

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DERIVATIVA E MODELAGEM NUMÉRICA EM UM
AQUÍFERO FRATURADO GRANÍTICO NA REGIÃO DE HYDERABAD, CENTRO-
SUL DA ÍNDIA**

Bruna Novello Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Co-Orientadora: Bárbara Panegassi

Rio Claro (SP)

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

Bruna Novello Fernandes

APLICAÇÃO DA ANÁLISE DERIVATIVA E MODELAGEM NUMÉRICA EM UM
AQUÍFERO FRATURADO GRANÍTICO NA REGIÃO DE HYDERABAD, CENTRO-SUL
DA ÍNDIA

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

2023

F363a	<p>Fernandes, Bruna Novello</p> <p>Aplicação da análise derivativa e modelagem numérica em um aquífero fraturado granítico na região de Hyderabad, centro-sul da Índia / Bruna Novello Fernandes. -- Rio Claro, 2023</p> <p>70 p.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang</p> <p>Coorientadora: Bárbara Panegassi</p> <p>1. Aquífero confinado de dupla porosidade. 2. Análise derivativa de teste de bombeamento. 3. Modelagem numérica de fluxo. 4. Zona de transição. 5. Zona fraturada. I. Título.</p>
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Bruna Novello Fernandes

APLICAÇÃO DA ANÁLISE DERIVATIVA E MODELAGEM NUMÉRICA EM UM
AQUÍFERO FRATURADO GRANÍTICO NA REGIÃO DE HYDERABAD, CENTRO-SUL
DA ÍNDIA

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.

Comissão Examinadora

Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Ms. Eduardo Camargo Meneghel

Caroline Favoreto da Cunha

Rio Claro, 27 de junho de 2023.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

Dedico este trabalho a minha família,
especialmente minha mãe Francine que esteve sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não se tornaria uma realidade sem a infinita disponibilidade e direta mentoria dos profissionais que me guiaram em todos os passos do projeto, mas também sem o apoio e suporte da minha família e amigos eu não seria capaz de chegar onde cheguei.

Primeiramente agradeço pelo apoio da minha família em todos os âmbitos necessários para que eu pudesse me dedicar a faculdade. O apoio da minha mãe foi essencial para que eu chegasse até o fim, assim como o apoio do meu avô Francisco X. Novello, tios Vinícius F. Novello e Lucas F. Novello e tia Livia R. Novello. Em especial agradeço pela força guia que minha avó Márcia R. G. Novello foi em minha vida, sua influência e amor permanecem comigo em todos os momentos.

Agradeço imensamente a Bárbara Panegassi por ter me ajudado em todo o processo deste trabalho, sem sua mentoria não conseguiria ter finalizado. Também agradeço ao Dr. Elias H. Teramoto e ao Dr. Chang Hung Kiang pelo apoio e orientação assim como o pessoal do LEBAC.

As minhas amigas de infância e adolescência que foram essenciais para eu me tornar a pessoa que sou hoje Bheatriz M. Lucas e Raquel dos Santos, foram nelas que eu me apoiei durante tantos anos.

Agradeço as amigas que fiz durante os anos dividindo carona com mulheres incríveis que serviram de suporte quando os dias eram longos e cansativos, Mariana Bapsttella, Eloá R. Sabadin, Natália R. Almeida e Lara R. Braga.

Também agradeço aos amigos que fiz durante meus anos na UNESP e no curso de geologia, Katarine Lacerda, Priscila Figueiredo, Ivan R. Grecchi, Milena Moura e Gilmar Luiza. Sem essas amigas e companheirismo não seria capaz de aproveitar cada segundo deste curso, sem as risadas, brincadeiras e momentos incríveis que serviram de distração em dias difíceis. Não seria quem sou hoje sem o ombro amigo que eles me dispuseram, sem as horas passadas desabafando e sendo acolhida e sem a vasta experiência de vida que nós dividimos.

RESUMO

Aquíferos cristalinos são de crescente importância para grandes centros urbanos por conta da escassez de recursos hídricos e contaminações resultantes do uso excessivo das águas subterrâneas. Os métodos utilizados para estudar o aquífero presente em rochas graníticas da região de *Hyderabad*, no centro sul da Índia, foram a análise derivativa e a modelagem matemática. A modelagem matemática, apesar de ser um método muito utilizado, pode variar em relação ao modelo conceitual adotado. Este trabalho, através do modelo gerado pelo *software* Model Muse e calibrado utilizando dados de rebaixamento obtidos de Rushton e Weller (1985), utilizou o modelo conceitual de duas camadas, uma zona saprolítica e uma zona transicional altamente fraturada. A aplicação do modelo indicou que os resultados simulados foram suficientemente similares aos dados observados para considerar que o modelo conceitual foi eficaz em reproduzir os fluxos subterrâneos da área estudada.

Palavras chave: Aquífero confinado de dupla porosidade. Análise derivativa de teste de bombeamento. Modelagem numérica de fluxo. Zona de transição. Zona fraturada.

ABSTRACT

Crystalline aquifers are of increasing importance for large urban centers due to the scarcity of water resources and contamination resulting from the excessive use of groundwater. The methods used to study the aquifer present in granitic rocks of the Hyderabad region, in south-central India, were derivative analysis and mathematical modeling. Mathematical modeling, despite being a widely used method, may vary in relation to the conceptual model adopted. This study, through the model generated by the Model Muse software and calibrated using drawdown data obtained from Rushton and Weller (1985), used the conceptual model of two layers, a saprolitic zone and a highly fractured transitional zone. The application of the model indicated that the simulated results were sufficiently similar to the observed data to consider that the conceptual model was effective in reproducing the underground flows of the studied area.

Keywords: Double porosity confined aquifer. Pumping test diagnostic plot analyse. Numerical flow modeling. Transition zone. Fractured zone.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.....	18
Figura 2 – Perfil de alteração típico de rochas cristalinas modificado de Acworth (1987). ...	19
Figura 3 – Esquemas representando a formação de juntas na base da zona que está sendo intemperizada (a) Taylor e Eggleton (2001) e (b) Shaw (1997).....	20
Figura 4 – Mecânica de fluxo de águas subterrâneas na região de estudo proposta por K. R. Rushton e J. Weller (1985).....	26
Figura 5 – Disposição do local de estudo sendo os valores em parênteses as profundidades dos poços/piezômetros.	26
Figura 6 – Resultados de campo dos testes de bombeamento, gráfico de rebaixamento (m) por tempo (h).	28
Figura 7 – Divisão e disposição da Índia Peninsular com a região de <i>Hyderabad</i> em destaque.	30
Figura 8 – (a) cráton Dharwar e (b) sequência estratigráfica completa do cráton. Em vermelho destacado está a área de estudo.....	31
Figura 9 – Mapa geológico simplificado do estado de Telangana, Índia.	33
Figura 10 – Modelo conceitual de aquíferos fraturados proposto por autores como Wright, (1992); Taylor e Howard (1999); Maréchal et al. (2004) e Lachassagne (2011).....	34
Figura 11 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade e S – armazenamento.	36
Figura 12 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, Ss – armazenamento específico das fraturas, Ss' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, Sf – fator de efeito das fraturas, Sw – fator de efeito do poço, r(w) – raio do poço e r(c) – raio do revestimento.	38
Figura 13 – Tabela de valores de condutividade hidráulica para rochas cristalinas. Modificado de AQTESOLV.	40
Figura 14 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquífero superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquífero inferior, Sw – fator de efeito do poço, r(w) – raio do poço e r(C) – raio do revestimento do poço.....	41

Figura 15 – Configuração geométrica para (A) blocos ‘slab-shaped’ e (B) blocos ‘sphere-shaped’. Parâmetros: b – abertura média das fissuras, b’ – espessura média dos blocos, K_f – condutividade hidráulica das fraturas, Ss_f – armazenamento específico das fraturas, z – distância do centro de um bloco ‘slab shaped’ até uma fissura, h’(z, f) – carga hidráulica do bloco (z) e da fratura (f), ρ – distância do centro do bloco ‘sphere shaped’ até uma fissura, K_m – condutividade hidráulica do bloco e Ss_m – armazenamento específico do bloco.	43
Figura 16 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K’ – condutividade hidráulica da matriz rochosa, Ss – armazenamento específico das fraturas, Ss’ – armazenamento específico da matriz rochosa, Sw – fator de efeito do poço, Sf – fator de efeito da fratura, r(w) – raio do poço e r(c) – raio do revestimento.	45
Figura 17 – Mesh gerado a partir do modelo conceitual com escala vertical de 5 vezes.....	49
Figura 18 – Distribuição das cargas hidráulicas na condição inicial do modelo nas duas camadas, topo do saprólito e topo da zona fraturada.....	50
Figura 19 – Modelo calibrado demonstrando os valores de condutividade hidráulica (Kx) para as camadas 1 e 2. Elevação vertical de 5 vezes.	51
Figura 20 – Gráficos comparativos entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do poço bombeado T e observacional D1.	52
Figura 21 – Gráfico comparativo entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do poço observacional D2.	53
Figura 22 – Gráfico comparativo entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do piezômetro S1.....	53
Figura 23 – Gráfico comparativo entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do piezômetro S2.....	54
Figura 24 – Gráfico comparativo entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do piezômetro S3.....	54
Figura 25 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K’ – condutividade hidráulica da matriz rochosa, Ss – armazenamento específico das fraturas, Ss’ – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, Sf – fator de efeito das fraturas, Sw – fator de efeito do poço, r(w) – raio do poço e r(c) – raio do revestimento.	55

Figura 26 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, S_f – fator de efeito das fraturas, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.56

Figura 27 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, S_f – fator de efeito das fraturas, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.56

Figura 28 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, S_f – fator de efeito das fraturas, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.57

Figura 29 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, S_f – fator de efeito das fraturas, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.57

Figura 30 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquífero superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquífero inferior, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(C)$ – raio do revestimento do poço.....58

Figura 31 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquífero superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquífero inferior, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(C)$ – raio do revestimento do poço.....58

Figura 32 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquífero superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquífero inferior, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(C)$ – raio do revestimento do poço..... 59

Figura 33 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquífero superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquífero inferior, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(C)$ – raio do revestimento do poço.....59

Figura 34 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquífero superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquífero inferior, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(C)$ – raio do revestimento do poço..... 60

Figura 35 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, S_w – fator de efeito do poço, S_f – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento..... 60

Figura 36 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, S_w – fator de efeito do poço, S_f – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento..... 61

Figura 37 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, S_w – fator de efeito do poço, S_f – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento..... 61

Figura 38 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, S_w – fator de efeito do poço, S_f – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento..... 62

Figura 39 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: **K** – condutividade hidráulica das fraturas, **K'** – condutividade hidráulica da matriz rochosa, **Ss** – armazenamento específico das fraturas, **Ss'** – armazenamento específico da matriz rochosa, **Sw** – fator de efeito do poço, **Sf** – fator de efeito da fratura, **r(w)** – raio do poço e **r(c)** – raio do revestimento.....62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. valores de K obtidos através da solução Cooper-Jacop (1946).	37
Tabela 2. valores de transmissividade (T) encontrados através do ajuste da solução Barker (1988).	39
Tabela 3. Valores de K obtidos através da solução Barker (1988).....	40
Tabela 4. Valores de K obtidos através do terceiro caso da solução Moench (1985).	42
Tabela 5. Valores de transmissividade (T) encontrados através do ajuste da solução Moench (1984).	46
Tabela 6. Valores de K obtidos através da solução Moench (1984).	47

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Localização	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Aquíferos Fraturados	18
2.2	Modelagem Hidrogeológica.....	21
2.3	Modelagem Matemática.....	22
2.4	Testes de Bombeamento e Análise derivativa	24
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Preparação.....	25
3.2	Interpretação dos dados de teste de bombeamento	28
3.3	Modelo Conceitual e Numérico	29
3.3.1	Calibração	29
3.4	Aplicação	29
4	GEOLOGIA REGIONAL.....	29
4.1	Cinturão Peninsular.....	30
4.2	Cráton <i>Dharwar</i>	31
4.2.1	Hidrogeologia.....	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1	Análise da Curva Diagnóstica dos Dados Observados.....	34
5.2	Modelo Conceitual.....	47
5.3	Modelo Matemático	48
5.3.1	Domínio e Discretização do Modelo	48
5.3.2	Condições de Contorno.....	50
5.3.3	Condições Iniciais	50
5.3.4	Calibração	51

5.4	Análise da Curva Diagnóstica dos Dados Simulados	55
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64
	ANEXOS	68
	ANEXO 1 – Dados do teste de bombeamento por Rushton e Weller (1985) poços T, D1 e D2.....	68
	ANEXO 2 – Dados do teste de bombeamento por Rushton e Weller (1985) piezômetros S1, S2 e S3.....	70

1 INTRODUÇÃO

Há uma real e crescente necessidade de novas tecnologias para captação de recursos hídricos na sociedade brasileira atualmente. As mudanças climáticas começam a dificultar cada vez mais o dia a dia dos seres humanos. Mesmo em um país como o Brasil, que detém a maior parte das águas subterrâneas disponíveis no planeta, diversas regiões enfrentam extensivas secas que duram meses, até anos. Isso mostra que estudar e compreender aquíferos deve ser uma tarefa contínua para que seja possível gerenciar os recursos hídricos adequadamente.

Além das informações ajudarem a entender como esses aquíferos se comportam e orientar a localização de poços artesianos, também são válidas para compreender como esses aquíferos podem ser contaminados. Contaminação de aquíferos é um problema muito presente em áreas urbanas, especialmente em locais tão populosos como a Índia, e seu monitoramento é necessário para que a sociedade possa manter seus recursos intactos ou remediar casos já existentes.

Entre os diferentes tipos de aquíferos – formação geológica que contém água e permite que quantidades significativas dessa água se movimentem no seu interior em condições naturais – os aquíferos fraturados são possivelmente os mais complexos de se estudar. Estão localizados em rochas ígneas ou metamórficas e são dependentes da quantidade e disposição das fraturas em ditas rochas. São aquíferos com pouca quantidade de água, porém, podendo estar localizados em regiões estratégicas para diferentes sociedades.

Devido a essa complexidade, investir em métodos de investigação destes aquíferos se mostra como o principal problema para que avanços sejam feitos em relação a captação de água e em relação a soluções para possíveis contaminantes.

Com isso em mente, estudar aquíferos fraturados ao redor do mundo, se mostra muito importante. Uma das formas mais utilizadas são os testes de bombeamento que consistem em bombeamento de um poço durante um intervalo de tempo e o registro da evolução dos rebaixamentos do nível de água, esses ensaios determinam os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos e a vazão dos poços.

Este trabalho utiliza como base o artigo '*Response to Pumping of a Weathered – Fractured Granite Aquifer* – K.R. Rushton e Jane Weller (1985)', no qual é investigado, através de um modelo numérico, a interação entre as duas camadas que ditam o comportamento de aquíferos fraturados uma zona intemperizada e a zona fraturada. Utilizando os resultados para possivelmente entender o comportamento a longo prazo de poços artesianos localizados neste aquífero.

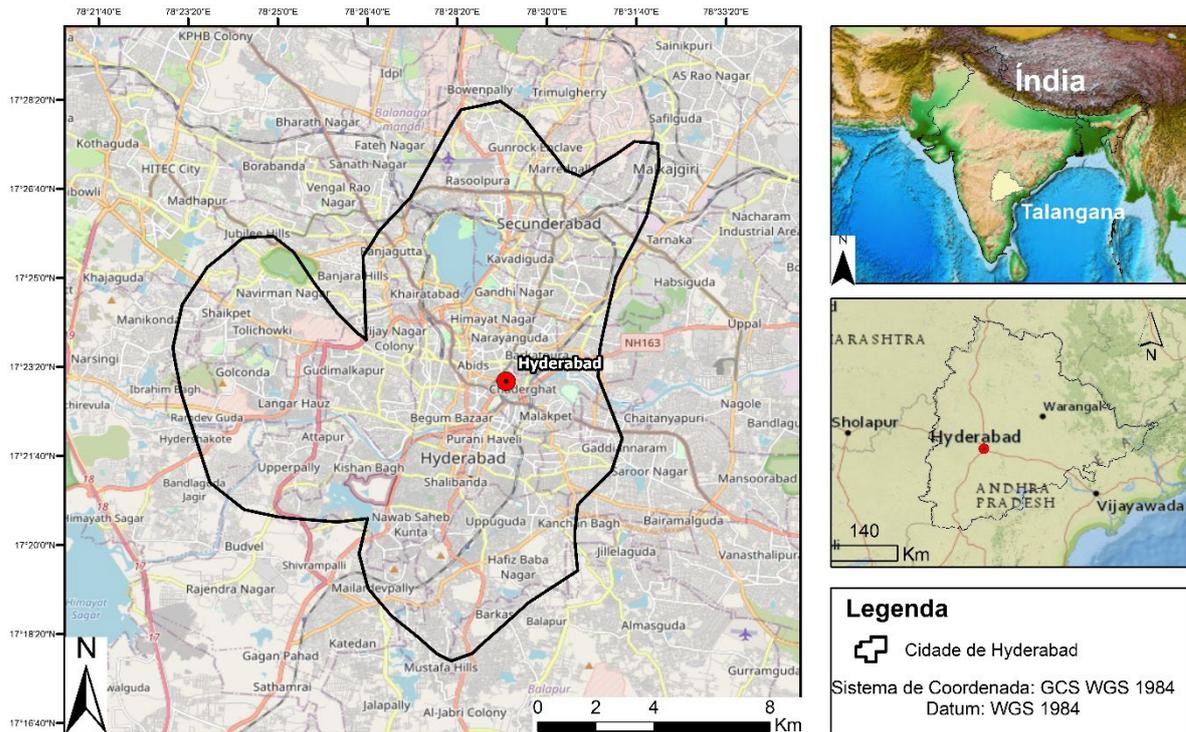
Com base na interpretação deste artigo e de seus resultados, o objetivo do presente estudo é analisar o comportamento do aquífero granítico presente na região de *Hyderabad* na Índia Central através da confecção de um modelo numérico sintético da região, da análise derivativa dos testes de bombeamento realizados pelos autores e da análise derivativa dos resultados calibrados pelo modelo.

1.1 Justificativa

Aquíferos fraturados muitas vezes estão localizados em regiões que necessitam de água ou que podem se beneficiar de novas descobertas que ajudem na demanda de poços artesianos para moradores locais. Então entendê-los, mesmo que de forma teórica, e que possa ser transferida para a realidade do Brasil, é essencial e é onde este trabalho se encaixa. Compreender o sistema de funcionamento desses aquíferos e como essas zonas se comportam, poder interpretar o modelo numérico apresentado pelo artigo e transferir os conhecimentos para a realidade dos aquíferos fraturados brasileiros é, essencialmente, o objetivo deste trabalho.

1.2 Localização

Este trabalho é feito com base em um artigo publicado em 1985 por K.R. Rushton e Jane Weller, sobre o comportamento do aquífero fraturado em rochas graníticas da Bacia Hidrográfica *Dulapally*, na região de *Hyderabad* em *Telangana*, Índia (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.**Mapa de Localização da Área de Estudo**

Fonte – Elaborado pela própria autora.

Esta bacia está localizada no centro-sul da Índia, geologicamente inserida em um contexto de granitos em um cráton que compõem o cinturão que engloba boa parte do território indiano chamado *Peninsular Shield*, um cinturão Arqueano-Paleoproterozoico.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aquíferos Fraturados

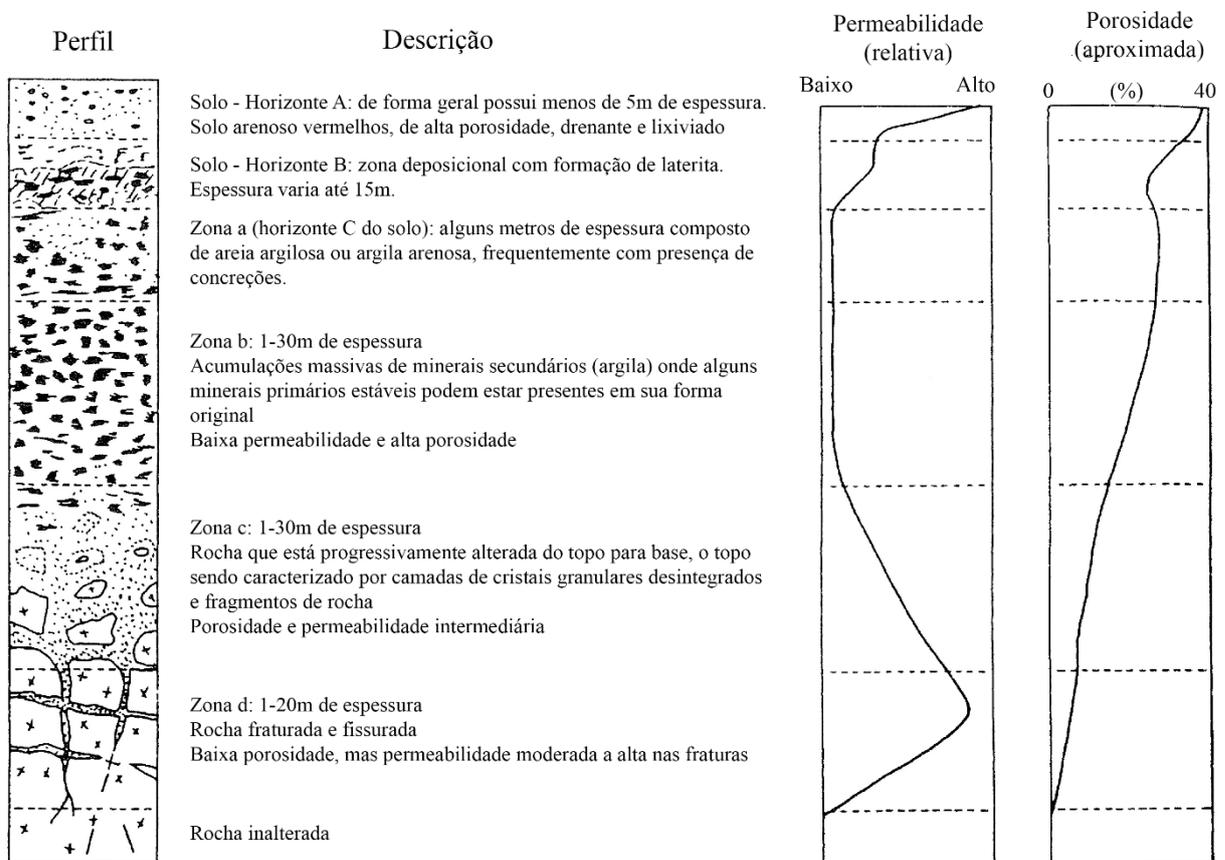
Domenico e Schwartz (1990) definem que, em rochas de baixa porosidade, como é o caso das rochas ígneas, o fluxo de água subterrânea depende das características das fraturas presentes nessas rochas, como densidade, conectividade, abertura e porosidade. Essas características são regidas por propriedades distintas, o que aumenta sua singularidade.

Em um aquífero fraturado, onde a água percola através das fraturas presentes, um dos principais assuntos relevantes ao estudo desses sistemas são as próprias fraturas. Quando se trata do surgimento de fraturas secundárias, é possível classificar sua existência e formação em três categorias: fraturas que surgem através do mecanismo de descompressão das rochas, fraturas estruturais geradas quando há movimentos tectônicos que afetam o corpo rochoso e fraturas que surgem através do processo de intemperismo.

O conhecimento geral sobre as fraturas que compõe esse tipo de aquífero é de que sua formação e possíveis reativações ocorrem de acordo com as duas primeiras origens mencionadas: tectônicas ou por descompressão. Entretanto, estudos como Lachassagne (2011), apresentam uma alternativa para a formação das fraturas secundárias.

Estudos e perfurações de poços em aquíferos fraturados têm demonstrado consistentemente a presença de uma zona fraturada nos primeiros metros do corpo rochoso, logo abaixo da zona intemperizada ou zona saprolítica (BISCALDI, 1968; ACWORTH, 1987; GUIRAUD *et al.*, 1990; WRIGHT, 1992; TAYLOR E HOWARD, 1999, 2000). Na Figura 2, pode-se observado típico perfil de alteração de rochas cristalinas.

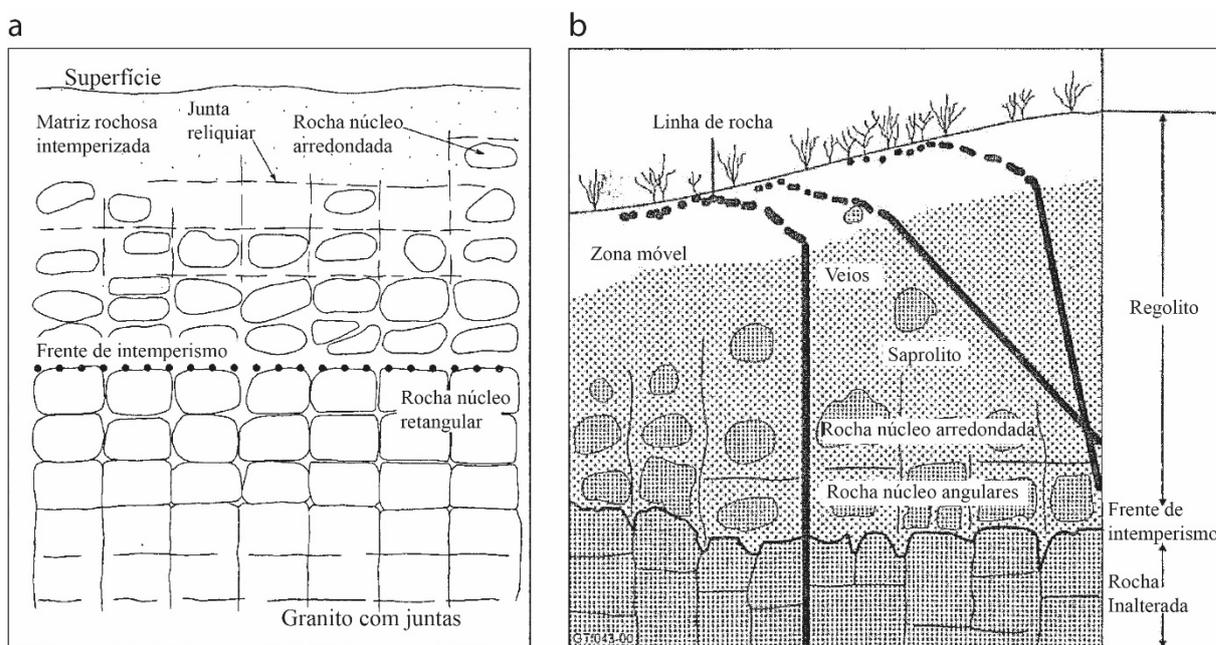
Figura 2 – Perfil de alteração típico de rochas cristalinas modificado de Acworth (1987).



Fonte – Adaptado de Acworth (1987)

As fraturas típicas de origem tectônica geralmente são verticais em escala de campo, e sua verticalidade pode ser explicada pelos movimentos tectônicos. No entanto, ao longo dos anos, estudos em diversos países (JAHNS, 1943; MABEE *et al.*, 2002; MANDL, 2005; CARLSSON E OLSSON, 1980/1981; TWIDALE, 1982; OLLIER, 1988; HILL *et al.*, 1995; TAYLOR E EGGLETON, 2001; WRIGHT, 1992; CHILTON E FOSTER, 1995; SHAW, 1997) registraram fraturas, principalmente em granitos, que se apresentam horizontais ou sub-horizontais (Figura 3), mas sem explicações detalhadas sobre sua gênese. Instintivamente, é possível observar que fraturas sub-horizontais têm maior capacidade de retenção de água em comparação com fraturas verticais ou sub-verticais.

Figura 3 – Esquemas representando a formação de juntas na base da zona que está sendo intemperizada (a) Taylor e Eggleton (2001) e (b) Shaw (1997).



Fonte – Modificado de Lachassagne (2011).

Com base na análise de diversos estudos, Lachassagne (2011) sintetiza que é muito improvável que o processo de descompressão seja responsável pela formação dessas fraturas.

Através do compilado de dados de observados durante dez anos em diversos países, Lachassagne (2011) apresenta um modelo conceitual que considera a possibilidade de as fraturas sub-horizontais serem formadas pelo processo de paleo intemperismo. O estudo propõe que a zona fraturada, localizada logo abaixo da camada saprolítica, faz parte do perfil de alteração da rocha. Isso implicaria em um aquífero que se forma através da interação entre as duas camadas, o saprólito e a camada fraturada.

Para que um perfil de alteração fique espesso e aumente as chances de uma sequência completa, é necessário um longo período de tempo, da ordem de milhões de anos, junto com uma região geologicamente estável e de temperaturas e chuvas recorrentes para que favoreçam o intemperismo da rocha. A zona fraturada resultante do processo de intemperismo possui fraturas geradas pela dilatação de alguns minerais à medida que sofrem alteração, como é o caso das biotitas nos granitos (TIEH *et al.*, 1980; MAC FARLANE, 1992; HILL, 1996; WYNS *et al.*, 2003).

Essencialmente, as fraturas sub-horizontais ocorreriam por conta do esforço aplicado pela expansão dos minerais que constituem a rocha durante o processo de alteração. O estresse horizontal aumenta durante o processo de intemperismo, enquanto o estresse vertical aumenta até que componente litostático seja compensado, gerando expansão. As tensões resultantes fazem com que o componente menor (σ_3) seja vertical, enquanto os maiores (σ_1 e σ_2) sejam horizontais. Quando o limite elástico da rocha é atingido, aparecem rachaduras (WYNS *et al.*, 2004; LACHASSAGNE, 2011). Em granitos, essas rachaduras são perpendiculares ao menor esforço (σ_3), resultando em juntas sub-horizontais.

2.2 Modelagem Hidrogeológica

Modelos hidrogeológicos, de acordo com Wang e Anderson (1982), são úteis para demonstrar uma versão mais simples e palpável da realidade dos aquíferos. A principal vantagem é o poder de simular situações diversas que um aquífero possa enfrentar de uma forma mais fácil de se estudar e interpretar (WANG E ANDERSON, 1982).

Ainda segundo Wang e Anderson (1982) há três tipos de modelos hidrogeológicos que possuem vantagens e limitações: (1) modelo tanque de areia, (2) modelo analógico e (3) modelo matemático.

Modelos tanque de areia consiste em um modelo físico em que é preenchido um tanque com material poroso e assim manipulá-lo para se adequar ao comportamento de um aquífero. O problema se encontra na escala destes modelos, são modelos de escala reduzida que podem gerar resultados que precisarão ser adaptados quando interpretados em relação a realidade (PRICKET, 1975 *apud* WANG E ANDERSON, 1982).

A segunda categoria, modelos analógicos, partem da associação entre fenômenos do aquífero e fenômenos governados por leis físicas. O fluxo da água seria governado por equações que se assemelham às que governam o fluxo de eletricidade por um condutor (WANG E ANDERSON, 1982).

E por fim os modelos matemáticos. Modelos matemáticos são usados desde o final do século XIX e se apoia em um conjunto de equações que são conhecidas por governar o fluxo de água subterrânea (WANG E ANDERSON, 1982).

2.3 Modelagem Matemática

Quanto mais próximos da realidade, mais os modelos matemáticos se tornam confiáveis. Modelos matemáticos para fluxo de água subterrânea podem ser analíticos ou numéricos e representam a distribuição de carga hidráulica no espaço e no caso de modelos transientes, também a distribuição da carga no tempo. (ANDERSON *et al.*, 2015).

Modelos analíticos são menos complexos, exigindo que o modelo conceitual seja muito simplificado para que o problema seja resolvido. O resultado se dá por meio de uma equação com uma variável dependente no espaço e possivelmente no tempo. Problemas mais simples podem ser resolvidos utilizando calculadora manual ou, no caso de problemas mais complexos, com uso de planilhas, programas de computador ou software especializado. No entanto, por ser um modelo que tende a favorecer sistemas mais simples, raramente envolvem tridimensionalidade, heterogeneidade ou geometrias mais realistas e complexas (ANDERSON *et al.*, 2015). Apesar disso, ainda é um método válido que pode ser utilizado como uma etapa na decodificação de sistemas numéricos mais complexos ou para verificar se a programação do modelo numérico está sendo feita corretamente (ANDERSON *et al.*, 2015).

Em contrapartida, modelos numéricos são geralmente baseados em diferença finita (FD – *finite difference*) ou no método de elemento finito (FE – *finite element*). Permitem representar o fluxo de água subterrânea tanto no estado estacionário quanto no estado transiente, em três dimensões, em meios heterogêneos e com limites complexos, além de uma rede de fontes (ANDERSON *et al.*, 2015).

Modelos, por mais avançados que sejam, nunca irão representar exatamente a complexa realidade da natureza e do mundo real. Portanto, as simulações podem ser comparadas com a ciência das previsões meteorológicas. As previsões são uma combinação de conjuntos de dados, representações físicas da atmosfera, meteorologia e imagens de satélite, é um método muito avançado e tecnológico, mas ainda sim resultam em probabilidades que muitas vezes não chegam a se tornarem reais. Também os modelos numéricos de águas subterrâneas devem ser tratados com cautela e esperar incertezas ao longo do caminho (ANDERSON *et al.*, 2015).

Modelos numéricos se tornaram o principal meio utilizado para representar os aquíferos hoje em dia, são modelos que permitem a complexidade das condições reais que descrevem um aquífero como o tipo de fluxo se é estacionário ou transiente, se o meio é heterogêneo, condições de contorno diversas, podendo ser em três dimensões assim aumentado a confiabilidade de seus resultados (ANDERSON *et al.*, 2015; SPITZ E MORENO, 1996).

Esse modelo é a junção da representação matemática – a descrição dos sistemas hidrogeológicos – e o código numérico computacional que é o programa de computador utilizado para processar os dados e resolver as equações que descrevem os processos pelos quais a água passa em subsuperfície (ANDERSON *et al.*, 2015).

Modelos matemáticos em geral consistem em uma equação governante, condições de contorno que especificam as cargas hidráulicas ou fluxo ao longo dos limites e as condições iniciais das cargas já no início da simulação (ANDERSON *et al.*, 2015).

Equações governantes são derivadas a partir de dois princípios: conservação de massa, que diz que a água não é criada ou destruída, apenas mantida; e pela Lei de Darcy, que diz que a água flui de um local com maior potencial em direção a um local com baixo potencial.

As condições de contorno são componentes importantes para a definição do modelo conceitual e posteriormente para sua transcrição em modelo matemático numérico. Influenciam indiretamente as direções e comportamentos do fluxo em modelos estacionários e transientes. Os contornos podem incluir recursos hidráulicos como divisões das águas em subsuperfície e características físicas como corpos de águas em superfície como rios e rochas que sejam impermeáveis. Podem ser identificados a partir de diversos mapas como potenciométricos, topográficos e geológicos tanto regionais quanto locais (ANDERSON *et al.*, 2015).

Matematicamente as condições de contorno estão divididas em três categorias:

Tipo I: Condição de carga hidráulica especificada (de Dirichlet) – onde a carga ao longo do limite é definida por um valor conhecido. As cargas, nesse contorno, podem variar com o espaço. Um caso especial desse contorno é o contorno de carga constante, onde as cargas ao longo do limite são definidas com o mesmo valor (ANDERSON *et al.*, 2015).

Tipo II: Contorno de fluxo especificado (de Neumann) – O fluxo ao longo de um limite é especificado, podendo ser nulo ou não. Não é nulo quando é possível determinar seu valor através da carga hidráulica. Quando o fluxo ao longo de um limite é nulo, chama-se não-fluxo (ANDERSON *et al.*, 2015; SPITZ E MORENO, 1996).

Tipo III: Condição dependente da carga hidráulica (de Cauchy) – é onde o fluxo é calculado a partir da lei de Darcy, usando um gradiente encontrado, por exemplo, a diferença entre uma carga hidráulica específica fora do contorno e a carga localizada no contorno e mais próximo a ele. Também chamada de mista por envolver as condições de Tipo I e Tipo II (ANDERSON *et al.*, 2015).

As condições descritas aqui são as condições hidráulicas presentes ao longo do perímetro, da base e do topo da área de estudo, onde o problema se localiza.

A condição de contorno de Tipo I ocorre quando corpos de água superficiais interagem livremente com o aquífero. A condição de contorno Tipo III é usada para representar o escoamento entre corpos de água superficiais e o aquífero, dependendo da diferença do nível da água de ambos (SPITZ E MORENO, 1996).

E por fim as condições iniciais que são as cargas hidráulicas gerais para todo o modelo no início da simulação transiente, afetando os resultados diretamente (ANDERSON *et al.*, 2015).

Há um fluxo de trabalho para a modelagem matemática, uma forma de gerar um guia para que todas as etapas de um modelo sejam efetuadas, chamado de Protocolos de Aplicação de Modelos Matemáticos (PAMMs). Anderson *et al.* (2015) dividem esse fluxo em: (1) definição do propósito do modelo, (2) modelo conceitual, (3) seleção do modelo numérico e código computacional, (4) construção do modelo, (5) calibração, (6) simulações de previsões, (7) análise de incerteza, (8) apresentação dos resultados e (9) revisão e atualização do modelo. Sendo 1, 2, 3 e 4 períodos de preparação, 5 período de calibração e 6, 7, 8 e 9 períodos de aplicação.

2.4 Testes de Bombeamento e Análise derivativa

Testes de bombeamento são a forma mais amplamente utilizada para se obter as características hidráulicas de um ou mais poços, assim permite-se extrapolar o conjunto de características obtidas para a caracterização do aquífero como um todo. O processo consiste em bombear um poço e registrar a resposta do aquífero. Através das equações de fluxo, então, é possível obter suas propriedades hidráulicas (RENARD *et al.*, 2008).

Ao longo das décadas em que o teste de bombeamento se torna popular e padrão, houveram diversos métodos de interpretação dos dados variando entre mais simples a mais robustos. O método de análise derivativa, demonstrado primeiramente por Chow (1952), consiste na análise da curva de rebaixamento comum em comparação com sua curva derivada logarítmica (RENARD *et al.*, 2008). A análise derivativa se mostra vantajosa por ser mais sensível as variações dos dados obtidos pelo teste de bombeamento, sendo possível extrapolar comportamentos mais específicos do aquífero e assim auxiliar na construção de um modelo conceitual mais preciso (BOURDET *et al.*, 1989).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Preparação

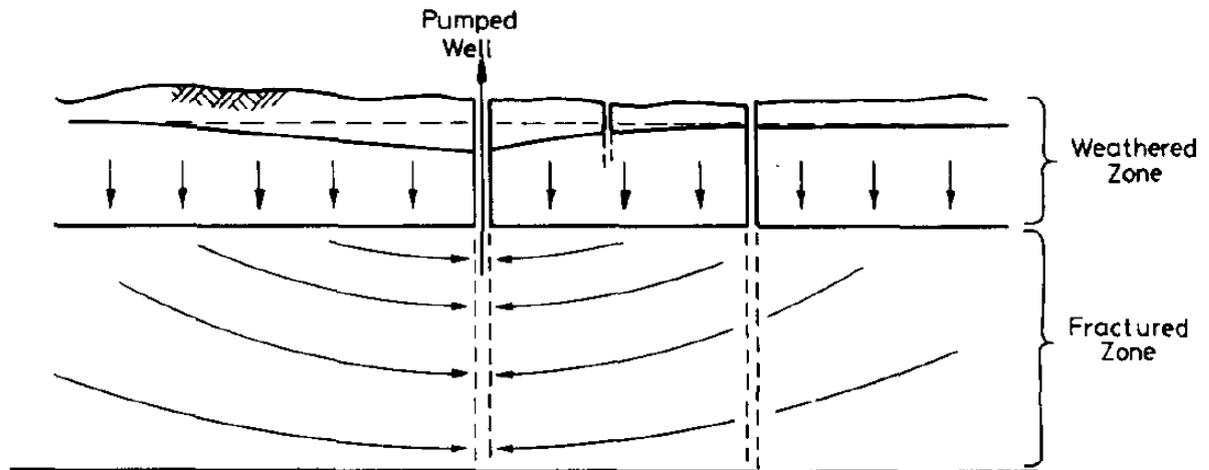
A etapa de preparação começa com uma extensa pesquisa bibliográfica, que envolve tanto a região de estudo quanto os assuntos que serão abordados no trabalho, como a análise derivativa e a modelagem hidrogeológica, assim como os *softwares* disponíveis. A pesquisa bibliográfica inicial é a de reconhecimento geológico da região para a familiarização com os aspectos que envolvem uma pesquisa hidrogeológica.

Este trabalho teve como base os resultados obtidos pelo artigo *Response to Pumping of a Weathered Fractured Granite Aquifer* de K. R. Rushton e J. Weller, publicado em 1985 no *Journal of Hydrology*. O artigo teve como objetivo obter conhecimento sobre os mecanismos de fluxo no sistema duplo do aquífero granítico na região de *Hyderabad*, na Índia, a fim de desenvolver um modelo que auxiliasse na compreensão da interação entre a zona intemperizada e a zona fraturada.

A bacia *Dulapally* é descrita pelos autores como um aquífero granítico com comportamento típico, no qual ocorre uma camada intemperizada de 10 metros que sobrepõe uma zona de 20 metros contendo extensas fraturas. Poços utilizados na região para irrigação, registram um tempo de recuperação muito lento após bombeamento, podendo durar dias. Isso indica que a condutividade hidráulica da zona fraturada é baixa (RUSHTON E WELLER, 1985).

O artigo sugere uma direção simplificada do fluxo ilustrada na Figura 4, porém o comportamento real é governado por: pela taxa de descarga, Q ; condutividade hidráulica radial da zona fraturada; condutividade hidráulica vertical da zona fraturada; coeficiente de armazenamento confinado da zona fraturada; condutividade hidráulica radial da zona intemperizada; condutividade hidráulica vertical da zona intemperizada e o rendimento específico da zona intemperizada (RUSHTON E WELLER, 1985).

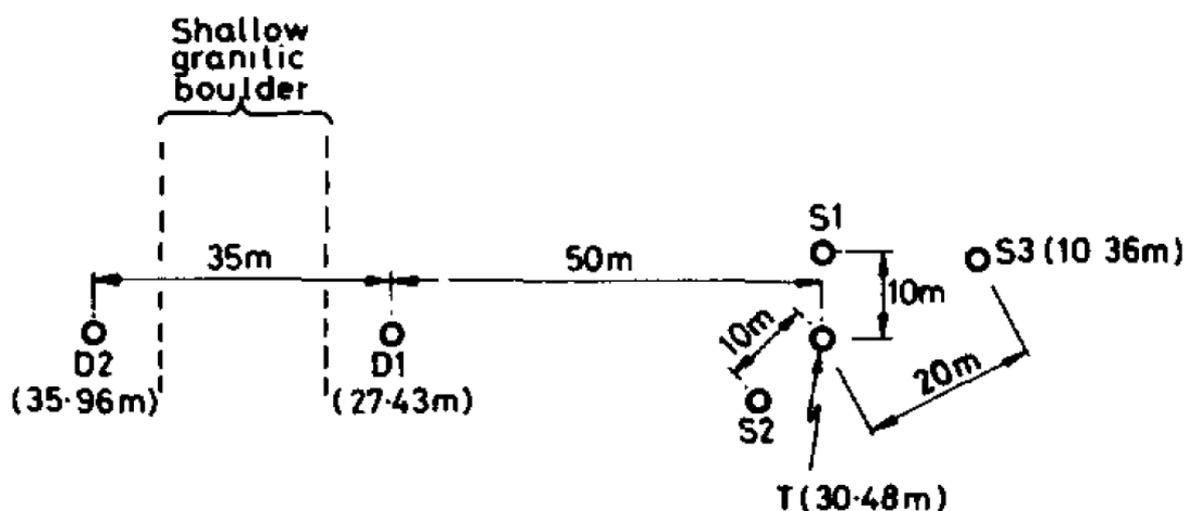
Figura 4 – Mecânica de fluxo de águas subterrâneas na região de estudo proposta por K. R. Rushton e J. Weller (1985).



Fonte – Modificado de Rushton e Weller (1985).

Não é possível obter medidas diretas desses parâmetros, isso é feito com a ajuda de uma série de testes de bombeamentos. Os autores utilizaram dados de testes de bombeamento obtidos através do bombeamento do poço T, da observação dos poços D1 e D2 que se encontravam a 50 e 85 metros de distância do poço T respectivamente e de três piezômetros que penetram apenas a zona intemperizada: S1 e S2 a 10 metros do poço T e S3 a 20 metros do poço T. É possível observar a disposição dos poços na Figura 5.

Figura 5 – Disposição do local de estudo sendo os valores em parênteses as profundidades dos poços/piezômetros.



Fonte – Modificado de Rushton e Weller (1985).

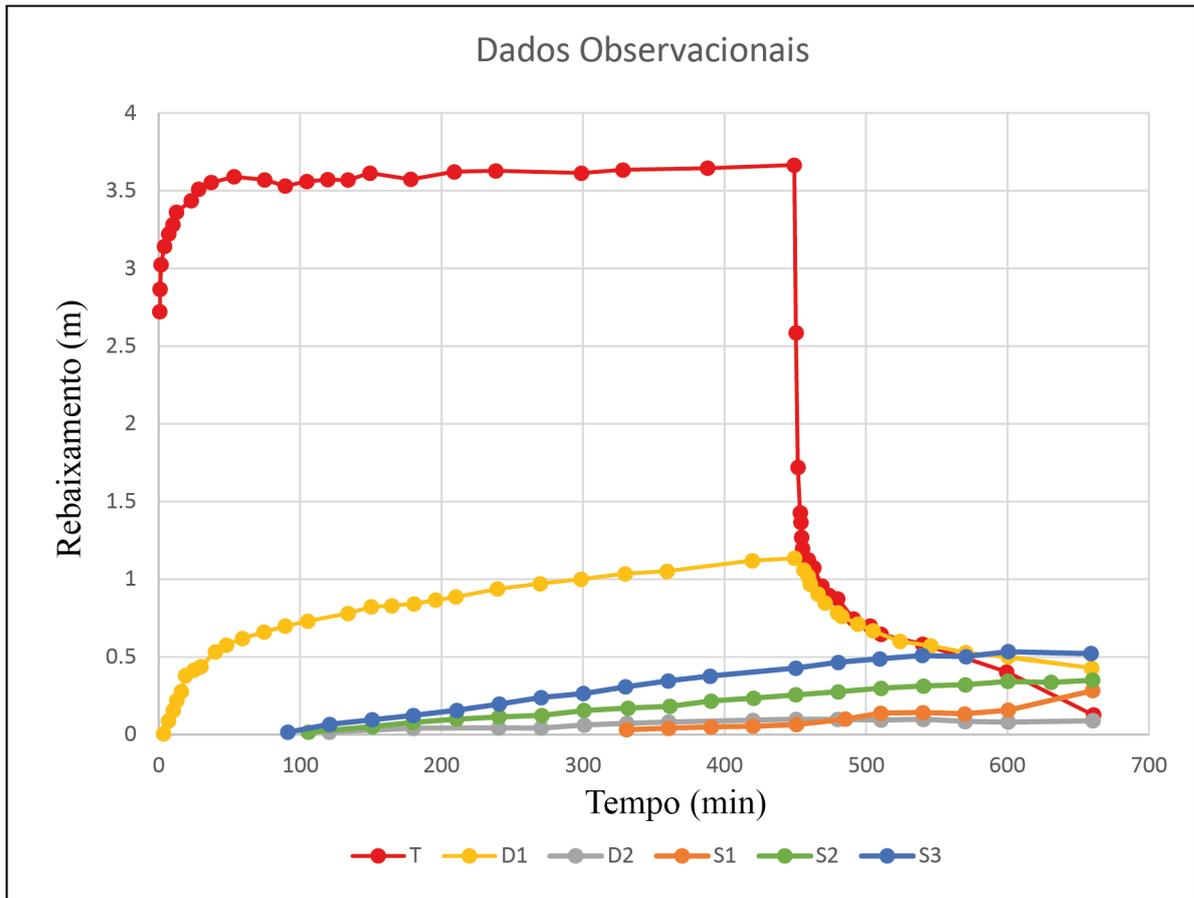
O teste de bombeamento foi feito por 7 horas e meia com uma taxa de descarga de 288m³ por dia sendo que as taxas de rebaixamento foram registradas durante o tempo de bombeamento e por mais 4 horas na fase de recuperação do aquífero, então resultando em um total de 11 horas e meia. Análise dos Testes de Bombeamento Rushton E Weller (1985)

Após os testes de bombeamento Rushton E Weller (1985) plotam os resultados e obtém as curvas de rebaixamento (Figura 6) e a partir deste resultado deduzem:

O nível da água no poço bombeado T cai rapidamente durante os primeiros minutos de teste e então permanece em um valor constante, quando a bomba é desligada acontece uma recuperação relativamente rápida. O poço observacional D1 demonstra que a carga hidráulica na zona fraturada em 50 metros de distância do poço T cai rapidamente durante o bombeamento e se recupera bem devagar quando a bomba é desligada. O rebaixamento máximo é perto de 1/3 do rebaixamento do poço T e após 3 horas e meia a recuperação atinge 63%.

Poço observacional D2 que se encontra a 85 metros de distância do poço T responde muito pouco ao teste, um mapeamento geofísico superficial indica a presença de um matacão entre os poços D1 e D2. Isso resulta em uma transmissividade mais baixa na zona fraturada o que serve de isolamento para o poço D2. Por fim os piezômetros S1, S2 e S3 que estão penetrando apenas a zona intemperizada demonstram comportamentos similares. Não há rebaixamento durante a primeira hora, mas em seguida o rebaixamento se inicia de forma constante.

Figura 6 – Resultados de campo dos testes de bombeamento, gráfico de rebaixamento (m) por tempo (h).



Fonte – Modificado de Rushton e Weller (1985).

Com base nos resultados de rebaixamento de cada poço e piezômetro (Anexo 1 e 2 respectivamente) foi possível compilar tabelas com os valores que então foram usados neste presente trabalho para a interpretação mais a fundo através da análise derivativa através do *software* AQTESOLV.

3.2 Interpretação dos dados de teste de bombeamento

Nesta etapa foram utilizadas as tabelas de resultados de Rushton e Weller (1985) para obter a curva diagnóstica dos dados observados para cada poço e piezômetro. Com os resultados obtidos foi possível nortear a elaboração do modelo conceitual para gerar o modelo matemático através do *software* ModelMuse.

3.3 Modelo Conceitual e Numérico

Posteriormente foi feito então um modelo sintético do aquífero utilizando o *software* Model Muse, em específico o MODFLOW 5, para a modelagem do aquífero através dos dados do artigo original. Por conta da falta de informações específicas acerca da topografia e localização exata do poço bombeado e dos poços de observação, foi optado por fazer um modelo sintético, um modelo simplificado, teórico, que servirá para compreender melhor o aquífero, mas não se mostra tão sofisticado.

Com o modelo pronto então são adicionadas as informações das tabelas nos Anexos 1 e 2 em cada poço e piezômetro para gerar o rodar o modelo e obter o resultado inicial. Quando essas etapas estão concluídas então o modelo foi calibrado ajustando os parâmetros.

3.3.1 Calibração

Com o modelo pronto seus parâmetros serão ajustados para que os dados obtidos dos poços observados sejam parecidos com os dados obtidos da simulação. A calibração envolve ajustar os parâmetros para que essencialmente ambas as curvas de rebaixamento, real e simulada, estejam de acordo.

3.4 Aplicação

Quando os resultados do modelo estão calibrados então é possível aplica-los no *software* AQTESOLV (DUFFIELD, 2007) para fazer a análise derivativa das curvas de rebaixamento e comparar os resultados com os testes de bombeamento iniciais. Neste momento é possível testar qual solução se encaixará melhor nos dados observados e simulados do aquífero através da manipulação dos parâmetros hidrodinâmicos regentes da solução.

4 GEOLOGIA REGIONAL

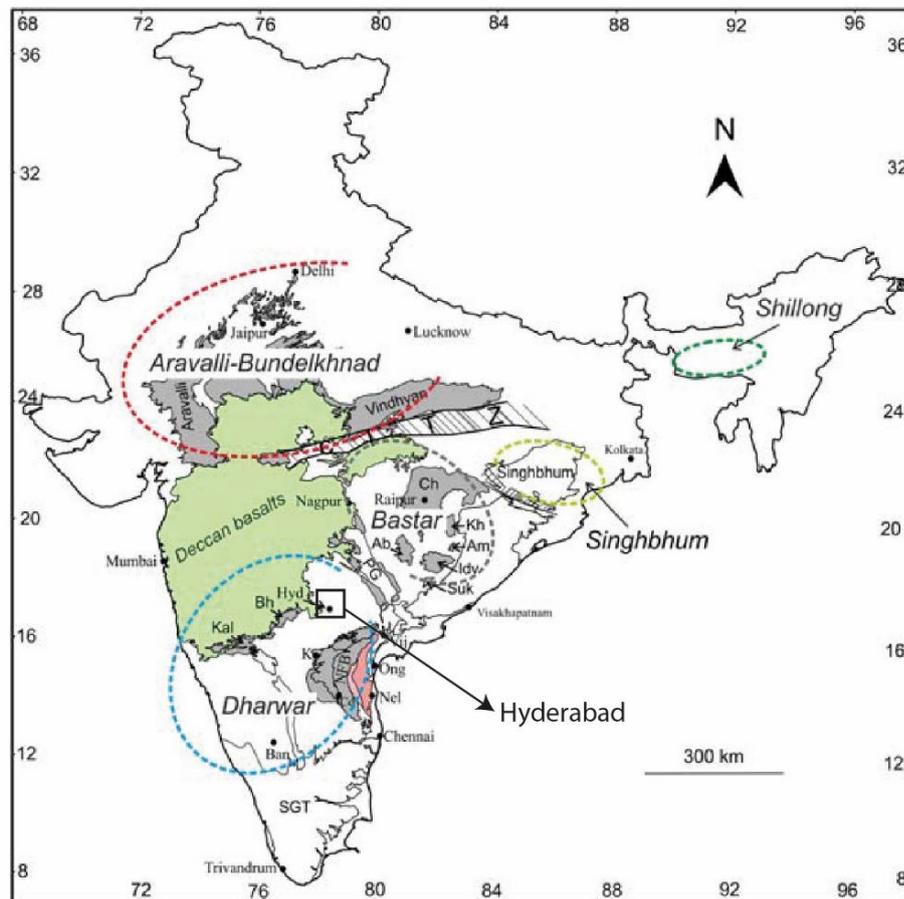
O território indiano pode ser dividido em três regiões bem demarcadas e com características específicas, Krishnan (1949) as descreve como: a Península, ou Cinturão Peninsular, ocupando a maior parte do centro-sul indiano, a sul dos rios *Indus* e *Ganges*. Em seguida os planos aluvionares *Indo-Gangetic* na porção norte do território se expandindo até o Paquistão, Bangladesh e sul do Nepal. E por fim a extensa cordilheira do Himalaia, abrangendo desde o Baluchistão no Paquistão, localizado a oeste do norte da Índia, até o Myanmar (antiga Birmânia) a leste do norte da Índia.

O aquífero estudado pelo artigo original está localizado na Índia Central, na bacia Hidrográfica *Dulapally*. Geologicamente está inserido em um cinturão chamado '*Peninsular Shield*' – Cinturão Peninsular, nome que caracteriza toda a região centro sul do país, dentro do contexto do cinturão. O local está no cráton *Dhawar*, localmente no complexo granítico da região de *Hyderabad*.

4.1 Cinturão Peninsular

A Índia Peninsular é um território composto por quatro núcleos Arqueanos principais: cráton *Aravali-Bundelkhan*, na região norte; cráton *Singhbhum*, a leste; cráton *Bastar*, na região centro leste e cráton *Dhawar*, na região centro sul (Figura 7).

Figura 7 – Divisão e disposição da Índia Peninsular com a região de *Hyderabad* em destaque.



Fonte – Modificado de Dilip Saha e Rajat Mazumder (2012).

O Cráton *Aravali-Bundelkhan* está localizado a norte da Zona Tectônica da Índia Central (*Central India Tectonic Zone* – CITZ, Sharma (2008)) e é delimitado a oeste pela dobra Aravalli-Delhi. Como é possível observar na Figura 8a, o cráton é separado em dois setores: *Rajasthan*, a oeste, e *Bundelkhand*, a leste, contendo a bacia sedimentar *Vindhyan* no centro.

O **cráton Bastar (Bhandara)** está localizado a sul da Zona Tectônica da Índia Central cercado por dois rifts mais novos, o graben *Mahanadi* a nordeste e o graben *Godavari* a sudoeste. O embasamento mais antigo do cráton consistente de greenstone belts e gnaisses TTG de 2.6 – 2.5Ma, é marcado por várias sequências supracrustais Paleoproterozoicas que passam por deformações e eventos metamórficos (BHOWMIK *et al.*, 2005).

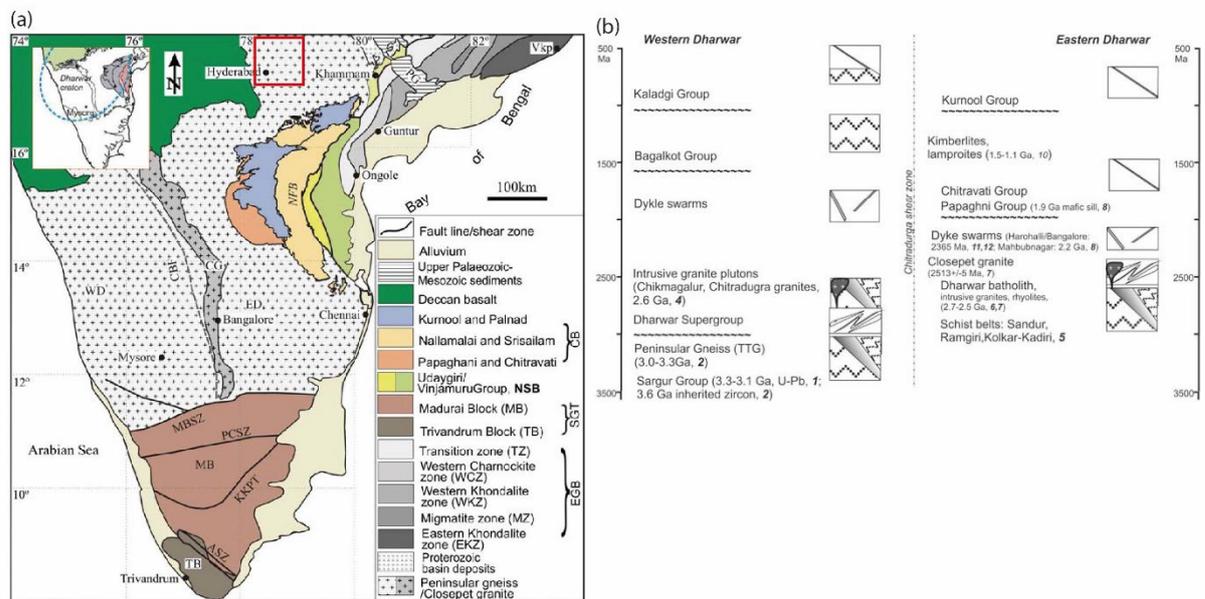
O **cráton Singhbhum** é o cráton mais a leste do bloco peninsular, é separado do cráton Bastar pela bacia Gondwana *Son-Mahanadi* a oeste, a norte é limitado pelo complexo granito-gnáissico *Chotanagpur* (CGC).

O **cráton Dharwar**, onde a cidade de *Hyderabad* se encontra e onde o estudo feito pelos autores do artigo no qual este trabalho é baseado, será melhor detalhado nos próximos subcapítulos.

4.2 Cráton Dharwar

O cráton *Dharwar* (Figura 8a) é o maior cráton da Índia Peninsular e está delimitado a sul pelo cinturão móvel Pan-African *Pandyan* também chamado de Southern Granulite Terrain (RAMAKRISHNAN E VAIDHYANADHAN, 2008) e a nordeste pelo rift *Pranhita-Kaladgi*.

Figura 8 – (a) cráton Dharwar e (b) sequência estratigráfica completa do cráton. Em vermelho destacado está a área de estudo.



Fonte – Modificado de Dilip Saha e Rajat Mazumder (2012).

A porção oeste do cráton é embasada pelo grupo *Sargur* composto por suítes de metassedimentos antigos e suítes ígneas metamorfolizadas (SWAMI NATH *et al.*, 1976) e por ortognaisses e granodioritos datados em 3.3-2.9Ga (BECKINSALE *et al.*, 1980). Logo acima do grupo *Sargur* é encontrado o supergrupo arqueano *Dharwar* de 2.9-2.6Ga (SWAMI NATH *et al.*, 1976), além disso este domínio é intrudido por diversos plútons graníticos de 2.6Ga (TAYLOR *et al.*, 1984). Seguindo o supergrupo *Dharwar* estão os grupos *Bababudan* e *Chitradurga* sucessões de *greenstone belts* mais novas (NAHA *et al.*, 1991) e por fim, granitoides de aproximadamente 2.6Ga intrudem a sequência mais antiga, são eles granito *Chitradurga* e granito *Chikmagalur* (CHADWICK *et al.*, 2007).

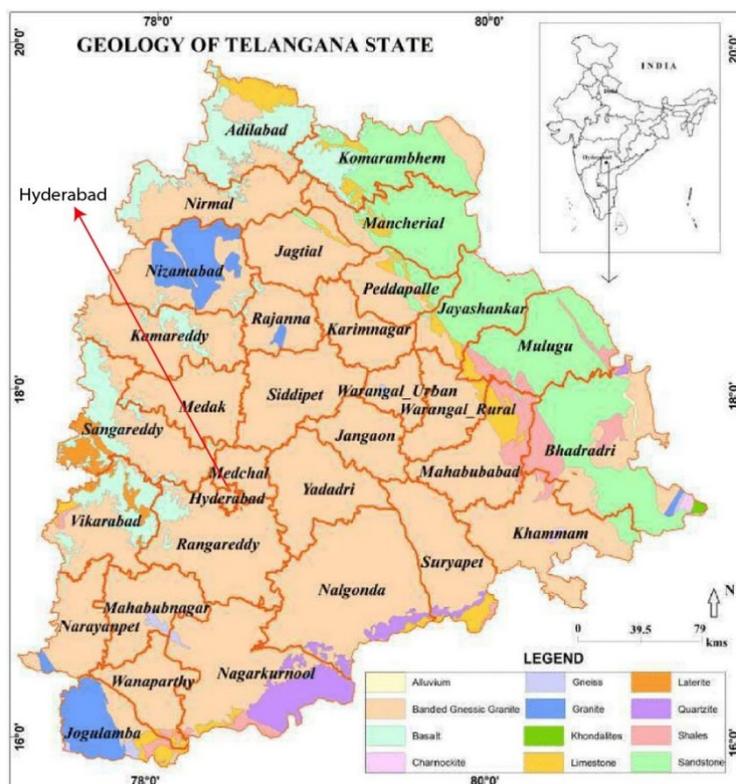
A porção leste é composta por um complexo cálcio-alcálico do final do Arqueano de granitos, granodioritos, monzonitos e dioritos denominado batólito *Dharwar* por Chadwick *et al.* (1996) por apresentar similaridades às litologias do supergrupo *Dharwar*. Metamorfismo de alto grau levando a charnokitos em 2.5Ga ocorreu na porção sul do batólito (HANSEN *et al.*, 1997). Este batólito está acima de um cinturão de xistos sendo eles *Sandur*, *Ramgiri*, *Kolar-Kadiri* (NUTMAN *et al.*, 1996; BALAKRISHNAN *et al.*, 1999). A sequência litoestratigráfica e tectônica completa pode ser observada na Figura 8b.

O batólito *Dharwar* é descrito por Pitcher (1979) como sendo formado por diversos corpos plutônicos que foram colocados na crosta durante um evento que Chadwick (1996) data como Arqueano tardio. Estudos (FRIEND, 1983; FRIEND E NUTMAN, 1991; JAYANANDA *et al.*, 2008; MOYEN *et al.*, 2003) indicam que a porção oeste do batólito foi formada através da fusão parcial de gnaisses antigos em aproximadamente 2.9Ga, enquanto a porção leste do batólito apresenta granitos mais novo (CHADWICK *et al.*, 1996).

O cráton ainda possui algumas bacias sedimentares como a *Cuddapah* que é a maior datada como Proterozoica com sedimentos paleoproterozoicos e duas menores, *Bhima* e *Kaladgi* com sedimentos neoproterozoicos incluindo de plataforma carbonática (SAHA E RAJAT, 2012).

O estado de *Talagana* onde a cidade de Hyderabad está localizada e por sua vez a bacia *Dullapally* está no contexto do batólito *Dharwar* em um granito gnáissico bandado (BGC) – *banded gneissic complex* (possível de ser observado na Figura 9 - Madhnure e Lavanya, 2021). Na região o complexo ocorre em duas variações, de coloração acinzentada e rósea, sendo que o granito róseo apresenta maiores cristais e é mais novo (SAHA E RAJAT, 2012).

Figura 9 – Mapa geológico simplificado do estado de Telangana, Índia.



Fonte – Modificado de Madhnure (2021)

4.2.1 Hidrogeologia

O aquífero fraturado da bacia hidrográfica *Dullapally* está em uma rocha granítica, o que indica que o acúmulo de água está associado à porosidade secundárias, associadas ao intemperismo ou fraturas, falhas e juntas.

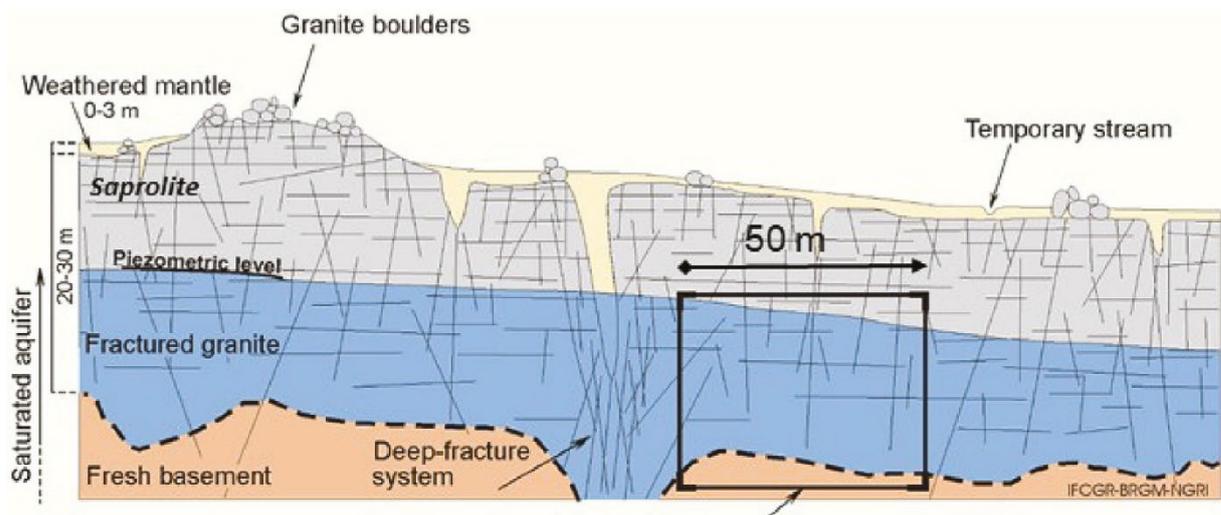
Segundo Sujhija (2005), a espessura da zona intemperizada varia de 2 metros em regiões mais altas até 15 metros em regiões mais baixas e de vale. Segundo Rushton e Weller (1985), artigo utilizado como base para este trabalho, a espessura na área de estudo da zona intemperizada é de aproximadamente 10m e a zona fraturada é de 20m.

Sukhija (2005) menciona que a região possui diversos lagos que, apesar de serem lagos que evaporam, são altamente utilizados para extração de água em função de uso doméstico.

Na região, água subterrânea ocorre em condições freáticas tanto nas porções mais rasas, na zona intemperizada, quanto, mais frequentes, na zona fraturada, chegando em profundidades maiores (SUKHIJA, 2005). É enfatizada a interação entre ambas as zonas, o que dita o comportamento do aquífero e, conseqüentemente, seu uso (RUSHTON E WELLER, 1985). Sukhija *et al.* (1996) realça que a recarga do aquífero fraturado está entre 7-8% em função da precipitação regional, que chega a 750mm por ano. Todo o centro-sul indiano é uma região que utiliza muita água subterrânea, possuindo mais de 700 poços extraindo mais de 10Mm³ por ano.

Diversos autores ao longo dos anos notaram a presença de uma camada altamente fraturada, trabalhos como Wright, (1992); Taylor e Howard (1999); Maréchal *et al.* (2004) e Lachassagne (2011) apontam que o modelo conceitual de aquíferos fraturados se divide saprólito, zona fraturada e rocha inalterada (Figura 10). Este modelo é caracterizado por uma zona saprolítica rica em argila com baixa permeabilidade e alta porosidade, uma zona fraturada com uma densidade alta de fraturas nos primeiros metros e menor densidade com o aumento da profundidade. E por fim a rocha inalterada caracterizada pela baixa porosidade e permeabilidade.

Figura 10 – Modelo conceitual de aquíferos fraturados proposto por autores como Wright, (1992); Taylor e Howard (1999); Maréchal *et al.* (2004) e Lachassagne (2011).



Fonte – Modificado de Maréchal *et al.* (2004).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

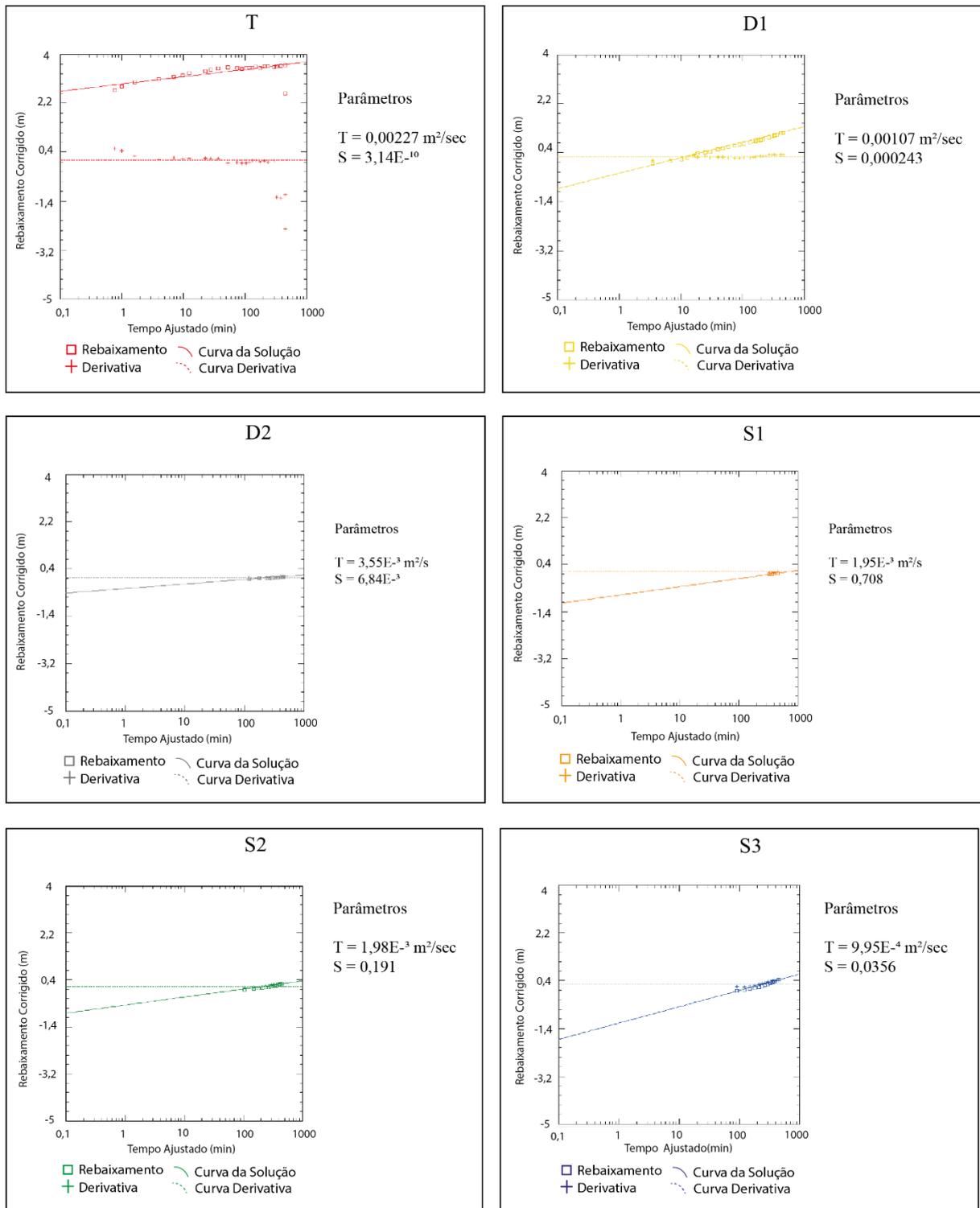
5.1 Análise da Curva Diagnóstica dos Dados Observados

Os dados de rebaixamento de todos os poços e piezômetros possibilitaram a elaboração e interpretação da curva diagnóstica de cada um. Nas curvas constam os valores de rebaixamento e sua derivada logarítmica em função do tempo, em gráfico de escala bilogarítmica.

Como descrito no tópico 3.1 os poços são T, que foi bombeado, D1 e D2 que foram observacionais e os piezômetros são S1, S2 e S3. A partir do lançamento dos dados no programa AQTESOLV é possível então, especificamente para cara poço, aplicar soluções que possam fazer com que os resultados se ajustem da melhor forma possível. Cada solução possui descrições particulares que encaixam em diferentes modelos de aquíferos fraturados, encontrar uma, ou mais, soluções que encaixam nos dados existentes, assim ajudar a identificar o possível modelo do aquífero em *Hyderabad*. Neste trabalho foram testadas quatro soluções: Cooper-Jacob (1946), Barker (1988), Moench (1985) caso 3 e por fim Moench (1984).

Primeiro foi testado a solução Cooper-Jacob (1946) possível de ser observada na Figura 11. Essa solução utiliza o método criado pelos autores de analisar os dados de testes de bombeamento baseados em uma linha reta que é uma aproximação da equação de Theis (1935), que serve para poços penetrantes em aquíferos confinados de fluxo instável. É uma solução ajustada apenas para obter parâmetros de referência de T, K e S.

Figura 11 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade e S – armazenamento.



Fonte – Elaborado pela própria autora através do software AQTESOLV.

A tabela 1 apresenta os valores de K obtidos através da formula $K = T/b$.

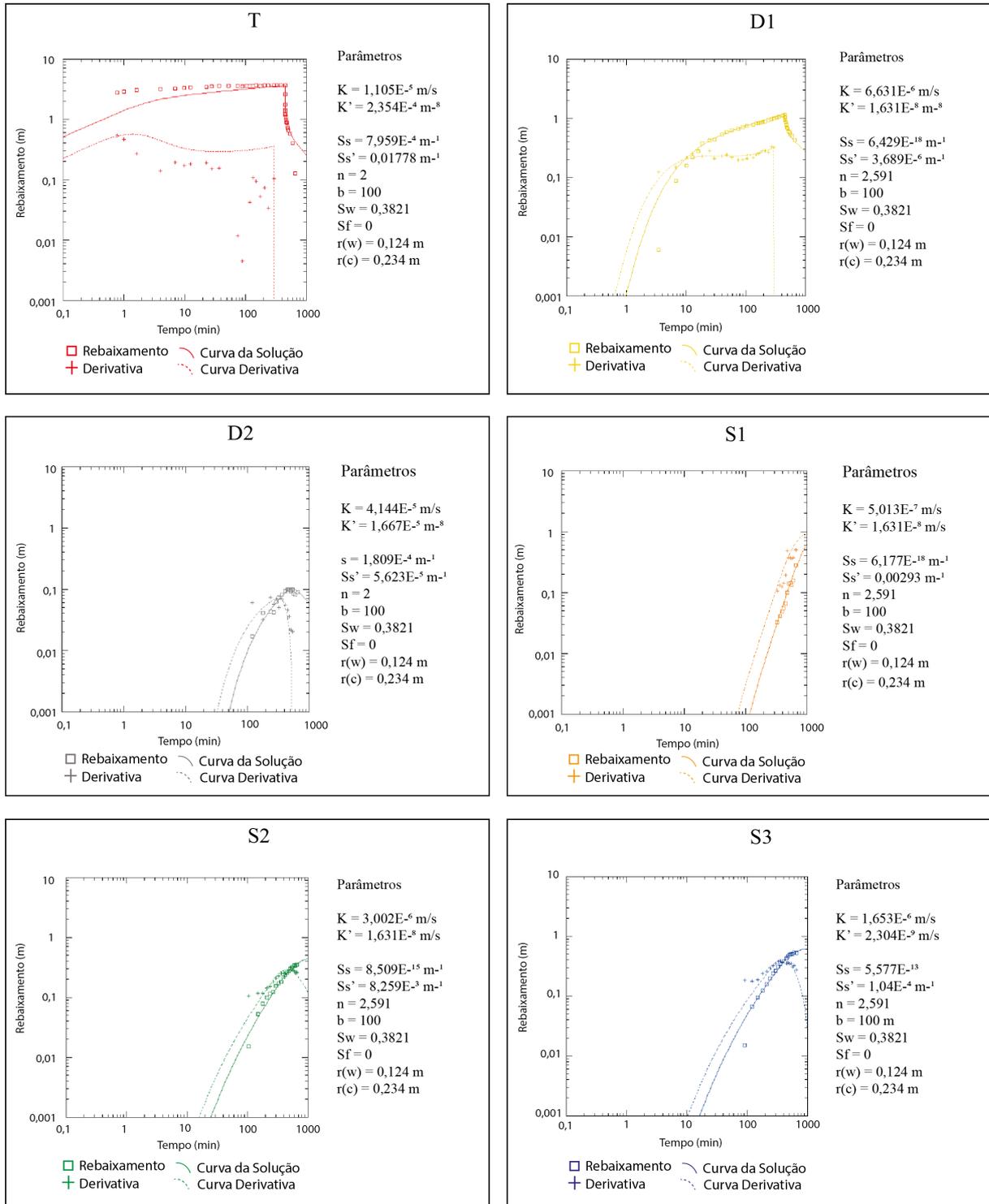
Tabela 1. valores de K obtidos através da solução Cooper-Jacob (1946).

	Valor de Condutividade Hidráulica (K) – Solução Cooper-Jacob (1946)
T	$2,27 \times 10^{-5}$
D1	$1,07 \times 10^{-5}$
D2	$3,55 \times 10^{-5}$
S1	$1,99 \times 10^{-5}$
S2	$1,98 \times 10^{-5}$
S3	$9,95 \times 10^{-6}$

Fonte – Elaborada pela própria autora.

A segunda solução utilizada foi a de Barker (1988). O autor derivou um modelo de fluxo radial generalizado para aquíferos fraturados, isotrópicos, de porosidade única ou dupla, e de fluxo instável (Figura 12). A solução indica três configurações: porosidade única, dupla porosidade com blocos ‘*slab shaped*’ (formato em placas) ou dupla porosidade com blocos ‘*sphere-shaped*’ (formato esférico). Para este trabalho foi utilizado a última configuração.

Figura 12 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, S_f – fator de efeito das fraturas, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



Fonte – Elaborada pela própria autora através do software AQTESOLV.

Esta solução se mostra mais complexa que a anterior, possuindo um número de parâmetros ajustáveis maior, possível de passar uma imagem mais completa do comportamento do aquífero. Esta solução não produz um valor de transmissividade (T), porém é possível facilmente calcular este valor através da equação $T = K.b$ apresentados na tabela 2.

Tabela 2. valores de transmissividade (T) encontrados através do ajuste da solução Barker (1988).

	Valor de transmissividade (T) – Solução Barker (1988)
T	$1,05.10^{-3}$
D1	$6,613.10^{-4}$
D2	$4,144.10^{-3}$
S1	$5,013.10^{-5}$
S2	$3,002.10^{-4}$
S3	$1,65.10^{-4}$

Fonte - Elaborada pela própria autora.

De acordo com a Figura 15 houve um bom ajuste para os piezômetros S1, S2 e S3 e o poço D1, mas o poço bombeado T não foi possível obter um ajuste adequado. A tabela 3 apresenta os valores de K para melhor visualização. De acordo com o guia de valores de condutividade hidráulica para os diferentes tipos de rochas (Figura 13) os valores obtidos pela solução estão dentro dos valores esperados para rochas ígneas fraturadas.

Figura 13 – Tabela de valores de condutividade hidráulica para rochas cristalinas. Modificado de AQTESOLV.

Rochas Cristalina	
Material	Condutividade Hidráulica (m/s)
Basalto permeável	4×10^{-7} a 2×10^{-2}
Rocha ígnea e metamórfica fraturada	8×10^{-9} a 3×10^{-4}
Granito alterado	$3,3 \times 10^{-6}$ a $5,2 \times 10^{-5}$
Gabro alterado	$5,5 \times 10^{-7}$ a $3,8 \times 10^{-6}$
Basalto	2×10^{-11} a $4,2 \times 10^{-7}$
Rocha ígnea e metamórfica não fraturada	3×10^{-14} a 2×10^{-10}

Legenda: Tabela de valores de condutividade hidráulica para rochas cristalinas. Modificado de AQTESOLV.

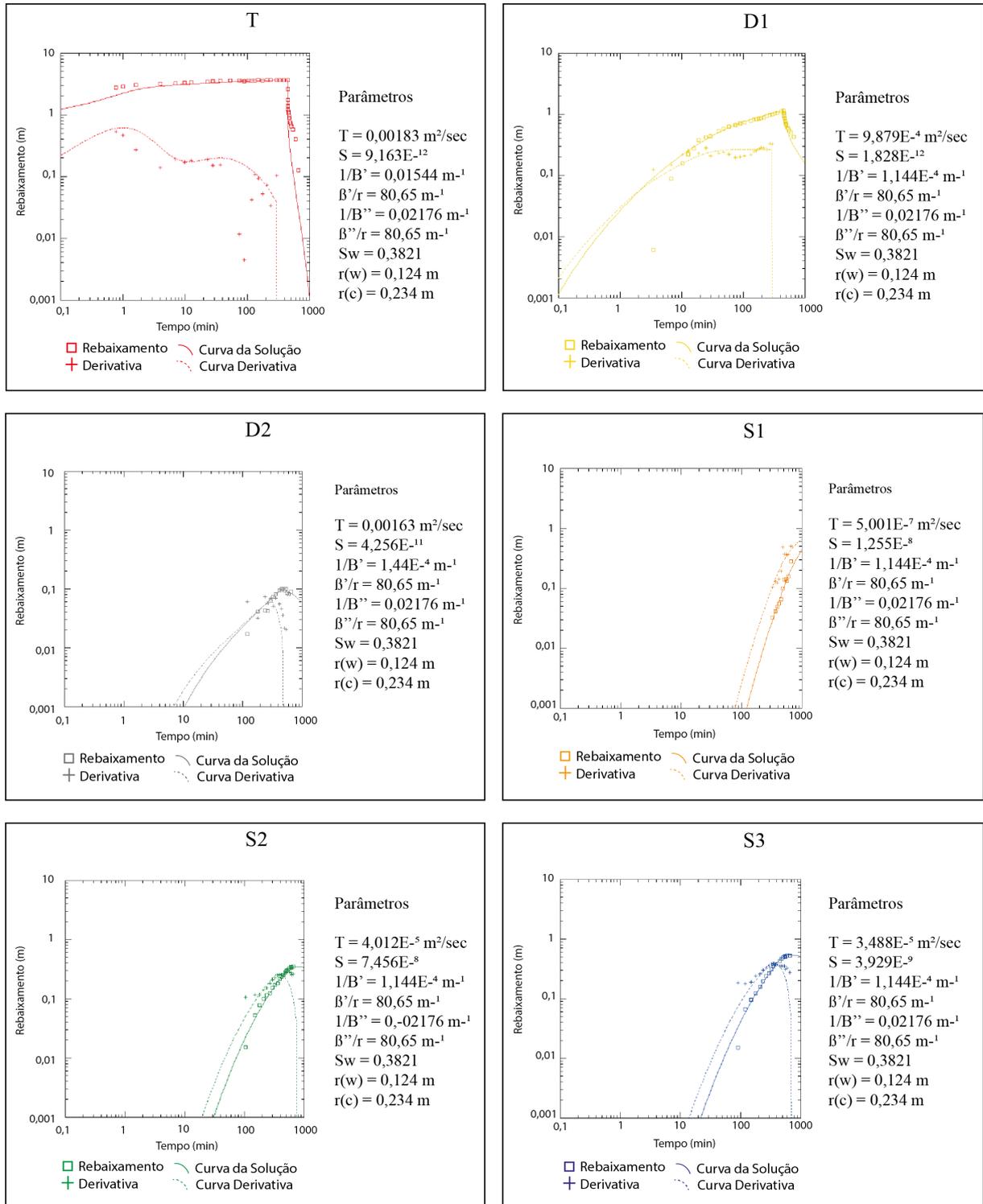
Tabela 3. Valores de K obtidos através da solução Barker (1988).

	Valor de Condutividade Hidráulica (K) – Solução Barker (1988)
T	$1,105 \times 10^{-5}$
D1	$6,631 \times 10^{-6}$
D2	$4,144 \times 10^{-5}$
S1	$5,013 \times 10^{-7}$
S2	$3,002 \times 10^{-6}$
S3	$1,653 \times 10^{-6}$

Fonte - Elaborada pela própria autora.

A solução terceira solução testada foi a de Moench (1985) especificamente o caso 3. O autor derivou uma solução para aquíferos confinados, drenantes, homogêneos, isotrópicos e levando em consideração uma ‘skin’ no poço. É possível observar os resultados na Figura 14.

Figura 14 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: **T** – transmissividade, **S** – armazenamento, **r/B'** e **B'** – parâmetros de drenância do aquífero superior, **r/B''** e **B''** – parâmetros de drenância do aquífero inferior, **Sw** – fator de efeito do poço, **r(w)** – raio do poço e **r(c)** – raio do revestimento do poço.



Fonte – Elaborado pela própria autora através do software AQTESOLV.

Moench (1985) descreve três casos diferentes para a solução, o primeiro assume que o aquífero tem a camada superior com carga hidráulica constante, o segundo assume ambas camadas são de não fluxo e o terceiro caso, aplicado no ajuste da solução neste trabalho, é uma junção das anteriores onde assume carga hidráulica constante no aquífero superior e não fluxo no aquífero inferior.

É possível identificar que o ajuste foi novamente eficaz nos três piezômetros, enquanto no poço D1 ficou boa, mas pior que a solução de Barker (1988), já para T o ajuste ainda não ficou perfeito, mas melhor que a solução anterior. O valor de K não é automaticamente obtido com essa solução, mas sim através da fórmula $K = T/b$ e os resultados estão apresentados na tabela 4. Os valores de K estão novamente de acordo com a janela padrão para rochas ígneas fraturadas, é possível também observar que os valores obtidos dos piezômetros, que penetram apenas a camada saprolítica, são os mais baixos, destacando o S1 como o mais baixo.

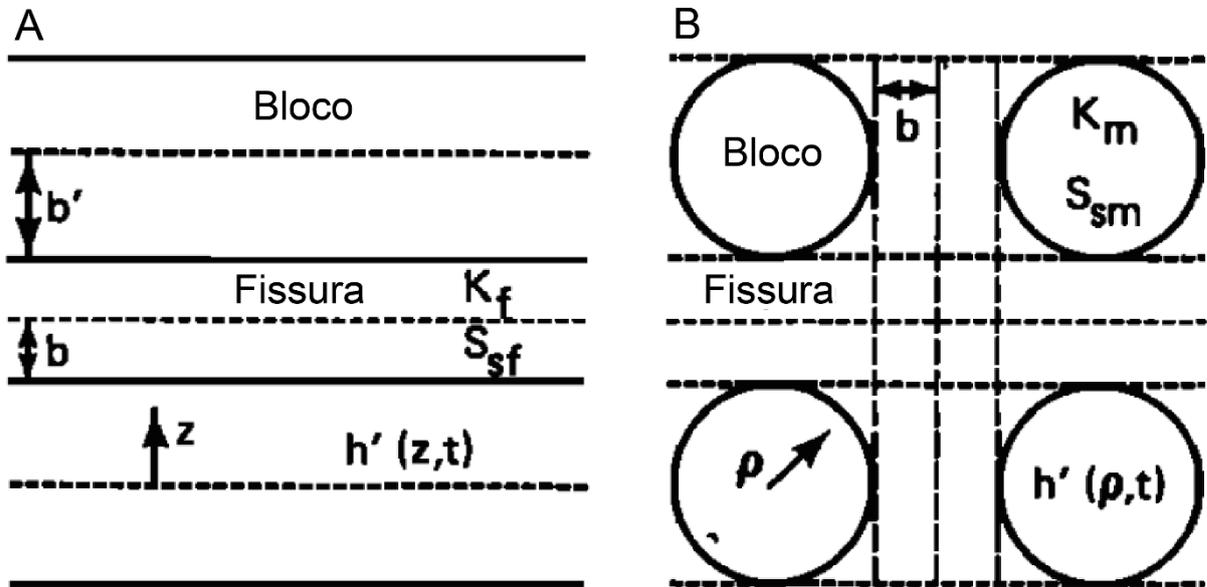
Tabela 4. Valores de K obtidos através do terceiro caso da solução Moench (1985).

	Valor de Condutividade Hidráulica (K) – Solução Moench (1985)
T	$1,83 \times 10^{-5}$
D1	$9,879 \times 10^{-6}$
D2	$1,63 \times 10^{-5}$
S1	$5,001 \times 10^{-9}$
S2	$4,012 \times 10^{-7}$
S3	$3,488 \times 10^{-7}$

Fonte - Elaborada pela própria autora.

Por fim, foi testada a solução Moench (1984) que derivou uma solução analítica para poços de fluxo instável, de diâmetro finito, levando em consideração armazenamento e fator de efeito no poço e na fratura, presumindo um aquífero de dupla porosidade além de ditar duas opções para o tipo de blocos rochosos que podem ser encontrados, blocos ‘*slab-shaped*’ ou ‘*sphere-shaped*’ (Figura 15).

Figura 15 – Configuração geométrica para (A) blocos ‘slab-shaped’ e (B) blocos ‘sphere-shaped’. Parâmetros: b – abertura média das fissuras, b' – espessura média dos blocos, K_f – condutividade hidráulica das fraturas, S_{sf} – armazenamento específico das fraturas, z – distância do centro de um bloco ‘slab shaped’ até uma fissura, $h'(z, t)$ – carga hidráulica do bloco (z) e da fratura (t), ρ – distância do centro do bloco ‘sphere shaped’ até uma fissura, K_m – condutividade hidráulica do bloco e S_{sm} – armazenamento específico do bloco.



Fonte – Modificado de Moench (1984).

Como discutido ao longo deste trabalho, aquíferos fraturados são sistemas complexos por serem heterogêneos e por vezes anisotrópicos. Estudos que envolvem rochas fraturadas onde o fluxo aumenta através de possíveis contribuições dos blocos de rocha, utilizam o conceito de aquíferos com dupla porosidade proposto por Barenblatt *et al.* (1960).

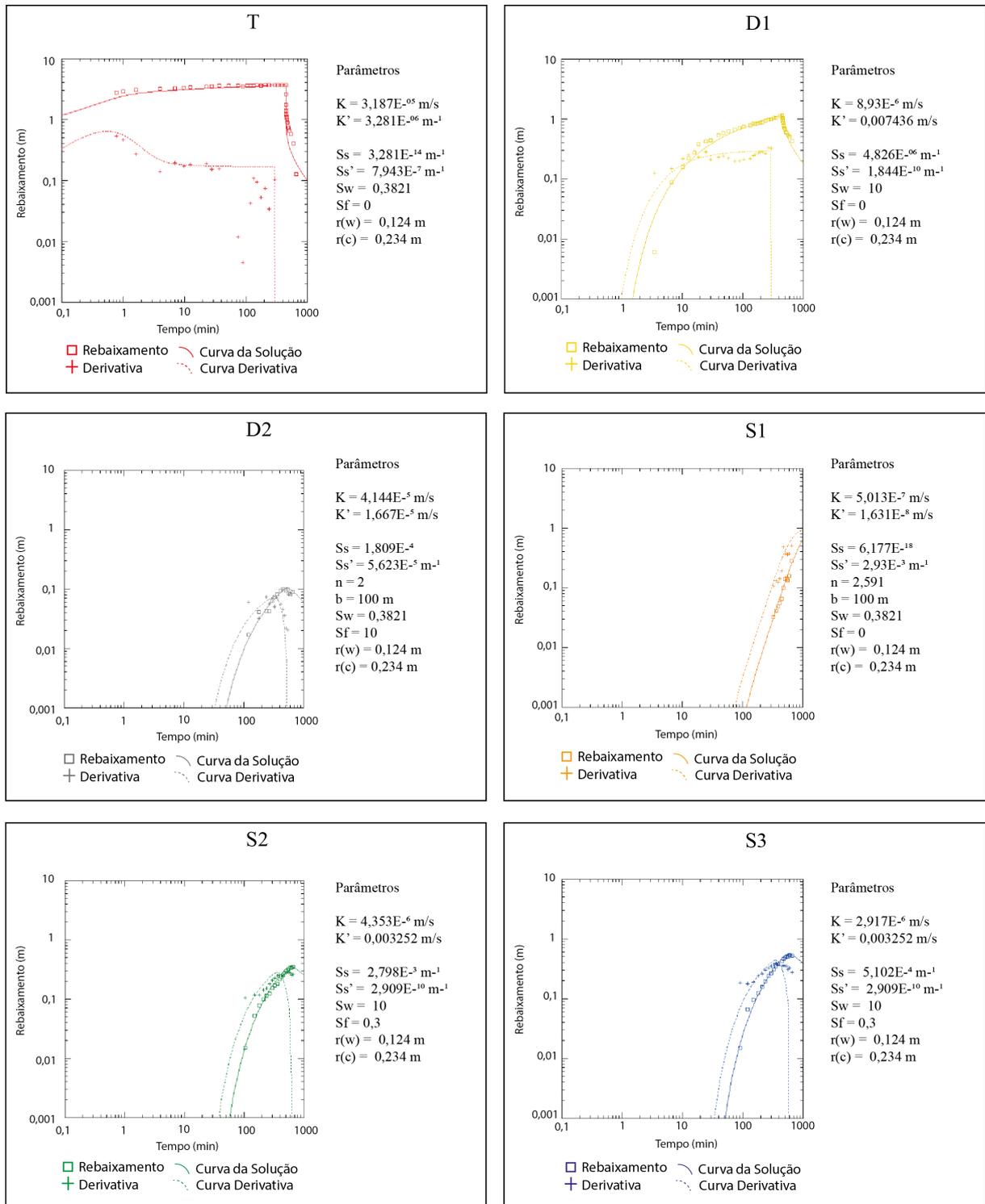
É interessante relembrar que a porosidade é uma das características inerentes das rochas, é a parte do volume da rocha que está essencialmente vazio, gerando espaço para o armazenamento de fluido. A porosidade pode ser primária – ocorre durante o processo de formação da rocha – ou pode ser secundária – ocorre durante o processo diagenético da rocha, também nos processos de deformação ou alteração.

O conceito de dupla porosidade, proposto por Barenblatt *et al.* (1969), ajudaria quantificar o fluxo em rochas fraturadas, já que o meio fraturado consiste de dois contínuos que interagem entre si e se sobrepõem, que seriam: a baixa permeabilidade dos blocos rochosos com porosidade primária e o contínuo de alta permeabilidade, porosidade secundária, das fraturas, assim também as propriedades hidráulicas seriam distintas para cada contínuo (Moench, 1984).

Moench (1984) indica que quando o assunto é o transporte de fluxo entre blocos da rocha matriz e as fissuras, há duas abordagens que podem solucionar problemas no tratamento dos dados de testes de bombeamento, Warren e Root (1963) ditam que o fluxo ocorre como um pseud. ‘*steady-state*’, relativamente constante; já Kazemi (1969) dita que o fluxo ocorre totalmente em condições transientes, instáveis.

A Figura 16 apresenta as curvas diagnósticas obtidas através do uso da solução Moench (1984) nos dados dos poços e piezômetros deste trabalho.

Figura 16 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, Sw – fator de efeito do poço, Sf – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



Fonte – Elaborada pela própria autora através do software AQTESOLV.

Assim como a solução de Barker (1988), Moench (1984) não gera a transmissividade automaticamente, então é possível calcular esse parâmetro facilmente através da equação $T = K.b$, sendo b a extensão da região do fluxo cravada em 100 m. A tabela 5 demonstra os valores de transmissividade obtidos.

Tabela 5. Valores de transmissividade (T) encontrados através do ajuste da solução Moench (1984).

	Valor de transmissividade (T) – Solução Moench (1984)
T	$3,187.10^{-8}$
D1	$8,93.10^{-4}$
D2	$4,144.10^{-3}$
S1	$5,013.10^{-5}$
S2	$4,35.10^{-4}$
S3	$2,917.10^{-4}$

Fonte - Elaborada pela própria autora.

Esta solução se mostra a de melhor encaixe para os dados do teste de bombeamento quando levando em consideração os poços T e D1. É possível observar através da curva diagnóstica que houve um ajuste mais seguro em todos os poços, também vale ressaltar que o poço observacional D2 está separado por um matacão que acaba o isolando do poço sendo bombeado, então suas respostas não ajudam o objetivo do estudo, em nenhuma das soluções.

Os valores de K estão apresentados na tabela 6 para melhor visualização. Se encaixam na variação de valores para rochas ígneas fraturadas. Também é interessante pontuar que para as três soluções o piezômetro S1 é o que apresenta condutividade hidráulica mais baixa. Diferentemente das soluções anteriores a condutividade hidráulica de D1 se mostra mais baixa, inclusive mais baixa que ambos piezômetros S2 e S3.

Tabela 6. Valores de K obtidos através da solução Moench (1984).

	Valor de Condutividade Hidráulica (K) – Solução Moench (1985)
T	$3,18 \times 10^{-5}$
D1	$8,93 \times 10^{-6}$
D2	$4,144 \times 10^{-5}$
S1	$5,013 \times 10^{-7}$
S2	$4,353 \times 10^{-6}$
S3	$2,917 \times 10^{-6}$

Fonte - Elaborada pela própria autora.

Os testes realizados indicam que as três soluções são boas soluções para os dados, as três apresentam bons ajustes e boas curvas diagnósticas, mesmo que não sejam perfeitas para todos os poços ao mesmo tempo. Barker (1988) indica um bom ajuste para os piezômetros da zona intemperizada, já o caso três de Moench (1985) também encaixa bem nos piezômetros e melhor que Barker nos poços T e D1.

É também possível concluir que nas soluções de Barker (1988) e Moench (1984) a opção de blocos ‘*sphere-shaped*’ ou blocos esféricos, foram as que se encaixaram melhor indicando que a rocha em questão, o granito de Hyderabad, está sendo alterada a formar blocos em esferas a contrapartida de blocos em placas.

As três soluções indicam que o aquífero provavelmente seria de dupla porosidade, enquanto o bom ajuste à solução de Moench (1985) indica que o aquífero seria também drenante, além de duplo poroso. Em relação a condutividade hidráulica obtida para cada solução é possível pontuar que os valores são muito próximos, registrando pouca variação. É consistente que para os piezômetros penetrantes apenas na zona saprolítica a condutividade se mostra mais baixa em relação a condutividade dos poços da zona fraturada, mesmo estando mais próximos do poço sendo bombeado.

5.2 Modelo Conceitual

Segundo Anderson *et al.* (2015), para representar de forma matemática todo o processo hidrogeológico é necessário que haja simplificações de algumas presunções. A equação governadora (*governing equation*) é a forma mais usada para modelar fluxo de água subterrânea assumindo um líquido de apenas uma fase em densidade constante e em meio poroso. O aquífero fraturado é essencialmente não poroso, então o trabalho é de calibrar este modelo típico poroso para que se encaixe na ‘realidade’ de um aquífero não poroso.

Para o modelo ser feito é necessário primeiramente definir um modelo conceitual com base nas análises teóricas do aquífero, assim como os dados do teste de bombeamento, este modelo é o que rege os parâmetros que serão colocados no programa ModelMuse. Como dito no tópico 3.2 foi um modelo sintético simples por conta da falta de informações específicas do aquífero em questão.

O domínio é composto por duas camadas com condutividades hidráulicas diferentes, sendo a zona intemperizada, chamada zona saprolítica (1) chegando a 13 metros de profundidade e de condutividade menor e a zona fraturada (2) chegando até 37 metros e de maior condutividade. As seguintes características são propostas para o modelo:

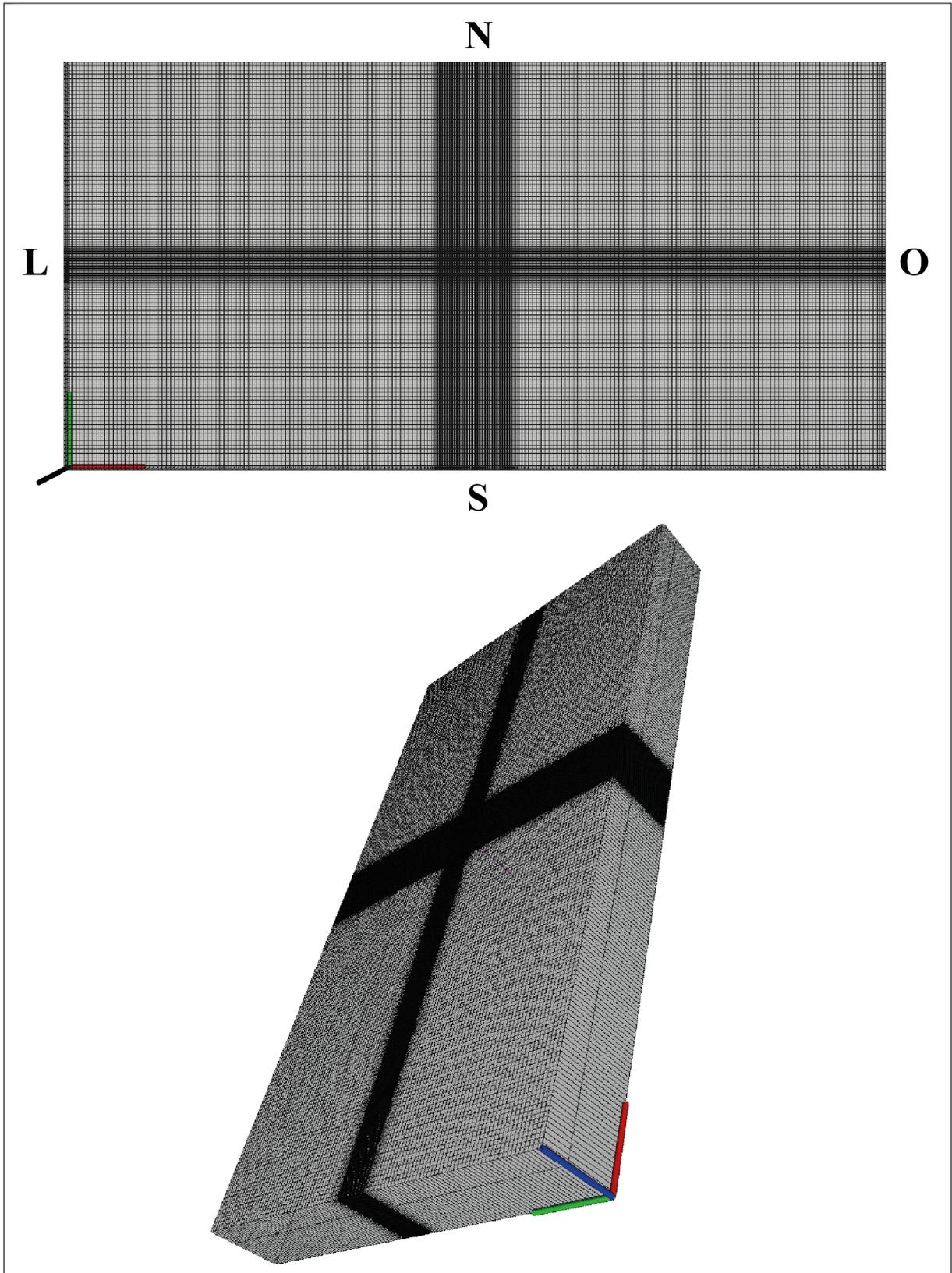
- A base do modelo teve como condição de fluxo nulo, por ser considerada a rocha inalterada com baixíssima permeabilidade.
- A zona saprolítica é considerada como não confinada enquanto a zona fratura é considerada como confinada.
- As bordas norte e sul da área de domínio do modelo são consideradas condições de fluxo nulo, já as bordas laterais serão consideradas condições de fluxo conhecido.

5.3 Modelo Matemático

5.3.1 *Domínio e Discretização do Modelo*

O modelo proposto é uma representação teórica da região do aquífero, sem medidas reais. Foi feito um retângulo de 300 m de comprimento por 200 m de altura gerando uma área de 60.000 m². Também levando em consideração essas dimensões mais a profundidade do modelo sendo de 100 m o volume do modelo é de 6.000.000 m³, subdividido em 2 camadas, os elementos foram fixados em 100. O modelo foi discretizado e o mesh gerado foi apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Mesh gerado a partir do modelo conceitual com escala vertical de 5 vezes.



Fonte – Gerado pela autora através do software Model Viewer.

5.3.2 Condições de Contorno

Com base no modelo conceitual, foram estabelecidas as condições de contorno dos limites do modelo. A base, devido ao contato com a rocha inalterada, é considerada como condição de contorno Tipo II, de fluxo nulo.

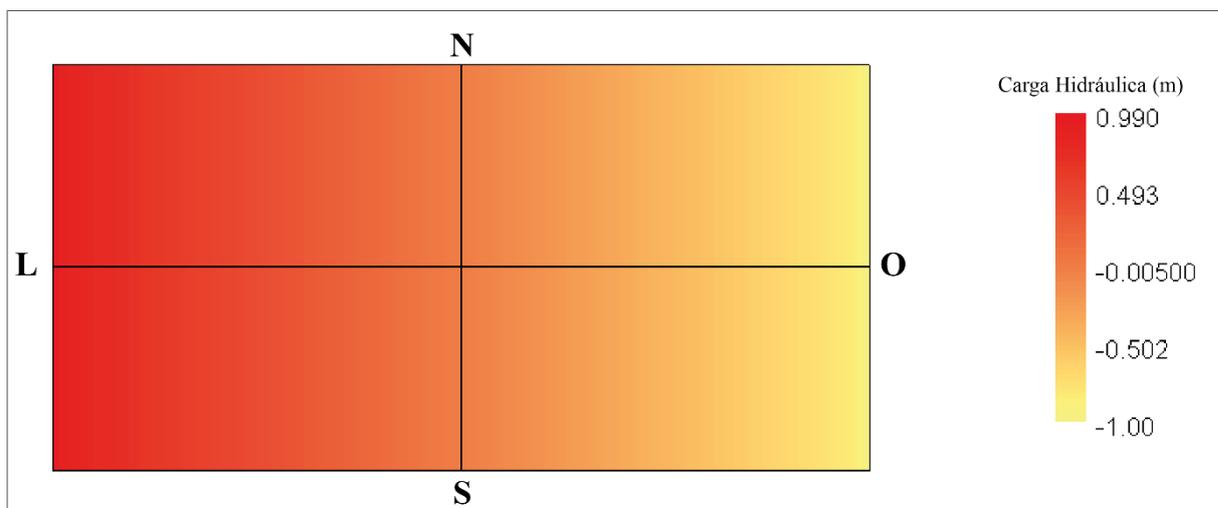
Os limites laterais ficam com condição de carga especificada, se encaixando como condição de contorno Tipo I. Os limites norte e sul são paralelos ao fluxo que segue de oeste para leste, então são de fluxo nulo, condição de contorno Tipo II. As condições descritas serviram para ambas as camadas, tanto a zona saprolítica quando para a zona fraturada.

Por fim, o poço de bombeamento T, os poços observacionais D1 e D2, e os piezômetros S1, S2 e S3 foram considerados como condição de contorno do Tipo II, com fluxo especificado com base nos dados do teste de bombeamento.

5.3.3 Condições Iniciais

A condição inicial foi gerada pela simulação em regime estacionário e teve como objetivo distribuir a carga hidráulica. Os dados utilizados são os valores teóricos da carga hidráulica para as laterais L (0,99) e O (-1), assim como os valores obtidos a partir do teste de bombeamento, para a camada saprolítica $K_x = K_y = 5,78 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, $K_z = 3,47 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ e $S_s = 0,01$ e para a camada fraturada $K_x = K_y = 5,78 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, $K_z = 3,47 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ e $S_s = 0,0025$. O topo do modelo está em 0, a base da zona saprolítica (camada 1) é -13 e a base da zona fraturada (camada 2) é -37. A Figura 18 apresenta o modelo em condições iniciais.

Figura 18 – Distribuição das cargas hidráulicas na condição inicial do modelo nas duas camadas, topo do saprólito e topo da zona fraturada.



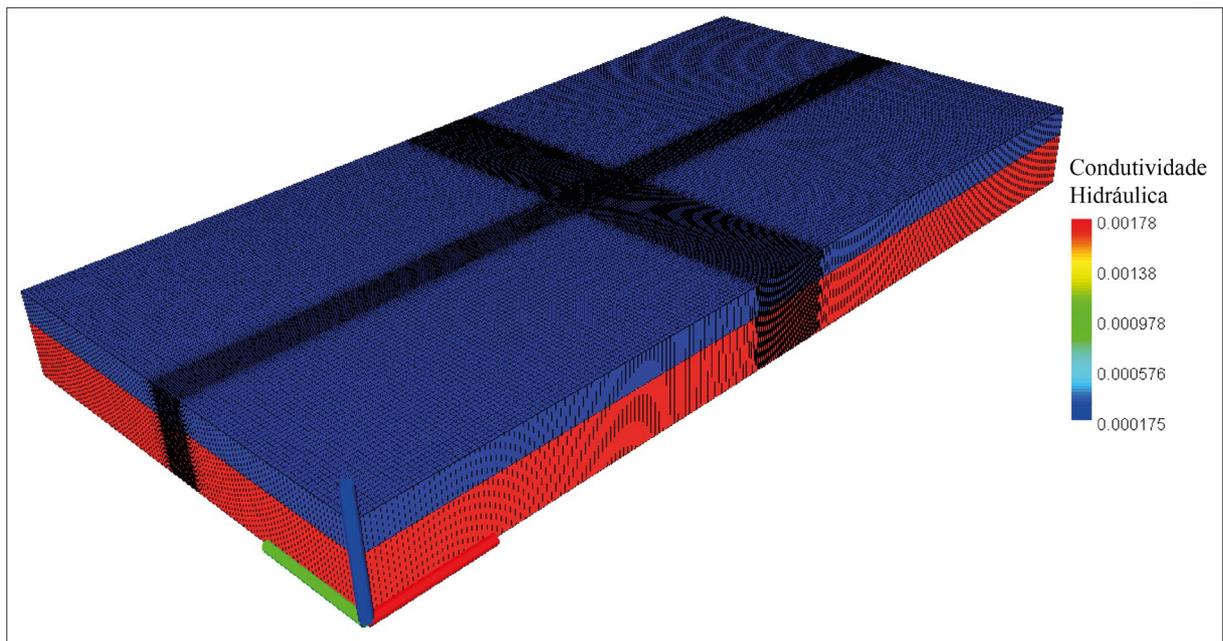
Fonte – Gerado pela autora através do software Model Viewer

5.3.4 Calibração

Na etapa de calibração, foram utilizados gráficos de comparação entre os dados observados e os dados simulados, a fim de identificar as diferenças e orientar os ajustes necessários para obter a maior semelhança entre as curvas. Além disso, foi levado em consideração que o *root mean square residual* (RMSR) – residual quadrático médio, permanesse em 0,249

Durante o processo de calibração, os valores de condutividade hidráulica (K_x , K_z) e armazenamento específico (S_s) foram ajustados para cada camada com base na comparação com o gráfico que representa a curva observada. Os valores obtidos com o ajuste para a camada 1 são de K_x como 0,00178 m/s, K_z como $1,37 \cdot 10^{-5}$ m/s e S_s como $3,1 \cdot 10^{-5}$. Os valores obtidos com o ajuste para a camada 2 são de K_x como $1,75 \cdot 10^{-4}$ m/s, K_z como $1,75 \cdot 10^{-5}$ m/s e S_s como $5,0 \cdot 10^{-5}$. A Figura 19 demonstra o modelo com as condutividades hidráulicas calibradas para ambas camadas.

Figura 19 – Modelo calibrado demonstrando os valores de condutividade hidráulica (K_x) para as camadas 1 e 2. Elevação vertical de 5 vezes.



Fonte – Gerado pela autora através do software Model Viewer.

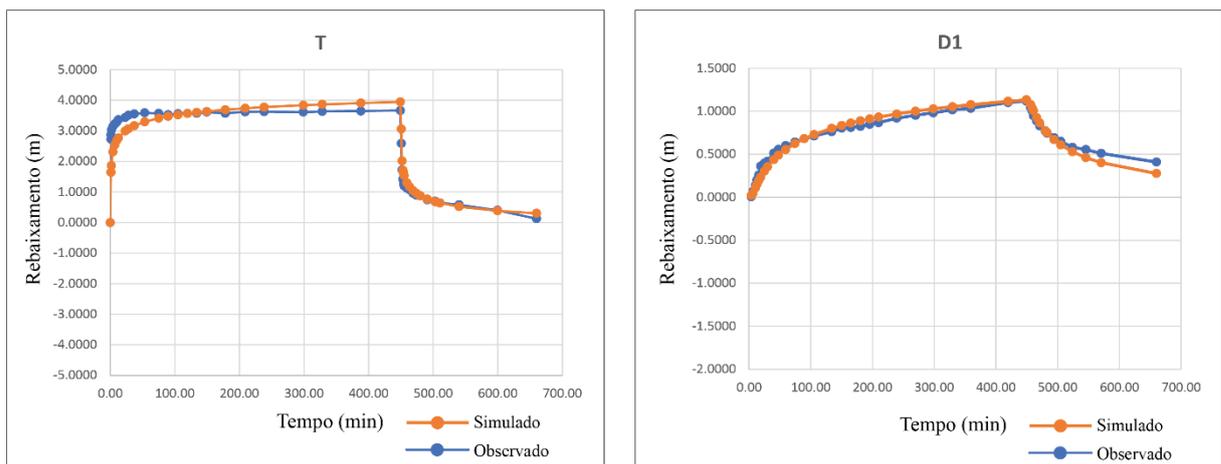
Foram utilizados todos os poços e piezômetros para a simulação. A calibração mostrou-se muito eficiente para os poços penetrantes até a zona fraturada (T e D1), gerando resultados muito próximos à realidade. Os dados do poço D2 foram desconsiderados por conta de seu isolamento em relação aos demais poços.

No entanto, para os piezômetros penetrantes até a zona saprolítica, a calibração mostrou-se eficiente para ajustar o período de rebaixamento, porém na simulação a recuperação é muito mais rápida se comparado aos dados observados. Considerando que a zona saprolítica continua com uma tendência de rebaixamento mesmo após o desligamento das bombas, como discutido subcapítulo 3.2, os dados da simulação deveriam representar este declínio e posterior recuperação, mas aparentam representar uma recuperação imediata.

Porém é possível observar que o modelo de duas camadas encaixa para o aquífero sendo estudado, pois houve uma calibração adequada com os dados utilizados e o ajuste dos parâmetros K_x , K_z e S_s .

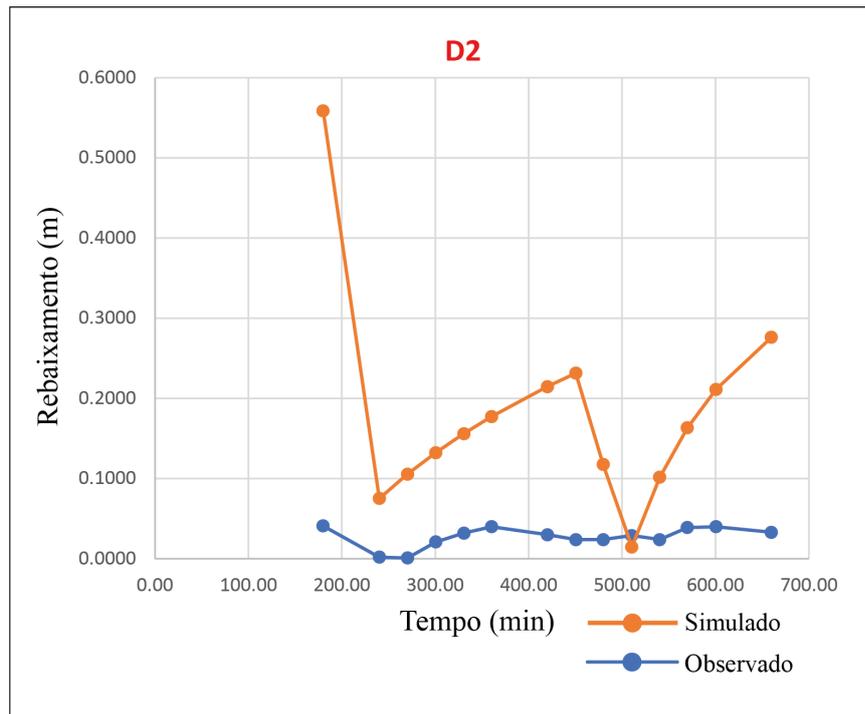
Os gráficos comparativos entre os dados dos testes de bombeamento observados e simulados, mostrando a diferença entre os dois, se encontram nas figuras 20 a 24.

Figura 20 – Gráficos comparativos entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do poço bombeado T e observacional D1.



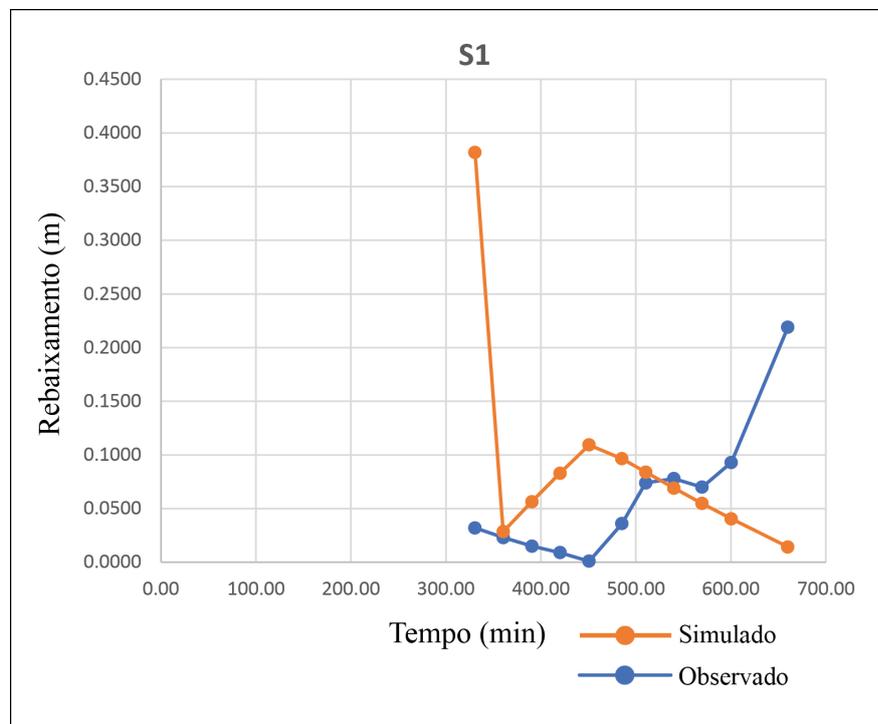
Fonte – Elaborado pela própria autora

Figura 21 – Gráfico comparativo entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do poço observacional D2.



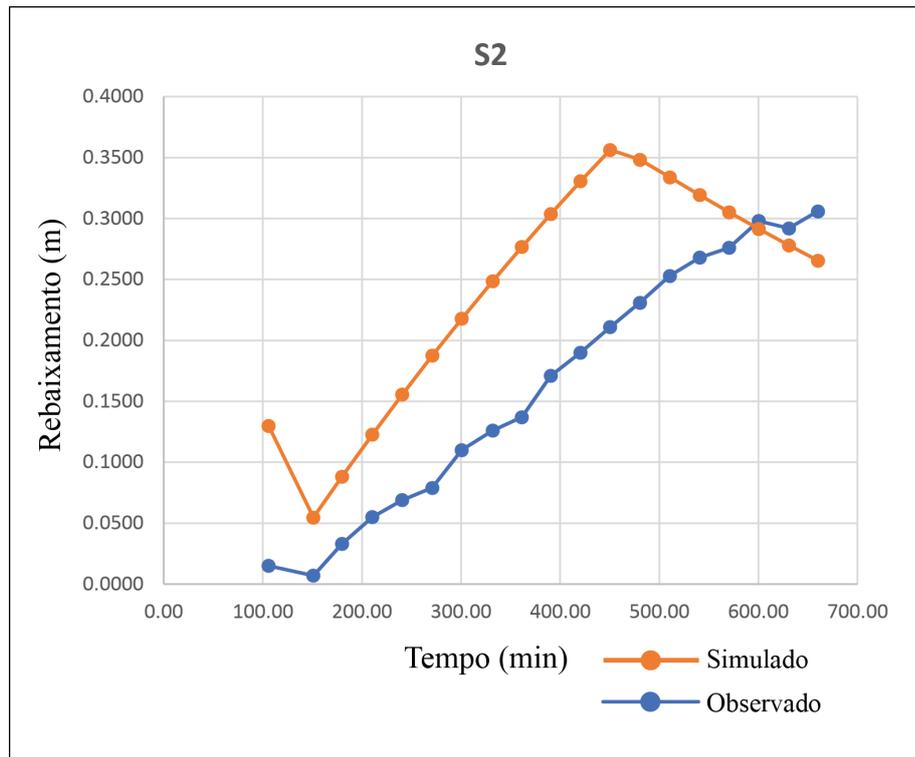
Fonte – Elaborado pela própria autora

Figura 22 – Gráfico comparativo entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do piezômetro S1.



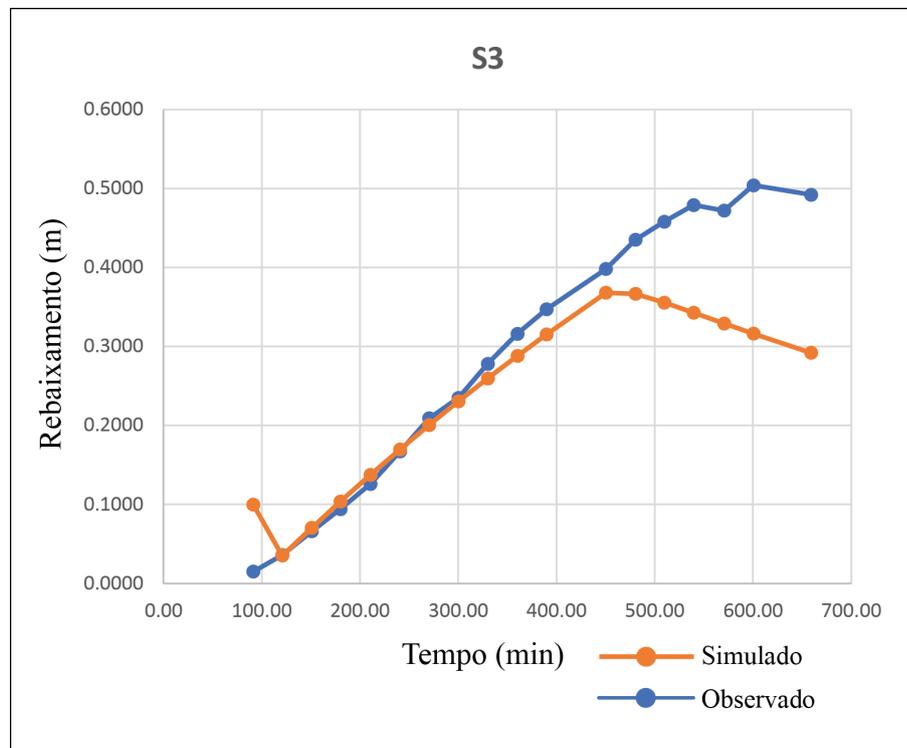
Fonte – Elaborado pela própria autora

Figura 23 – Gráfico comparativo entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do piezômetro S2.



Fonte – Elaborado pela própria autora

Figura 24 – Gráfico comparativo entre os dados de rebaixamento em relação ao tempo, sendo em azul o observado e laranja o simulado, do piezômetro S3.



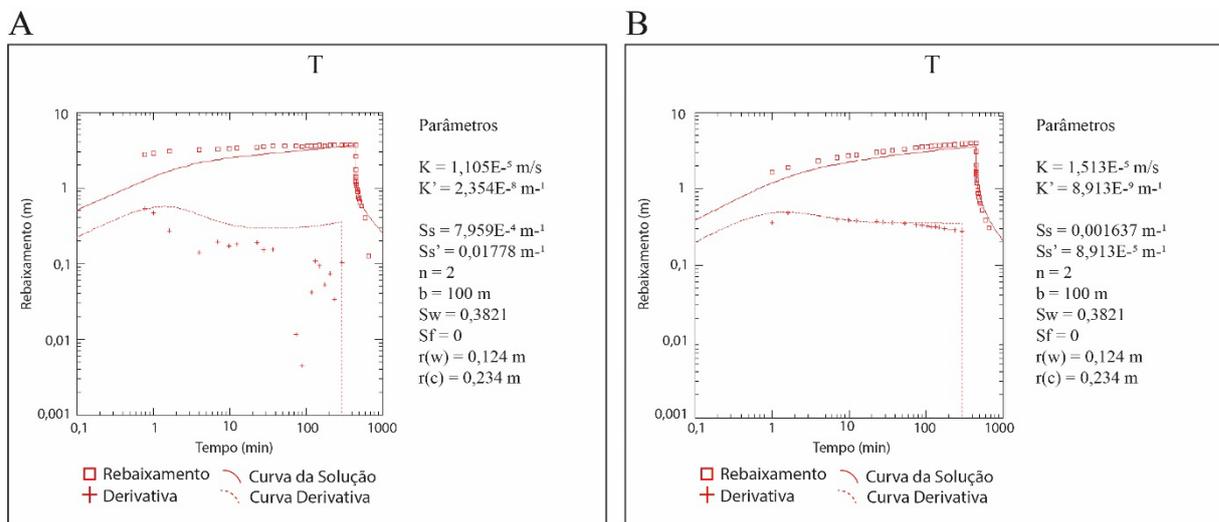
Fonte – Elaborado pela própria autora

5.4 Análise da Curva Diagnóstica dos Dados Simulados

Todos os dados de simulação, com exceção do poço D2 que se demonstrou improvável de calibrar, possibilitaram a elaboração e interpretação das curvas diagnósticas, permitindo assim a comparação com as curvas previamente demonstradas no subcapítulo 5.2. Assim como os resultados simulados demonstraram, é possível perceber que na fase final do teste onde se encontra a recuperação após o desligamento da bomba, as curvas dos piezômetros se diferem dos dados observados se recuperando de forma imediata.

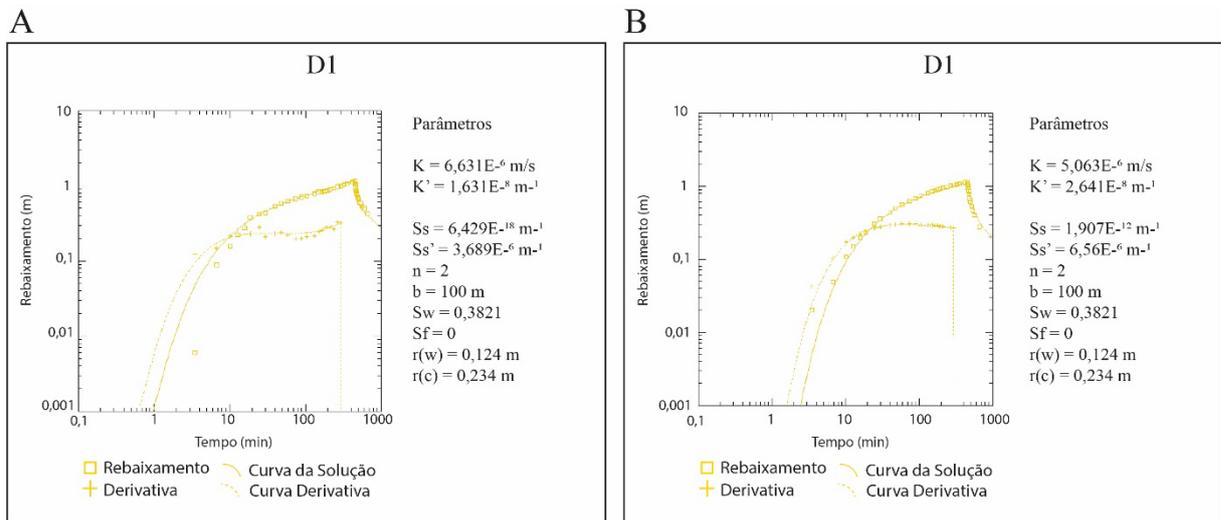
Assim como para os dados observados, as três soluções mostraram resultados positivos, ainda que não perfeitos, para todos os poços e piezômetros. Os valores de condutividade hidráulica se diferem muito pouco entre os dados observados e simulados, indicando uma boa calibração. Aqui serão apresentadas as comparações entre as curvas diagnósticas observadas e simuladas. Barker (1988) Figuras 25 a 29. Moench (1985) Figuras 30 a 34. Moench (1984) Figuras 35 a 39.

Figura 25 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: **K** – condutividade hidráulica das fraturas, **K'** – condutividade hidráulica da matriz rochosa, **Ss** – armazenamento específico das fraturas, **Ss'** – armazenamento específico da matriz rochosa, **n** – dimensão do fluxo, **b** – extensão da região de fluxo, **Sf** – fator de efeito das fraturas, **Sw** – fator de efeito do poço, **r(w)** – raio do poço e **r(c)** – raio do revestimento.



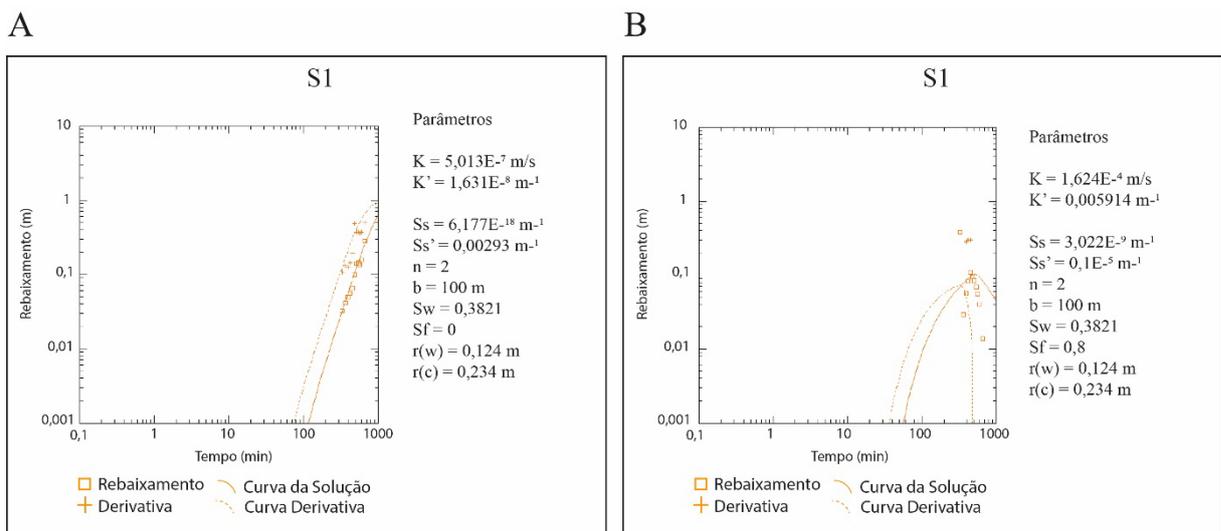
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 26 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, Ss – armazenamento específico das fraturas, Ss' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, Sf – fator de efeito das fraturas, Sw – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



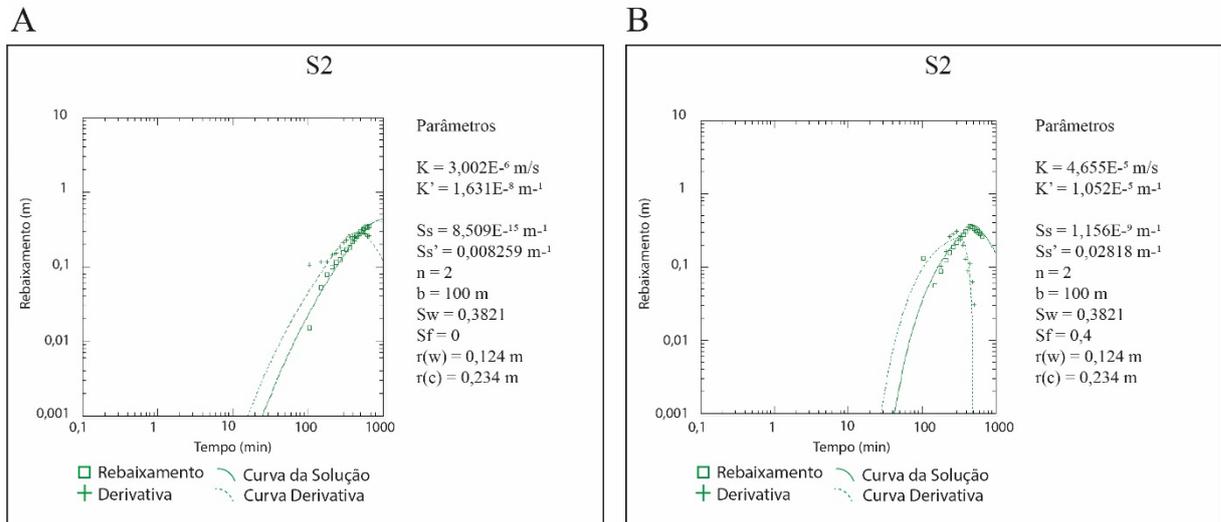
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 27 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, Ss – armazenamento específico das fraturas, Ss' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, Sf – fator de efeito das fraturas, Sw – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



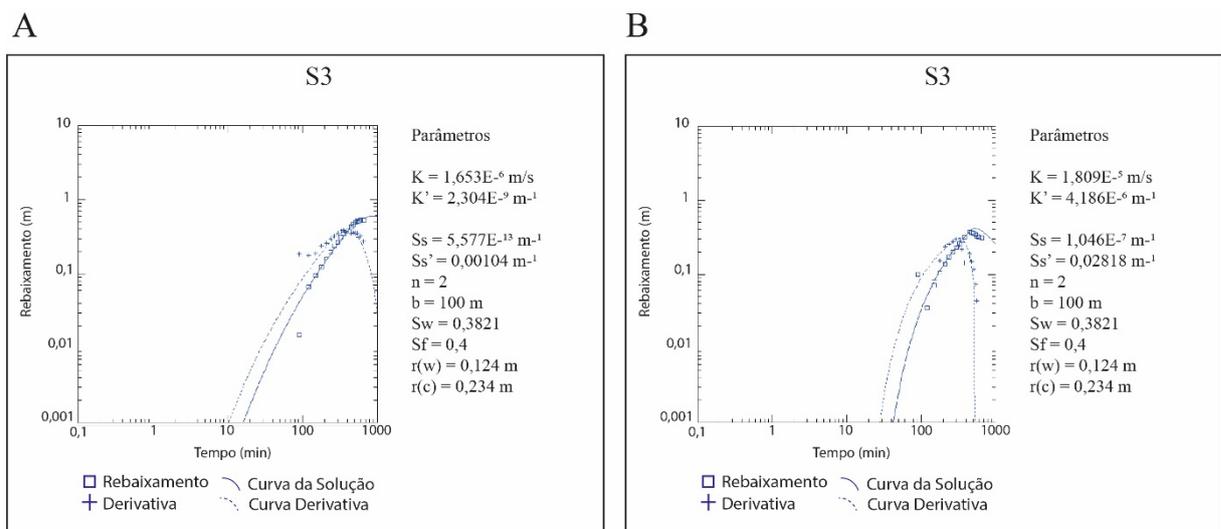
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 28 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, S_f – fator de efeito das fraturas, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



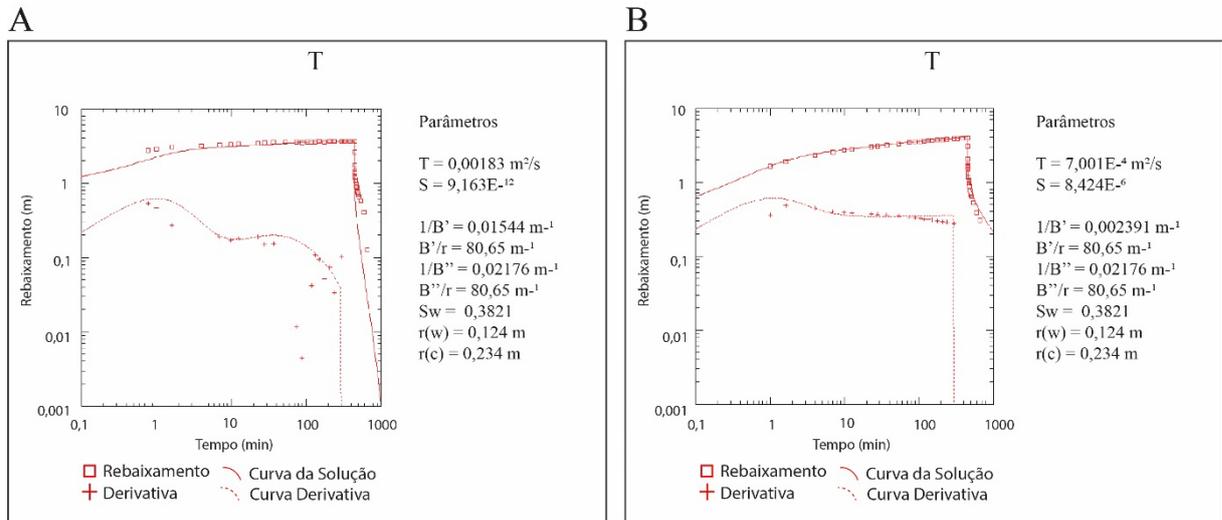
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 29 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, n – dimensão do fluxo, b – extensão da região de fluxo, S_f – fator de efeito das fraturas, S_w – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



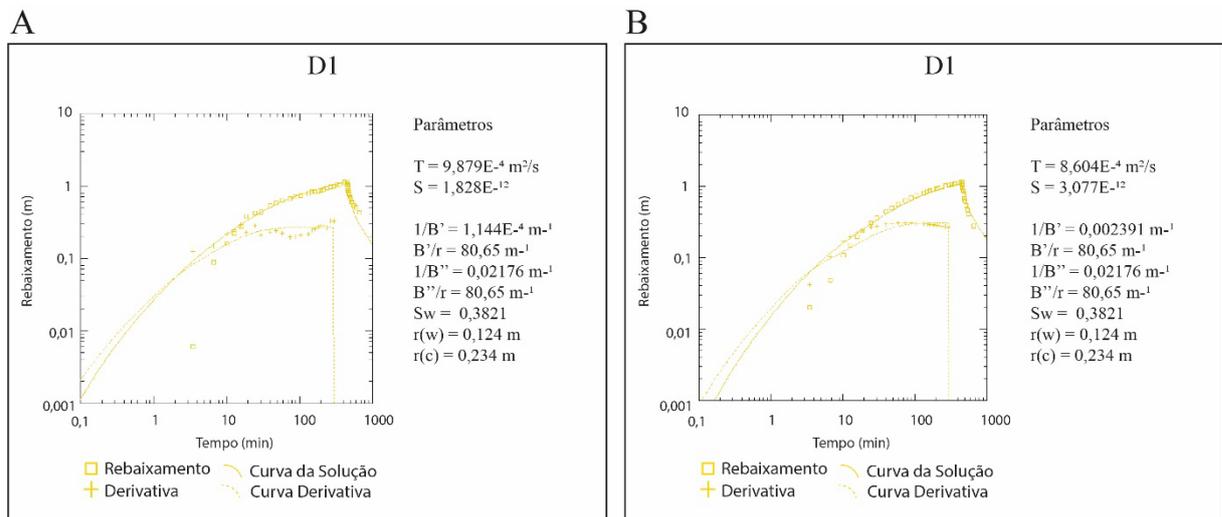
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 30 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: **T** – transmissividade, **S** – armazenamento, **r/B'** e **B'** – parâmetros de drenância do aquífero superior, **r/B''** e **B''** – parâmetros de drenância do aquífero inferior, **Sw** – fator de efeito do poço, **r(w)** – raio do poço e **r(C)** – raio do revestimento do poço.



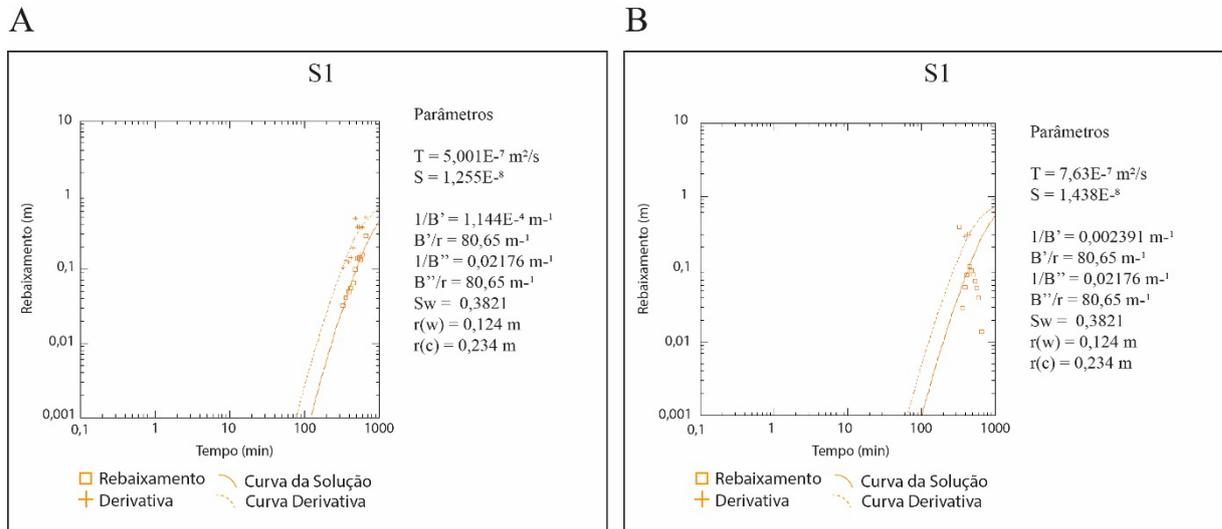
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 31 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: **T** – transmissividade, **S** – armazenamento, **r/B'** e **B'** – parâmetros de drenância do aquífero superior, **r/B''** e **B''** – parâmetros de drenância do aquífero inferior, **Sw** – fator de efeito do poço, **r(w)** – raio do poço e **r(C)** – raio do revestimento do poço.



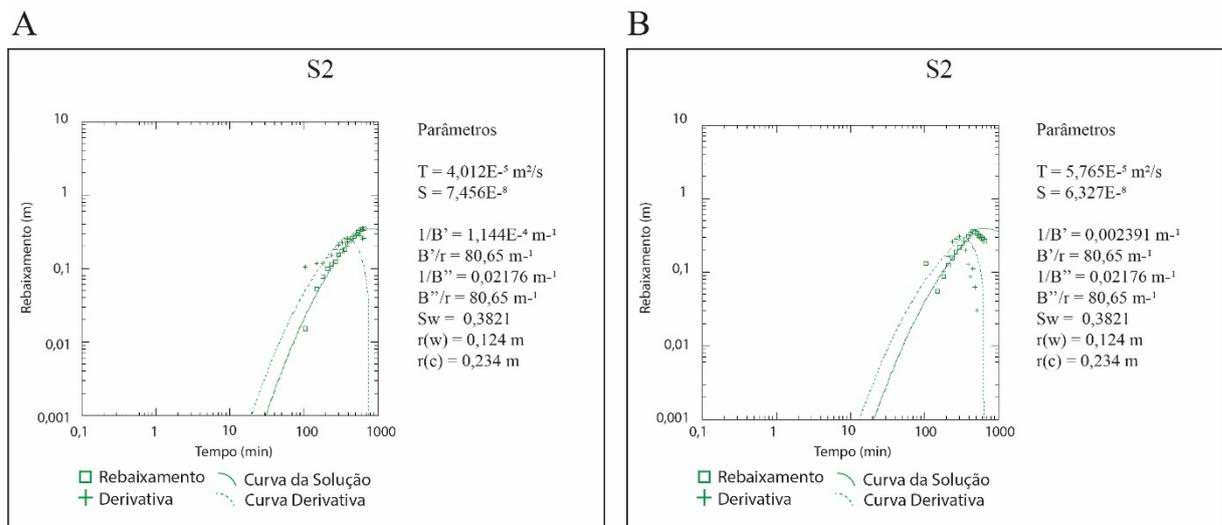
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 32 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquítarde superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquítarde inferior, Sw – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(C)$ – raio do revestimento do poço.



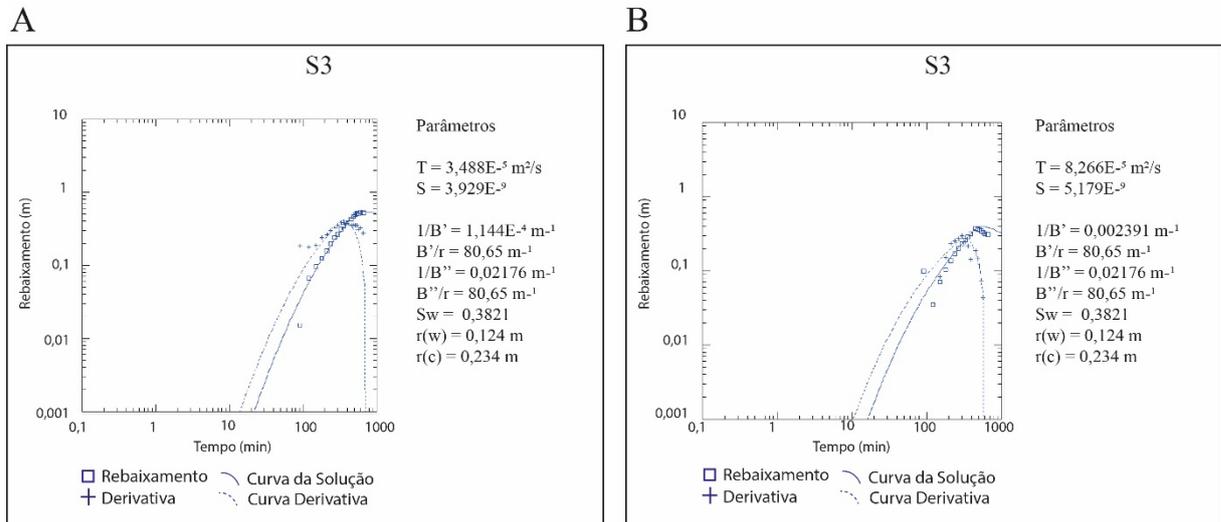
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 33 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquítarde superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquítarde inferior, Sw – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(C)$ – raio do revestimento do poço.



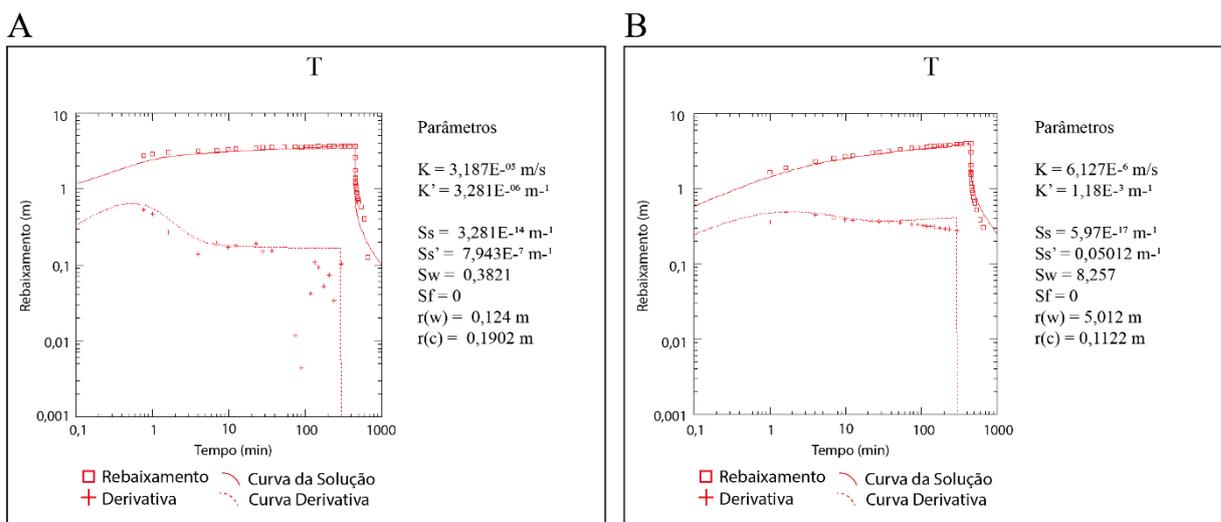
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 34 – Curva diagnóstica construída a partir dos dados de rebaixamento observados. Os parâmetros estimados são: T – transmissividade, S – armazenamento, r/B' e B' – parâmetros de drenância do aquífero superior, r/B'' e B'' – parâmetros de drenância do aquífero inferior, Sw – fator de efeito do poço, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento do poço.



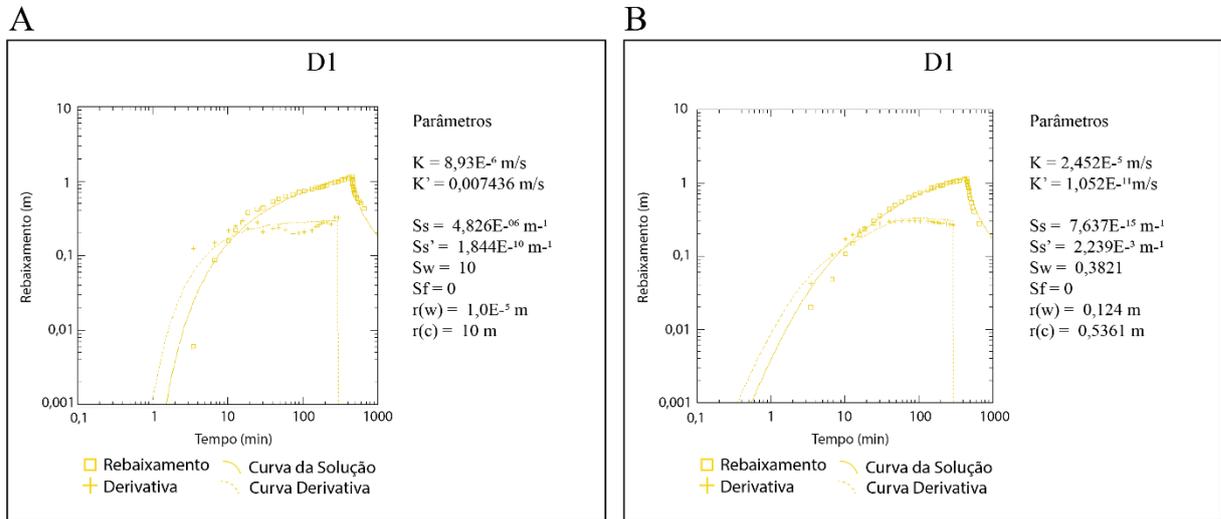
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 35 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, Ss – armazenamento específico das fraturas, Ss' – armazenamento específico da matriz rochosa, Sw – fator de efeito do poço, Sf – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



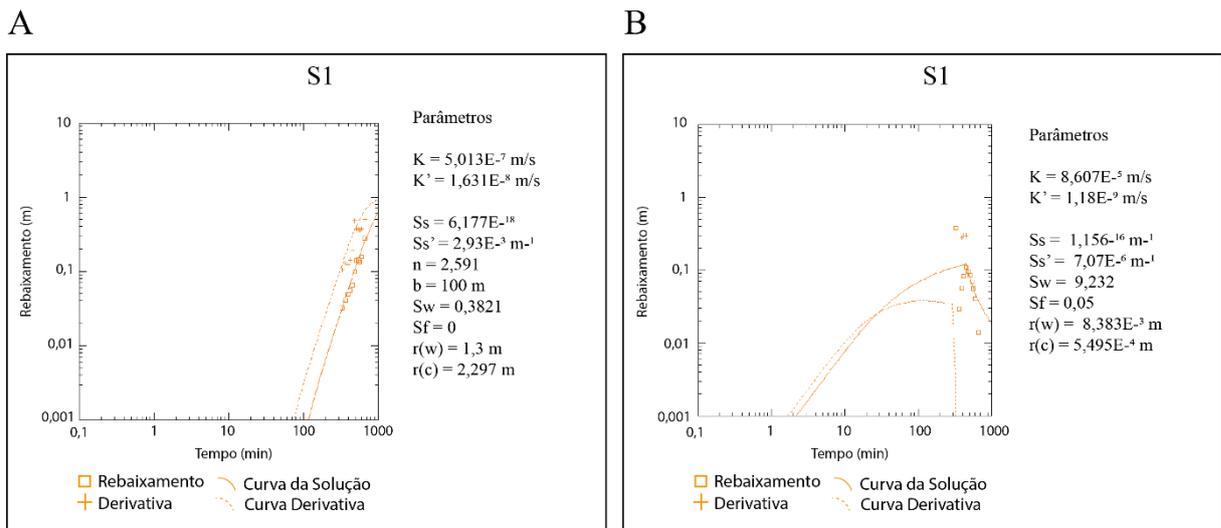
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 36 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, S_w – fator de efeito do poço, S_f – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



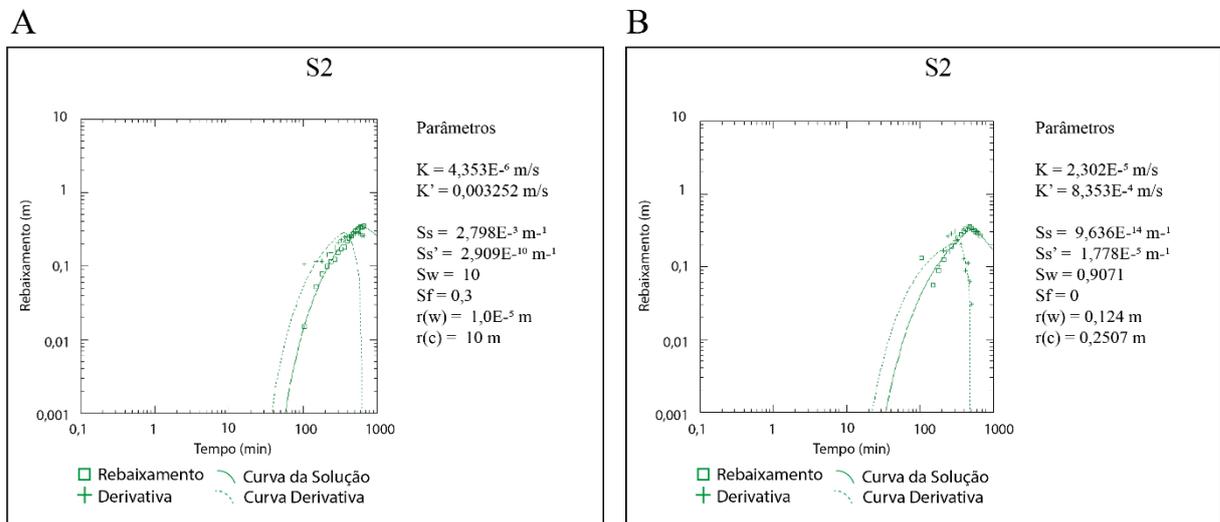
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 37 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, S_w – fator de efeito do poço, S_f – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



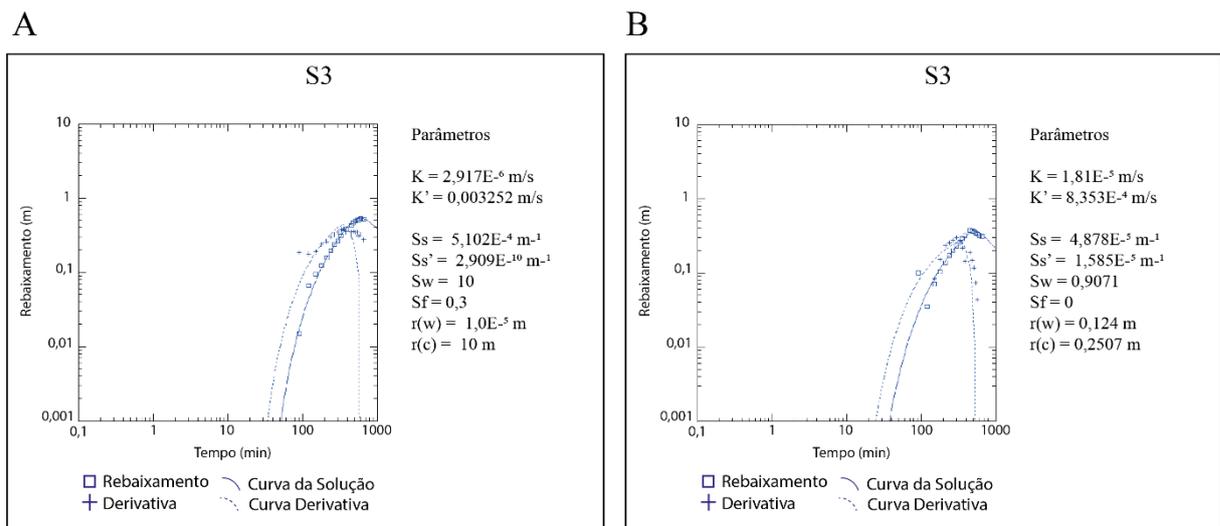
Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 38 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, S_w – fator de efeito do poço, S_f – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



Fonte – Elaborado pela autora.

Figura 39 – Comparação entre as curvas diagnósticas construídas a partir dos dados de rebaixamento observados (A) e simulados (B). Os parâmetros estimados são: K – condutividade hidráulica das fraturas, K' – condutividade hidráulica da matriz rochosa, S_s – armazenamento específico das fraturas, S_s' – armazenamento específico da matriz rochosa, S_w – fator de efeito do poço, S_f – fator de efeito da fratura, $r(w)$ – raio do poço e $r(c)$ – raio do revestimento.



Fonte – Elaborado pela autora.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados do teste de bombeamento obtidos por Rushton e Weller (1985) confirmados pelo comportamento exibido pelos resultados obtidos por este trabalho, é possível deduzir que o aquífero demonstra um sistema de duas camadas efetivo. O modelo conceitual que diz que há uma camada transicional fraturada entre a zona saprolítica e a rocha alterada é aplicável para o aquífero em questão podendo encaixar na descrição de Lachassagne (2011).

As curvas diagnósticas obtidas através da análise derivativa foram de grande ajuda em definir o modelo conceitual do trabalho. As três soluções – Barker (1988), Moench (1984) e o terceiro caso de Moench (1985) – se encaixam de forma satisfatória aos dados observados. Com isso deduziu-se com base em Moench (1984) e Barker (1988) que o aquífero seria confinado com dupla porosidade, já Moench (1985) indica que o aquífero seria confinado drenante, já que o saprólito se mostra em contato com a zona fraturada.

Esta análise permitiu a elaboração do modelo hidrogeológico através do software Model Muse. A simulação calibrada foi bem sucedida em representar o comportamento da zona fraturada, já na zona saprolítica a simulação gerou um bom resultado para o rebaixamento, mas não para a recuperação. O comportamento dos dados observados demonstra que os piezômetros penetrantes apenas no saprólito indicam que há um contínuo rebaixamento mesmo após o desligamento das bombas, o que pode significar que o saprólito alimenta a recuperação da zona fraturada. A simulação, porém, não foi capaz de reproduzir esse comportamento, gerou uma recuperação imediata.

O modelo de duas camadas se mostrou bem sucedido para este aquífero, então recomenda-se a investigação detalhada e aplicação deste modelo para outros aquíferos cristalinos que podem também demonstrar uma zona transicional. É um bom trabalho para transferir o conhecimento obtido e aplica-lo para aquíferos brasileiros que também se encontram em rochas ígneas e em regiões críticas para suprir a demanda populacional. O modelo se tornar viável indica a possibilidade de aplicação em diversas etapas de um estudo hidrogeológico em rochas cristalinas, desde para representar um estudo preliminar até para ajudar em medidas de remediação de áreas contaminadas, algo muito comum em grandes centros urbanos.

REFERÊNCIAS

- ACWORTH, R. I. The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 20, n. 4, p. 265-272, 1987.
- ANDERSON, Mary P.; WOESSNER, William W.; HUNT, Randall J. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press, 2015.
- BARKER, J.A. A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. **Water Resources Research**, vol. 24, no. 10, pp. 1796-1804, 1988.
- BALAKRISHNAN *et al.* U–Pb ages for zircon and titanite from the Ramagiri area, southern India: evidence for accretionary origin of the Eastern Dharwar craton during the late Archean. **Journal of Geology**, v. 107, p. 69-86, 1999.
- BARENBLATT, Grigory I.; ZHELTOV, Iu P.; KOCHINA, I. N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]. **Journal of applied mathematics and mechanics**, v. 24, n. 5, p. 1286-1303, 1960.
- BECKINSALE *et al.* 3360m-yr. old gneisses from the south Indian Craton: Nature. London, v. 283, p. 469-470, 1980.
- BENDER, Friedrich *et al.* Geology of Burma. 1983.
- BHOWMIK *et al.* Mesoproterozoic reworking of Palaeoproterozoic ultrahigh temperature granulites in the Central Indian Tectonic Zone. **Journal of Petrology**, v. 46, p. 1085-1119, 2005.
- BISCALDI, R. Problèmes hydrogè - ologiques des régions daffleurement de roches èruptives et mètamorphiques sous climat tropical. **Hydrogèol. Bull**, 1968.
- BOURDET, Dominique *et al.* A new set of type curves simplifies well test analysis. **World oil**, v. 196, n. 6, p. 95-106, 1983.
- BOURDET, Dominique *et al.* Use of pressure derivative in well test interpretation. **SPE Formation Evaluation**, v. 4, n. 02, p. 293-302, 1989.
- CHADWICK, Brian; VASUDEV, V. N.; AHMED, Nazeer. The Sandur Schist Belt and its Adjacent Plutonic Rocks Implications for Late Archaean Crustal Evolution in Karnataka. **Journal of Geological Society of India**, v. 47, n. 1, 1996.
- CHADWICK, B.; VASUDEV, V. N.; HEGDE, G. V. The Dharwar craton, southern India, interpreted as the result of Late Archaean oblique convergence. **Precambrian Research**, v. 99, n. 1-2, p. 91-111, 2000.
- CHADWICK *et al.* Structure and SHRIMP, U/Pb zircon ages of granites adjacent to the Chitradurga schist belt: implications for Neoproterozoic convergence in the Dharwar craton, southern India. **Journal of the Geological Society of India**, v. 69, p. 5-24, 2007.

DOMENICO, P. A.; MIFFLIN, M. D. Water from low-permeability sediments and land subsidence. **Water Resources Research**, v. 1, n. 4, p. 563-576, 1965.

DUFFIELD, Glenn M. AQTESOLV for Windows Version 4.5 User's Guide, HydroSOLVE. Inc., Reston, VA, 2007.

GUPTA, M. L. *et al.* Geothermal studies in the Hyderabad granitic region and the crustal thermal structure of the Southern Indian Shield. **Tectonophysics**, v. 140, n. 2-4, p. 257-264, 1987.

KOVAC, Peter; HENSHAW, Nicola; CASCONI, Lorenzo; HILL, Catherine; EUE, Dorothea; QUALLINGTON, Andrew. Structural Mapping Based on Remote Sensing and Potential Field Data – A Peninsular India Case Study. **Biennial International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics**, 2010.

FRIEND, C.R.L. The link between charnockite and granite production: evidence from Kabbaldurga, Karnataka, southern India. In: Atherton MP, Gribble CD (eds) Migmatites, melting and metamorphism. **Shiva Publishing Ltd.**, Nantwich, Cheshire, p. 264-276, 1983.

FRIEND, C. L.; NUTMAN; P., A. SHRIMP U–Pb, geochronology of the Closepet Granite and Peninsular Gneiss, Karnataka, South India. **Journal of the Geological Society of India**, v. 38, p. 357-368, 1991.

JAYANANDA *et al.* 3.35 ga komatiite volcanism in the western Dharwar craton, southern India: constraints from Nd isotopes and whole rock geochemistry. **Pre-cambrian Research**, v. 162, p. 160-179, 2008.

LACHASSAGNE, Patrick; WYNS, Robert; DEWANDEL, Benoît. The fracture permeability of hard rock aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. **Terra Nova**, v. 23, n. 3, p. 145-161, 2011.

MADHNURE, Pandith; LAVANYA, B. Development of Groundwater Irrigation in Telangana State: Challenges, Management and Way Forward. **Journal of the Geological Society of India**, v. 97, n. 3, p. 271-281, 2021.

MAHESWARI, K. *et al.* Ground penetrating radar for groundwater exploration in granitic terrains: A case study from Hyderabad. **Journal of the Geological Society of India**, v. 81, p. 781-790, 2013.

MARÉCHAL, Jean-Christophe; DEWANDEL, Benoît; SUBRAHMANYAM, K. Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. **Water resources research**, v. 40, n. 11, 2004.

MOENCH, Allen F. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. **Water Resources Research**, v. 20, n. 7, pp. 831-846, 1984.

- MOENCH, Allen F. Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers. **Water Resources Research**, v. 21, n. 8, p. 1121-1131, 1985.
- MOYEN, Jean-François et al. Syntectonic granite emplacement at different structural levels: the Closepet granite, South India. **Journal of Structural Geology**, v. 25, n. 4, p. 611-631, 2003.
- MUKHOPADHYAY, Dhruva. Structural pattern in the Dharwar craton. **The Journal of Geology**, 94.2, pp. 167-186, 1986.
- NAHA, K.; SRINIVASAN, R.; JAYARAM, S. Sedimentological, structural and migmatitic history of the Archaean Dharwar tectonic province, southern India. **Proceedings of the Indian Academy of Science (Earth and Planetary Science)**, v. 100, p. 413-433, 1991.
- NUTMAN *et al.* SHRIMP U/Pb zircon ages of acid volcanic rocks in the Chitradurga and Sandur groups, and granites adjacent to the Sandur schist belt, Karnataka. **Journal of the Geological Society of India**, v. 47, p. 153-164, 1996.
- PITCHER, Wallace. Comments on the geological environments of granites, origin of granite batholiths. The Jane Herdman Laboratories of Geology, University of Liverpool, 1979.
- RAMAKRISHNAN; VAIDYANADHAN, M. & R. **Geology of India, Volume I**: Geological Society of India. 2. ed. Bangalore: [s.n.], 2008. p. 10-56.
- RENARD, Philippe; GLENZ, Damian; MEJIAS, Miguel. Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. **Hydrogeology Journal**, v. 17, n. 3, p. 589-600, 2009.
- RUSHTON, K. R.; WELLER, Jane. Response to pumping of a weathered-fractured granite aquifer. **Journal of Hydrology**, v. 80, pp. 299-309, 1985.
- SAHA, Dilip; MAZUMDER, Rajat. An overview of the Palaeoproterozoic geology of Peninsular India, and key stratigraphic and tectonic issues. **Geological Society**, Londres, v. 365, n. 1, p. 5-29, 2012.
- SHARMA; S, R. Cratons and Fold Belts of India. **Springer**, v. 127, n. 23, p. 325, 2008.
- SPITZ, Karlheinz; MORENO, Joanna. A practical guide to groundwater and solute transport modeling, John Wiley and sons, 1996.
- SUKHIJA, B. S. et al. Efficacy of percolation ponds as artificial recharge structures and the controlling factors. **Geological Society of India**, v. 66, n. 1, p. 95-104, 2005.
- SUMIT, Das. Hydro-geomorphic characteristics of the Indian (Peninsular) catchments: Based on morphometric correlation with hydro-sedimentary data. **Advances in Space Research**, 67, pp. 2382-2397, 2021.
- SWAMI, N., RAMAKRISHNAN, M. e VISWANATHA, M.N. Rec. Geol. Survey, India, v.107, n. 2, p.149-175, 1976

TAYLOR, Richard; HOWARD, Ken. A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda. **Hydrogeology Journal**, v. 8, n.3, p. 279-294, 2000.

TAYLOR et al. Petrography, chemistry and isotopic ages of Peninsular Gneiss, Dharwar acid volcanic rocks and the Chitradurga granite with special reference to the late Archean evolution of the Karnataka craton, southern India. **Precambrian Research**, v. 23, n. 3, p. 349-375, 1984.

WANG, Herbert. F.; ANDERSON, Mary P. Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. Freeman, 1982.

WRIGHT, Ernest Peter. The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 66, n. 1, p. 1-27, 1992.

ANEXO 1

Dados do teste de bombeamento por Rushton e Weller (1985) poços T, D1 e D2.

	Tempo (min)	Rebaixamento (m)		Tempo (min)	Rebaixamento (m)		Tempo (min)	Rebaixamento (m)
T	0.78	2.723	D1	3.48	0.006	D2	120.54	0.017
	1.02	2.867		6.78	0.088		180	0.041
	1.62	3.024		10.26	0.156		240.24	0.043
	4.02	3.142		12.84	0.219		270.42	0.042
	7.02	3.222		15.96	0.277		300.78	0.062
	9.96	3.282		18.84	0.381		330.78	0.073
	12.6	3.363		24.9	0.415		360.54	0.081
	22.98	3.436		29.88	0.438		420.12	0.093
	28.14	3.51		40.02	0.532		450.6	0.099
	37.2	3.553		47.76	0.576		479.88	0.099
	53.16	3.59		59.28	0.619		510.54	0.094
	74.94	3.571		74.4	0.66		540.42	0.099
	89.52	3.53		89.46	0.699		570.06	0.084
	104.76	3.56		105.48	0.731		600.6	0.081
	119.58	3.572		133.8	0.78		660.42	0.09
	133.92	3.569		150.12	0.822			
	149.28	3.614		164.7	0.829			
	178.2	3.374		180.42	0.842			
	208.86	3.622		195.66	0.865			
	238.14	3.628		210	0.886			
	298.86	3.614		239.34	0.937			
	328.2	3.634		269.76	0.971			
	388.02	3.646		298.62	1			
	449.22	3.665		329.64	1.035			
	450.54	2.586		359.4	1.052			
	451.8	1.72		419.52	1.12			
	453.42	1.427		449.4	1.135			
	454.02	1.367		456.06	1.06			

454.32	1.27	458.88	1.021		
455.1	1.197	460.62	0.966		
459.3	1.126	466.02	0.906		
463.14	1.074	471	0.848		
468.72	0.956	480	0.784		
473.7	0.897	482.76	0.762		
479.94	0.875	494.22	0.711		
490.98	0.745	504.9	0.668		
502.86	0.699	523.98	0.6		
510.54	0.645	545.58	0.572		
540	0.582	570.54	0.529		
599.46	0.403	659.46	0.428		
660.78	0.127	600.48	0.502		

ANEXO 2

Dados do teste de bombeamento por Rushton e Weller (1985) piezômetros S1, S2 e S3.

	Tempo (min)	Rebaixamento (m)		Tempo (min)	Rebaixamento (m)		Tempo (min)	Rebaixamento (m)
S1	330.6	0.032	S2	105.9	0.015	S3	91.32	0.015
	360.42	0.041		151.02	0.052		120.78	0.066
	390.48	0.049		179.76	0.078		150.84	0.096
	420.06	0.055		210.42	0.1		180.06	0.124
	450.78	0.065		240.54	0.114		210.66	0.156
	485.34	0.1		270.9	0.124		240.66	0.197
	510.3	0.138		300.6	0.155		270.36	0.239
	540.18	0.142		331.8	0.171		300.24	0.265
	569.7	0.134		361.26	0.182		330	0.308
	600.48	0.157		390.42	0.216		360.18	0.346
	660	0.283		420.54	0.235		389.82	0.377
				450.36	0.256		450.36	0.428
				480.42	0.276		480.3	0.465
				510.66	0.298		509.7	0.488
				540.72	0.313		539.64	0.509
				570.3	0.321		570.6	0.502
				600.18	0.343		600.42	0.534
				630.78	0.337		659.04	0.522
				660.18	0.351			