estação Pinheiro

Figura 64 – a. Vista de montante da Estação Pinheiro, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Estação Pinheiro, no rio Santa Catarina



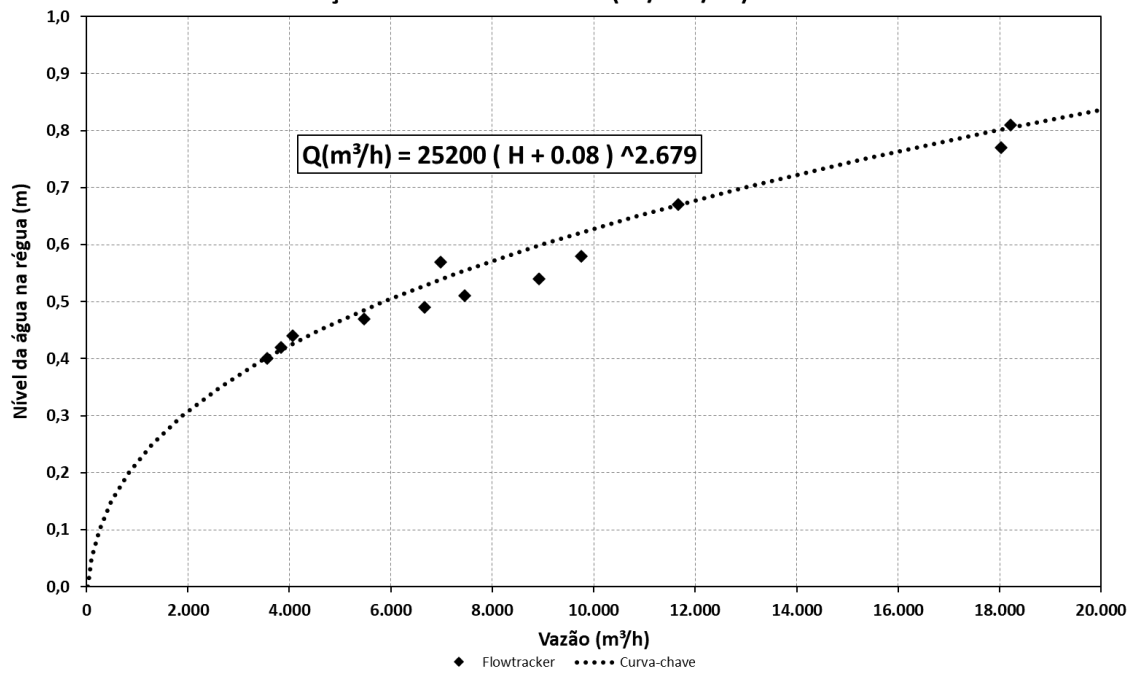
Fonte: Nexa.

Figura 65 – Seção Transversal da estação Pinheiro computada no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

Figura 66 – Curva-chave da estação Pinheiro.
Curva-chave estação Pinheiro - Versão 2 - (20/nov/20)



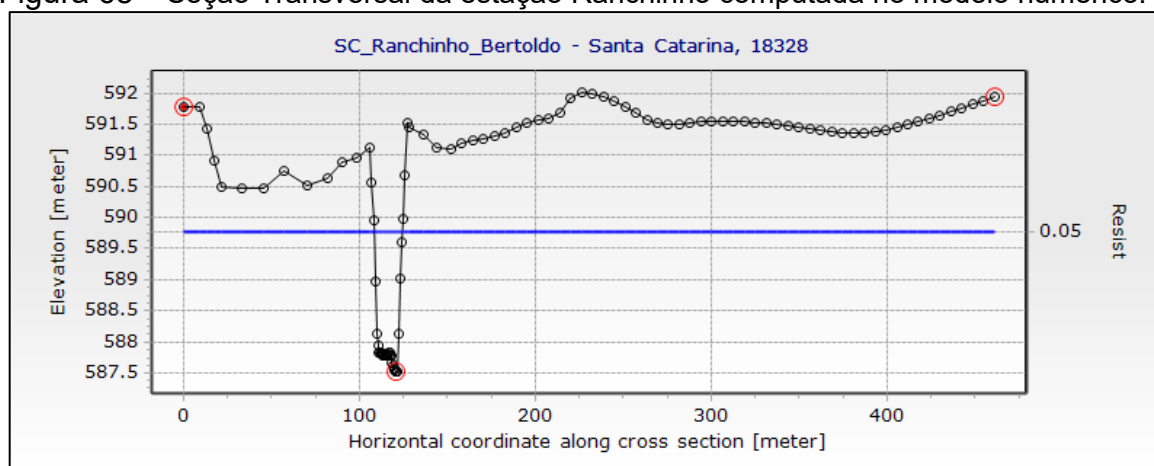
Fonte: Nexa.

e. Rio Santa Catarina: Estação Ranchinho

Figura 67 – a. Vista de montante da Estação Ranchinho, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Estação Ranchinho, no rio Santa Catarina

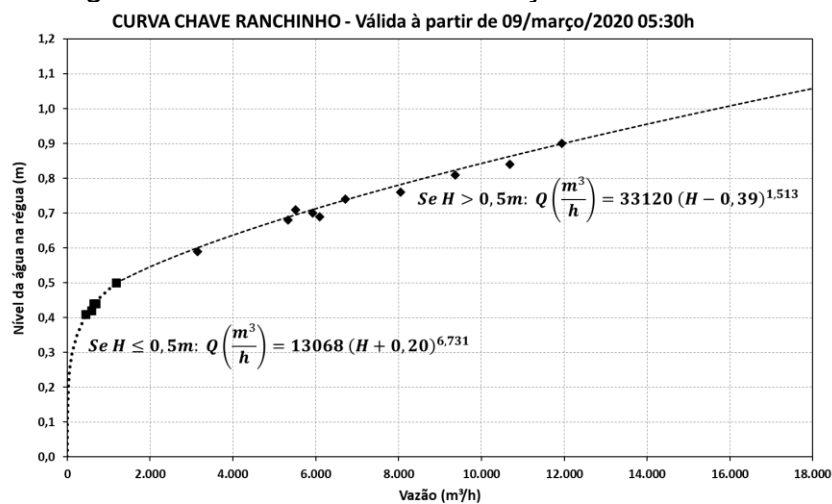


Figura 68 – Seção Transversal da estação Ranchinho computada no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

Figura 69 – Curva-chave da estação Ranchinho.



Fonte: Nexa.

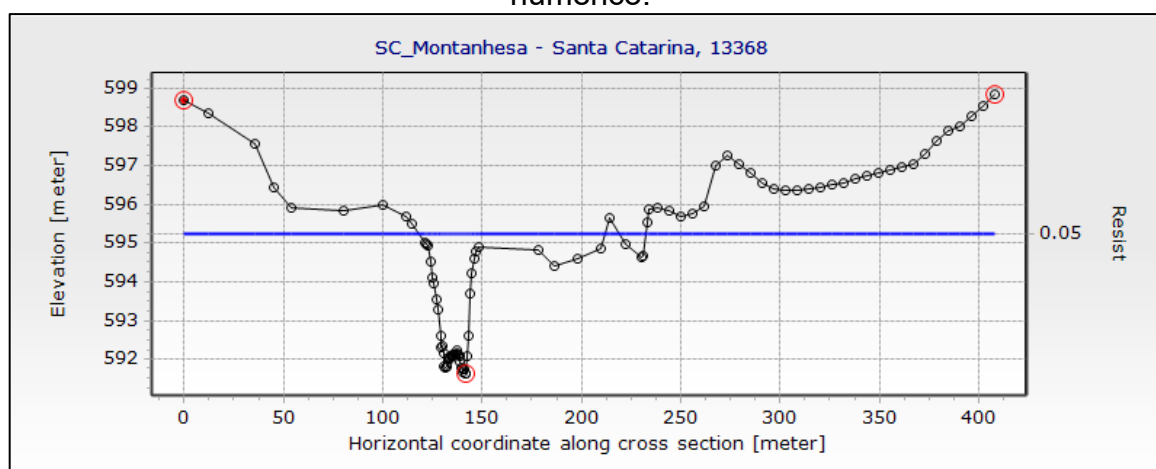
f. Rio Santa Catarina: Estação Montanhesea

Figura 70 – a. Vista de montante da Estação Montanhesea, no rio Santa Catarina; e
 b. Vista de jusante da Vista de jusante da Estação Montanhesea, no rio Santa
 Catarina



Fonte: Nexa.

Figura 71 – Seção Transversal da estação Montanhesea computada no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

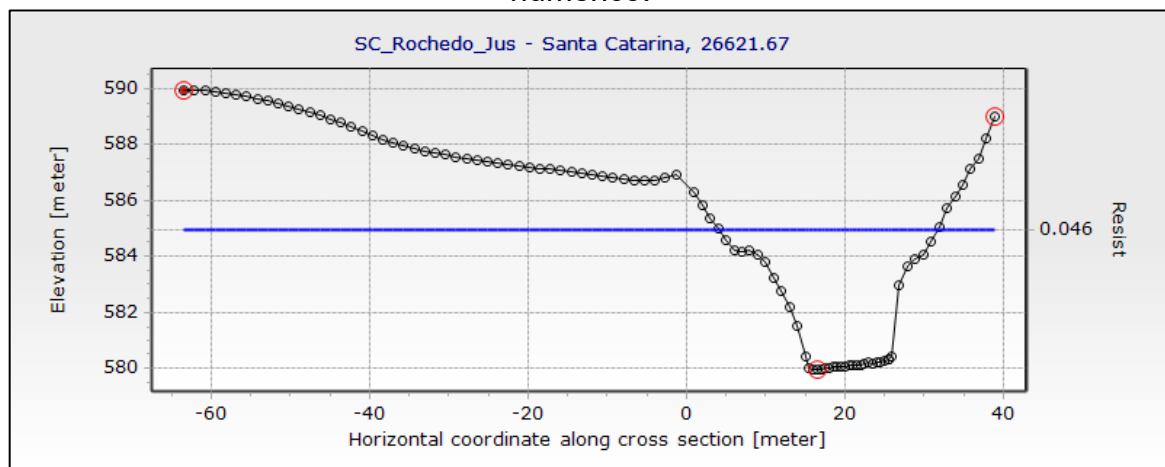
g. Rio Santa Catarina: Estação Rochedo

Figura 72 – a. Vista de montante da Estação Rochedo, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Estação Rochedo, no rio Santa Catarina



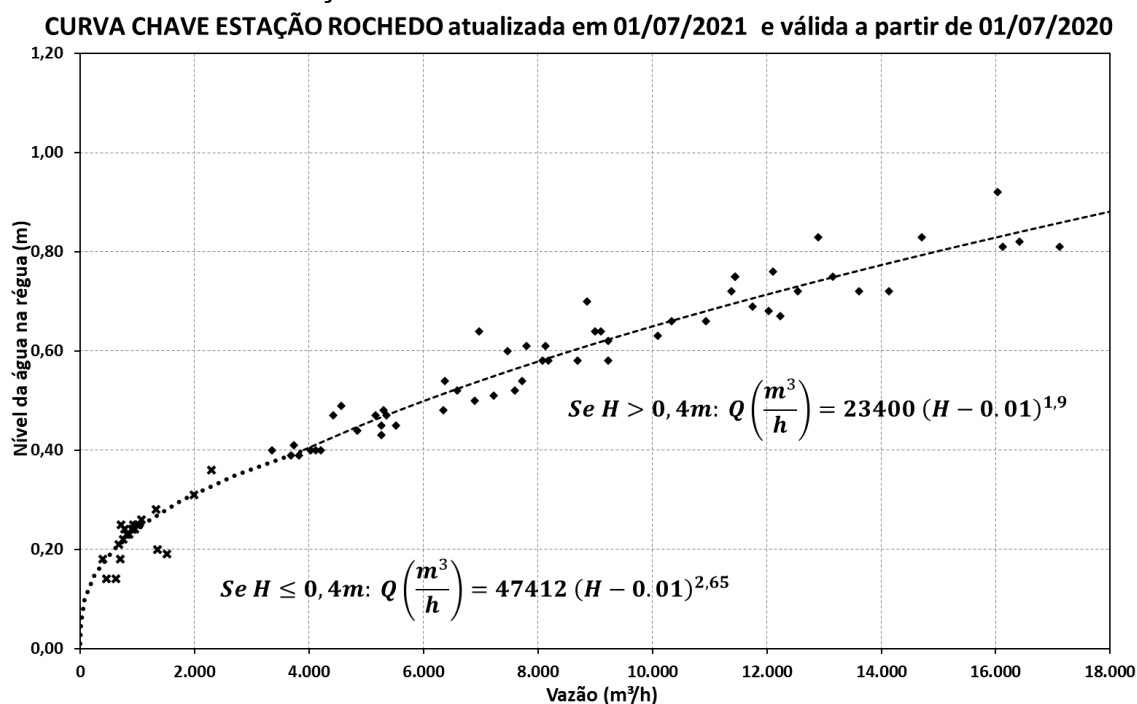
Fonte: Nexa.

Figura 73 – Seção Transversal da estação Rochedo computada no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

Figura 74 – Curva-chave da estação Rochedo, considerada para o cálculo das condições de contorno no modelo numérico.



Fonte: Nexa.

h. Rio Santa Catarina: Estação RPPN

A estação RPPN está a jusante do modelo.

Figura 75 – a. Vista de montante da Estação RPPN, no rio Santa Catarina; e b. Vista de jusante da Estação RPPN, no rio Santa Catarina



Fonte: Nexa.

APÊNDICE B – Descrição do Modelo Numérico de Águas Subterrâneas

O modelo numérico foi atualizado pela equipe da Nexa com o objetivo de avaliar os motivos do secamento do rio Santa Catarina e possíveis soluções de mitigação. A construção do modelo foi apresentada por (IPT, 2021) e é resumida a seguir.

A partir de um modelo conceitual, foram elaborados dois modelos transientes, um para o período seco entre maio de 2015 e setembro de 2015 e um para o período chuvoso, entre setembro de 2015 e abril de 2016. Cada modelo foi calibrado separadamente nos respectivos períodos.

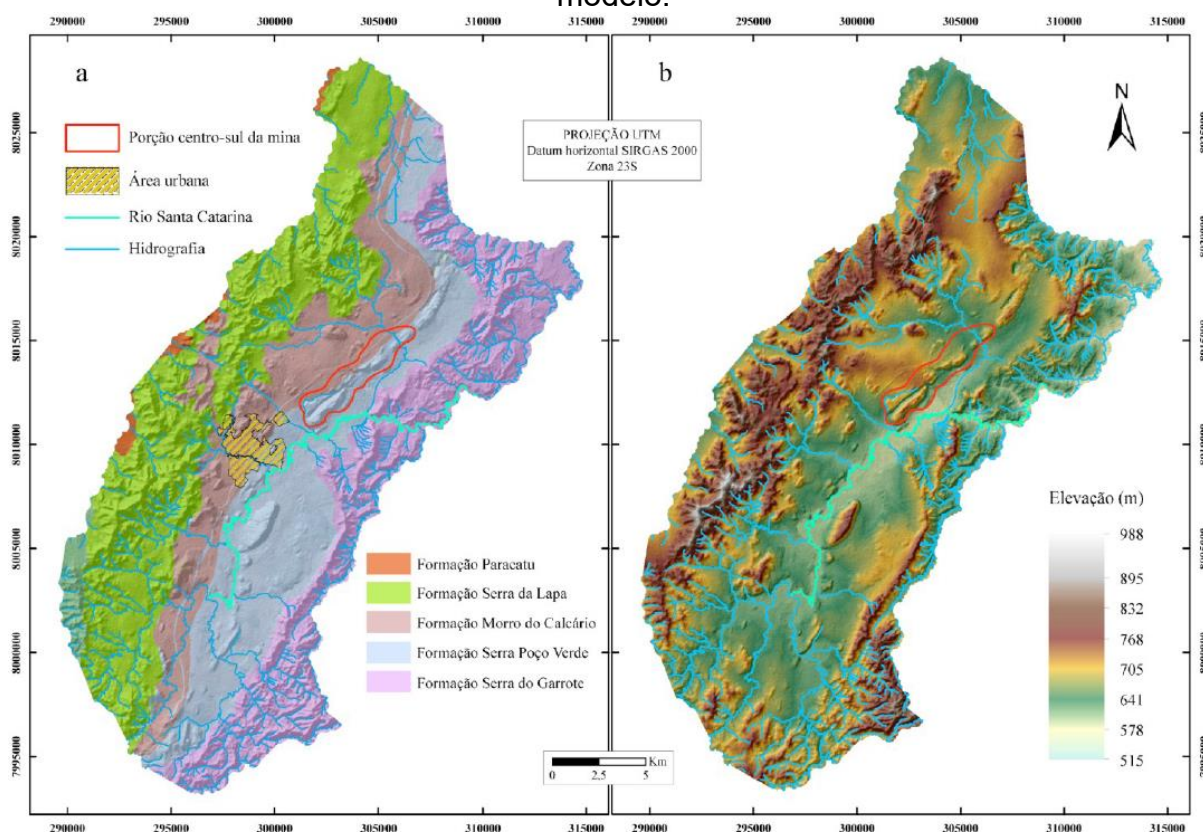
Na próxima etapa do projeto, os modelos serão validados para os períodos entre abril de 2016 e outubro de 2017 e para o período entre junho de 2019 e junho de 2020.

Domínio do modelo

O domínio do modelo possui 399 km², com os limites definidos por uma análise integrada da rede hidrográfica e do arcabouço geológico regional. As delimitações em planta foram baseadas nas drenagens que margeiam as formações Paracatu, Serra da Lapa e Serra do Garrote. As formações Morro do Calcário e Serra do Poço Verde, definidas como a bacia sedimentar dolomítica, representam a região de afloramento do aquífero.

A base topográfica do modelo foi elaborada por meio da integração dos seguintes dados: Modelo Digital de Elevação (MDE) do sensor Alos Palsar, com resolução espacial de 12,5m; dados das cotas altimétricas dos poços contidos no domínio do MDE; dados de elevação da área no entorno do rio Santa Catarina, obtidos por levantamento VANT a laser em fevereiro de 2018. A Figura 76 apresenta o Mapa Geológico e Hipsométrico correspondentes ao domínio do modelo.

Figura 76 – a. Mapa geológico do modelo; e b. Mapa hipsométrico do domínio do modelo.



Fonte: (IPT, 2021).

Modelo hidrogeológico conceitual

Nos limites a oeste e leste do modelo, a Formação Serra da Lapa e a Formação Serra do Garrote, respectivamente, configuram como divisores de águas. A oeste, nas altitudes entre 832 e 895m; e a Leste nas elevações entre 641m (porção NE) e 832m (porção SE).

O escoamento superficial ocorre entre esses altos topográficos, bem como de algumas porções da Formação Morro do Calcário, e recarregam os limites imediatos oeste e leste da bacia sedimentar dolomítica, com deságue no rio Santa Catarina, localizado na Formação Serra do Poço Verde (dolomito rosa, dolomito cinza e filito preto).

Portanto, atualmente, o sistema de fluxo subterrâneo na área modelada concentra-se dentro da bacia sedimentar dolomítica, com sentido preferencial em direção à mina, como apresenta a Figura 77. Esse fluxo ocorre nas camadas de cobertura colúvio-aluvionar, epicarste e entre fraturas e condutos cársticos no maciço

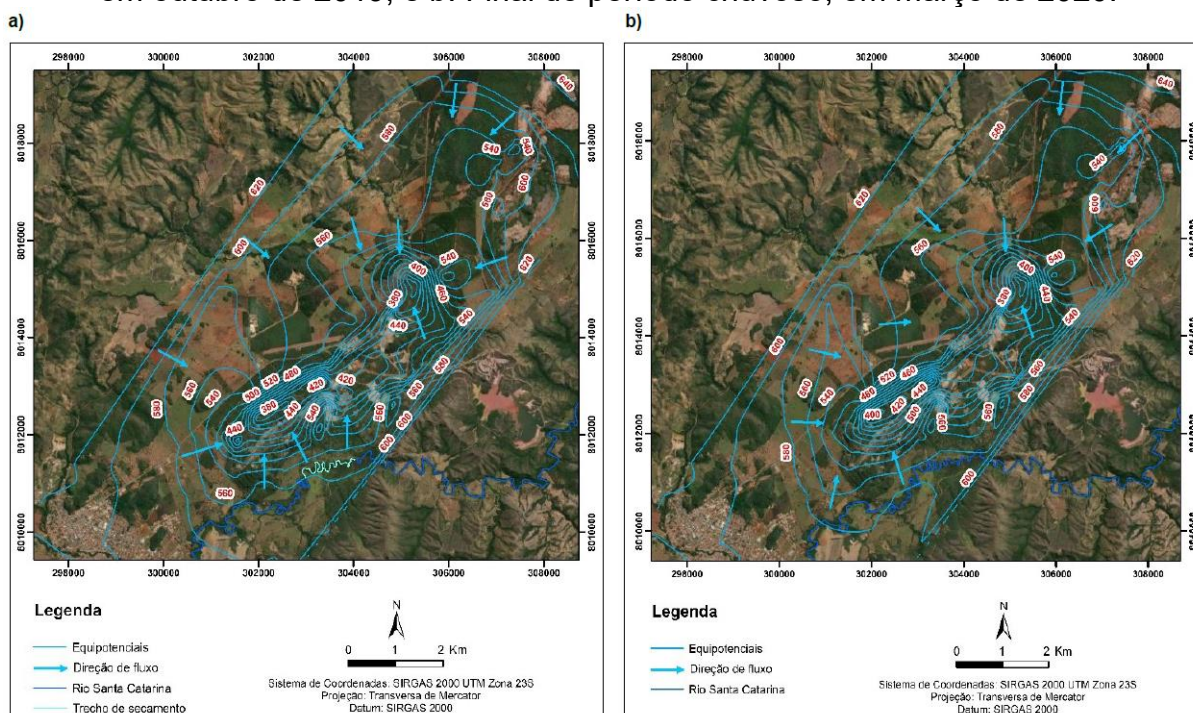
rochoso carbonático, com as seguintes características (BITTENCOURT et al. 2008; SOTERO, 2019, apud (IPT, 2021):

- i. Cobertura colúvio-aluvionar: configura um aquífero raso, de porosidade primária, com conexão direta com o rio Santa Catarina. Está sobreposto ao epicarste.
- ii. Epicarste: conforma o maciço cárstico alterado e, portanto, apresenta, além da porosidade primária, porosidade secundária formada por condutos cársticos, conectando hidráulicamente os sedimentos superficiais com o maciço rochoso.
- iii. Maciço dolomítico: o fluxo se dá, preferencialmente, por porosidade secundária formada por sistemas de fraturas e pela porosidade terciária caracterizada, formada por feições de dissolução desenvolvidas na forma de condutos cársticos que se formam preferencialmente ao longo dos principais sistemas de fraturas (NE-SW e NW-SE).

A infiltração da precipitação constitui o principal meio de recarga dos aquíferos. Os locais de bombeamento da mina e os corpos d'água superficiais que não são afetados pelo cone de rebaixamento configuram as áreas de descarga.

O rio Santa Catarina atualmente tem atuado como um rio influente e colaborado com a recarga do aquífero ao longo de todo o ano hidrogeológico. O rio seca em alguns trechos nos períodos de estiagem devido à baixa precipitação e ausência de alimentação por águas subterrâneas do aquífero, que se encontra rebaixado. É possível que haja uma desconexão do aquífero do rio, principalmente na época seca, mas tal observação deve ser comprovada pela instalação de piezômetros para monitoramento. E essa desconexão deve colaborar para o secamento do rio, uma vez que não há fluxo de base do aquífero para o rio (IPT, 2021).

Figura 77 – Mapas potenciométricos da área do modelo em a. Final do período seco, em outubro de 2019; e b. Final do período chuvoso, em março de 2020.

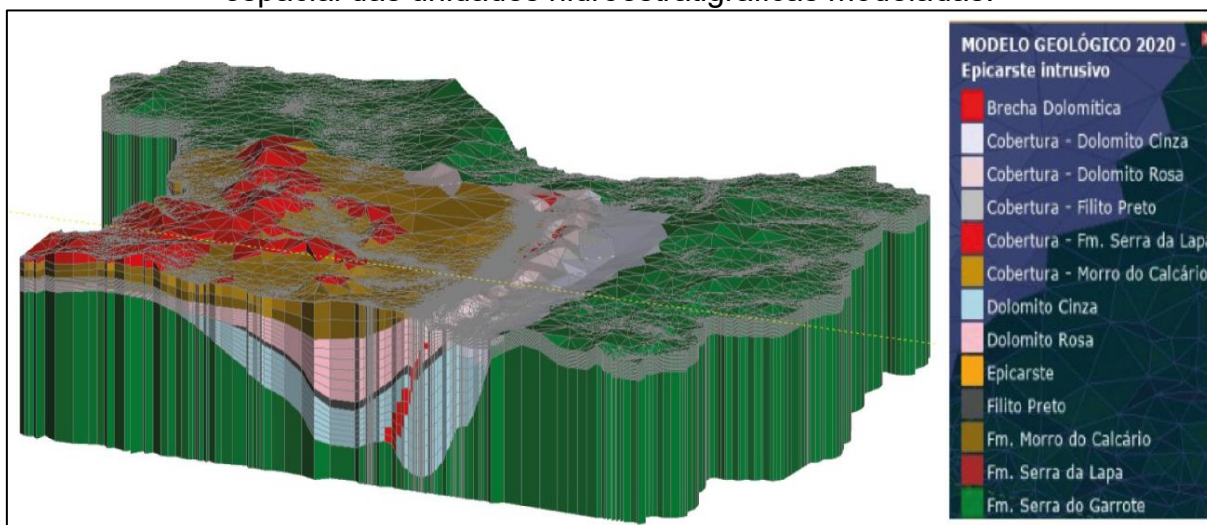


Fonte: (IPT, 2021).

Discretização da malha numérica

O modelo numérico possui uma largura de 25,2 km, altura de 35,3 km e profundidade de 1.437 m. Foi construído com 1.753.056 elementos de malha triangular, 935.883 nós e 19 camadas. A geometria e a distribuição espacial das unidades hidrogeológicas foi definida no *software* Leapfrog. A espessura mínima de cada camada foi fixada em 7 m para que o epicarste e as coberturas associadas a cada litotipo fossem devidamente representadas. A Figura 78 ilustra a malha numérica, bem como a distribuição das unidades hidrogeológicas no modelo.

Figura 78 – Representação da malha numérica do modelo, com a distribuição espacial das unidades hidroestratigráficas modeladas.



Fonte: (IPT, 2021).

Propriedades hidrogeológicas

As unidades hidrogeológicas brecha dolomítica, filito preto, dolomito rosa e dolomito cinza, bem como as formações Serra da Lapa, Morro do Calcário e Serra do Garrote foram inseridas no modelo sob condições hidráulicas isotrópicas, onde as condutividades hidráulicas horizontais se equivalem às verticais.

As condutividades hidráulicas verticais das unidades hidrogeológicas correspondentes às coberturas foram estimadas em uma ordem de grandeza abaixo em relação às condutividades hidráulicas horizontais, visto que estruturas sedimentares desenvolvidas em sedimentos inconsolidados ou em rochas sedimentares geram padrões longitudinais de imbricação de grãos, os quais favorecem o fluxo de águas subterrâneas na direção horizontal. A Tabela 13 apresentou os parâmetros hidrogeológicos de cada unidade hidrogeológica, considerados inicialmente no modelo.

Condições de contorno

As condições de contorno consideradas no modelo foram as seguintes:

- i. Mina: condição de contorno de 1º tipo (Dirichlet). Dessa forma, simulou-se o bombeamento na mina, mantendo o valor da carga hidráulica referente à cota do nível da respectiva galeria subterrânea.
- ii. Drenagens intermitentes e perenes e nos limites do modelo: condição de contorno de 3º tipo (Cauchy). Considerou-se o fluxo dependente da carga hidráulica no rio e a taxa de condutância do leito. Portanto, na solução do modelo, o fluxo nas drenagens irá variar de acordo com a variação do nível do rio.
- iii. Estruturas rúpteis: inseridas como feições discretas, com a condição associada a lei de Darcy. É utilizada quando o elemento se encontra totalmente preenchido por material poroso, para condições de fluxo laminar dentro da estrutura (DIERSCH, 2014 apud NINANYA, 2014).
- iv. Conduitos cársticos: inseridas como feições discretas, com a condição associada a lei de Manning-Strickler. É utilizada quando o elemento se encontra parcialmente preenchido por fluido e não apresenta qualquer tipo de material em seu interior (DIERSCH, 2014 apud NINANYA, 2014).
- v. Recarga: restrita ao topo do modelo, variável entre setembro de 2015 a abril de 2016. Os valores calibrados de recarga consideraram 26% da precipitação mensal. As regiões à margem da bacia sedimentar dolomítica, pertencentes às Formações Serra da Lapa e Serra do Garrote, consideradas como zonas de baixo potencial de recarga (aquíferos pobres devido à baixa permeabilidade) consideraram 2,6% de taxa de recarga.

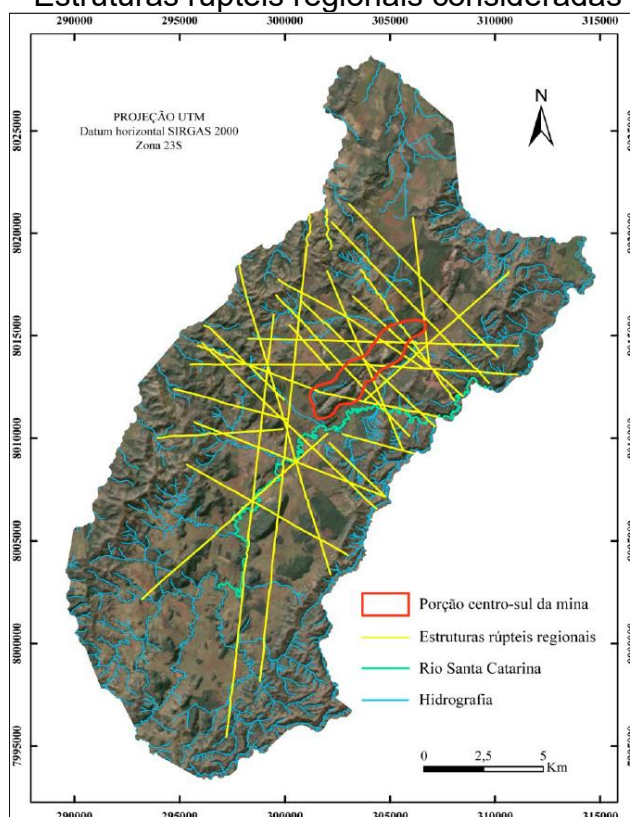
Feições discretas

As estruturas rúpteis regionais, apresentadas na Figura 79, foram inseridas no modelo como elementos discretos planares, bem como as estruturas rúpteis locais com médio e alto potencial hidrogeológico, apresentadas na Figura 80. Os conduitos cársticos conectantes foram considerados como feições discretas lineares, por meio da equação de Manning. Sua localização, no interior da mina, foi inferida por meio de ensaios com traçadores fluorescentes, quando foram observados conduitos cársticos com surgência de água proveniente do rio Santa Catarina. A localização das extremidades dos conduitos

localizados no rio Santa Catarina, foi baseada em observações de sumidouros ao longo do leito do rio.

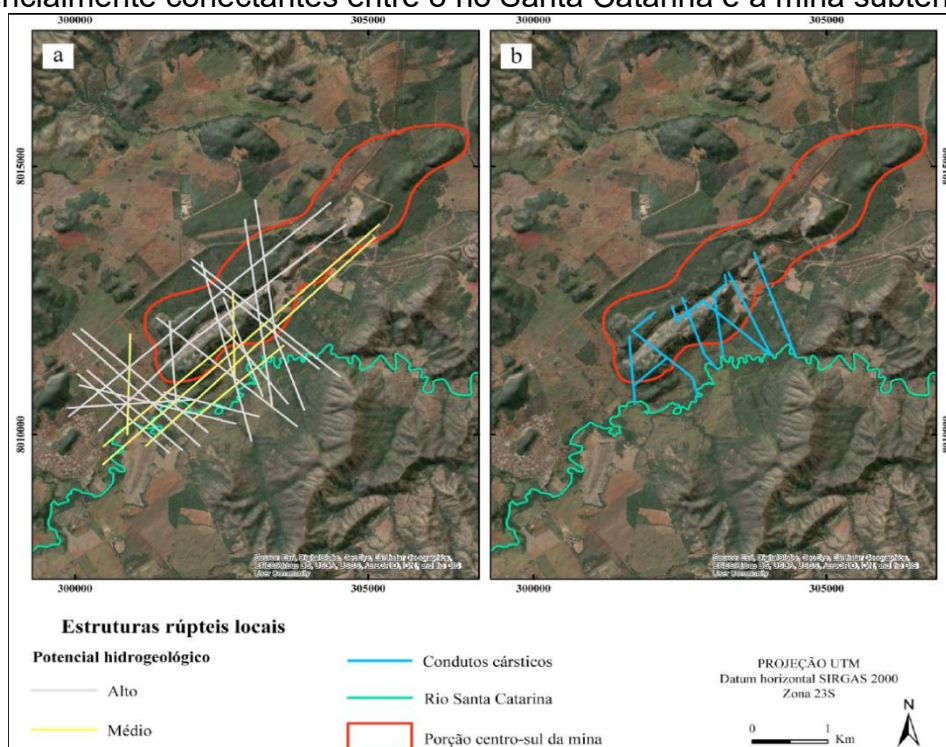
As continuidades subsuperficiais dos condutos, delimitados entre os sumidouros no rio e as surgências na mina, foram inferidas através dos planos que definem as estruturas rúpteis locais, que conectam hidráulicamente a região e exercem controle sobre o desenvolvimento das feições cársticas observadas. A Tabela 16 resume os parâmetros físicos considerados para as feições discretas no modelo.

Figura 79 – Estruturas rúpteis regionais consideradas no modelo.



Fonte: (IPT, 2021).

Figura 80 – Feições discretas locais consideradas no modelo: a) estruturas rúpteis locais de alto e médio potencial hidrogeológico; e b) condutos cársticos potencialmente conectantes entre o rio Santa Catarina e a mina subterrânea.



Fonte: (IPT, 2021).

Tabela 16 – Parâmetros físicos dos elementos discretos inseridos no modelo.

Parâmetros Físicos	Condutos	Estruturas rúpteis locais		Estruturas rúpteis regionais
		Médio potencial	Alto potencial	
Coefficiente de rugosidade M ($m^{1/3}/s$)	8	-	-	-
Área da seção transversal (m^2)	0,39	-	-	-
Abertura (m)	-	0,1	0,15	0,1
Condutividade hidráulica (m/dia)	-	864	864	864

Fonte: (IPT, 2021).

Condição inicial

O modelo transiente seco considerou as médias das cargas hidráulicas do mês de maio de 2015 e a vazão de bombeamento da mina no dia 15 de maio de 2015 como condições iniciais. O modelo transiente chuvoso considerou as médias das cargas hidráulicas do mês de setembro de 2015, bem como a vazão de bombeamento da mina para o dia 15 de setembro de 2015.

As cargas hidráulicas, que representam a potenciometria da mina nas condições iniciais, foram definidas pelas cotas das galerias subterrâneas.

Calibração

A calibração foi realizada no modelo transiente, para as médias mensais do período seco. Durante a calibração, os valores das condutividades hidráulicas horizontais e verticais, e os valores de armazenamento específico variaram dentro da mesma ordem de grandeza em relação aos dados de entrada em todas as unidades hidrogeológicas. A Tabela 17 apresenta os valores calibrados das propriedades hidrogeológicas consideradas no modelo.

O RMS normalizado foi calculado para verificação quantitativa da qualidade da calibração. Nos períodos seco e chuvoso, o RMS normalizado obtido foi de 9,89% e 7,53% respectivamente. Os erros obtidos estão abaixo do valor máximo de 10% e, portanto, a calibração foi considerada como bem-sucedida. A Figura 81 e Figura 82, apresentam a calibração no último mês do período seco (setembro de 2015) e do período chuvoso (abril de 2016), respectivamente.

Tabela 17 – Valores calibrados de condutividade hidráulica das unidades hidrogeológicas e armazenamento específico.

Unidade Hidrogeológica	Condutividade hidráulica (m/d)		Armazenamento específico (m ⁻¹)
	Kx, Ky	Kz	
Brecha Dolomítica	1,29E-02	1,29E-02	2,08E-05
Cobertura - Dolomito Cinza	2,50E+01	2,50E+00	1,85E-05
Cobertura - Dolomito Rosa	1,08E-01	1,08E-02	8,23E-06
Cobertura - Filito Preto	8,03E+00	8,03E-01	5,76E-05
Cobertura - Morro do Calcário	1,93E-01	1,93E-02	7,54E-05
Cobertura - Serra do Garrote	7,73E+00	7,73E-01	-
Dolomito Cinza	9,80E-03	9,80E-03	1,94E-05
Dolomito Rosa	1,08E-02	1,08E-02	9,14E-05
Epicarste	6,23E+00	6,23E+00	4,68E-05
Filito Preto	2,22E-02	2,22E-02	6,44E-05
Fm. Morro do Calcário	1,17E-01	1,17E-01	2,34E-05
Fm. Serra da Lapa	1,05E-01	1,05E-02	-
Fm. Serra do Garrote	4,94E-04	4,94E-04	-

Fonte: (IPT, 2021).

