



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**"JULIO DE MESQUITA FILHO"**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS**



Trabalho de Conclusão de Curso  
Curso de Graduação em Geologia

Análise de modelo tridimensional de aquífero fraturado na região de Amparo -SP

João Pedro Goldnadel Penteadó

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Bela. Bárbara Panegassi (coorientadora)

Rio Claro (SP)

2022  
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“Júlio de Mesquita Filho”  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

JOÃO PEDRO GOLDNADEL PENTEADO

Análise de modelo tridimensional de aquífero fraturado na região de Amparo -SP

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Geociências  
e Ciências Exatas – Câmpus de Rio  
Claro, da Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção  
do grau de Geólogo.

Rio Claro – SP

2022



## Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais que sempre me apoiaram e me incentivaram em todas as escolhas que fiz na minha vida, principalmente na escolha do curso de geologia na UNESP de Rio Claro.

Ao LEBAC e seus colaboradores, em especial ao Prof. Dr. Chang Hung Kiang, Dr. Elias H. Teramoto, Pedro Luiz Becaro Crioni e a Bárbara Panegassi, que sem eles este trabalho não seria possível de ser realizado.

Aos companheiros de República Gleise, Matheus Maestrello, Matheus Airon, Pedro Hippólito, Otávio Sanches e Gabriel Antunes, pelos momentos felizes e tristes que convivemos e vivemos juntos.

Aos moradores da República Taco, Rodrigo Marques, Gabriela Mendonça, Christopher Agabiti, Leonardo Rodrigues e Fernanda Giddings, pelas festas, churrascos e inúmeros momentos de alegria vividos.

Aos amigos da graduação Paulo Henrique Camargo Raymundo, Amanda Molina, Suelen Portughesi, Giulia Vincenzo, Nadine Chiosini, Caique Ildebrand pelos incontáveis almoços e jantares, pelas SEGESP's realizadas e trabalhos feitos durante a graduação.

E por último agradeço a UNESP, pelos ótimos anos vividos em Rio Claro.

## Resumo

O estado de São Paulo possui quase 25% de sua área situada no sistema aquífero cristalino (SAC) abrangendo mais de 60 mil km<sup>2</sup>, sendo esta uma importante fonte de recursos hídricos. Visando embasar a gestão deste recurso hídrico, a compreensão de como ocorre a circulação e o armazenamento da água no interior do aquífero fraturado é necessária. Deste modo, este trabalho tem como objetivo apresentar um modelo matemático baseado na análise hidroquímica, isotópica e de teste de bombeamento e a respectiva curva diagnóstica, com premissas de um modelo conceitual de um aquífero situado na cidade de Amparo - SP, em rochas gnáissico-migmatíticas.

Com a análise geoquímica de amostras de dois poços e de uma nascente situada na área de estudo, é possível inferir que o aquífero é recarregado com as águas superficiais devido à composição química similar. Pelas análises isotópicas obtidas, entende-se que a origem da água do poço 2 é ligeiramente diferente comparada com o poço 1. A partir do resultado obtido pela análise do teste de bombeamento, a solução que mais se adequou aos dados obtidos foi o de Dupla Porosidade, considerando blocos em formato de laje, proposto por Moench (1984). Este modelo se mostrou mais efetivo pois levou em conta o fator da pele do poço e das fraturas.

Palavras chaves: Teste de bombeamento, Sistema aquífero cristalino, Modelo conceitual, Análise de curva diagnóstica, FEFLOW.

## **Abstract**

The state of São Paulo has almost 25% of its area located in the crystalline aquifer system (SAC) covering more than 60 thousand km<sup>2</sup>, which is an important source of water resources, but generally presents low productivity in relation to porous aquifers. In order to support the management of this water resource, an understanding of how the circulation and storage of water occurs within the fractured aquifer is necessary. Thus, this work aims to present a conceptual model based on hydrochemical, isotopic and pumping test analysis and the respective diagnostic curve of an aquifer located in the city of Amparo - SP, in gneiss-migmatitic rocks.

With the geochemical analysis of the wells and a spring located in the study area, it is possible to infer that the aquifer is recharged with surface waters because their chemical compositions are similar. From the result obtained by the analysis of the pumping test, the solution that best suited the data obtained was the double porosity solution, proposed by Moench (1984). This model proved to be more effective by taking into account the skin effect of the well and fractures.

Keywords: Pumping test, Crystalline aquifer system, Conceptual model, Diagnostic curve analysis, FEFLOW

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Porção leste do estado de São Paulo com rochas do embasamento aflorante.....	2
Figura 2.1: Curvas diagnósticas comumente encontradas em hidrogeologia: a) aquífero confinado infinito e bidimensional (modelo de Theis); b) aquífero não-confinado ou dupla porosidade; c) condição de não-fluxo linear e infinita; d) condição de carga constante linear e infinita; e) aquífero com drenança; f) armazenamento do poço e efeito de pele; g) fratura vertical com condutividade infinita; h) fluxo radial genérico com dimensão inferior a 2; i) fluxo radial genérico com dimensão superior a 2; j) efeito combinado de armazenamento do poço e condição de carga constante linear e infinita.....	8
Figura 3.1 : Domínios tectônicos da província Mantiqueira Central, adaptado de Hackspacker et al, 2003.....	14
Figura 4.1: Localização das amostras coletadas.....	18
Figura 5.1: Testemunhos de sondagem do Poço 2.....	21
Figura 5.2: Perfil construtivo dos Poços 1 e 2 .....	22
Figura 5.3 : A. Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas e superficiais ; B. tabelas com parâmetros utilizados para confecção dos gráficos.....	24
Figura 5.4: Dispersão dos valores de $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ , indicando que as amostras analisadas batem com a linha meteórica. ....	26
Figura 5.5: Gráfico da vazão do teste de bombeamento do poço 1.....	27
Figura 5.6: Gráficos de rebaixamento do Poço 1 e Poço 2.....	28
FIGURA 5.7 – Ajustes com a solução de Moench (1984) slab-shaped block para aquíferos fraturados com dupla porosidade: P1 faz referência ao rebaixamento do poço bombeado; P2 faz referência ao rebaixamento do poço observado.....	30
Figura 5.8: Malha de elementos finitos, sendo observado o refinamento nas bordas norte, oeste e sul com condições de contorno do Tipo I.....	33
Figura 5.9: Mapa topográfico.....	34

Figura 5.10: Condições de contorno estabelecidas para o modelo.....	35
Figura 5.11: Cargas hidráulicas especificadas em cada slice.....	36
Figura 5.12: Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de bombeamento P1 e gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, simulado (linha azul) e observado (linha vermelha), do poço de monitoramento P2.....	38
Figura 5.13. Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento simulados do P1 (pontos) e modelo analítico ajustado (linhas).....	39
Figura 5.14. Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento simulados do P2 (pontos) e modelo analítico ajustado (linhas).....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Tabela dos padrões internacionais de razão isotópica.....	5
Tabela 4.1: Tabela dos métodos utilizados para amostragem geoquímica de cada elemento.....	17
Tabela 4.2 : Tabela com as características dos poços tubulares.....	19
Tabela 5.1: Tabela de classificação das águas analisadas.....	25
Tabela 5.2: Valores isotópicos obtidos das amostras.....	25
Tabela 5.3: Valores de condutividade hidráulica ajustados.....	37

## Lista de Abreviações

SAC – Sistema aquífero cristalino

P1 – Poço 1

P2 – Poço 2

K – Condutividade hidráulica

Ss – Armazenamento específico

Sw – Efeito de pele do poço

## Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	4
1.2 Justificativas.....	4
2.Fundamentação Teórica.....	5
2.1 Análise Isotópica .....	5
2.2 Análise Hidroquímica .....	6
2.3 Teste de bombeamento e análise da curva derivativa.....	6
2.4 Modelos conceituais .....	9
2.5 Modelo numérico.....	9
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	13
3.1. Geologia.....	13
3.2 Geologia Estrutural.....	14
3.3 Clima.....	15
3.4 Geomorfologia.....	16
3.5 Hidrogeologia.....	16
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
4.1 Análises químicas e isotópicas.....	17
4.2 Análise dos perfis construtivos .....	18
4.3 Teste de bombeamento e análise da curva diagnóstica .....	20
4.4 Elaboração do modelo conceitual .....	20

5. RESULTADOS.....	21
5.1 Perfil construtivo.....	21
5.2 Caracterização Hidroquímica.....	23
5.3 Composição Isotópica.....	25
5.4 Análise do teste de bombeamento.....	27
5.5 Análise da curva diagnóstica .....	29
5.6 Modelo Conceitual .....	31
5.7 Modelo Matemático.....	32
5.7.1 Domínio e discretização do modelo.....	32
5.7.2 Condições de contorno.....	34
5.7.3 Condições iniciais.....	35
5.8 Simulação em regime transiente.....	36
5.8.1 Parâmetros.....	36
5.8.2 Recarga .....	37
5.8.3 Calibração.....	37
5.8 Análise da curva diagnóstica dos dados simulados.....	39
6. CONCLUSÕES.....	41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	43

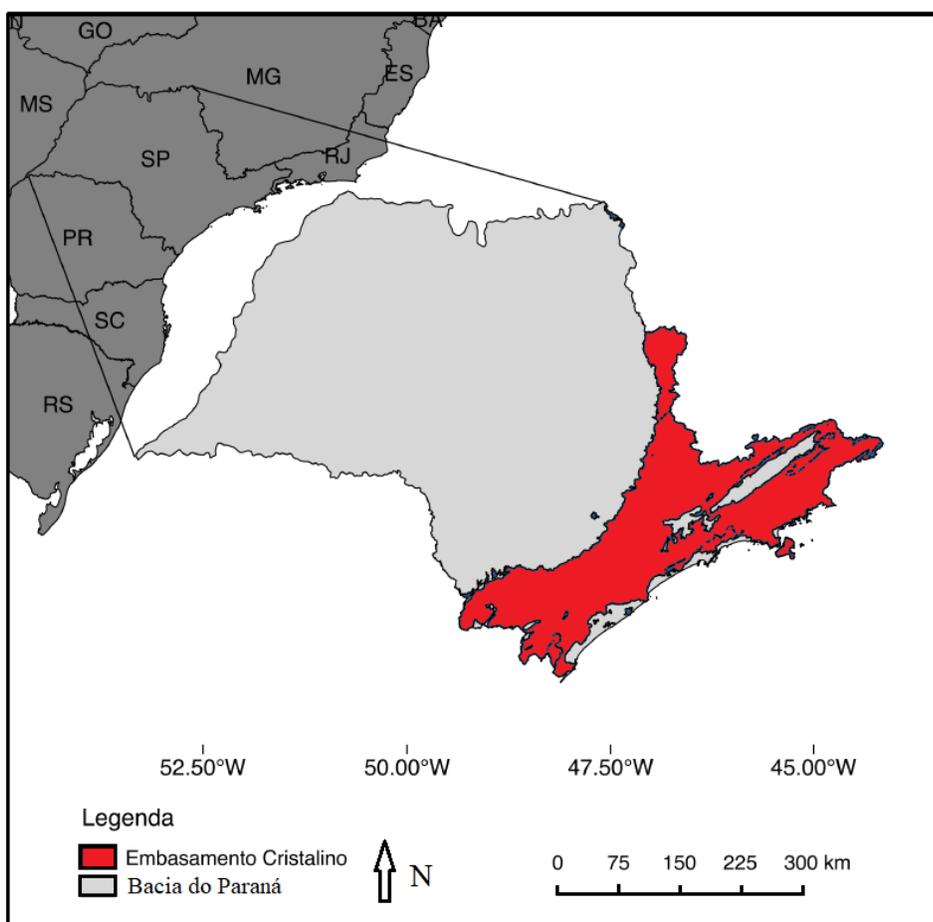


## 1.INTRODUÇÃO

A abundância de aquíferos fraturados e sua importância para a demanda crescente de água com uso final para o abastecimento e irrigação, está criando uma necessidade de entendimento dos processos que regem o armazenamento e o fluxo de água neste tipo de sistema (GUSTAFSON & KRÁSNÝ, 1994; AYRAUD *et al.*, 2008; JANAUT *et al.* 2012). A circulação e o armazenamento de água nas descontinuidades das rochas formadoras destes sistemas, apresenta uma alta complexidade, limitando assim a capacidade de prever a produtividade de tais aquíferos (BERKOWITZ, 2002).

No estado de São Paulo, a área onde rochas do embasamento cristalino afloram em quase 25% do seu território (Figura 1.1), abrange mais de 61.000 km<sup>2</sup> (DAEE/LEBAC, 2013) assim sendo, o Sistema de Aquífero Cristalino (SAC) é uma importante fonte de água para diversas finalidades, como o abastecimento público, uso industrial e para fins agrícolas.

Figura 1.1: Porção leste do estado de São Paulo com rochas do embasamento aflorante.



Fonte: Adaptado de NAVARRO (2018)

No SAC a leste do estado de São Paulo, há uma grande dificuldade de se obter grandes vazões que, aliado ao alto índice pluviométrico da região que favorece o uso de águas superficiais como principal fonte de recursos hídricos, faz a utilização do aquífero fraturado ainda muito baixa para o abastecimento público, segundo estudos do DAEE/LEBAC em 2013 estimaram que somente 34% dos municípios situados na região do embasamento cristalino utilizam água do SAC.

A prospecção de águas subterrâneas em terrenos cristalinos sempre foi intimamente relacionada a estruturas rúpteis e lineamentos observadas em fotografias aéreas, sensoriamento remoto em busca de vales retilíneos, zonas de cisalhamento e lineamentos em escala de afloramentos. Diversos autores confirmam que as principais

áreas responsáveis pela entrada de água estão nas porções rasas do aquífero, com o intuito de se atingir mais fraturas mais profundas que produzem grandes vazões, isso acarreta o aumento do custo significativamente das captações no SAC sem nenhuma garantia de sucesso.

Os aquíferos cristalinos são caracterizados pela complexidade envolvida no fluxo e armazenamento em descontinuidades geológicas, subsidiando a formulação de modelos conceituais empregando abordagens distintas, como a caracterização hidroquímica, é de extrema importância para a prospecção e uso adequado da água neste tipo de aquífero.

Os modelos conceituais são uma representação simplificada das condições naturais da circulação das águas, visando explicar de forma didática a dinâmica de fluidos em subsuperfície. Para a elaboração de um modelo conceitual, diversos critérios são considerados como as características do aquífero, clima, condições estruturais e tipos de solos. A dificuldade de se aplicar um modelo conceitual em um aquífero fraturado é a grande quantidade de variáveis que interferem na dinâmica do fluxo dentro do aquífero, tornando a simplificação de um modelo uma tarefa de grande complexidade.

Para a elaboração do modelo conceitual proposto para a área, foram utilizados os dados obtidos na análise isotópica, hidroquímica e do teste de bombeamento para criar as premissas que são utilizadas.

A utilização da modelagem numérica de fluxo tornou-se uma ferramenta importante nos últimos anos para gerenciamento de áreas onde possa ocorrer ou ocorreu a contaminação do solo, monitorando o fluxo dos contaminantes e também para a previsão dos efeitos do estresse hídrico na região. Esta necessidade da utilização da modelagem em áreas contaminadas se dá desde 2013, quando o artigo 36 do Decreto nº. 59.263/2013, ordena a sua utilização em uma área classificada como contaminada.

## 1.1 Objetivos

Com base em dados de análise hidroquímica, isotópica e na realização e interpretação de um teste de bombeamento, considerando sua análise de curva diagnóstica e a confecção de modelo numérico a partir do FEFLOW, compreender o comportamento do fluxo da água subterrânea em aquífero fraturado associados às rochas gnáissicas migmatíticas no município de Amparo e propor um modelo numérico para o sistema.

## 1.2 Justificativas

Os aquíferos cristalinos são caracterizados pela complexidade envolvida no fluxo e armazenamento em descontinuidades geológicas, subsidiando a formulação de modelos conceituais empregando abordagens distintas, como a caracterização hidroquímica, teste de bombeamento e análise da curva derivativa. Estas são ferramentas importantes para se fazer um melhor uso da água, aplicar uma remediação adequada quando necessário e um melhor gerenciamento dos recursos hídricos da região.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Análise Isotópica

Comumente em uma amostra, a quantidade relativa de um isótopo é a razão entre este isótopo e o de maior abundância do mesmo. Desse modo, o resultado é baseado na diferença relativa entre os valores das amostras observadas, gerando um erro analítico menor do que geralmente se tem de medidas absolutas (WERNER & BRAND 2001).

As razões isotópicas são normalmente representadas através da notação  $\delta$ , em valores de ‰ (per mil), através da fórmula:

$$\delta = [(R_{amostra} - R_{padr\tilde{a}o}) / R_{padr\tilde{a}o}] * 1000$$

O valores padrão estipulados para cada tipo de elemento varia, sendo cada um medido a partir de amostra reconhecida internacionalmente (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Tabela dos padrões internacionais de razão isotópica.

Razão isotópica	Padrão Internacional	Valor do Padrão
2H/1H ou D/H	Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)	0,00015575
13C/12C	Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)	0,0111802
15N/14N	Ar atmosférico (AIR)	0,0036782
18O/16O	Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW) ou Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB)	VSMOW = 0,0020052
34S/32S	Vienna Canyon Diablo Troilite (VCDT)	0,0451509

## 2.2 Análise Hidroquímica

A principal ferramenta para se classificar e caracterizar as águas subterrâneas são os padrões químicos gerados a partir das análises hidrogeoquímicas. Tais critérios são resultados diretos da interação fluido/rocha, gerando uma assinatura geoquímica única.

Feitosa *et al.* (2008), define que o produto da mineralização das águas subterrâneas é fruto das interações de fatores exógenos (elementos climáticos) e endógenos (litologia, tipos de fluxos, estruturas presentes na rocha e processos intempéricos). Gastmans *et al.* (2005) resume a composição química final das águas armazenadas em aquíferos como sendo a relação dos fatores climáticos com a mineralogia das rochas da área.

Por fatores antrópicos, muitas vezes as características hidroquímicas das águas podem ser afetadas, uma vez que o crescimento populacional demanda maiores quantidades de alimentos e recursos hídricos, a contaminação dos solos e consequentemente dos aquíferos se torna cada vez mais presente.

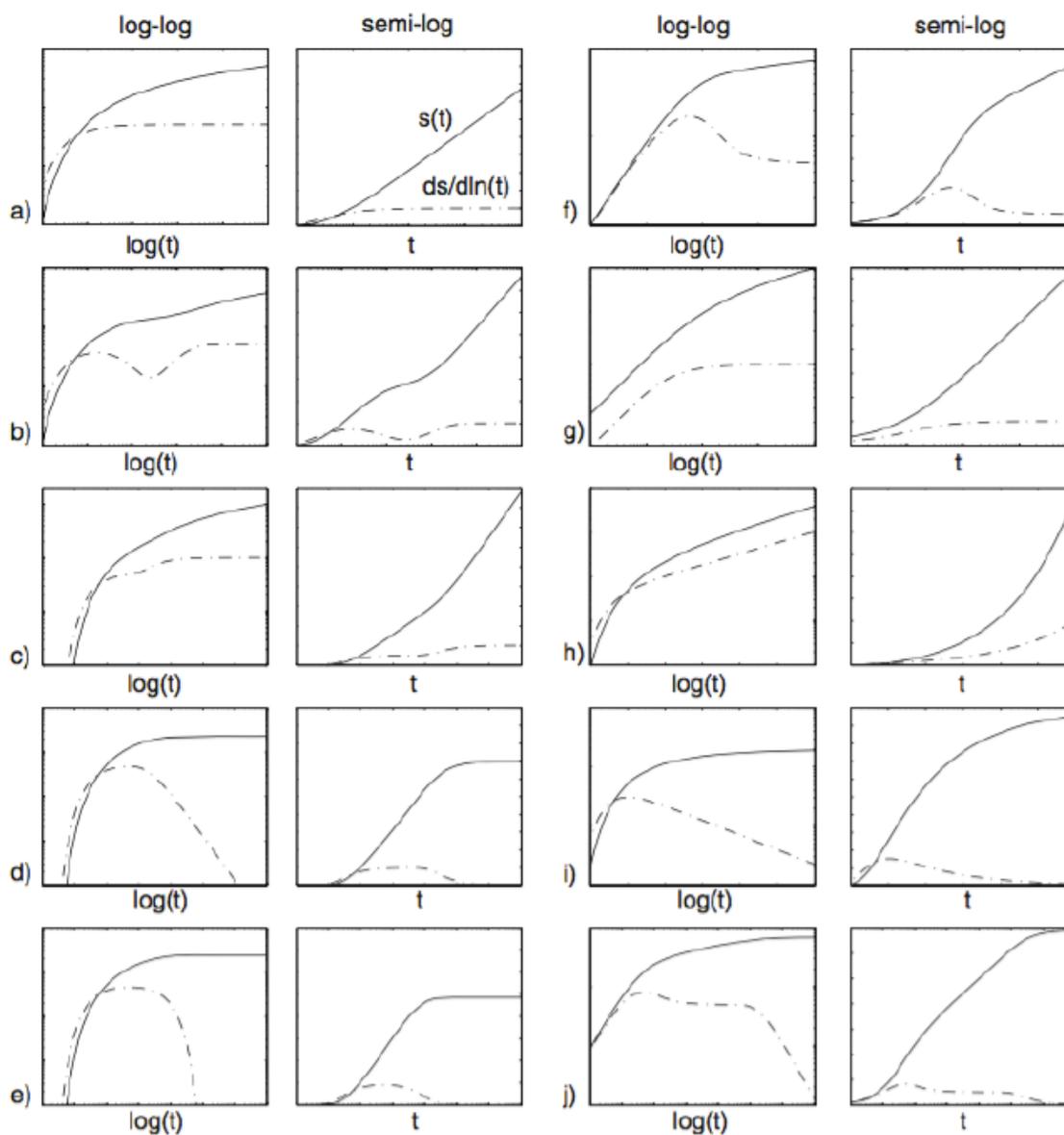
## 2.3 Teste de bombeamento e análise da curva derivativa

O teste de bombeamento é um dos métodos mais utilizados para medir as propriedades hidráulicas de um aquífero. Neste método, a água do poço é bombeada e se monitora os valores de rebaixamento e de vazão ao longo do tempo. Após a coleta dos dados, os valores obtidos são substituídos em um equação de fluxo apropriada para conseguir obter as características hidráulicas do aquífero estudado (KRUSEMAN & RIDDER, 1994). A maior vantagem da utilização dos teste de bombeamento, é a simplicidade em se comparar o gráfico obtido com as curvas diagnósticas típicas de cada modelo (Figura 2.2), buscando assim um modelo mais correto para a interpretação dos dados obtidos em campo.

Ao longo da duração do ensaio de bombeamento, o rebaixamento é influenciado por diferentes fatores como o armazenamento do poço, condições de contorno e pelo tipo de aquífero, tais fatores se destacam ao longo do tempo de duração do ensaio (KRUSEMAN & RIDDER, 1994). Nos momentos iniciais do ensaio, o principal fator que se sobressai é o armazenamento do poço, enquanto no meio do teste as características que surgem são do aquífero e na porção final se ressalta as condições de contorno (BOURDET, 2002).

Dentre todos os métodos utilizados para se interpretar os dados do teste de bombeamento, o que mais se destacou foi a análise derivativa. Neste método se analisa a relação entre a curva de rebaixamento e a relação com sua derivada logarítmica, ambas em função do tempo (BOURDET, 2002; RENARD *et al.*, 2008).

Figura 2.2: Curvas diagnósticas comumente encontradas em hidrogeologia: a) aquífero confinado infinito e bidimensional (modelo de Theis); b) aquífero não-confinado ou dupla porosidade; c) condição de não-fluxo linear e infinita; d) condição de carga constante linear e infinita; e) aquífero com drenança; f) armazenamento do poço e efeito de pele; g) fratura vertical com condutividade infinita; h) fluxo radial genérico com dimensão inferior a 2; i) fluxo radial genérico com dimensão superior a 2; j) efeito combinado de armazenamento do poço e condição de carga constante linear e infinita. Adaptado de Renard *et al.* (2008)



## 2.4 MODELO CONCEITUAL

A zona intensamente fraturada presente no modelo conceitual deste trabalho pode apresentar diversas explicações. Bense *et al* (2013), classifica esta porção fraturada como sendo fruto de esforços tectônicos em zonas de falhas transcorrentes (modelo sustentado pela geologia local, pelo Grupo Amparo estar situado no Sistema de Naples Sudeste do Brasil (CAMPOS NETO & CABY, 1999)). Outra hipótese para a existência deste nível intensamente fraturado é fruto dos processos intempéricos que alteram a biotita presente nas rochas gnáissicas em vermiculita (LACHASSAGNE *et al.* 2011). Este processo intempérico produz um aumento de volume de até 40 % na rocha, criando uma zona de estresse que acaba fraturando a rocha.

O modelo assumido para se criar o conceitual, foi com os parâmetros contínuos, estimando um valor constante para a permeabilidade, porosidade, e carga hidráulica. Assumindo que estes valores não variam, se cria um modelo de fluxo simplificado para se explicar o fluxo em meios fraturados

Com o passar do tempo, diversas propostas de modelos conceituais para aquífero fraturado foram criadas, sendo ela a de dupla porosidade, confinado com drenança, fratura vertical, entre outros.

## 2.5 MODELOS EM HIDROGEOLOGIA

Um modelo é uma ferramenta utilizada para representar de forma simplificada a realidade (WANG & ANDERSON, 1982). Em hidrogeologia existem dois principais grupos de modelos que são utilizados (ANDERSON *et al.*, 2015; FETTER, 2001; KRESIC, 2007), o primeiro são os modelos físicos (1) e o segundo são os modelos matemáticos (2).

Os modelos matemáticos se resumem em um conjunto de equações diferenciais que traduzem os fenômenos físicos, se subdividindo em dois, os modelos numéricos e os modelos analíticos.

A utilização dos modelos analíticos é de certa forma restrita, pois para

funcionarem necessitam de um meio isotrópico e homogêneo, situação dificilmente encontrada no ambiente hidrogeológico.

Já os modelos matemáticos numéricos apresentam a capacidade de solução de problemas em ambientes complexos, heterogêneos e anisotrópicos (WANG & ANDERSON, 1982). Como os modelos numéricos se mostraram de grande valor para a solução de diversos tipos de problemas, do mais simples ao mais complexo, com condições de contorno complexas, resolução de problemas em até três dimensões, este método se tornou o mais utilizado em hidrogeologia atualmente (ANDERSON *et al.*, 2015; SPITZ & MORENO, 1996).

Para a solução das equações de transporte e fluxo, é utilizada a combinação da linguagem matemática, método pelo qual os sistemas hidrogeológicos são descritos, com um código numérico computacional, que processa os dados inseridos por meio de um programa (ANDERSON *et al.*, 2015; SPITZ & MORENO, 1996).

Um modelo matemático de fluxo de água subterrânea é constituído de 3 elementos principais: (1) equação governante, a qual quantifica o fluxo dentro do sistema, (2) condições de contorno, que classificam o fluxo ao longo de todos os seus limites, (3) condições iniciais, dados de uma variável que precisa ser especificadas no começo da simulação (ANDERSON *et al.*, 2015).

A equação governante (1) é a união da lei de Darcy, a qual afirma que a água subterrânea flui de um ponto de maior energia para um ponto de menor energia potencial e o princípio de conservação das massas, que afirma que nenhuma água é criada ou destruída (ANDERSON *et al.*, 2015).

As condições de contorno são divididas em três tipos e são responsáveis por guiar a convergência de um modelo para uma solução (ANDERSON *et al.*, 2015):

Tipo I - Conhecida como condição de contorno de carga hidráulica especificada ou condição de Dirichlet. Este tipo é usado quando se conhece os valores da carga hidráulica, podendo ser utilizada para o cálculo de pontos ao redor. Porém os valores das cargas hidráulicas podem não serem fixos, variando em função do tempo e espaço.

Esta condição ocorre quando existem drenagens conectadas diretamente ao aquífero, presumindo que a nível de água do aquífero é igual ao nível superficial (SPITZ & MORENO, 1996).

Tipo II - Condição de contorno de fluxo especificado ou condição de Neumann é quando o fluxo ao longo de um limite é conhecido, podendo ser nulo ou não, sendo possível determinar seu valor com relação ao gradiente hidráulico. Caso o fluxo ao longo de um limite seja nulo, este é chamado de não-fluxo, caracterizando uma condição especial (SPITZ & MORENO, 1996).

Tipo III - Condição de contorno dependente de carga ou condição de Cauchy é quando se utiliza a lei de Darcy e o gradiente hidráulico, entre um ponto inserido no contorno e um ponto fora, para calcular o fluxo através do contorno.

As condições iniciais são importantes quando se está em um regime transiente, nos quais os valores calculados dependem dos valores de tempos anteriores, assim sendo necessário especificar os dados iniciais.

Após a confecção inicial do modelo, uma etapa importante para a modelagem é a calibração, no que se consiste ajustar os valores obtidos nas simulações até estes corresponderem com os dados observados em campo, para se ter uma precisão aceitável no modelo (WANG & ANDERSON, 1982).

- Preparação. Nesta etapa ocorre a coleta dos dados que serão utilizados para a criação do modelo numérico. Este processo é de suma importância, pois a qualidade da simulação está relacionada diretamente com a qualidade dos dados amostrados.

Spitz & Moreno (1996), fizeram uma relação dos dados mais importantes para serem utilizados na modelagem, sendo eles: mapa geológico, topográfico, hidrológico, características do aquífero, como a condutividade e porosidade.

- Calibração. Neste momento é feito a comparação dos valores observados em campo com os valores simulados, fazendo as alterações necessárias no modelo até que a diferença entre os parâmetros entre em uma faixa de tolerância adequada. (SPITZ & MORENO, 1996).

- Aplicação. Quando o modelo é aplicado, este deve cumprir com o seu propósito, visando resultados que são apresentados por meio de relatórios, podendo sofrer revisões e atualizações no modelo final.

## 2.5. Método de elementos finitos

Dentre os métodos mais utilizados na modelagem hidrogeológica, estão os métodos numéricos dos elementos finitos e das diferenças finitas. Para a solução da equação diferencial que governa o fluxo no aquífero, a equação exata é substituída por uma solução aproximada, utilizando a técnica de Galerkin, que utiliza o princípio de resíduos ponderados (WANG & ANDERSON, 1982).

Os elementos utilizados com mais frequência neste método, são os triangulares, utilizando três nós, posicionados em cada vértice do triângulo, obtendo o valor da carga hidráulica no interior dos elementos utilizando equações para interpolar os valores em cada um dos nós.(WANG & ANDERSON,1982).

A vantagem de se utilizar os elementos finitos ao invés das diferenças finitas está no fato dos elementos finitos se mostrarem utilizar formas geométricas irregulares, que facilita a representação de contornos, meios heterogêneos e anisotrópicos de maneira muito mais real (ANDERSON et al., 2015).

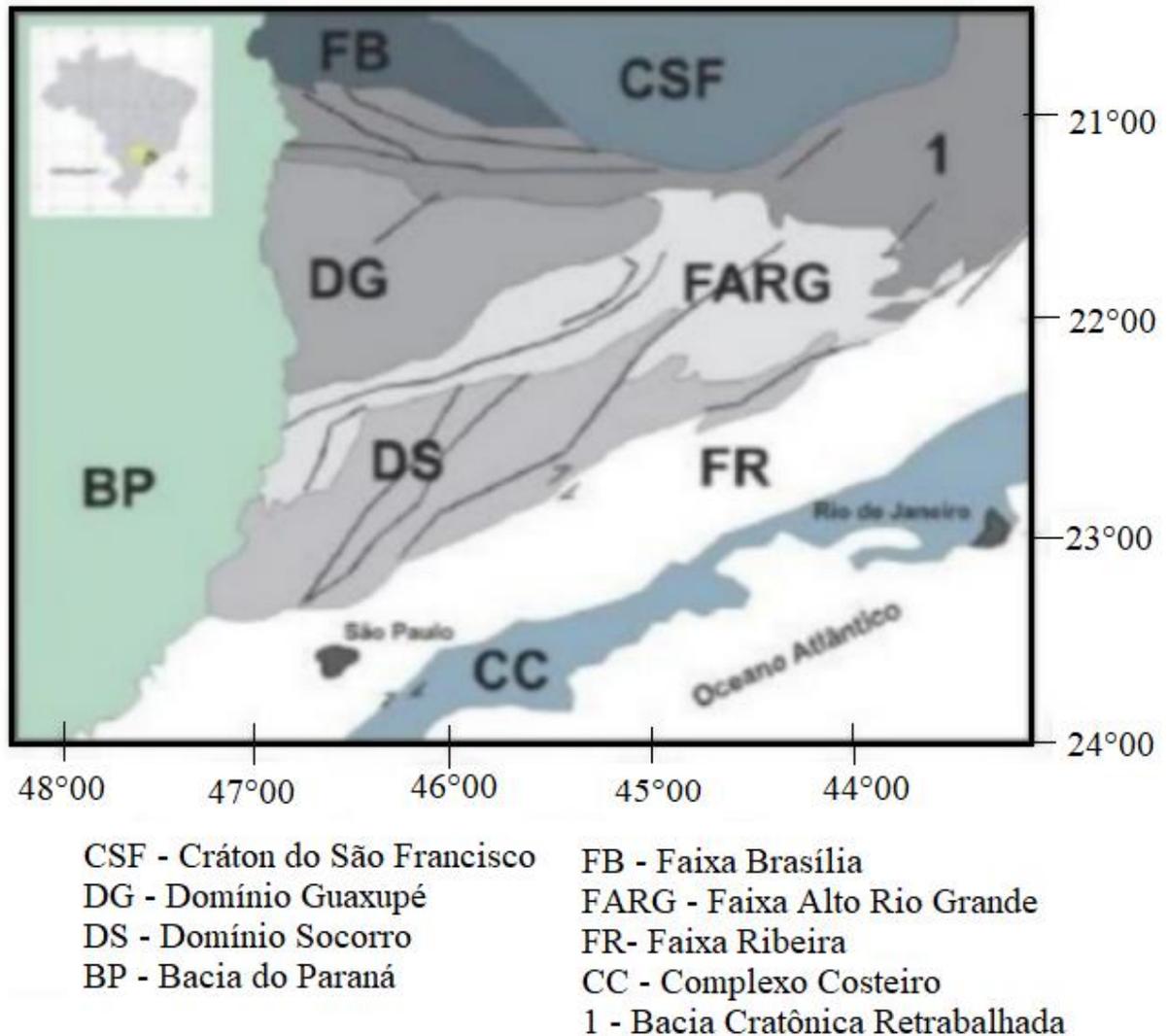
### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Geologia

A área de estudo encontra-se na porção central da Província Mantiqueira (ALMEIDA *et al.*, 1981), que constitui parte dos sistemas orogênicos situados a sul do Cráton São Francisco, cujo a evolução iniciou-se no Arqueano até a aglutinação do Gondwana Ocidental, no ciclo Brasileiro. A geologia é marcada por sucessivas colagens e interações de placas tectônicas que formam complexas faixas móveis acrecionárias, colisionais ou transpressionais, reativadas sucessivamente (ALMEIDA *et al.*, 1981).

A Província Mantiqueira foi subdivida, por diversos autores (CAVALCANTE *et al.*, 1979; CAMPO NETO *et al.*, 1990; EBERT *et al.*, 1997), em domínios ou unidades geológicas (Figura 3.1), já a parte mais central foi subdividida nos domínios Faixa Alto Rio Grande, Socorro, São Roque, Embu, as duas últimas associadas a Faixa Ribeira (MORAIS *et al.*, 1999).

Figura 3.1 : Domínios tectônicos da província Mantiqueira Central, adaptado de Hackspacker *et al.*, 2003.



### 3.2 Geologia Estrutural

Na região ocorrem associações entre as rochas do Complexo Amparo (embasamento) com as rochas do Complexo Itapira (sequência metavulcanossedimentar). O reconhecimento estratigráfico entre os dois complexos torna-se difícil, pois ambos encontram-se sobre metamorfismo de médio a alto grau. Trabalhos geocronológicos (WERNICK *et al.*, WERNICK, 1978, ARTUR, 1980, TASSINARI & CAMPOS E NETO, 1988, TASSIANRI *et al.*, 2001, FETTER *et al.*, 2001)

mostram que as rochas possuem idades que variam do Arqueano ao Neoproterozóico. Já em relação à geotectônica, a região está contida na faixa Alto Rio Grande (HASUI & OLIVEIRA, 1984) e da Nappe Socorro-Guaxupé (CAMPOS NETO *et al.*, 1984; CAMPOS NETO, 1985).

As rochas ortoderivadas do embasamento como gnaisses e migmatitos de composição tonalítica a monzogranítica e o granitóides sin- a tardi-tectônicos, foram definidos como Geossinclíneo Laurenciano (Complexo Amparo) que afloram em grande quantidade na área de estudo, já as metassedimentares e metavulcanossedimentares com granitóides associados foram definidas como Geossinclíneo Assíntico (Grupo Itapira) (EBERT 1968, 1971).

O Complexo Amparo e Grupo Itapira foram incluídos por Vasconcellos (1988), Campos Neto *et al.* (1990), Peloggia (1990) e Campos Neto (1991) na Faixa Alto Rio Grande, unidade definida por Hasui & Oliveira (1984) como faixa marginal ao Cráton do São Francisco. Baseados em dados tectono-estratigráficos e geocronológicos, mais recentemente, alguns autores colocam a região no Sistema de Naples Sudeste do Brasil (CAMPOS NETO & CABY, 1999), no Cinturão Brasília (TROUW *et al.*, 2000), ou no Sistema Orogênico Tocantins (CAMPOS NETO, 2000).

### 3.3 Clima

O clima na região de Amparo é subtropical de altitude, sendo classificado como Cwa pelo classificação de Köppen, com estações bem definidas, sendo a estação chuvosa entres os meses de outubro a abril e a seca de maio a setembro, com temperaturas médias de 18° a 22°C (BARISON, 1995).

A pluviosidade média dos últimos anos ficou entre 1065 mm/ano a 1173 mm/ano, tais dados foram obtidos pela União Nacional de Bioenergia até o ano de 2020.

Por apresentar uma alta pluviosidade anual, a região apresenta uma zona de alta decomposição das rochas cristalinas, gerando mantos de alteração de grande espessura (TORRES *et al.*, 2012).

### 3.4 Geomorfologia

A região de amparo está inserida na província geomorfológica do Planalto Atlântico (ROZZ & MOROZ, 1997), com predominância do relevo com morros e encostas com declividades acentuadas, geralmente maiores que 15%.

Pela região possuir alta declividade os vales acabam sendo muito entalhados por formas dissecadas, apresentando uma rede de drenagem densa. Desse modo, a área do município de Amparo está sujeita a processos erosivos mais intensos, o que aumenta o risco de movimentos de massas (PONÇANO *et al.*, 1981).

Segundo Ab'Saber (1979), a região está no domínio morfoclimático denominado "mares de morros", o qual apresenta montanhas com formas arredondadas em seu topo.

### 3.5 Hidrogeologia

O SAC ocupa 100% da área do município de Amparo, associado às rochas gnáissicas-migmatíticas do Complexo Amparo, sendo que a ocorrência de água subterrânea está diretamente ligada a fraturas e fendas presentes na rocha (BONFIM, 2010).

Na região deste estudo, a ocorrência de rochas com minerais de fácil alteração e intemperismo (micas e anfibólios), gera espessos mantos de alteração que podem chegar a mais de 10 metros de espessura (CAVALCANTE *et al.*, 1991).

Com a presença deste manto de alteração na região, o sistema aquífero considerado neste trabalho é composto por três camadas: a primeira sendo o manto de intemperismo e a segunda a rocha sã com fraturas e a terceira a rocha sã sem fraturas, em maiores profundidades

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Análise dos perfis construtivos

Para determinação dos parâmetros do modelo conceitual, os perfis construtivos irão fornecer informações importantes como espessuras das camadas de saprolito e rocha sã fratura, assim como o contato entre as duas. Esta análise foi feita levando em conta a presença do revestimento de PVC geomecânico na parede do poço.

Os poços distam entre si cerca de 60 metros e as características de cada poço do presente estudo, assim como coordenadas geográficas e data das perfurações, estão descritas na Tabela 4.2

Figura 4.2 : Tabela com as características dos poços tubulares

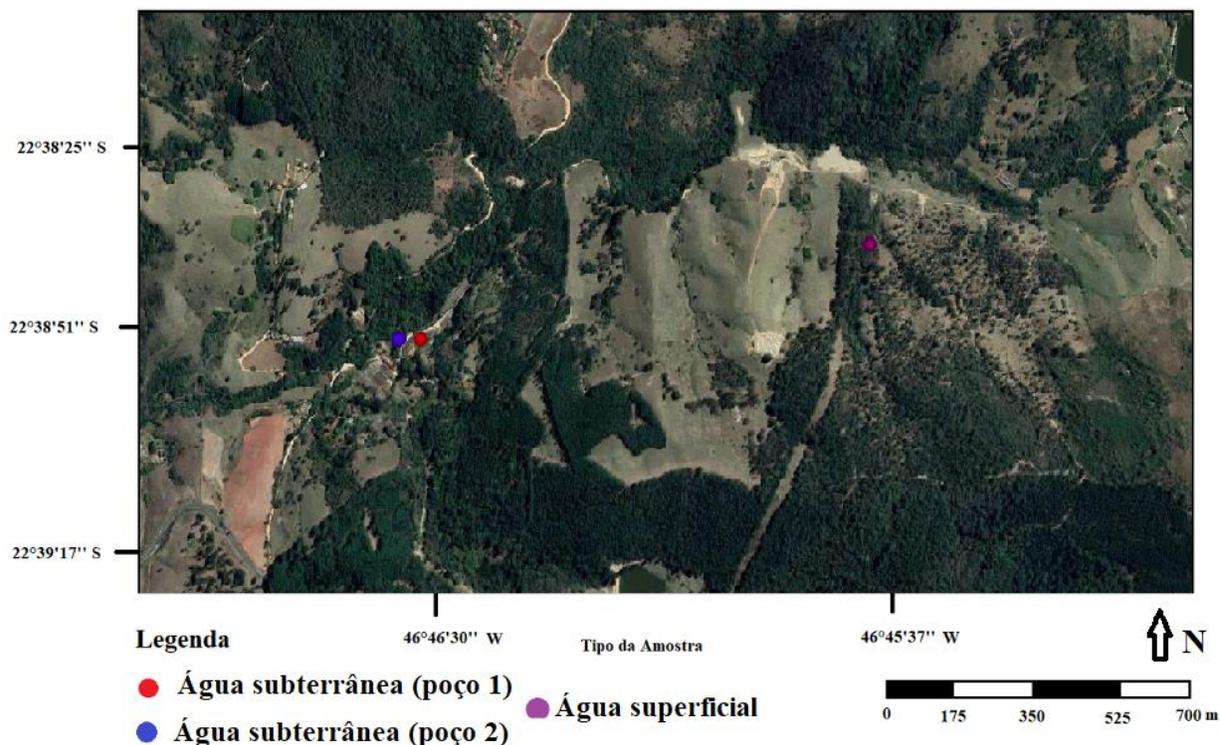
Poço	Poço 1	Poço 2
Tipo	Tubular	Tubular
Cota	790	785
Coordenadas	22°38'56.67"S 46°46'28.14"O	22°38'56.88"S 46°46'30.38"O
Diâmetro	150 mm	150 mm
Profundidade	60 m	60 m
Altura da boca do poço	57 cm	53,5 cm
Nível estático	12,787 m	6,55 m
Profundidade da Bomba	48 m	48 m
Modelo da bomba	Ebara BAS 412	Ebara BHS 511
Data da perfuração	10/05/1998	20/05/1998
Profundidade do Saprolito	0 a 18 metros	0 a 14,30 metros
Profundidade da Rocha Sã fraturada	18 a 60 metros	14,30 a 60 metros

## 4.2 Análises químicas e isotópicas

A coleta das amostras foi efetuada em Setembro de 2019, no período de estiagem. Foram coletadas três amostras, das quais duas são de poços tubulares e uma de nascente (Figura 4.1). Para a coleta das amostras dos dois poços, ambos foram bombeados por pelo menos 15 minutos, para garantir que a água neles contida foi totalmente renovada.

As amostras destinadas para análise de cátions e ânions, receberam um tratamento em campo, sendo filtradas com uma membrana de  $0,45\ \mu\text{m}$  e preservadas em uma caixa de isopor a  $4^{\circ}\text{C}$ . A alcalinidade foi determinada em laboratório por intermédio do método de titulação potenciométrica. Os ânions por cromatografia iônica (IC), e os cátions por emissão óptica de espectrometria com plasma de argônio indutivo (ICP-OES).

Figura 4.1: Localização das amostras coletadas



Os métodos e os parâmetros analíticos que foram utilizados para cada elemento e suas concentrações estão descritos a seguir (Tabela 4.1)

Tabela 4.1: Tabela dos métodos utilizados para amostragem geoquímica de cada elemento

<b>Parâmetro Analítico</b>	<b>Método Analítico</b>
Alumínio, Bário, Berílio, Cálcio, Cádmio, Cobalto, Crômio, Cobre, Ferro, Magnésio, Manganês, Molibdênio, Níquel, Fósforo, Chumbo, Silício, Estanho, Estrôncio, Vanádio, Zinco.	SMEWW 3120B
Fluoreto, Cloreto, Nitrito, Nitrato, Sulfato, Brometo	EPA 300.0 – 300.1
pH (a 25°C)	SMEWW 4500 H B
Alcalinidade	SMEWW 2320B
Dureza	SMEWW 2340B
Cor	SMEWW 2120C
Turbidez	SMEWW 2130B
Condutividade	SMEWW 2510B

Para avaliar a origem da água presente nos aquíferos, foi feita a assinatura isotópica da água, estabelecida por espectroscopia isotópica de absorção laser em cavidade ressonante, utilizando-se instrumento Liquid Water Isotope Analyzer da Los Gatos Research Inc (LWIA-24d). Todas as amostras coletadas foram encaminhadas ao laboratório de Hidroquímica do LEBAC/RAIH, na UNESP - Campus de Rio Claro/SP para análise.

Para a criação do gráfico da linha meteórica local, foram utilizados dados da estação do GNIP de Bragança Paulista de 1997 e 1998.

### 4.3 Teste de bombeamento e análise da curva diagnóstica

O ensaio foi realizado com o bombeamento do P1, utilizando uma bomba Ebara BAS 412. O rebaixamento foi monitorado nos poços P1 e P2, sendo que este último se encontra a aproximadamente 65 metros de distância do primeiro.

O teste de bombeamento foi realizado entre os dias 25 e 26 de janeiro de 2022, pelo autor deste trabalho e colaboradores do LEBAC. O tempo total do teste foi de 1680 minutos, sendo os primeiros 1440 minutos referentes ao teste de bombeamento no poço 1 e análise de rebaixamento no poço 2 e os 240 minutos finais, ao teste de recuperação dos poços. O modelo do teste realizado foi o de vazão constante sendo apresentado os dados obtidos e as especificações gerais, no Anexo 1.

Com os dados de rebaixamento obtidos durante o teste, foi confeccionado a curva de rebaixamento a derivativa a partir do software AQT SOLV® para determinar qual modelo de aquífero se encaixa com os dados observados.

### 4.3 Método dos elementos finitos e FEFLOW

Escolhido do método de elementos finitos, o software usado para modelagem foi o FEFLOW – Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System (DIERSCH, 2014). Neste software é possível simular o fluxo e o transporte de calor e massa em água subterrâneas em meios fraturados (objeto deste estudo) e porosos e em zonas não saturadas. Este método é capaz de solucionar as equações governantes em modelos onde existem diversas condicionantes como: diferentes saturações e densidades, superfícies livres, fluxos não isométricos, entre outros (DIERSCH, 2014)

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Perfil construtivo

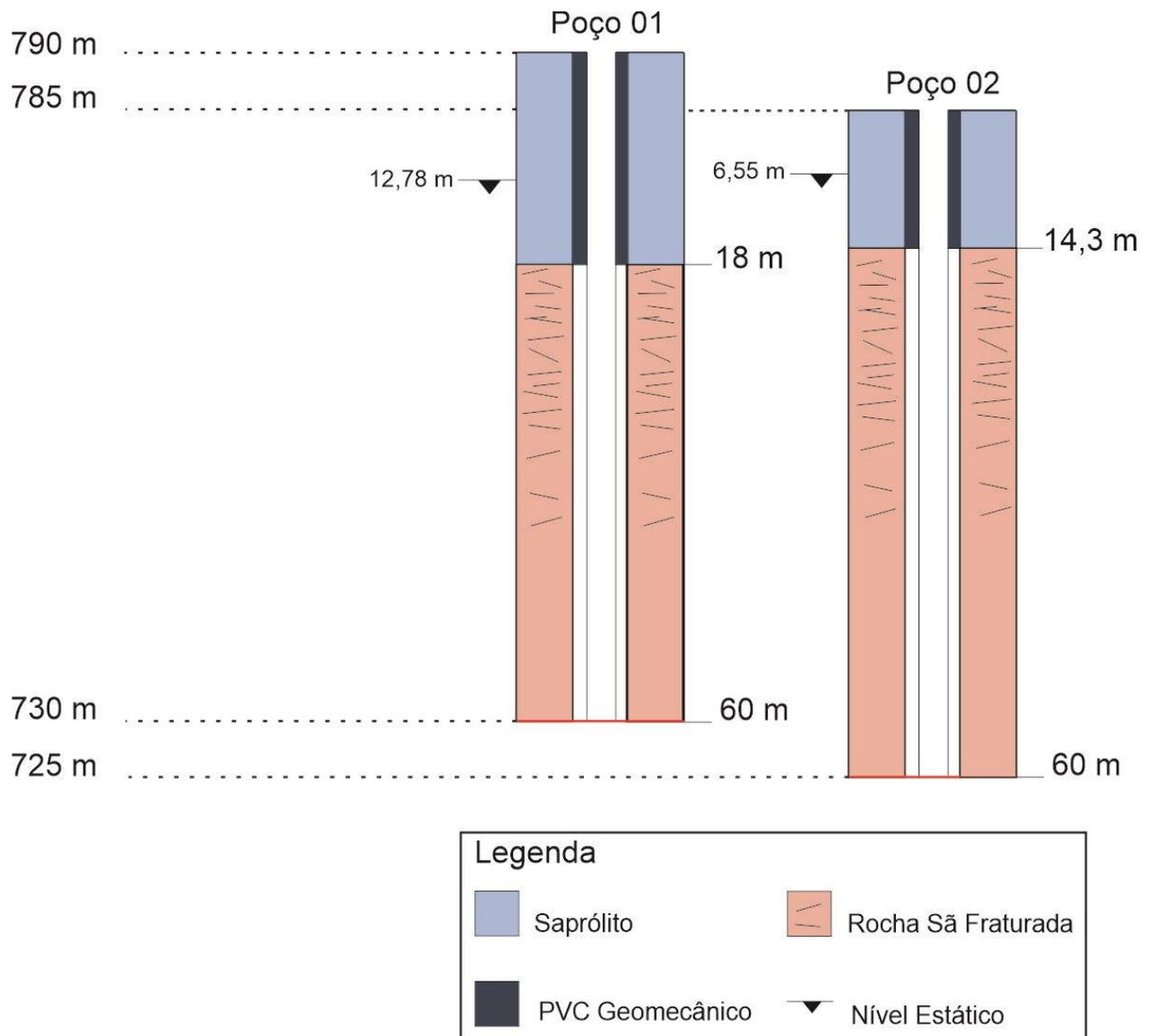
Os testemunhos de sondagem apresentados na Figura 5.1 pertencem ao poço 2. As fraturas apresentam caráter sub-horizontal, com espaçamento de até 2 cm de espessura. Algumas porções apresentam oxidação devido a passagem de água em contato com a rocha. (Figura 5.1)

Figura 5.1: Testemunhos de sondagem do Poço 2.



Pela análise do perfil construtivo dos poços e anotações da empresa Água Branca que executou a perfuração (Figura 5.2) as fraturas sub-horizontais estão dispostas na camada denominada neste trabalho como rocha sã fraturada. A camada de saprólito, pelo perfil construtivo fornecido pela empresa, é localizada nos primeiros 15 metros do poço, enquanto que a rocha sã fraturada está entre os 15 e 60 metros.

Figura 5.2: Perfil construtivo dos Poços 1 e 2



## 5.2 Caracterização Hidroquímica

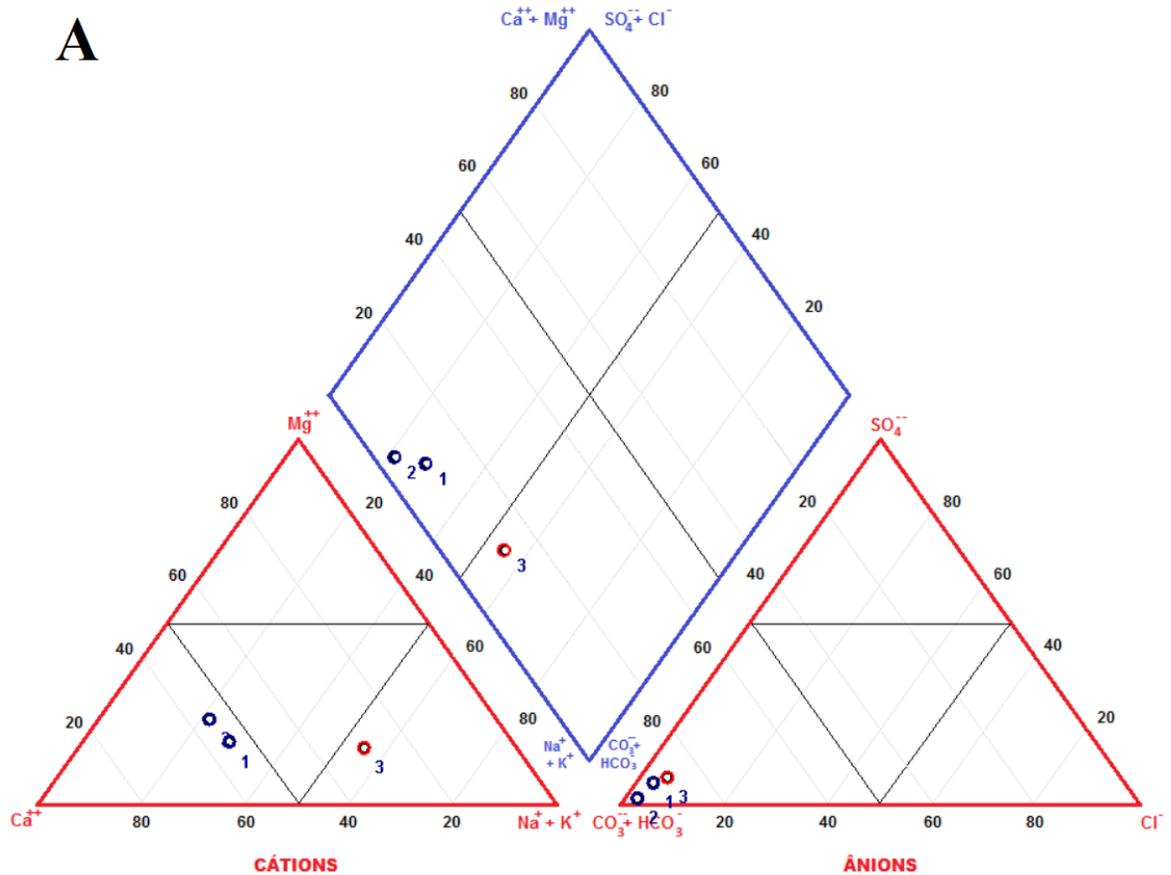
No anexo 3, é apresentado o resultado das análises físico-químicas dos Poços 1 e 2, assim como uma nascente que aflora na área de estudo.

Dentre os parâmetros analisados, as águas dos poços 1 e 2, apresentam baixa condutividade elétrica (224  $\mu\text{S/cm}$  e 334  $\mu\text{S/cm}$ , respectivamente), enquanto a condutividade da água da nascente foi de 155  $\mu\text{S/cm}$ , menor do que a dos poços. Em relação ao pH, os poços 1 e 2 apresentaram pH neutro de 7,14 e 7,23, respectivamente, já a nascente apresentou um pH ligeiramente mais ácido, de 6,61.

Em ambos os poços, o ânion predominante foi o bicarbonato, com concentrações de 132 mg/L para o P1 e 214 mg/L para o P2, seguidos dos ânions sulfato e nitrato no P1 e sulfato e cloreto no P2. Já em relação aos cátions, no P1 há a predominância de bário, enquanto que no P2 ocorre a predominância de cálcio (Figura x). Ambas as águas dos poços são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, conforme pode ser visualizado no diagrama de Piper (figura 5.3A e 5.3B)

Na água superficial da nascente, o ânion de maior expressão também é o bicarbonato, com concentração de 87,6 mg/L, seguidos dos ânions sulfato e cloreto. Em relação aos cátions, o de maior concentração é o bário, seguido do sódio, sendo classificada como bicarbonatada sódica

Figura 5.3 : A. Diagrama de Piper com a classificação das águas subterrâneas e superficiais ; B. tabelas com parâmetros utilizados para confecção dos gráficos. Elaborado pelo autor utilizando o *software* Qualigraf.



**B**

Nº	Nome da Amostra	Na + k (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO <sub>3</sub> +HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	Classificação das Águas
1	poco 1	16,22	26,30	5,12	2,40	132,00	7,15	Cálcica Bicarbonatada
2	poco 2	19,01	40,80	10,60	2,50	214,00	3,50	Cálcica Bicarbonatada
3	nascente	24,52	10,80	3,52	2,80	87,60	6,10	Sódica Bicarbonatada

Os valores estimados de Sólidos Totais Dissolvidos (STD), foi calculado a partir do *software* Qualigraf, utilizando a seguinte fórmula:  $STD = CE * 0,65$ , gerando os seguintes resultados: STD do P1 foi de 145,6 mg/L, STD do P2 foi de 217,1 mg/L e STD da nascente foi de 100,8 mg/L, sendo todas as águas classificadas como Água doce. (Tabela 5.1)

Tabela 5.1: Classificação das águas analisadas

Nome da Amostra	Na + K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	C.E. (µS/cm)	STD estimado (mg/L)	Classificação
poco 1	16,22	26,30	5,12	2,40	132,00	7,15	224	145,6	Água Doce
poco 2	19,01	40,80	10,60	2,50	214,00	3,50	334	217,1	Água Doce
nascente	24,52	10,80	3,52	2,80	87,60	6,10	155	100,8	Água Doce

Os valores baixos obtidos de condutividade elétrica e de STD podem estar relacionados com a litologia local ou com o baixo tempo de residência das águas no aquífero. Estudos realizados anteriormente por Bertachini (1987), Chang et al. (2002), e Ezaki (2011), mostram que águas presentes em rochas semelhantes aos gnaisses do Complexo Amparo, apresentam características semelhantes ao deste trabalho, mesmo essas rochas possuindo elevada solubilidade de seus feldspatos e plagioclásios. Estes resultados semelhantes suportam a tese de baixo tempo de residência das águas no aquífero.

### 5.3 Composição Isotópica

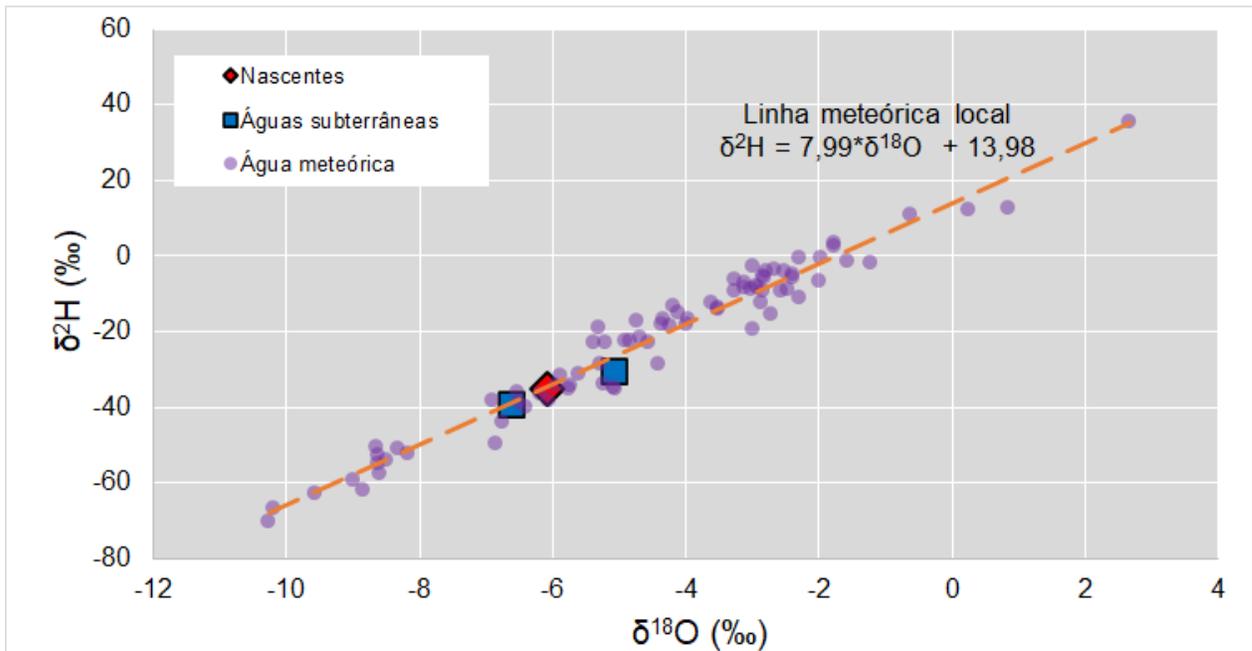
Na tabela 5.2 é apresentado os valores isotópicos das amostras das águas subterrâneas e superficiais.

Tabela 5.2: Valores isotópicos obtidos das amostras

Identificação	δ H-2	δ O-18
	o/oo	o/oo
	1,2	0,40
Poco 1	-39,2	-6,63
Poço 2	-30,6	-5,08
Nascente 2	-35,2	-6,08

A partir dos dados fornecidos pela GNIP de Bragança Paulista dos anos de 1997 a 1998, foi confeccionada a linha meteórica local e confeccionado o gráfico (Figura 5.4) comparando os valores obtidos das amostras com os valores das águas meteóricas locais. Na mesma imagem é fornecido a equação linear entre deutério e  $\delta^{18}\text{O}$ .

Figura 5.4: Dispersão dos valores de  $\delta^2\text{H}$  versus  $\delta^{18}\text{O}$ , indicando que as amostras analisadas se aproximam da linha meteórica.



Dentre as amostras coletadas, apenas uma delas apresentou um leve enriquecimento em  $\delta^{18}\text{O}$ , sendo fruto dos processos de evaporação, nos quais as moléculas mais leves de água, apresentam uma taxa de evaporação mais rápida do que as mais pesadas (Urey. 1947).

Com esta leve diferença entre as composições dos poços, é possível entender que cada um recebe quantidades diferentes de águas oriundas do aquífero e da precipitação meteórica, já que os valores dos parâmetros obtidos na verdade são médias ponderadas dos valores de  $\delta^{18}\text{O}$  das diferentes contribuições.

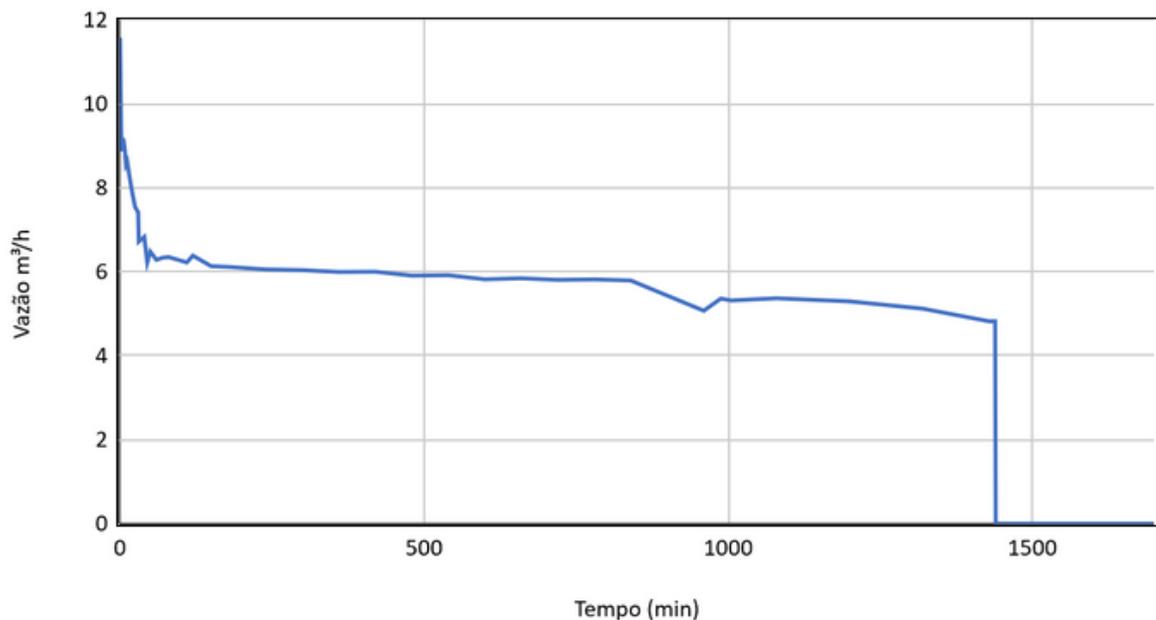
#### 5.4 Análise do teste de bombeamento

Os dados obtidos no teste de bombeamento, como vazões, rebaixamento do poço 1 e 2 (Anexo 1), nos forneceram informações importantes para dar credibilidade ao modelo conceitual proposto neste trabalho.

Analisando os dados obtidos com o bombeamento do P1 na zona fraturada, nota-se que o P2 pode ter influência de outras variáveis em sua recarga, por apresentar um valor de rebaixamento relativamente baixo. As vazões variaram de 11,57 m<sup>3</sup>/h a 4,82 m<sup>3</sup>/h durante toda a extensão do teste. A vazão média obtida foi de 8,19 m<sup>3</sup>/h. (Figura 5.5)

Figura 5.5: Gráfico da vazão do teste de bombeamento do poço 1.

#### Vazão m<sup>3</sup>/h versus Tempo (min)

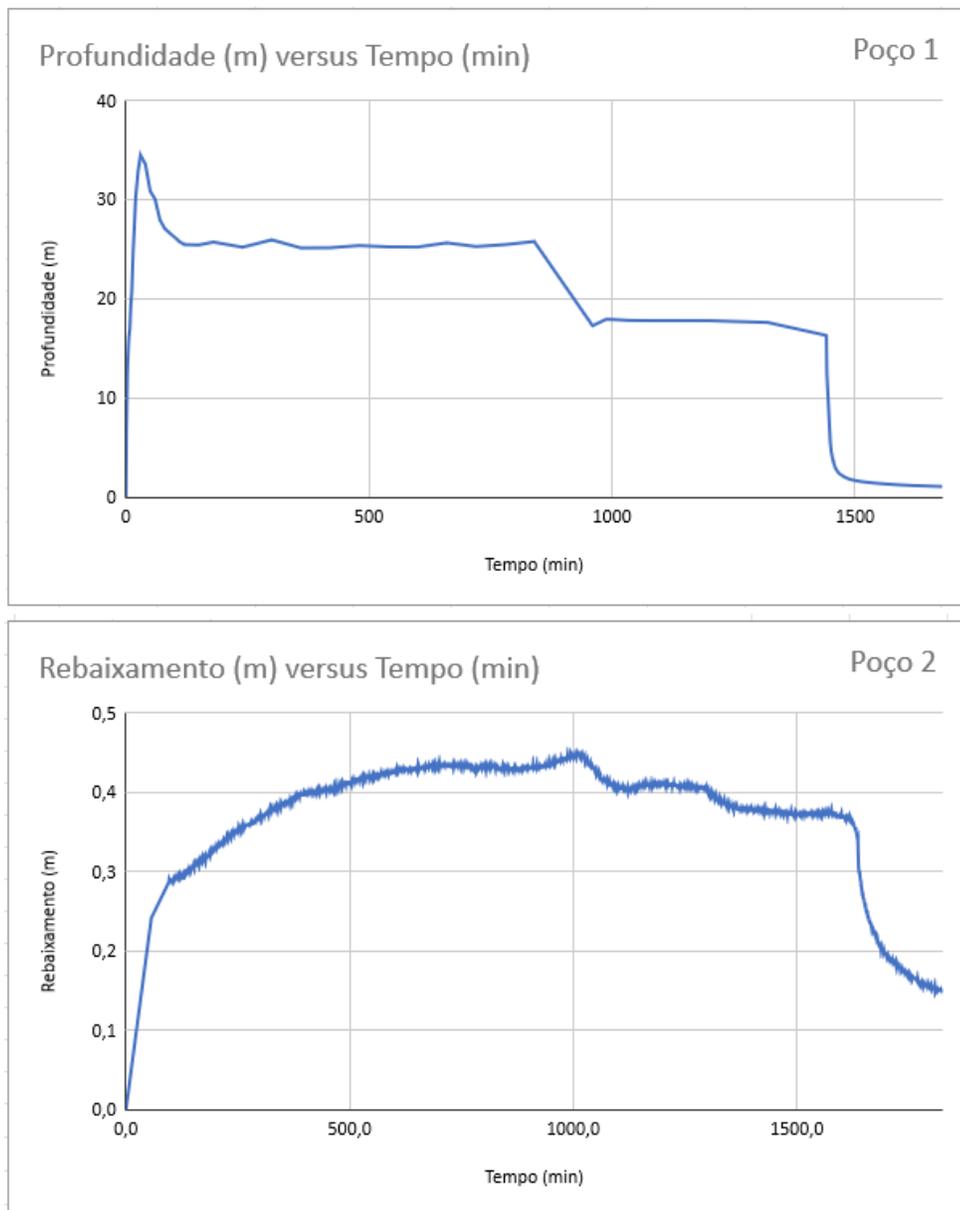


Segundo gráfico de vazão/tempo, é possível averiguar que perto do  $t = 800$  min ocorreu uma diminuição inesperada da vazão, resultado de algum processo desconhecido.

Analisando concomitantemente os gráficos de rebaixamento dos poços 1 e 2 (Figura 5.6), é possível afirmar que existe conexão entre os dois. Ao se bombear o P1,

ocorre o lento rebaixamento de P2 ao longo de todo o teste. No  $t = 800$  min, quando ocorre a redução da vazão citada anteriormente, a resposta em P2 se dá a quase 200 minutos depois, indicado pela recuperação do P2 no  $t = 1000$  min.

Figura 5.6: Gráficos de rebaixamento do Poço 1 e Poço 2



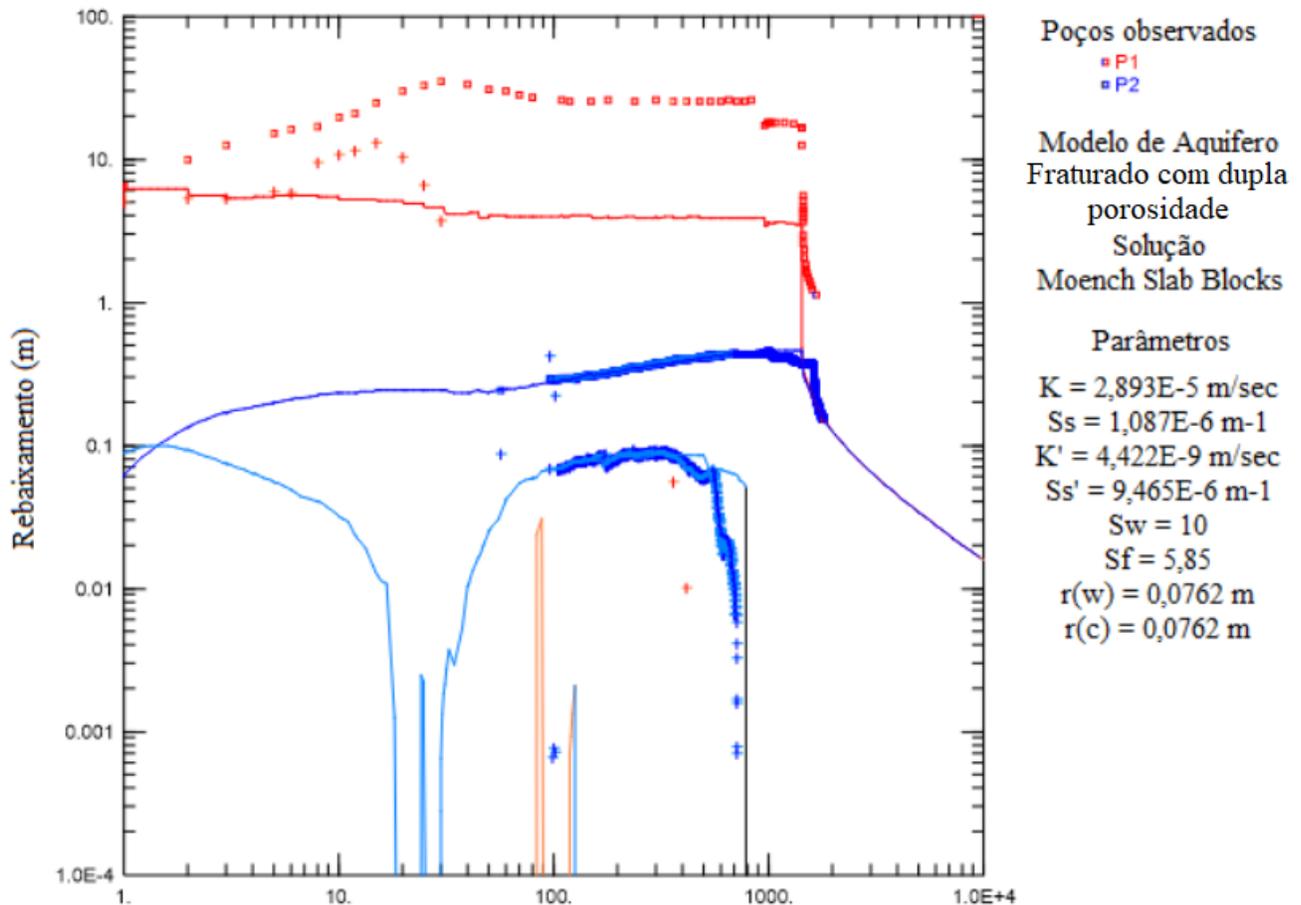
Outro dado que reforça a lenta influência entre do P2 sobre o P1 é a curva final dos gráficos. Quando se cessa o bombeamento no P1 em  $t = 1440$  min, a resposta do P2 a esse estímulo se dá aproximadamente em  $t = 1600$  min.

### 5.5 Análise da curva diagnóstica

A solução que mais se adequou foi Moench (1984) Slab-shaped block (Figura 5.7), indicando que modelos de dupla porosidade podem ser empregados em aquíferos fraturados. A escolha do método de Moench (1984) se mostrou mais adaptável pois leva em consideração o efeito de pele tanto para as fraturas como para o poço.

Autores como Pereira e Almeida (1995), apresentaram resultados parecidos quando investigaram aquíferos fraturados. Segundo os autores, as soluções que obtiveram os melhores ajustes foram as que consideraram os efeitos de pele, tanto de poço como de fraturas, seguindo o modelo de Moench (1984).

FIGURA 5.7 – Ajustes com a solução de Moench (1984) slab-shaped block para aquíferos fraturados com dupla porosidade: P1 faz referência ao rebaixamento do poço bombeado; P2 faz referência ao rebaixamento do poço observado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outras soluções aplicadas (Anexo 2) apresentaram semelhança da curva tipo do P2, mas nenhum apresentou uma curva diagnóstica tão satisfatória quanto a de Moench (1984) Slab-shaped Blocks. As curvas tipo de P1 e P2 só se adequaram concomitantemente sob valores elevados do efeito de pele poço ( $S_w \cong 100$ ).

A curva derivativa de cada poço não seguiu o padrão esperado como exemplificado na Figura 5.7, erro que pode ser resultado da duração do teste de bombeamento (24 horas), sendo um tempo insuficiente para que todas as dimensões de fluxo se reproduzam na curva gerada (Ferroud et al. 2019). Pelo curto período do teste, existe a possibilidade da carga hidráulica não ter sido atingida, pois houve alteração da vazão durante por causas desconhecidas, podendo não gerar a curva derivativa completa. (Ferroud et al. 2019).

A classificação como dupla porosidade indica que a água do aquífero é derivada da matriz da rocha e das fraturas, neste estudo a principal fonte de água está relacionada à segunda camada (rocha sã fraturada).

## 5.6 Modelo Conceitual

Com base nos dados gerados pelo teste de bombeamento e análise da curva diagnóstica de rebaixamento, dados de testemunhos de sondagem, perfis construtivos dos poços e dados das análises geoquímicas e isotópicas, foram adotadas as seguintes premissas para a geração do modelo conceitual:

- O domínio é composto por duas camadas, sendo elas: o saprólito (1), com abrangência até, aproximadamente, os 15 primeiros metros de profundidade; e a rocha sã fraturada (2) com abrangência dos 15 aos 70 metros de profundidade;
- A principal fonte de recarga do aquífero são as águas meteóricas;
- Formado por rocha altamente intemperizada, que corresponde a matriz, e por fraturas. A água é armazenada tanto nos poros como nas fraturas, sendo esta a dupla porosidade.
- É um aquífero fraturado que se comporta com dupla porosidade
- O meio se comporta como homogêneo e anisotrópico
- As fraturas presentes na rocha são sub-horizontais;
- O nível estático permanece sempre na zona do saprólito;
- O aquífero não apresenta camada confinante;

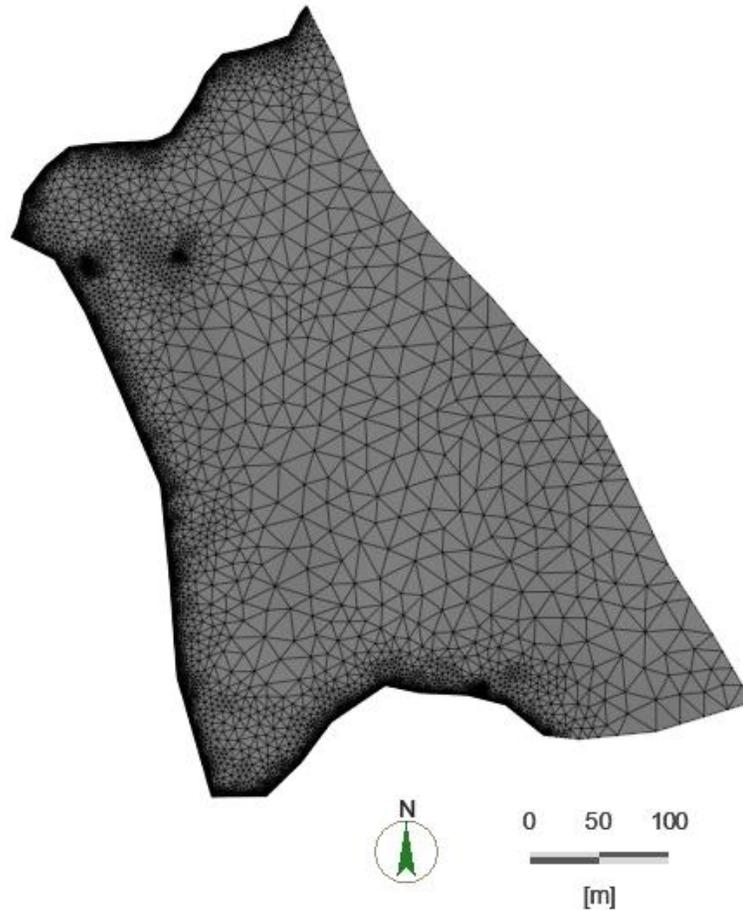
## 5.7 Modelo Matemático

### 5.7.1 Domínio e discretização do modelo

A área modelada abrange 147.131 m<sup>2</sup> de área total e volume de 10.299.170 m<sup>3</sup>, sendo subdividida em duas camadas, portanto três *slices*. A discretização do modelo produziu um refinamento dos elementos nas bordas do modelo, onde a condição de contorno é do tipo I, relacionado a drenagem (Figura 5.8). Foi adotado no modelo 2 poços, utilizados para a calibração do modelo.

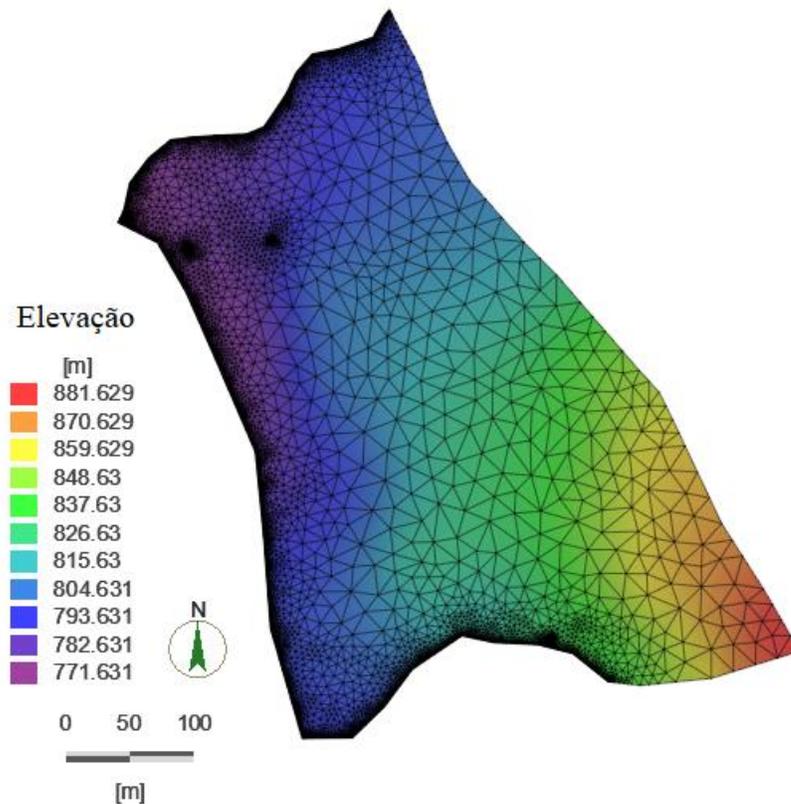
No total, o número de elementos gerados foi de 43830, número de nós foi de 31336. Em relação a porcentagem de ângulos maiores que 120° foi 0.0% e ângulos maiores que 90° foi 12,0%, portanto todos obedecendo a Lei de Delaunay.

Figura 5.8: Malha de elementos finitos, sendo observado o refinamento nas bordas norte, oeste e sul com condições de contorno do Tipo I.



A topografia utilizada no modelo foi confeccionada utilizando os dados do modelo digital de elevação, gerados pelo satélite ALOS-PALSAR.. Os dados topográficos foram transferidos para o FEFLOW, para se realizar a discretização do primeiro *layer* (Figura 5.9).

Figura 5.9: Mapa topográfico



### 5.7.2 Condições de contorno

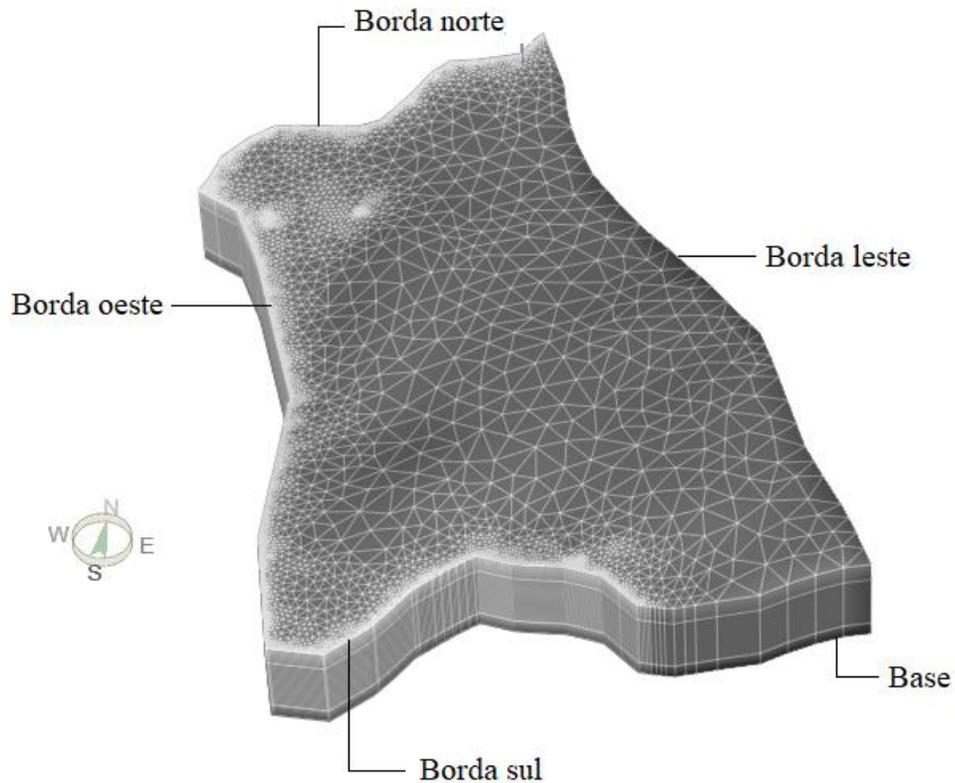
Levando em consideração o modelo conceitual, as condições de contorno foram estabelecidas nos limites do modelo. Na base, por ser o contato com a rocha sã, é considerado uma condição de contorno do Tipo II, de não fluxo.

Quanto aos limites laterais, a borda leste, levando em consideração a topografia local, é um divisor de águas, sendo assim uma condição de contorno do Tipo II, não fluxo. Já as bordas oeste e norte são condições de contorno com carga hidráulica especificada e a metade da borda sul apresentando carga hidráulica especificada e metade com não fluxo. (Figura 5.10)

Por último o poço de bombeamento (P1) foi inserido no FEFLOW como *multilayer well*, sendo considerado como uma condição de contorno do Tipo II, com fluxo

especificado. Já o poço de observação (P2), também foi inserido como *multilayer well*, porém sem a aplicação de um valor de bombeamento (Anexo 1).

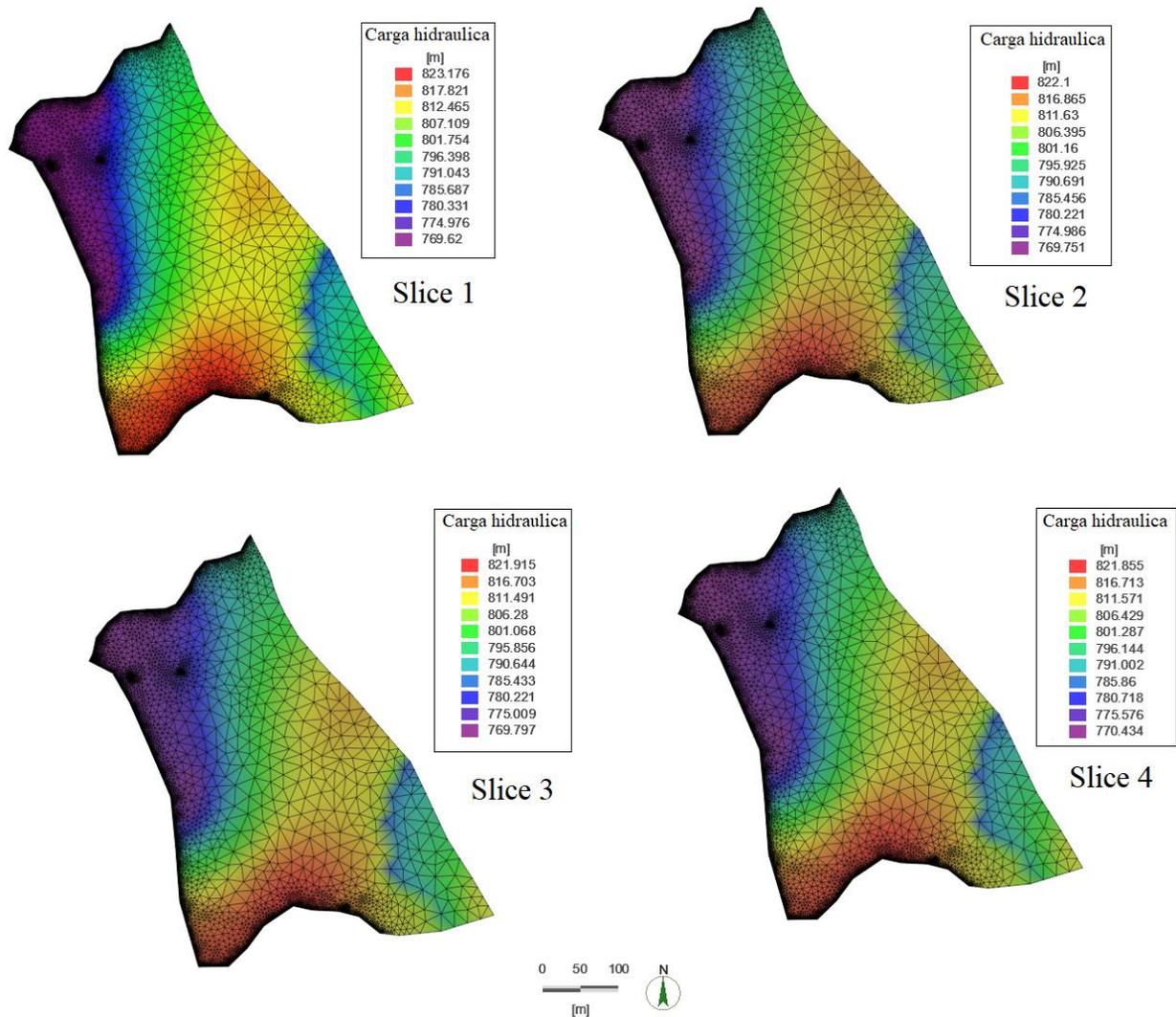
Figura 5.10: Condições de contorno estabelecidas para o modelo.



### 5.7.3 Condições iniciais

As condições iniciais que foram utilizadas para o regime transiente foram determinadas a partir da simulação em regime estacionário, sendo distribuídas as cargas hidráulicas em cada *Slice* (Figura 5.11) Os valores tomados como referência foram os dados de P1 e P2 antes do bombeamento.

Figura 5.11: Cargas hidráulicas especificadas em cada slice



## 5.8 Simulação em regime transiente

### 5.8.1 Parâmetros

Dentre os valores utilizados para a calibração do modelo, o principal parâmetro utilizado foi os valores de rebaixamento, visando à similaridade entre os valores observados e simulados durante o teste de bombeamento realizado.

Para a determinação dos valores de condutividade hidráulica de cada camada, foi

utilizado como base os valores obtidos por Panegassi (2020), onde o arcabouço geológico é muito similar, a calibração foi feita para ajustar a geometria da curva simulada com a curva observada, variando os valores de  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ , sempre na proporção de  $K_x = K_y = 1/10 K_z$  e  $S_s$ , de ambas as layers. sendo feitos os ajustes necessários para se adequar a este trabalho (Tabela 5.3)

Tabela 5.3: Valores de condutividade hidráulica ajustados

	$K_x$	$K_y$	$K_z$
Layer 1	1,63E-06	1,63E-06	1,63E-05
Layer 2	1,51E-06	1,51E-06	1,51E-05

### 5.8.2 Recarga

O valor de recarga foi adotado como nulo para a simulação do modelo em regime transiente

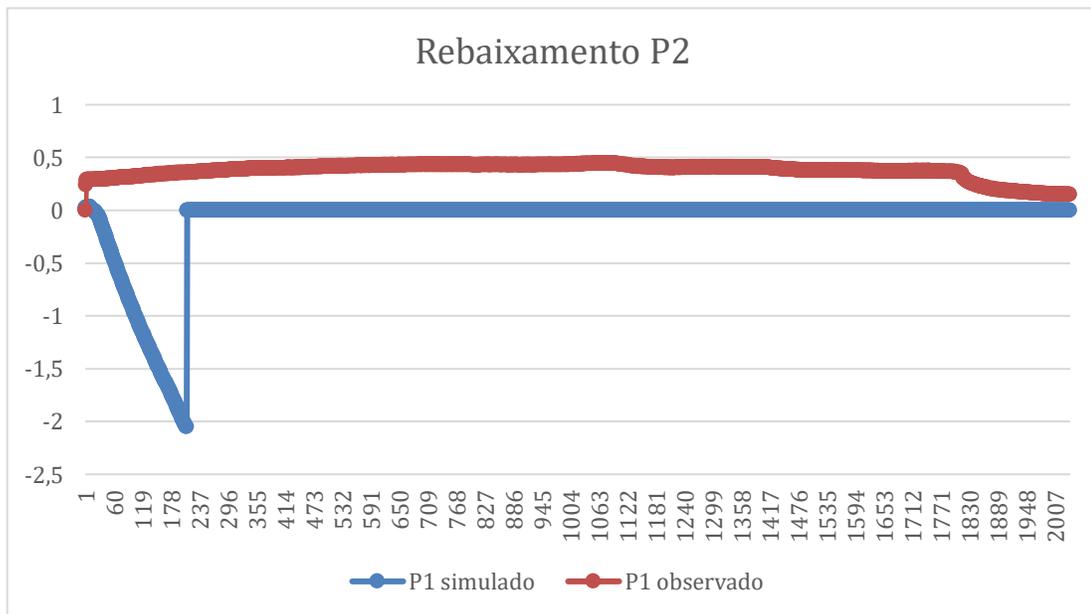
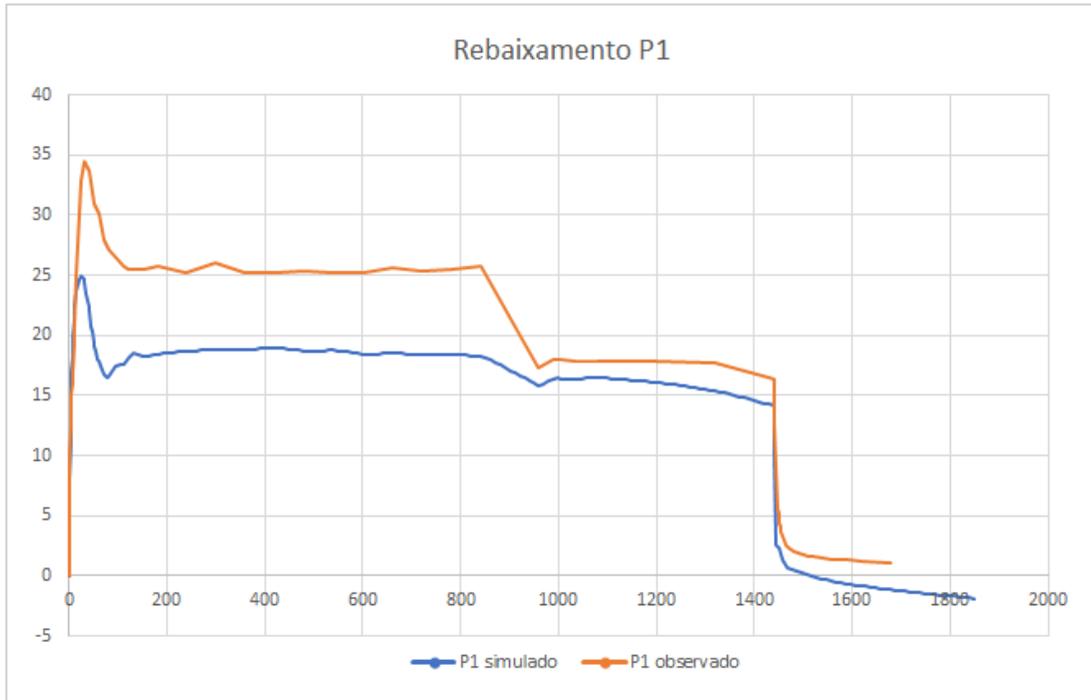
### 5.8.3 Calibração

Para a calibração do modelo em regime transiente, foi utilizado a comparação entre as curvas de rebaixamento obtidas durante o teste de bombeamento e as curvas obtidas durante a simulação, adotando valores fixos de condutividade hidráulica.

A discretização temporal foi feita pela geração automática pelo FEFLOW, resultando em 1850 minutos divididos em 192 time steps.

Os resultados obtidos do rebaixamento dos poços são indicados nas figuras 5.12, sendo estes valores comparados com os dados obtidos em campo. No gráfico de rebaixamento de P2, este não manteve a mesma geometria entre os dados observado e simulados, este resultado pode ter sido causado pela falta de informações sobre os poços ou pelos parâmetros do aquífero.

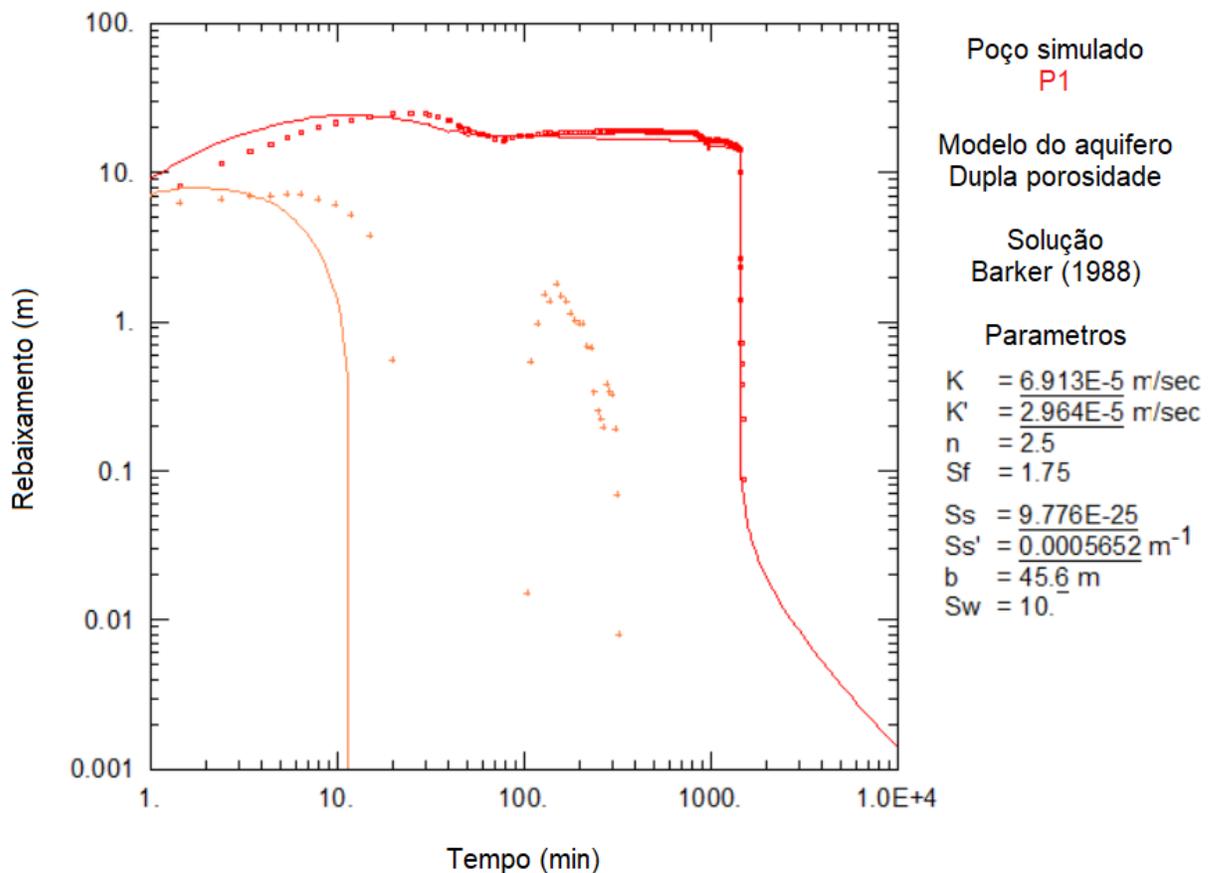
Figura 5.12: Gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, observado (linha azul) e simulado (linha laranja), do poço de bombeamento P1 e gráfico comparativo entre dados de rebaixamento, simulado (linha azul) e observado (linha vermelha), do poço de monitoramento P2,,



### 5.8 Análise da curva diagnóstica dos dados simulados

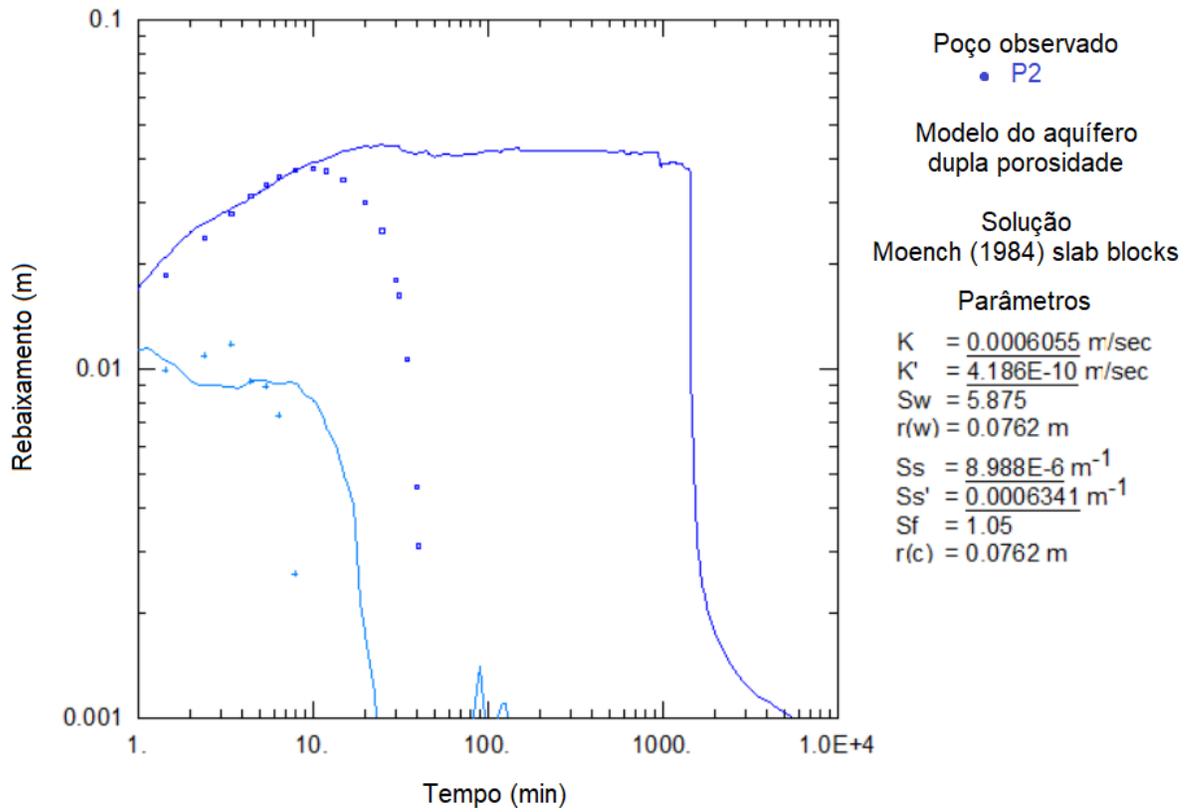
Os dados de rebaixamento obtidos pela simulação do teste de bombeamento de P1, forneceu as informações necessárias para a confecção e interpretação da curva diagnóstica (Figura 5.13), permitindo assim a comparação com os dados observados em campo.

Figura 5.13. Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento simulados do P1 (pontos) e modelo analítico ajustado (linhas).



Assim, analisando a curva dos dados simulados de P1, o modelo analítico que melhor se adequou foi o de dupla porosidade descrito por Barker (1988). Porém analisando a curva diagnóstica do rebaixamento de P2, nenhuma solução se adequou satisfatoriamente ao resultado obtido pela simulação (Figura 5.14).

Figura 5.14. Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento simulados do P2 (pontos) e modelo analítico ajustado (linhas).



## 6. CONCLUSÕES

Com a interpretação dos dados fornecidos pelo teste de bombeamento, foi constatado a interligação entre os dois poços, apesar de cada água possuir composições físico-químicas diferentes entre si. Esta diferença pode ser interpretada pelo fato de um dos poços receber maior contribuição da camada de saprólito, alterando assim sua composição química

Analisando a curva diagnóstica obtida por meio do software AQT SOLVE, foi possível determinar o modelo analítico como sendo um aquífero fraturado com dupla porosidade definido por Barker (1988). Analisando este resultado com outras variáveis, é possível inferir que a parte do saprólito faz a função da porosidade da matriz da rocha, enquanto que a rocha sã fraturada faz a função da porosidade secundária.

Pela análise hidrogeoquímica, as águas dos poços foram classificadas como Carbonatadas cálcicas provavelmente apresentando baixo tempo de residência no aquífero em decorrência dos baixos teores de bicarbonato e de STD estimados. Tais resultados demonstram a alta eficiência dos processos de recarga do aquífero, outro dado que comprova a eficiência da recarga do aquífero são as características isotópicas das águas, plotando as amostras junto com a linha meteórica local, as amostras apresentam valores extremamente próximas a linha local, assegurando a constante renovação e a utilização desta água como fonte segura. A água da nascente foi classificada como carbonatada sódica, este resultado pode ser interpretado pois o enriquecimento em sódio se deve a água atmosférica.

Em posse de todos os dados coletados, foi confeccionado um modelo hidrogeológico a partir do *software* FEFLOW. Com a simulação do teste de bombeamento de vazão constante, o resultado se mostrou semelhante aos dados observados em campo apenas nos dados simulados para o bombeamento de P1, sendo assim, não podendo afirmar que o resultado do modelo é de dupla porosidade.

Apesar deste modelo levar em consideração a camada altamente fraturada e a matriz da rocha, o fato do aquífero funcionar como dupla porosidade diverge do modelo analítico proposto por Panegassi (2020), onde classificou um aquífero no Grupo Amparo como confinado drenante. Este resultado pode ser entendido pela diferença na

quantidade de fraturas observadas na área deste estudo e na área de estudo de Panegassi (2020).

Com esta diferença entre resultados no mesmo contexto geológico, recomenda-se estudos voltados para o entendimento possibilidade da existência de um conjunto de fraturas verticais que conectam a porção do saprólito com as fraturas sub-horizontais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M. 1981. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: COM, Simpósio sobre o Cráton do São Francisco E suas Faixas Marginais, 1, Salvador, Anais, 1-10
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press, 564 p., 2015.
- Anouck Ferroud, Silvain Rafini, Romain Chesnaux, Using flow dimension sequences to interpret non-uniform aquifers with constant-rate pumping-tests: A review, Journal of Hydrology X, Volume 2, 2019.
- AYRAUD, V., AQUILINA, L., LABASQUE, T., PAUWELS, H., MOLENAT, J., PIERSON-WICKMANN, A. C., Fourre, E. Compartmentalization of physical and chemical properties in hard-rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses. Applied geochemistry, v. 23, n. 9, p. 2686-2707, 2008.
- BERKOWITZ, Brian. Characterizing flow and transport in fractured geological media: A review. Advances in water resources, v. 25, n. 8, p. 861-884, 2002
- V.F. Bense, T. Gleeson, S.E. Loveless, O. Bour, J. Scibek, Fault zone hydrogeology, Earth-Science Reviews, Volume 127, 2013, Pages 171-192, ISSN 0012-8252,.
- BOURDET, D. Well test analysis: the use of advanced interpretation models, 1a edição, Elsevier Science, Amsterdam, 438 f, 2002.
- Cabral, J.J.S.P. and Wrobel, L.C. (1993), Numerical analysis of saltwater intrusion using B-spline boundary elements. Int. J. Numer. Meth. Fluids, 16: 989-1005.
- CAMPOS Neto M.C. 1985. Evolução do pré-cambriano paulista e regiões adjacentes. In: SBG, Simp. Reg. Geol., 4, São Paulo, Atas, p. 79-80.
- Campos Neto, M. C., Caby, R. 1999. Tectonic constrain on Neoproterozoic high pressure metamorphism and nappe systems south of São Francisco craton, southeast Brazil. Precambrian Research, 97:3-26.
- CAMPOS Neto, M. C., Caby, R. 2000. Lower crust extrusion and terrane accretion in the Neoproterozoic nappes of southeast Brazil. Tectonics, 19(4):669-687.

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

Ebert H. 1968. Ocorrência da fácies granulítica no sul de Minas Gerais e áreas adjacentes, em dependência da estrutura orogenética: hipótese sobre a sua origem. An. Acad. Bras. Ciec., 40:215-229.

Lachassagne, P., Wyns, R. and Dewandel, B. (2011), The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. Terra Nova, 23: 145-161.

Lousada, Enéas & Campos, José. (2005). Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. Revista Brasileira de Geociências. 35. 407-414.

FETTER, C. W. Applied Hydrogeology, 4a edição, Prentice Hall, New Jersey, 598 f, 2001.

FIALHO, A.; CHAMBEL, A.; ALMEIDA, C. Caracterização hidráulica de aquíferos fracturados por modelos de porosidade dupla no concelho de Evora. In: CONGRESSO DA ÁGUA. [Anais...], Lisboa, 1990.

GUSTAFSON, G.; KRÁSNÝ, J. Crystalline rock aquifers: their occurrence, use and importance. Applied Hydrogeology, v. 2, n. 2, p. 64-75, 1994.

Hasui Y. & Oliveira M.A.F. 1984. Província Mantiqueira – Setor Central. In F.F.M. Almeida & Y. Hasui (Coord.) O Pre-Cambriano do Brasil. São Paulo, Edgard Blucher, pp.: 308-339.

JAUNAT, J.; HUNEAU, F.; DUPUY, A.; CELLE-JEANTON, H.; VERGNAUD-AYRAUD, V.; AQUILINA, L.; LE COUSTOMER, P. Hydrochemical data and groundwater dating to infer differential flowpaths through weathered profiles of a fractured aquifer. Applied Geochemistry, v. 27, n. 10, p. 2053-2067, 2012.

John E. Moore, Contribution of groundwater modeling to planning, Journal of Hydrology, Volume 43, Issues 1–4, 1979, Pages 121-128, ISSN 0022-1694,

KRESIC, N. Hydrogeology and groundwater modeling. 2a edição, CRC press, Boca

Raton, Florida, 870 f, 2007.

KRUSEMAN, G. P.; RIDDER N. A. Analysis and evaluation of pumping test data.

2a edição, ILRI, Wageningen, 377 f, 1994.

Neuman, S. P., and Witherspoon, P. A. (1969), Applicability of Current Theories of Flow in Leaky Aquifers, *Water Resour. Res.*, 5( 4), 817– 829,

SPITZ, Karlheinz; MORENO, Joanna. A practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley and sons, 1996.

UREY, H. C. The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society*, p. 562, 1947.

WANG, H. F. & ANDERSON, M. P. Introduction to Groundwater Modeling:

Finite Difference and Finite Element Methods. San Diego, California, USA: Academic Press. 237 p., 1982

Werner, R.A. & Brand, W.A. 2001. Referencing strategies and techniques in stable isotope ratio analysis. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 15:501–519.

Wernick E. 1978. Contribuição à estratigrafia do Pré-cambriano do leste do estado de São Paulo e áreas vizinhas. *Rev. Bras. Geoc.*, 8:206-216.

Sites consultados:

<http://www.aqtesolv.com/pumping-tests/derivative-analysis.htm>

<http://www3.funceme.br/qualigraf/app/pagina/show/3>

<https://www.udop.com.br/indices-pluviometricos>

## **anexo 1**

Tabela 1: Dados de rebaixamento do Poço 1 (Bombeado)

Tempo (min)	Profundidade (m)	Tempo (min)	Profundidade (m)
0	0	840	25,823
1	6,443	960	17,329
2	9,878	988	17,983
3	12,593	1005	17,952
5	15,173	1035	17,868
6	16,121	1080	17,843
8	17,033	1200	17,838
10	19,373	1320	17,663
12	20,693	1429	16,483
15	24,91	1440	16,363
20	30,198	1441	16,333
25	32,893	1442	12,483
30	34,523	1449	5,553
40	33,623	1450	5,123
50	30,893	1451	4,603
60	30,093	1452	4,403
70	27,993	1453	4,103
80	27,118	1454	3,913
110	25,823	1455	3,663
120	25,513	1460	2,923
150	25,473	1465	2,568
180	25,763	1470	2,333
240	25,248	1480	2,033
300	25,988	1490	1,838
360	25,173	1500	1,728
420	25,193	1510	1,638
480	25,413	1520	1,573
540	25,283	1540	1,468
600	25,263	1560	1,388
660	25,688	1590	1,293
720	25,317	1620	1,213
780	25,508	1680	1,119

Tabela 2: Rebaixamento do Poço 2 (monitorado)

Tempo (min)	Rebaixamento (m)
0,0	0
56,9	0,242
156,3	0,311
256,6	0,354
356,0	0,387
456,3	0,404
564,3	0,421
656,9	0,43
756,4	0,433
856,7	0,428
956,1	0,439
1056,4	0,422
1156,7	0,408
1256,2	0,408
1356,5	0,38
1440,6	0,377
1540,1	0,373
1640,4	0,299
1740,7	0,175
1825,7	0,151

Tabela 3: apresentando os valores das vazões obtidas durante o teste de bombeamento no poço 1

Tempo (min)	Vazão m³/min	Vazão m³/h	Tempo (min)	Vazão m³/min	Vazão m³/h
0	0,1930	11,57712642	240	0,1009	6,054490414
1	0,1743	10,45903544	300	0,1006	6,038242201
2	0,1557	9,340944473	360	0,0999	5,994005994
3	0,1478	8,866995074	420	0,1000	6
4	0,1515	9,090909091	480	0,0985	5,907449951
5	0,1525	9,150991357	540	0,0986	5,917159763
6	0,1522	9,132420091	600	0,0970	5,819592629
8	0,1485	8,910891089	660	0,0974	5,844155844
10	0,1426	8,55513308	720	0,0968	5,806451613
12	0,1436	8,616562949	780	0,0970	5,8177117
15	0,1390	8,337193145	840	0,0965	5,791505792
20	0,1317	7,90166813	960	0,0845	5,071851226
25	0,1256	7,537688442	988	0,0893	5,360333532
30	0,1236	7,416563659	1005	0,0886	5,316792202
31	0,1120	6,718924972	1080	0,0895	5,368326871
40	0,1138	6,828528073	1200	0,0882	5,294117647
45	0,1037	6,221914967	1320	0,0853	5,120910384
50	0,1080	6,477150054	1429	0,0803	4,820567756
60	0,1047	6,282722513	1439	0,0803	4,820567756
70	0,1056	6,33356791	1440	0,0000	0
80	0,1058	6,349206349	1441	0,0000	0
110	0,1037	6,221914967	1450	0,0000	0
120	0,1064	6,382978723	1500	0,0000	0
150	0,1022	6,132879046	1600	0,0000	0
180	0,1019	6,114130435	1700	0,0000	0

## **Anexo 2**

Figura 1: Gráfico resultante do tratamento dos dados do teste de bombeamento ajustado para o modelo de Aquífero fraturado drenante de Neuman-Whitespooch

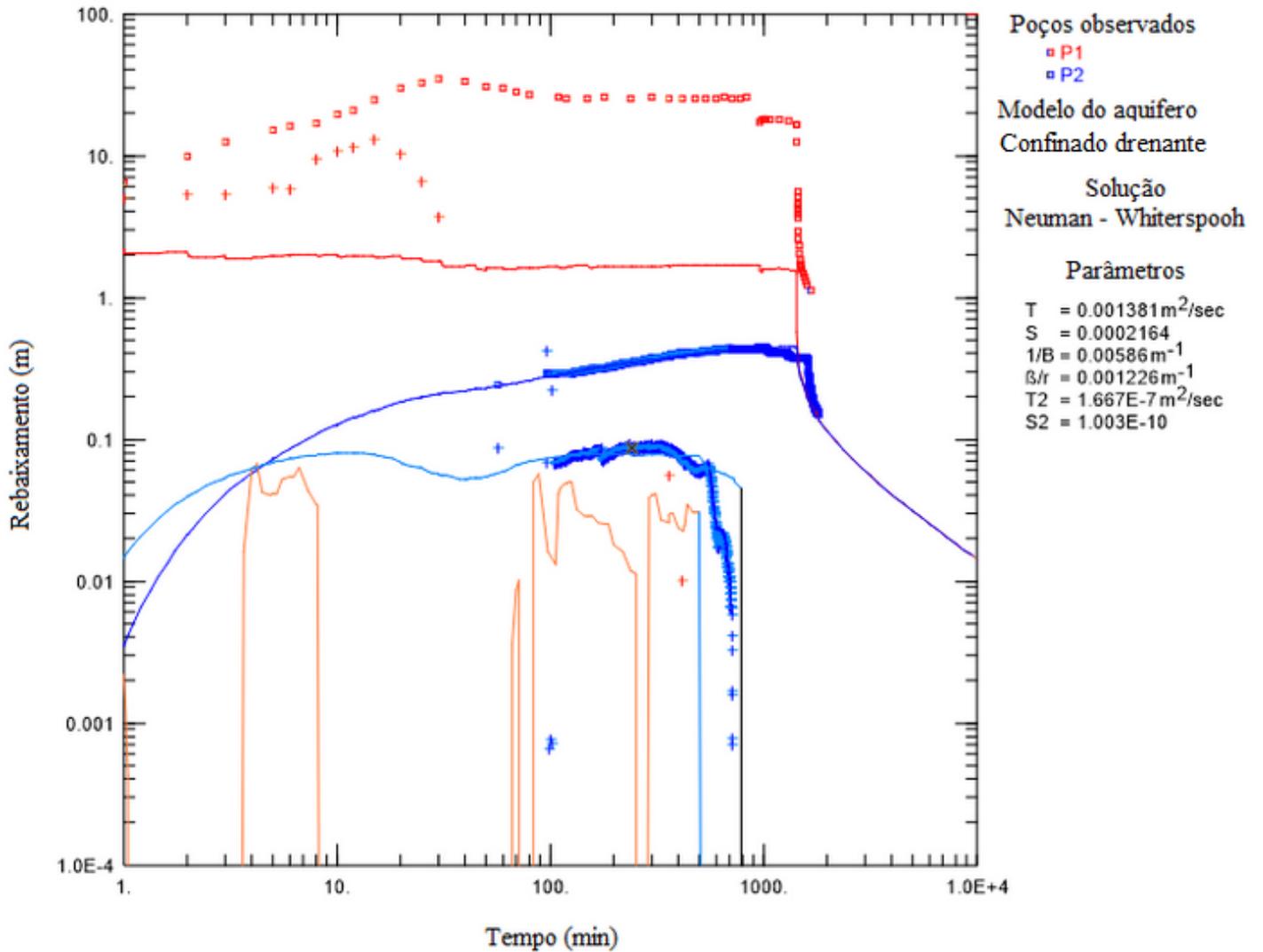


Figura 2: Gráfico resultante do tratamento dos dados do teste de bombeamento ajustado para o modelo de Aquífero fraturado com dupla porosidade, pela solução de Moench (1984)

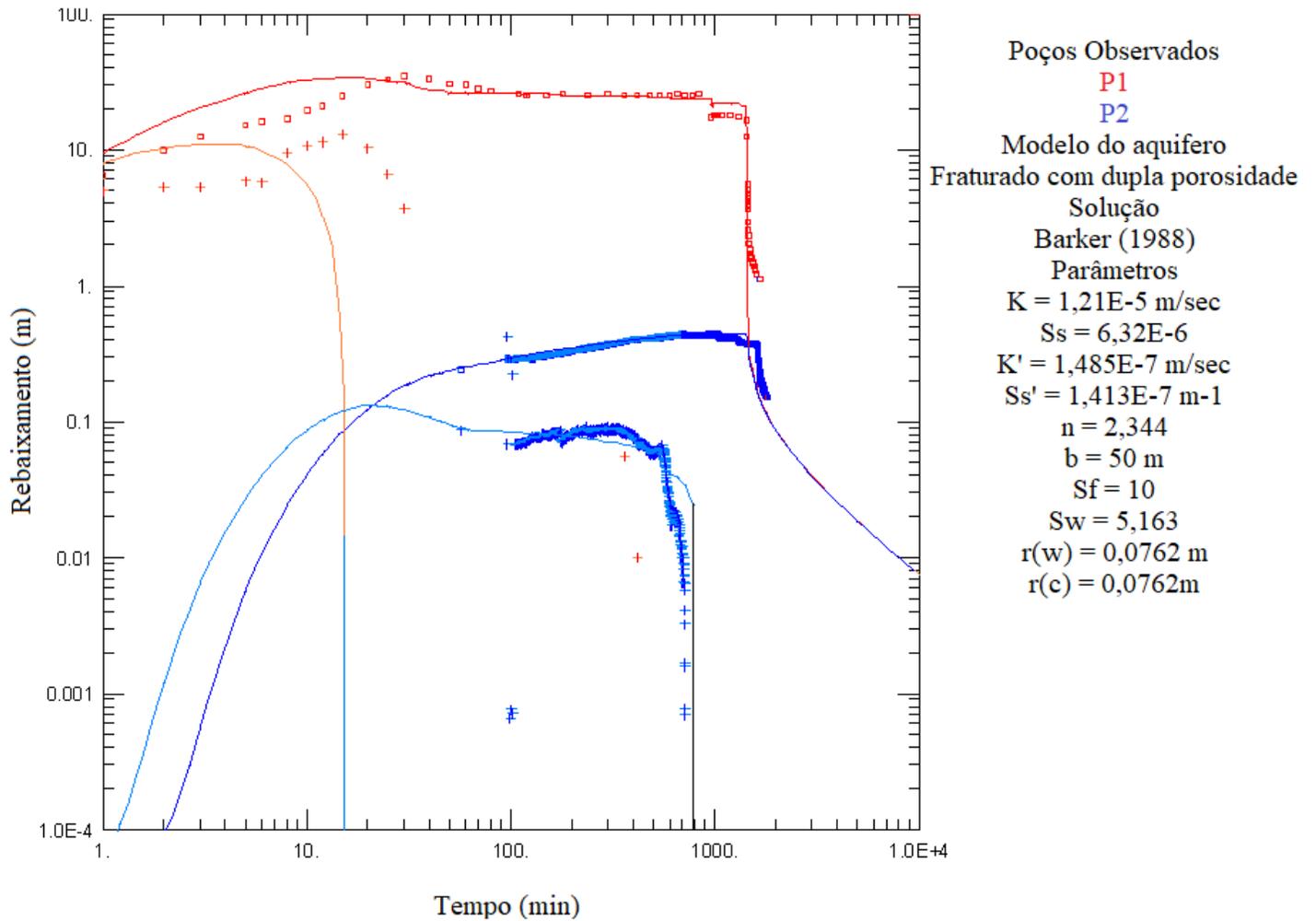


Figura 3: Gráfico resultante do tratamento dos dados do teste de bombeamento ajustado para o modelo de Aquífero confinado drenante, pela solução de Cooley-Case.

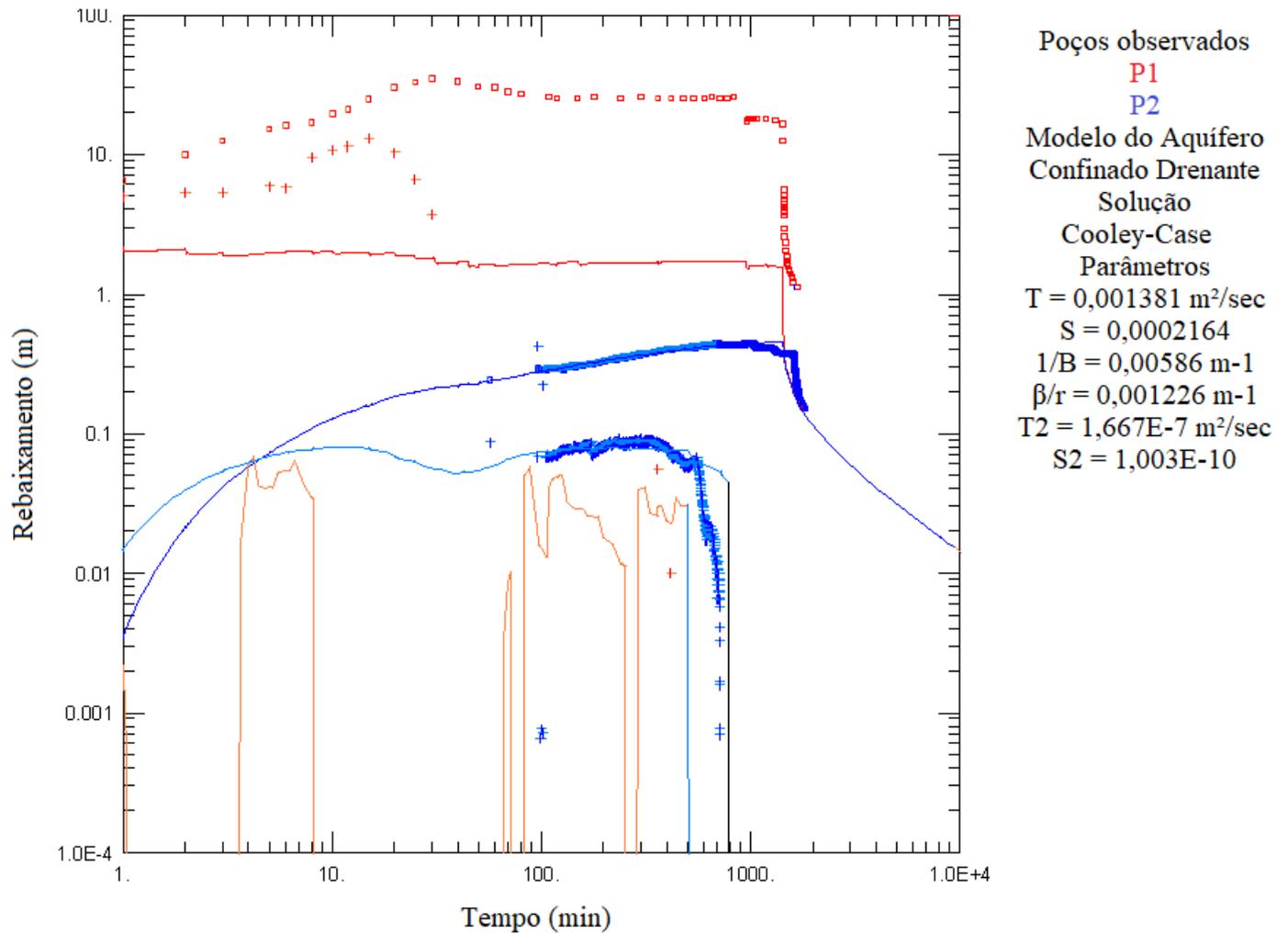


Figura 4: Gráfico resultante do tratamento dos dados do teste de bombeamento ajustado para o modelo de Aquífero confinado drenante, pela solução de Moench - caso 2

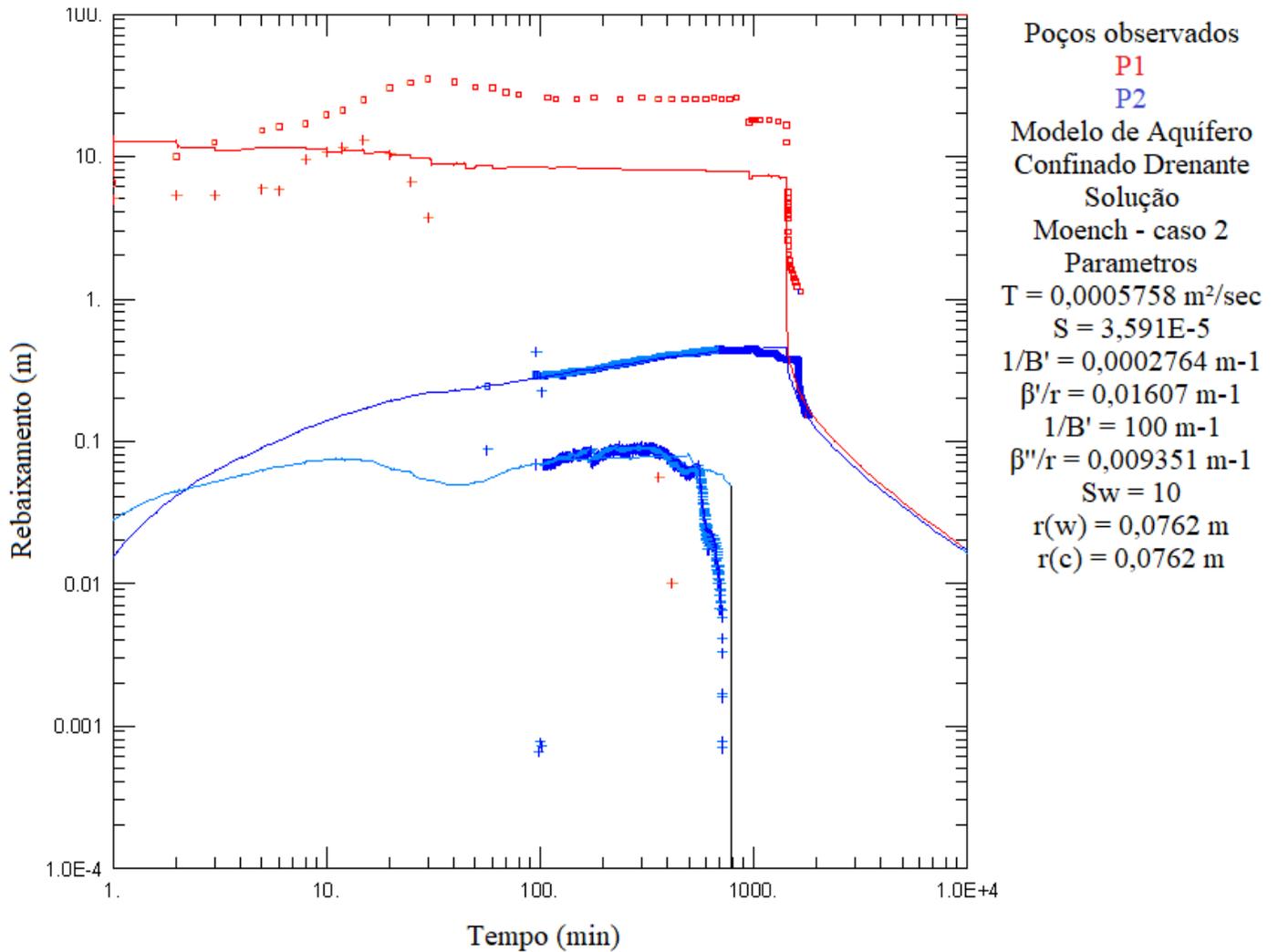
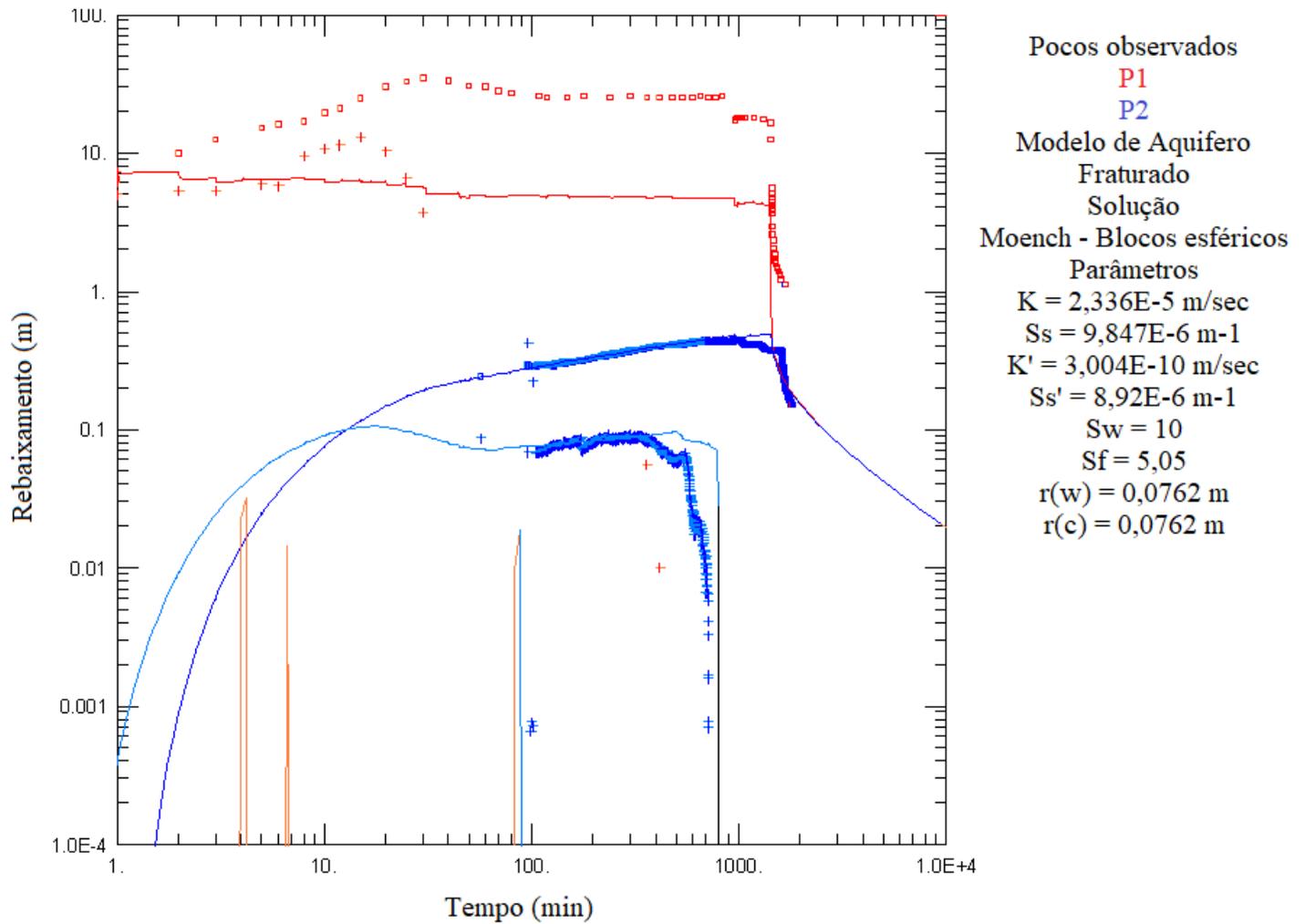


Figura 5: Gráfico resultante do tratamento dos dados do teste de bombeamento ajustado para o modelo de Aquífero fraturado, pela solução de Moench - Blocos esféricos



## **Anexo 3**



Tabela 1: Dados da amostragem hidroquímica dos poços 1 e 2 e da nascente

H2L	Amostra	Temp.	Cond.	pH	Alcalinidade HCO3- CO32- OH-					
No.	Identif.	°C	µS/cm		mg/L	mg/L	mg/L			
	LQ									
234/19	Poço – 1	25	224	7,14	132	-	-			
235/19	Poço – 2	25	334	7,23	214	-	-			
242/19	Nascente - 1	25	155	6,61	87,6	-	-			
H2L	Amostra	F-	Cl-	NO2-	NO3-	SO42-	Acetato	Br -		
No.	Identif.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		
	LQ	0,01	0,01	0,02	0,04	0,02	0,1	0,03		
234/19	Poço – 1	0,18	2,4	< 0,020	2,62	7,15	< 0,10	< 0,030		
235/19	Poço – 2	0,18	2,5	< 0,020	1,64	3,5	< 0,10	< 0,030		
242/19	Nascente - 1	0,13	2,8	< 0,020	< 0,040	6,1	< 0,10	< 0,030		
H2L	Amostra	Li	Na	NH4	K	Al	Ba	Be	Ca	
No.	Identif.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	
	LQ	0,01	0,1	0,05	0,1	0,005	0,001	0,005	0,003	
234/19	Poço – 1	< 0,010	14	< 0,050	2,22	0,006	0,04	< 0,005	26,3	
235/19	Poço – 2	< 0,010	15,5	< 0,050	3,51	< 0,005	0,033	< 0,005	40,8	
242/19	Nascente - 1	< 0,010	20,7	< 0,050	3,82	< 0,005	0,039	< 0,005	10,8	
H2L	Amostra	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn		

No.	Identif.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L		
	<b>LQ</b>	0,005	0,003	0,003	0,004	0,005	0,002	0,001		
234/19	Poço – 1	< 0,005	< 0,003	< 0,003	< 0,004	0,007	5,12	0,007		
235/19	Poço – 2	< 0,005	< 0,003	< 0,003	< 0,004	< 0,005	10,6	0,002		
242/19	Nascente - 1	< 0,005	< 0,003	< 0,003	< 0,004	0,033	3,52	0,009		
<b>H2L</b>	<b>Amostra</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>Pb</b>	<b>Si</b>	<b>Sn</b>	<b>Sr</b>	<b>V</b>	<b>Zn</b>
No.	Identif.	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
	<b>LQ</b>	0,005	0,003	0,005	0,005	0,06	0,005	0,005	0,003	0,005
234/19	Poço – 1	< 0,005	< 0,003	0,025	0,006	20,1	< 0,005	0,13	< 0,003	< 0,005
235/19	Poço – 2	< 0,005	< 0,003	0,021	0,006	18,1	< 0,005	0,19	< 0,003	0,006
242/19	Nascente - 1	< 0,005	< 0,003	0,014	0,007	20,9	< 0,005	0,12	< 0,003	0,035