

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

MODELO NUMÉRICO DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO CAMPO DE
TAQUIPE - BA

Jessica Tinami Katayama

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Co-Orientador: Msc. Roger Dias Gonçalves

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

JESSICA TINAMI KATAYAMA

MODELO NUMÉRICO DE FLUXO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DO CAMPO DE TAQUIPE – BA

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
Geóloga.

Rio Claro - SP

2022

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com a ajuda de diversas pessoas e instituições para que fosse concretizado. Primeiramente, agradeço a Deus, pela vida, a minha família por todo amor, aos amigos pela parceria e ao meu co-orientador professor Roger Dias por todos os ensinamentos compartilhados. As instituições, agradeço a ANP (Agência Nacional do Petróleo) por ceder as informações utilizadas nesse estudo, a DHI Water & Environment e sua representante no Brasil Hydroinfo por disponibilizar a licença acadêmica do *software* Feflow 7.4. A família, agradeço por todo o amor e apoio incondicional. Nada disso seria possível sem vocês. Aos amigos, agradeço toda a turma Cabacitos pelos os momentos vividos durante os anos de graduação. Em especial, agradeço aos amigos Helena, Isabella, Pietro, TLG, Davi, Pompeu, Caxaxa, Luana, Aline e Letícia com os quais pude compartilhar momentos de desespero e alegrias. Obrigada por partilharem nos altos e baixos. Ao professor Roger minha gratidão pelas conversas, ensinamentos, paciência e, principalmente, por toda compreensão e incentivo durante o desenvolvimento desse projeto, muito obrigada !

RESUMO

Pesquisas que subsidiam uma melhor gestão ambiental do meio ambiente e dos recursos naturais são essenciais para o futuro do planeta. O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo numérico hidrogeológico que permita uma melhor compreensão das águas subterrâneas no Campo de Taquipe-BA. Os dados compilados de 18 poços do SIAGAS e de 50 poços da ANP indicam que na área de estudo aflora a Fm. São Sebastião com uma espessura média de 500m e contato inferior com a Fm. Pojuca. Essa unidade apresenta-se bem heterogênea, com grande quantidade de intercalações entre areia e finos. Por isso para melhor definir o caráter desse espesso pacote, foram gerados mapas de Areia vs Argila nas profundidades de 0-50m, 50-150m e de 150m até a base. O modelo numérico de fluxo e as simulações foram feitas no *software* Feflow 7.4. As simulações foram feitas em regime permanente, com base em 14 pontos de observação. A configuração do modelo contempla 4 camadas com espessuras de 5m, 45m, 100m e 300m, do topo para a base. Essas também foram setorizadas regionalmente em zonas norte e sul, sendo que na camada 4 da zona norte tem-se ainda uma terceira zona. Após 96 simulações os valores de condutividade hidráulica (K) obtidos para a Zona Norte foram de: Camada 1= $1E-05$ m/s; Camada 2= $1E-06$ m/s; Camada 3= $9,21E-07$ m/s; Camada 4= $5E-06$ a $9,21E-07$ m/s. Já a Zona Sul apresenta os seguintes valores: Camadas 1 e 2= $6.24E-05$ m/s e Camadas 3 e 4= $3E-05$ m/s. O resultado da calibração apresentou valores de RMS= 8,22; NRMS = 14,6%; erro absoluto: $\hat{E} = 6,23$; e desvio padrão $\sigma = 8,53$. O desbalanço de fluxo corresponde a $+0,061276$ m³/dia, que representa 0,0004% da entrada da água total. O modelo possui representatividade regional e contribui para compreensão da dinâmica das águas subterrâneas do local. Além disso, o modelo também contribui de forma a indicar pontos que necessitam de mais informações geológicas que deem subsídios para uma discretização mais complexa da área.

Palavras chave: Hidrogeologia, Fm. São Sebastião, modelagem numérica, Feflow.

ABSTRACT

Research that supports better environmental management of the environment and natural resources is essential for the future of the planet. The objective of this work is to develop a hydrogeological numerical model that allows a better understanding of groundwater in the Taquipe-BA Field. Data compiled from 18 wells of SIAGAS and 50 wells of the ANP indicate that in the study area, Fm. São Sebastião has an average thickness of 500m and lower contact with Fm. Pojuca. This unit is very heterogeneous, with a large amount of intercalations between sand and clay. Therefore, to better define the character of this thick package, maps of Sand vs Clay were generated at depths of 0-50m, 50-150m and 150m to the base. The numerical model and simulations were developed in the Feflow 7.4 software. The simulations were made in steady state, based on 14 observation points. The configuration of the model includes 4 layers with thicknesses of 5m, 45m, 100m and 300m, from top to base. These were also sectorized regionally in north and south zones, and in the layer 4 of the north zone there is still a third zone. After 96 simulations, the hydraulic conductivity (K) values obtained for the North Zone were: Layer 1= 1E-05 m/s; Layer 2= 1E-06 m/s; Layer 3=9.21E-07 m/s; Layer 4= 5E-06 at 9.21E-07 m/s. The values obtained for the South Zone were: Layers 1 and 2= 6.24E-05 m/s and Layers 3 and 4= 3E-05 m/s. The obtained results show the following values RMS values= 8.22; NRMS = 14.6%; absolute error: $\hat{E} = 6.23$; and standard deviation $\sigma = 8.53$. The water balance corresponds to +0.061276 m³/day, which represents 0.0004% of the total water inlet. The model has regional representativeness and contributes to the understanding of the local groundwater dynamics. In addition, the model also contributes in order to indicate points that need more geological information that provides subsidies for a more complex discretization of the area.

Palavras chave: Hydrogeology, Fm. São Sebastião, numerical modeling, Feflow.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	10
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
3.1	Conceitos hidrogeológicos	10
3.1.1	Aquíferos	10
3.1.2	Equações de fluxo	11
3.2	Utilização de modelos em hidrogeologia	14
3.2.1	Preparação	16
3.2.2	Calibração	16
3.2.3	Aplicação	16
3.3	Modelo conceitual	16
3.4	Modelo Matemático	16
4	GEOLOGIA REGIONAL	17
4.1	Estratigrafia da Bacia do Recôncavo	17
4.1.1	Supersequência Paleozóica – Sequência Permiana	Erro! Indicador não definido.
4.1.2	Supersequência Pré Rife – Sequência J20-K05	19
4.1.3	Supersequência Rife	20
4.1.4	Supersequência Pós Rife - Sequência K50	23
4.1.5	Supersequências do Neógeno – Sequências N20 e N50	24
4.1.6	Supersequências N60	24
4.2	Configuração estrutural da bacia	24
4.3	O Canyon de Taquipe no contexto geológico regional	26
4.3.1	O preenchimento do Canyon	26
4.3.2	Caracterização estrutural	27
4.3.3	Origem e desenvolvimento	29
5	Caracterização da área	30
5.1	Geomorfologia	31
5.2	Clima	32
5.3	Caracterização Hidrogeológica	Erro! Indicador não definido.
6	Metodologia	34
6.1	Revisão Bibliográfica	34
6.2	Aquisição e confecção do banco de dados	34
6.3	Definição do Modelo Conceitual	34
6.4	Modelo matemático	35

6.5	Calibração	35
6.6	Análise e discussão dos resultados	35
7	Resultados e Discussão	36
7.1	Caracterização Geológica Local	36
7.2	Simulação numérica de fluxo	46
7.2.1	Modelo Conceitual	46
7.2.2	Modelo Numérico	47
7.2.3	Condutividade Hidráulica e Recarga	52
7.2.4	Calibração dos pontos de observação	55
7.2.5	Análise qualitativa da sensibilidade das camadas	58
7.2.6	Balanço de fluxo	59
8	CONCLUSÃO	Erro! Indicador não definido.
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização do Campo de Taquipe – BA.....	9
Figura 2 – Etapas de modelagem de águas subterrâneas.	15
Figura 3 - Mapa geológico do Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá, mostrando a distribuição de sedimentos pré-, sin- e pós-rifte.	18
Figura 4 - Arcabouço estrutural e campos de petróleo da Bacia do Recôncavo.	24
Figura 5 - Seção geológica A-A' traçado na Figura 3, porção sul da bacia.	26
Figura 6 - Paleogeografia durante a deposição da Formação Taquipe.....	26
Figura 7 - Mapa de localização do Canyon de Taquipe (vermelho), Campo de Taquipe (amarelo) e Falhas de Paranaguá e Mata-Catu (branco).	28
Figura 8 - Seção estratigráfica esquemática mostrando o efeito da reativação no Andar Aratu, de falhamentos de idade Rio da Serra. Blocos basculados em sentido oposto ao mergulho regional.....	29
Figura 9 - Bloco diagrama esquemático do modelo deposicional da formação Taquipe, mostrando a distribuição das fácies dentro do Canyon de Taquipe.	Erro! Indicador não definido.
Figura 10 - Localização da área de estudo no município de São Sebastião do Passé-BA.....	30
Figura 11 - Mapa topográfico do Campo de Taquipe e entorno.....	31
Figura 12 - fluviometria anual do período de 1964 a 2020 com média global de 1236mm/ano.	32
Figura 13 - Mapa de poços do Siagas.	37
Figura 14 - Mapa de poços da ANP.....	40
Figura 15 – Mapa de Areia vs Argila de 0-50m com base nos dados do SIAGAS.	41
Figura 16 - Mapa de Areia vs Argila de 0-50m com base nos dados da ANP.....	42
Figura 17 - Mapa de Areia vs Argila de 50-150m com base nos dados do SIAGAS	43
Figura 18 - Mapa de Areia vs Argila de 0-150m com base nos dados da ANP.....	44
Figura 19 - Mapa de Areia vs Argila de 150m-base utilizando <i>dados</i> da ANP.	45
Figura 20 - Limite estabelecido para o modelo.	47
Figura 21 - Malha de elementos finitos com refinamento nas drenagens e nos 14 poços de observação.	48
Figura 22 - Cota altimétrica do topo do modelo.	49
Figura 23 - Visualização tridimensional do modelo numérico com valores de espessura.....	50
Figura 24 - Representação das condições de contorno do Tipo 1 ou Seepage na Layer 1.....	51
Figura 25 - Mapa de espessura da Camada 4.	53
Figura 26 - Distribuição da condutividade hidráulica nas camadas de 1 a 4.....	54
Figura 27 - Distribuição dos valores de recarga por precipitação.	55
Figura 28 - Gráfico de correlação dos valores de carga hidráulica observados versus calculados.....	56
Figura 29 Distribuição da diferença de carga hidráulica (Calculado-Observado) no modelo.	57
Figura 30 - Balanço de fluxo do modelo calibrado.	59

1 INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera tem um papel importante na matriz energética nacional. Segundo o Relatório do Balanço Energético Nacional (BEN), elaborado pelo Ministério de Minas e Energia em 2018, o petróleo e o gás natural juntos totalizam 49,4% da matriz brasileira. Trata-se, entretanto, de um dos setores com maior potencial de degradação ambiental. Operações *onshore* e *offshore* que envolvem perfuração e extração costumam ser extremamente invasivas.

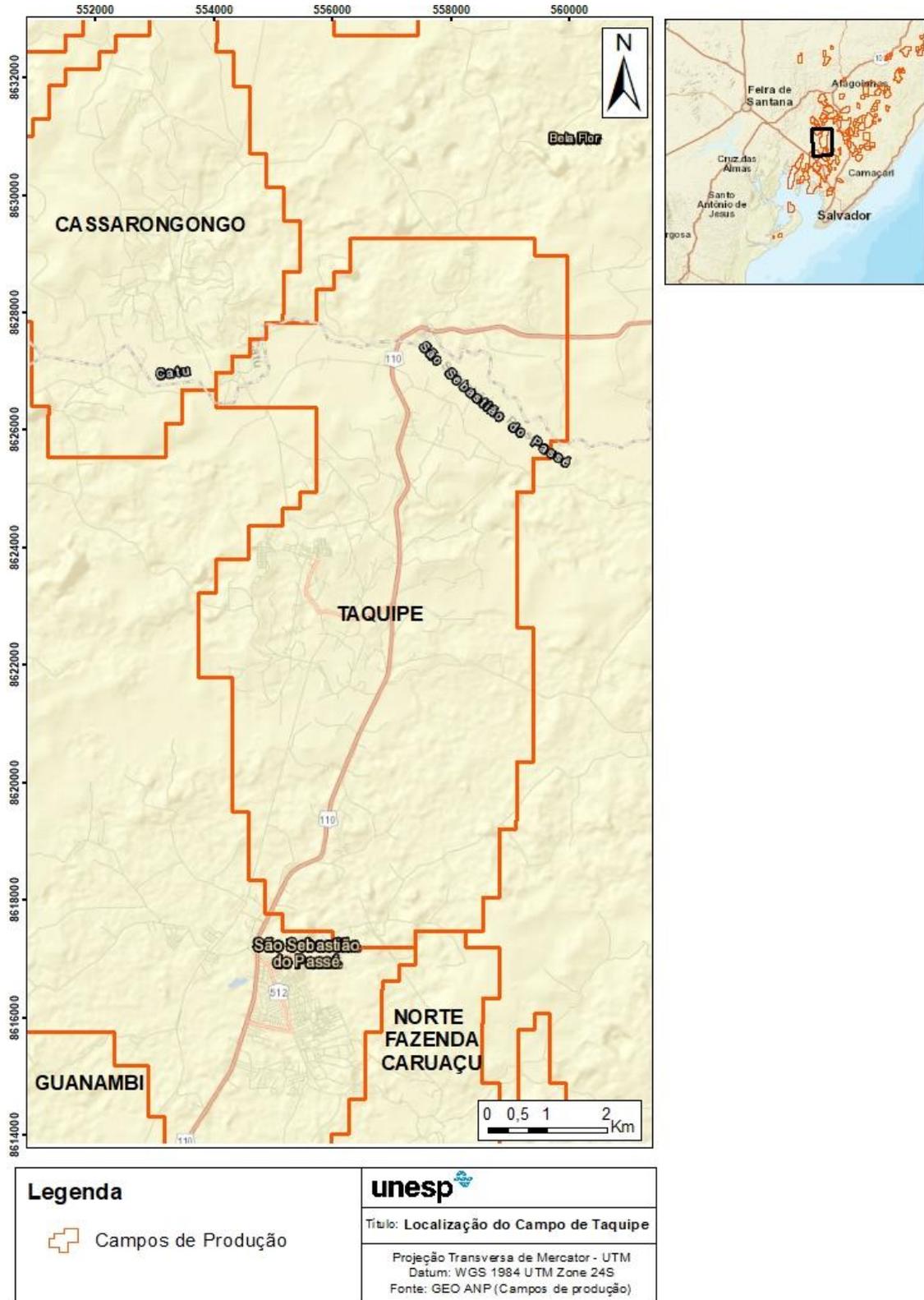
Os processos de toda a cadeia produtiva, desde o momento da retirada dos hidrocarbonetos em direção a superfície até a inserção no mercado trazem consequências ao meio ambiente, à cultura e à saúde humana (O'ROURKE e CONNOLLY, 2003). Dentre os principais resíduos gerados está a chamada água de produção, que é obtida junto com o fluido extraído do reservatório e seu volume chega a ser o maior de toda a atividade petrolífera (IFC, 2007).

Nesse cenário, como alternativa de descarte desse volumoso resíduo com alto teor de óleos e graxas (TOG), tem-se a prática da reinjeção em subsuperfície. Essa prática exige um conhecimento geológico detalhado da área, bem como simulações numéricas que permitam reproduzir o comportamento do fluido no reservatório.

Para execução desta pesquisa, foi selecionado o campo de Taquipe – BA, localizado na porção sul da Bacia do Recôncavo, no Município de São Sebastião do Passé, estado da Bahia (Figura 1).

O Campo de Taquipe é um dentre os 242 campos terrestres de produção distribuídos em território nacional. Descoberto em 1958, teve suas atividades iniciadas no ano seguinte ao seu descobrimento, mantendo a operação até os dias atuais. Desde então foram perfurados 249 poços, sendo 87 poços produtores e 30 injetores (ANP, 2016).

Figura 1 - Mapa de localização do Campo de Taquipe – BA.



Fonte: Autora, 2022.

2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O trabalho em questão tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo numérico hidrogeológico que permita a compreensão do fluxo das águas subterrâneas no Campo de Taquipe-BA.

Diante do exposto, o trabalho é justificado pela necessidade de um detalhamento do conhecimento de subsuperfície na região, para assim, melhor entender os comportamentos dos contaminantes nos aquíferos mais rasos, gerando assim subsídios para o planejamento de operações de reinjeção visando uma gestão ambiental adequada de todo o processo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Conceitos hidrogeológicos

3.1.1 Aquíferos

Aquífero é uma formação geológica que armazena e transmite água em condições naturais (FETTER, 2000). Os aquíferos são classificados de acordo com a capacidade de transmissão de água que as camadas limítrofes apresentam e em função da pressão que atingem (MANOEL FILHO, 2000).

O aquífero livre é aquele que apresenta a superfície de saturação em contato com a atmosfera (FETTER, 2000).

O aquífero confinado, como o próprio nome já diz, encontra-se enclausurado (topo e base) por camadas impermeáveis. Neste caso, a pressão exercida nesse aquífero pode produzir uma exsudação da água que seja superior a superfície rochosa, quando isso ocorre o aquífero pode ser denominado de artesianos (BEAR & VERRUIJT, 1987).

O aquífero semiconfinado está compreendido entre camadas semipermeáveis, ou seja, que não são totalmente resistentes ao fluxo de água. Quando isso ocorre, os aquíferos podem ganhar ou perder água pela drenança (BEAR & VERRUIJT, 1987).

O aquífero suspenso está localizado entre a superfície terrestre e a freática, isso por que pode ocorrer de uma camada impermeável ou semipermeável permitir sua elevação (BEAR & VERRUIJT, 1987).

3.1.2 Equações de fluxo

Em 1856, Henry Darcy concluiu experimentalmente uma relação entre a vazão de escoamento Q [L^3/T] e os parâmetros da área da uma seção filtrante (A), carga hidráulica (h_1-h_2) e distância (L) (FETTER, 2000). Essa relação é expressa pela seguinte equação:

$$Q = - K.A \frac{(h_1-h_2)}{L}$$

Em que o K representa a condutividade hidráulica [L/T], o sinal negativo significa que a direção do fluxo ocorre no sentido de maior carga hidráulica para menor carga hidráulica.

1.1.1.1 Carga hidráulica

A pressão exercida em um ponto e sua altura, em relação a um datum, expressam o nível de energia em que a água se encontra, indicando a carga hidráulica (FETTER, 2000). Matematicamente essa relação é expressa pela seguinte equação:

$$h = z + \frac{P}{\rho \cdot g} \rightarrow h = z + \frac{P}{\gamma}$$

Onde z é a cota do ponto, P (Pa) é a pressão que o atinge, ρ é amassa específica do líquido, g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e γ (N/m^3) é o peso específico.

1.1.1.2 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica (K) é um coeficiente de proporcionalidade que representa a facilidade com a qual a água passa em um meio poroso. Matematicamente é expresso pela relação entre os parâmetros de porosidade, tamanho, forma e distribuição dos grãos (FETTER, 2000).

$$K = k_i \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu}$$

Em que, k_i a permeabilidade intrínseca do meio poroso (m^2); ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3); g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido [$kg/(m,s)$].

A permeabilidade intrínseca (k_i) é um parâmetro relativo a granulometria e disposição estrutural do tipo de material poroso. Na equação, C descreve o efeito dos espaços porosos e d é o diâmetro médio dos grãos (FETTER, 2000).

$$k_i = C \cdot d$$

1.1.1.3 Transmissividade hidráulica

Diz respeito a quantidade de água que o meio poroso é capaz de transmitir. Matematicamente, tem-se:

$$T = b \cdot K$$

Onde, K é a condutividade hidráulica e b é a espessura do aquífero.

1.1.1.4 Coeficiente de armazenamento

Definido como o volume de água que um aquífero libera ou armazena devido a variação de carga hidráulica por unidade de área superficial do aquífero (FETTER, 2000).

$$S = b \cdot S_s$$

Onde, b é a espessura do aquífero e S_s o armazenamento específico. O armazenamento específico corresponde a capacidade que um conjunto água rocha tem em reter ou ceder água.

1.1.1.5 Generalizações da Lei de Darcy

A representação matemática do fluxo de águas subterrâneas, assim como toda representação de um processo natural, envolve simplificações. A lei de Darcy, por exemplo, foi estabelecida considerando um fluxo unidirecional, entretanto, a partir dela foram geradas equações generalizadas para fluxos tridimensionais. (FETTER, 2000). A partir da relação da velocidade aparente com a equação de Darcy, tem-se que:

$$v = Q A = -K \frac{dh}{dl}$$

$$v = -K \text{ grad } h$$

Na expressão o grad h indica a variação da carga hidráulica em cada uma das direções x, y e z. Dessa forma, para cada eixo tem-se que:

$$v_x = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} \quad v_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}$$

No caso de meios isotrópicos, K é um escalar e v e grad h são vetores. No entanto, na natureza os meios são majoritariamente anisotrópicos, isso significa que há variação do K, e, portanto, o parâmetro deixa de ser um escalar. Nesse caso, é necessário realizar o cálculo de K através de uma matriz de coeficientes. (MANOEL FILHO, 2000).

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial h / \partial x \\ \partial h / \partial y \\ \partial h / \partial z \end{bmatrix}$$

1.1.1.6 Equação geral de Fluxo

A equação de continuidade descreve a conservação de massa durante o fluxo. A equação governante é derivada a partir de um fluxo que passa através de um cubo de material poroso denominado de Volume Elementar Representativo (VER) (WANG & ANDERSON, 1982).

Para condições de regime de fluxo permanente, predomina uma condição de equilíbrio, ou seja, a quantidade de água que flui para fora de um VER é a mesma que entra. Assim, considerando que o balanço de massa é calculado pela soma dos resultados da componente em cada direção, tem-se que a equação da continuidade simplificada que representa essa situação é:

$$-\frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Considerando um meio anisotrópico, quando se substitui a equação de Darcy, obtém-se a equação de Laplace (FREEZE & CHERRY, 1979):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

3.2 Utilização de modelos em hidrogeologia

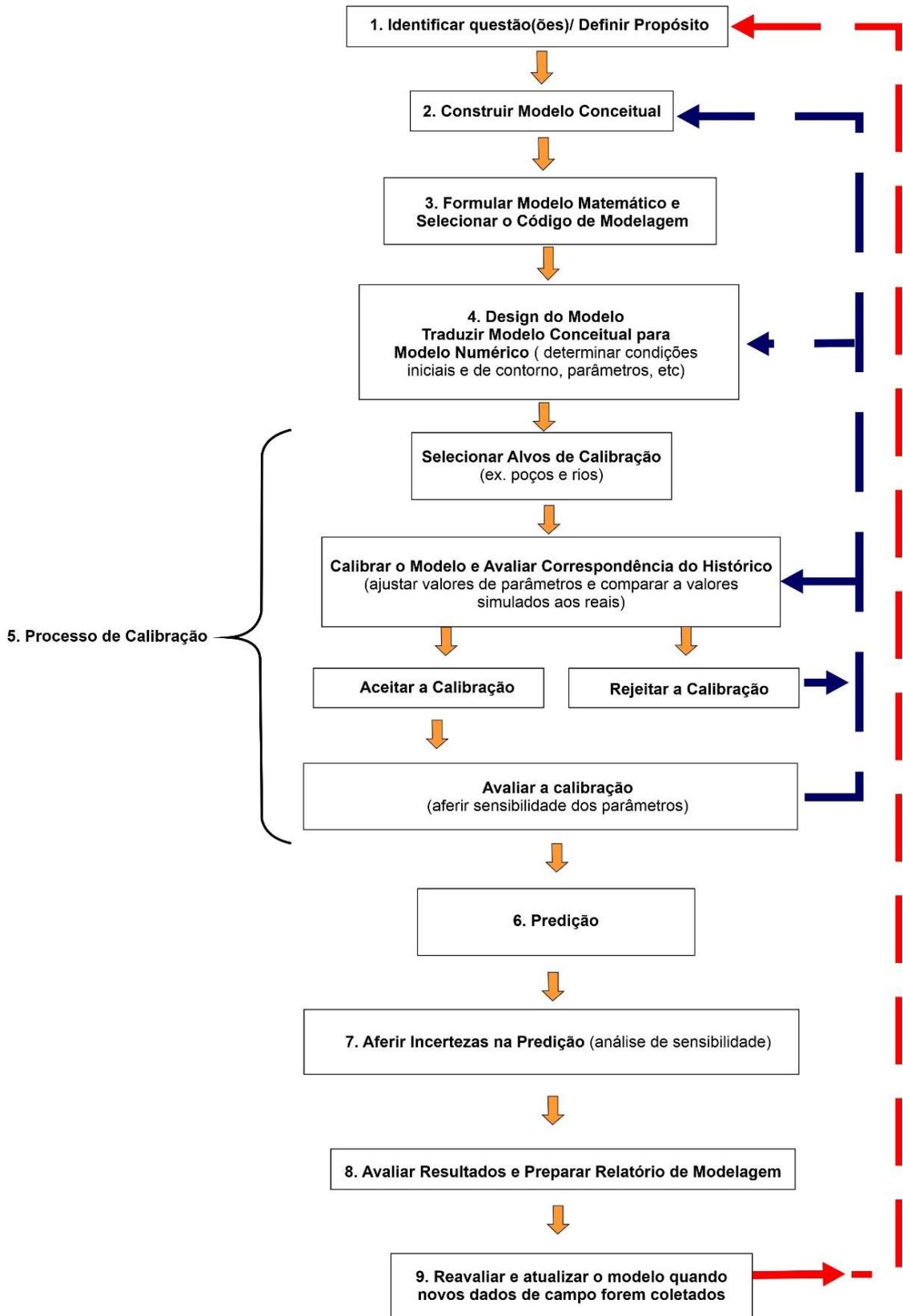
Um modelo é uma representação simplificada do complexo mundo natural. Na hidrogeologia, um modelo de fluxo de águas subterrâneas pode ser empregado de duas formas, sendo elas conceitual e dinâmico.

O modelo conceitual é aquele que representa as condições e relações hidrogeológicas de um sistema aquífero sem levar em consideração a dimensão temporal, por isso também podem ser considerados estáticos. Identificar as informações de forma a descrever um cenário hidrogeológico que melhor reproduza o comportamento do sistema hídrico em questão levando em conta a identificação das fronteiras do modelo, condições de contorno, parâmetros hidrogeológicos e entrada e saídas são base para a construção de um modelo numérico (FETTER, 2001).

Diferentemente do modelo conceitual, o modelo dinâmico leva em consideração as relações hidrogeológicas no tempo e no espaço. Neste estudo será utilizado o modelo dinâmico do tipo matemático para fluxo subterrâneo. Esses são fundamentados na resolução de equações mais complexas, que envolvem a variabilidade de parâmetros, caracterizando-os como modelos numéricos computacionais.

Para a construção de modelos numéricos computacionais, é necessário seguir uma série de procedimentos, que são as etapas de modelagem. Esses são denominados de Protocolos de Aplicação de Modelos Matemáticos, de sigla PAMM's (ANDERSON & WOESSNER, 2015; Figura 2). Os PAMM's possuem nove etapas, que aqui são subdividas em três fases, denominadas de preparação, calibração aplicação.

Figura 2 – Etapas de modelagem de águas subterrâneas.



Fonte: Adaptado de Anderson & Woessner, 2015.

3.2.1 Preparação

Essa etapa é iniciada pela definição do propósito da modelagem tendo em vista sua aplicação final. Tendo definido isso, dá-se início a aquisição e compilação de dados, podendo esses serem obtidos na literatura, no campo ou em banco de dados abertos. Essas informações servem de base para estabelecer o modelo conceitual da área de estudo. Por fim, esse modelo conceitual sustentará a elaboração do modelo numérico.

3.2.2 Calibração

Nesta segunda fase ocorre a calibração do modelo. Essa etapa requer a simulação em ambiente computacional reiteradamente, até que os parâmetros calculados sejam equivalentes ou próximos aos valores reais (observados em campo).

3.2.3 Aplicação

Com o modelo calibrado, é possível analisar os resultados obtidos na simulação, possibilitando uma maior compreensão do modelo hidrogeológico considerado.

3.3 Modelo conceitual

O modelo conceitual corresponde a representação simplificada de um aquífero. As simplificações vêm em muitas formas, nos processos incluídos ou excluídos do modelo (FETTER, 2000). O modelo conceitual tem por objetivos o conhecimento das unidades hidrogeológicas e o comportamento do fluxo de água subterrânea que balizaram a concepção dos modelos matemáticos.

3.4 Modelo matemático

A modelagem numérica tridimensional de fluxo de água subterrânea permite representar matematicamente as condições hidrodinâmicas observadas em sistemas hidrogeológicos de interesse. Consiste em uma ferramenta que possibilita a realização de prognósticos quanto às possíveis variações nessas condições frente a intervenções diversas (ANDERSON & WOESSNER, 1992).

A definição das condições de contorno são fundamentais para um modelo matemático, uma vez que delimitam o número de soluções possíveis para uma única equação de modo a especificar valores de parâmetros aos nós do modelo. As condições de contorno podem ser classificadas em três tipos diferentes:

- 1° Tipo (Dirichlet): Especifica o valor que a solução deve assumir em um ponto; variável especificada;
Exemplo: carga hidráulica especificada.
- 2° Tipo (Neumann): Especifica o valor que a derivada da solução deve assumir em um ponto; fluxo especificado
Exemplo: taxa de recarga ou de bombamento.
- 3° Tipo (Cauchy): Especifica o valor que a solução e sua derivada devem assumir em um ponto;
Exemplo: Fluxo de água trocado entre o aquífero e um rio.

4 GEOLOGIA REGIONAL

Com aproximadamente 11.500 km² de extensão e 6.500 m de espessura, a Bacia do Recôncavo integra o Sistema Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá na região nordeste, no Estado da Bahia (Figura 3). Seus limites são representados pela Falha de Salvador a leste, Falha de Maragogipe a oeste, sistema Falha da Barra ao sul e o Alto de Aporá ao norte separando-a da bacia do Tucano.

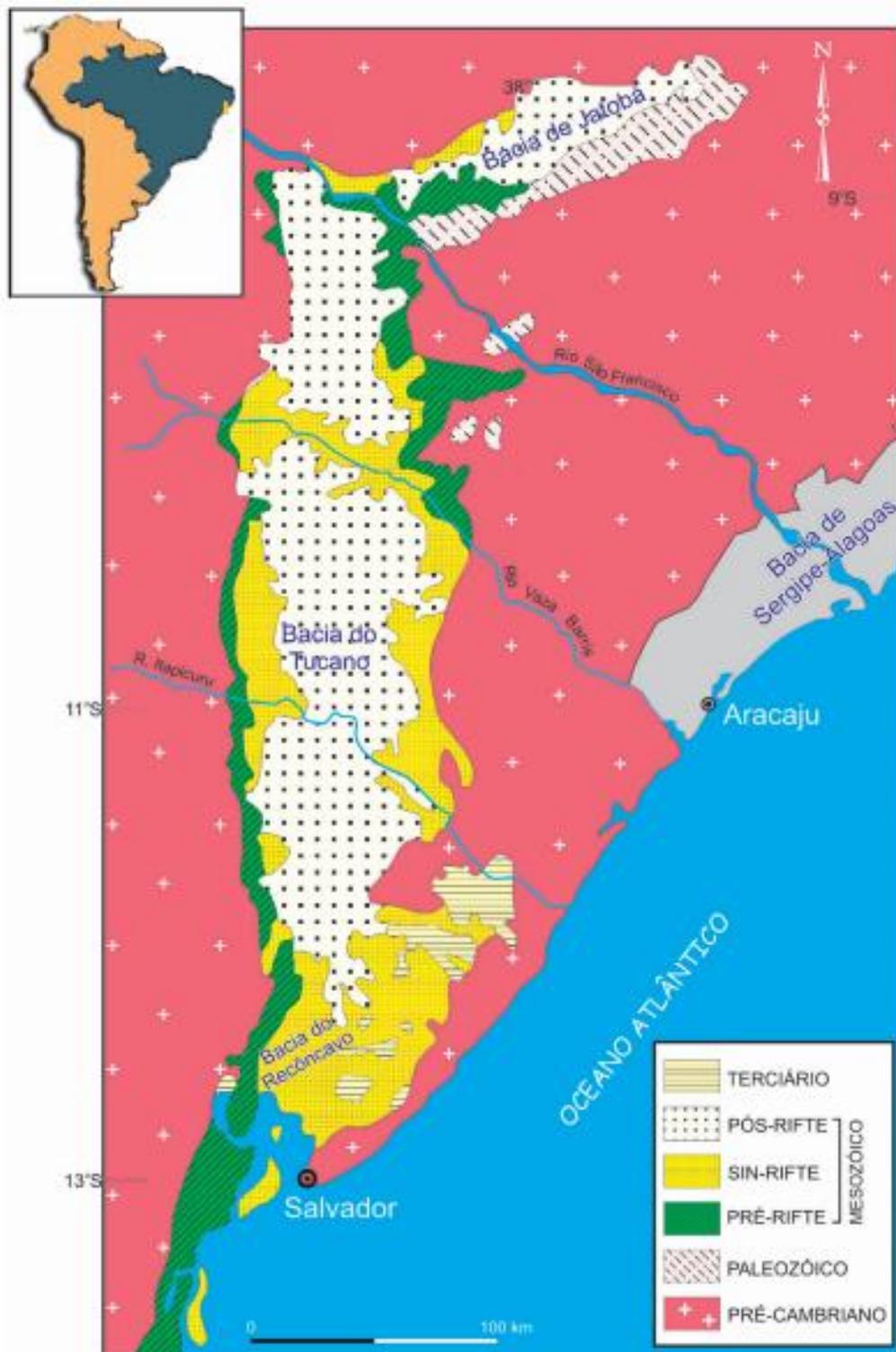
4.1 Estratigrafia da Bacia do Recôncavo

A sistematização de informações acumuladas desde a primeira metade do século XIX sobre a Bacia do Recôncavo foi feita por Viana et al. (1971), e posteriormente os trabalhos de Caixeta et al. (1994) e Silva et al. (2007) contribuíram com modificações na estratigrafia da área.

4.1.1 Supersequência Paleozóica – Sequência Permiana

Representado pela Formação Afligidos, os Membros Pedrão (inferior) e Cazumba (superior) foram depositados em um ambiente de bacia intracratônica em paleoclima árido. A tendência geral regressiva passa de uma sedimentação marinha rasa, para bacias evaporíticas, sabkha continental e, por fim, sistemas lacustres (AGUIAR e MATO, 1990).

Figura 3 - Mapa geológico do Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá, mostrando a distribuição de sedimentos pré-, sin- e pós-rifte.



Fonte: Magnavita, 1992.

Formação Afligidos (Kunguriano)

O Membro Pedrão inferior contempla arenitos com feições de retrabalhamento por onda, laminitos e evaporitos. O Membro Cazumba apresenta predominância de pelitos e lamitos, na base há nódulos de anidrita e no topo o contato é discordante com o Mb. Boipeba da Fm. Aliança (AGUIAR E MATO, 1990).

4.1.2 Supersequência Pré Riffe – Sequência J20-K05

Corresponde à fácies depositadas no estágio inicial de flexura da crosta. Constituído pelo Grupo Brotas e pelas Formações Itaparica e Água Grande do Grupo Santo Amaro. Essa sequência representa três grandes ciclos flúvio-eólicos intercalados entre si por transgressões lacustres marcadas por sedimentação pelítica (SILVA et al., 2007).

Grupo Brotas (Neojurássico)

Abrange as Formações Aliança e Sergi.

Formação Aliança

Depositada por sistemas flúvio lacustres em clima árido, compreende os membros Boipeba (inferior) e Capianga (superior). O primeiro consiste em arenitos feldspáticos finos a médios de cor avermelhada e marrom com estratificação cruzada e o segundo de folhelhos com coloração vermelho-tijolo. O contato da base entre o Mb. Boipeba e a Fm. Afligidos é discordante e no topo há uma passagem gradacional com a Fm. Sergi (CAIXETA et al., 1994 e VIANA et al., 1971).

Formação Sergi

Depositadas em sistemas fluviais entrelaçados com retrabalhamento eólicos, as litologias que compõem essa unidade são arenitos finos a conglomeráticos com estratificação cruzada acanalada, marcas de onda e de coloração avermelhada e cinza esverdeada. O contato superior com a Fm. Itaparica é gradacional (CAIXETA et al., 1994 e VIANA et al., 1971).

Grupo Santo Amaro (Berrisiano-Eobarremiano)

Fazem parte desse grupo as Formações Itaparica, Água Grande, Candeias e Maracangalha, sendo que as duas primeiras foram depositadas durante a fase pré-rifte e as últimas duas na fase rifte (SILVA et al., 2007).

Formação Itaparica (Eoberrisiano)

Sucessão de folhelhos de coloração acinzentada com siltitos, apresenta espessura máxima de 200m. Sob essas camadas pode ainda ocorrer arenitos calcíferos e calcários. O contato superior com a Fm. Água Grande é discordante (VIANA et al., 1971).

Formação Água Grande

Depositados em sistemas fluviais com retrabalhamento eólico os arenitos finos a grossos apresentam estratificações cruzadas de médio a grande porte. As feições de retrabalhamento são mais proeminentes no topo da seção, podendo ser indicativas de uma pausa na sedimentação, marcando um contato discordante com a Fm. Candeias (CAIXETA et al., 1994).

4.1.3 Supersequência Rifte

Fazem parte da supersequência rifte as sequências K10, K20 e K30 (SILVA et al., 2007).

Sequência K10-K20

Essa sequência pode ser relacionada com as Formações Candeias e Maracangalha. As litofácies indicam um sistema deposicional lacustre no início da fase rifte (SILVA et al., 2007).

Formação Candeias

Unidade essencialmente argilosa entre os arenitos da Fm. Água Grande e os clásticos do Grupo Ilhas (VIANA et al., 1971). Os folhelhos do Membro Tauá (inferior) apresentam-se menos resistivos que os do Membro Gomo (superior), além disso na unidade superior há a presença de delgadas camadas de calcário e arenito fino (CAIXETA et al., 1994).

Sequência K30

A base dessa sequência pode ser representada também pela Formação Maracangalha, se estendendo até a Formação Sebastião do Grupo Massacará. A sucessão estratigráfica expressa uma transição de ambientes deposicionais, onde há o recuo de sítios lacustres, expansão dos sistemas deltaicos e o assoreamento do rifte com o predomínio de fácies fluviais (SILVA et al., 2007).

Formação Maracangalha

Se caracteriza por folhelhos de coloração cinza de resistividade inferior quando comparados aos do Membro Gomo. É dividida nos Membros Caruaçu (inferior) e Pitanga (superior), o primeiro compreende arenitos com estratificações cruzadas e plano paralelas e o segundo aparece como lentes de arenitos finos maciços em meio a espessos corpos de folhelhos. O contato superior com a Fm. Marfim do Grupo Ilhas é concordante, por vezes através da interdigitação com o Mb. Caruaçu. (CAIXETA et al., 1994 e VIANA et al., 1971).

Grupo Ilhas (Valanginiano - Aptiano)

Seção areno-argilosa depositada em ambiente deltaico, compreende as Formações Marfim e Pojuca, também denominadas ilhas inferior e superior, respectivamente (VIANA et al., 1971).

Formação Marfim

Arenitos finos a médios, bem selecionados intercalados com camadas de folhelhos e siltitos. O Membro superior Catu apresenta característicos marcos elétricos na curva de potencial espontâneo, devido a ocorrência de arenitos com considerável permoporosidade. Os contatos inferior e superior são, respectivamente, concordantes com a Fm. Candeias e concordante gradacional com a Fm. Pojuca (CAIXETA et al., 1994 e VIANA et al., 1971).

Formação Pojuca

Contempla intercalações de arenitos finos a médios, folhelhos, siltitos e calcários. Essas apresentam respostas elétricas particulares, possibilitando a caracterização da unidade em marcos de correlação numerados de 1 a 15. O Membro Santiago, correlacionado entre os marcos de 11 a 14, representa uma camada arenítica de expressão regional, que melhor se desenvolve nas proximidades da cidade de São Sebastião do Passé-BA (CAIXETA et al., 1994 e VIANA et al., 1971).

O contato inferior da formação é gradacional com a Fm. Candeias, concordante com a Fm. Marfim e lateralmente encontra-se interdigitado com a Fm. Salvador. (VIANA et al., 1971).

Formação Taquipe

Compreende folhelhos e lentes de arenitos finos maciços, depositados preferencialmente no Cânion de Taquipe, uma feição erosiva alongada na direção N-S. A unidade é envolta pela Fm. Pojuca, mantendo relações de discordância na base e concordância no topo (CAIXETA et al., 1994 e VIANA et al., 1971).

Grupo Massacará (Berriasiano- Eoaptiano)

Compreende as Formações São Sebastião e Salvador, as últimas depositadas durante a fase rifte (SILVA et al., 2007).

Formação São Sebastião

Compreende arenitos grossos de coloração amarelo-avermelhada intercalado com finos depositados por sistemas fluviais da fase final do assoreamento do rifte. O Membro Paciência (inferior) é composto por arenitos de granulação fina a grossa e folhelhos negros. O Membro Passagem dos Teixeiras (intermediário) abrange arenitos finos a médios e folhelhos de coloração acinzentada, sendo que no contato entre essas duas litologias é comum a presença de óxido de ferro na forma de concreções. O Membro Rio Joanes (superior) é composto por arenitos finos e argilas avermelhadas (CAIXETA et al., 1994).

Formação Salvador

Caracterizado por arenitos e, principalmente, conglomerados, alguns autores consideram a formação representativa do início do estágio rifte, tendo como base a deposição dos primeiros conglomerados sin-tectônicos durante o Berrisiano, que se estende até Neobarremiano/Eoaptino. Entretanto, a interpretação aqui adotada segue a de Caixeta et al. (1994) e Viana et al. (1971), que apontam a defasagem temporal como compatível com início do soerguimento das ombreiras do rifte e sua erosão, constituindo leques aluviais e fandeltas (SILVA et al., 2007).

Os conglomerados podem apresentar clastos de diferentes tamanhos e tipos, são eles: seixos de arenitos de até 10cm, seixos de calcário de até 50 cm, seixos e matacões de rochas metamórficas de até 2m (Viana et al., 1971).

4.1.4 Supersequência Pós Rifte - Sequência K50

A sequência K50 pode ser relacionada com a Formação Marizal (SILVA et al., 2007).

Formação Marizal (Neoaptiniano)

Compreende clásticos grossos, folhelhos e calcários depositados em sistemas aluviais já no contexto de subsidência tectônica. Os estratos encontram-se subhorizontalizados sobrepostos às seções estruturadas da seção rifte, caracterizando uma discordância angular na base (SILVA et al., 2007).

4.1.5 Supersequências do Neógeno – Sequências N20 e N50

As sequências N20 e N50 correspondem, respectivamente, as Formações Sabiá e ao Grupo Barreiras (SILVA et al., 2007).

Formação Sabiá

Contempla folhelhos, calcários e arenitos depositados em discordância com a Fm. São Sebastião e com o Grupo Barreiras. Com uma espessura máxima de 20m é associado a uma transgressão miocênica (VIANA et al., 1971).

Grupo Barreiras

Contempla areias grossas a muito grossas, argilas de cores variadas e arenitos grossos mal consolidados com estratificação cruzada. Foram formados em sistemas de leques aluviais pliocênicos (VIANA et al., 1971).

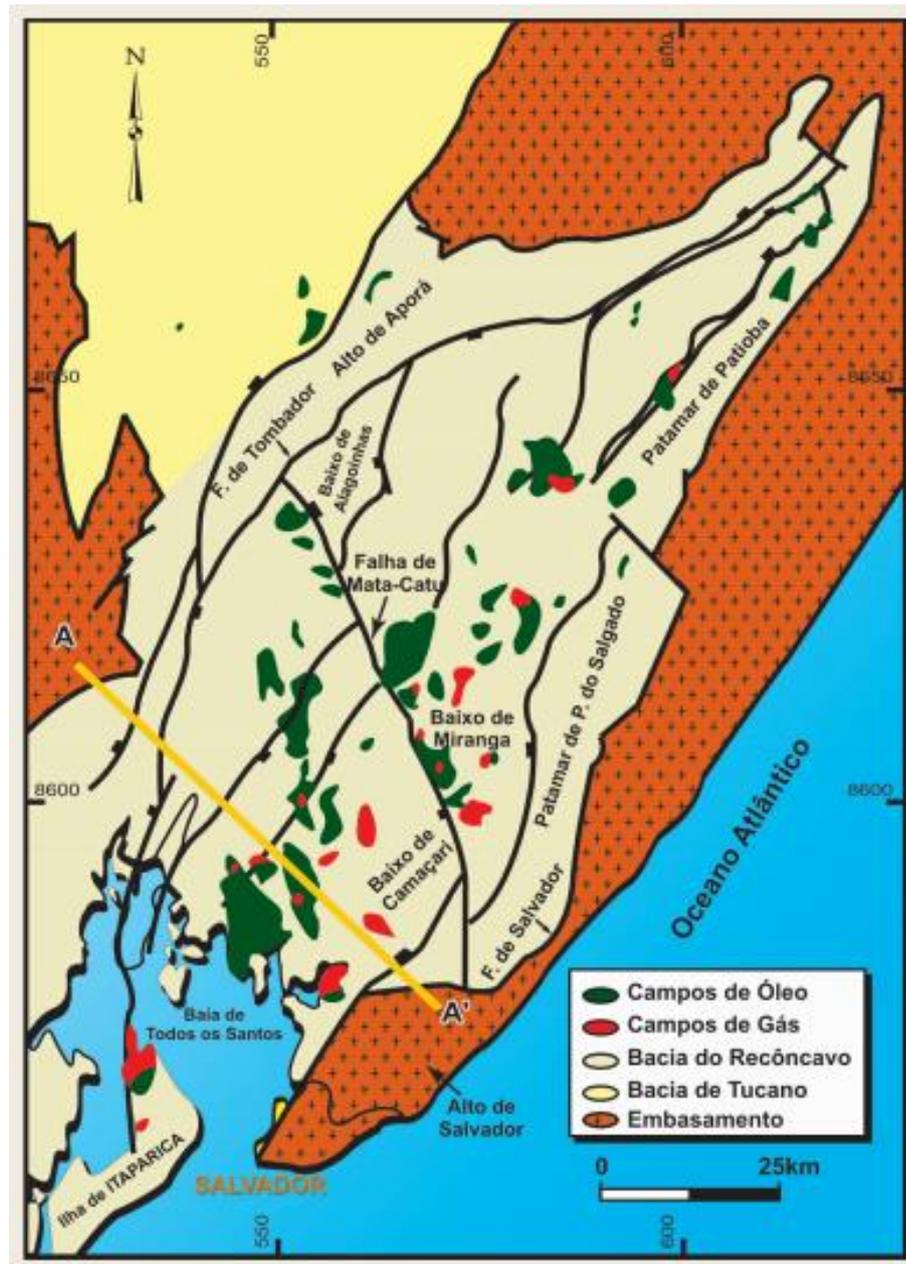
4.1.6 Supersequências N60

Sedimentos pleistocênicos de praias e aluviões que recobrem grande parte da fisiografia atual da bacia, bem como o embasamento cristalino (SILVA et al., 2007).

4.2 Configuração estrutural da bacia

A orientação geral das estruturas segue a direção NE-SW. As falhas condicionadas durante o estágio de separação do Gondwana caracterizam a arquitetura do rifte. Essas possuem direções preferenciais NE-SW e NW-SE (Figura 4), sendo a última referente a falhas de transferência (SILVA et al., 2007). As falhas que caracterizam o limite oeste da bacia pertencem ao Sistema de Falhas de Maragogipe e no limite leste tem se a Falha de Salvador (BUENO, 1987).

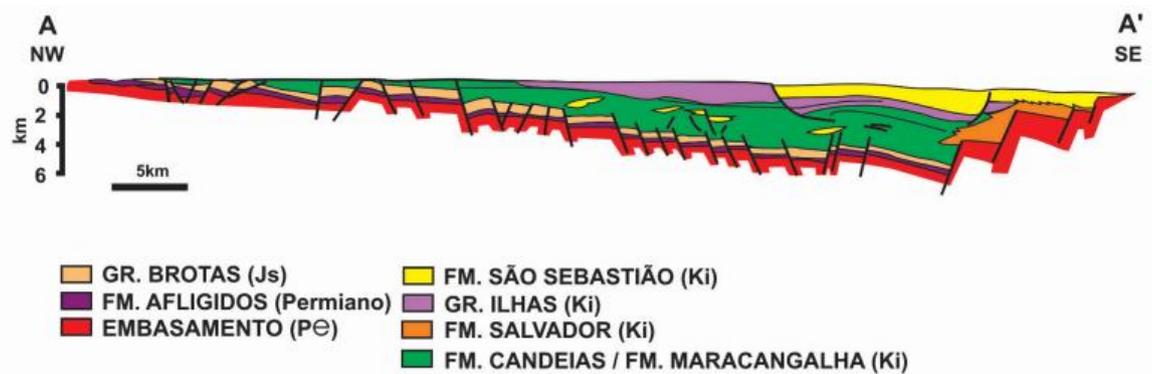
Figura 4 - Arcabouço estrutural e campos de petróleo da Bacia do Recôncavo.



Fonte: Magnavita et al., 2005.

As falhas de transferência, como as Falhas de Mata-Catu e Itanagra-Araçás, são responsáveis pela compartimentação da bacia ao mudarem a polaridade dos hemi-grábens. A geometria assimétrica da bacia é marcada pelo rejeito da falha da borda principal (Figura 5) (MAGNAVITA et al., 2005).

Figura 5 - Seção geológica A-A' traçado na Figura 3, porção sul da bacia.



Fonte: Magnavita et al., 2005.

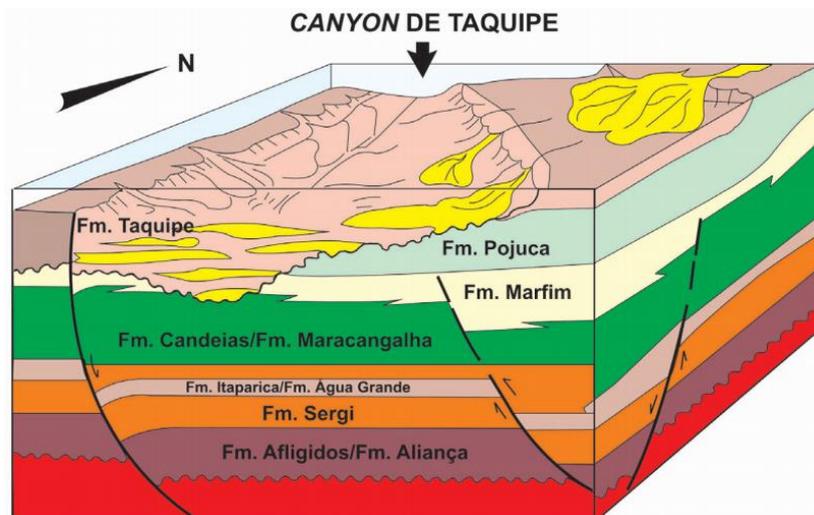
4.3 O Canyon de Taquipe no contexto geológico regional

Até o ano de 1983, a seção que preenche o Canyon de Taquipe era informalmente conhecida como “Seção Anômala do Andar Aratu”, e foi somente em 1985 que Netto e Oliveira propuseram uma estratigrafia genética para essa região da Bacia do Recôncavo. Posteriormente, o trabalho de Bueno (1987) contribuiu para a compreensão dos prováveis fatores geradores do canyon e sua evolução.

4.3.1 O preenchimento do Canyon

Durante a deposição do marco 7 da Formação Pojuca na Bacia do Recôncavo Sul, foi estabelecida uma feição erosiva de orientação aproximadamente N-S. Essa foi preenchida por sedimentos de identidade litológica própria e limites definidos, denominada de Formação Taquipe (Figura 6).

Figura 6 - Paleogeografia durante a deposição da Formação Taquipe.



Fonte: Magnavita et al., 2005.

Através da análise eletrofaciológica, Bueno (1987) caracterizou a formação em cinco eletrofácies, são elas:

Eletrofácies F: perfis de potencial espontâneo (SP) e Raios gama (GR) caracterizados por um padrão em “caixote”. Representados por arenitos finos a médios e ocasionais siltitos de composição arcosiana. Interpreta-se para essa parte da seção que as fácies foram depositadas em canais multi-episódicos, decorrentes de fluxos de detritos e correntes turbidíticas.

Eletrofácies G: Os perfis SP e GR são aproximadamente constantes, exibindo sutis irregularidades. Já os valores de resistividade (IES) oscilam, formando picos intercalados com valores baixos. Nesta parte da seção predominam folhelhos e ocasionais siltitos e calcários. Interpreta-se uma deposição cíclica decorrente de flutuações climáticas em um ambiente tectonicamente estável, possivelmente nas bordas do canyon, onde a produção de carbonatos é possibilitada.

Eletrofácies H: Os perfis SP, GR e IES são tipicamente representados por padrões em “sinos”. Arenitos finos a muito finos são os correspondentes litológicos dessa seção. Interpretam-se deposições em leques turbidíticos e em complexos marginais de canais.

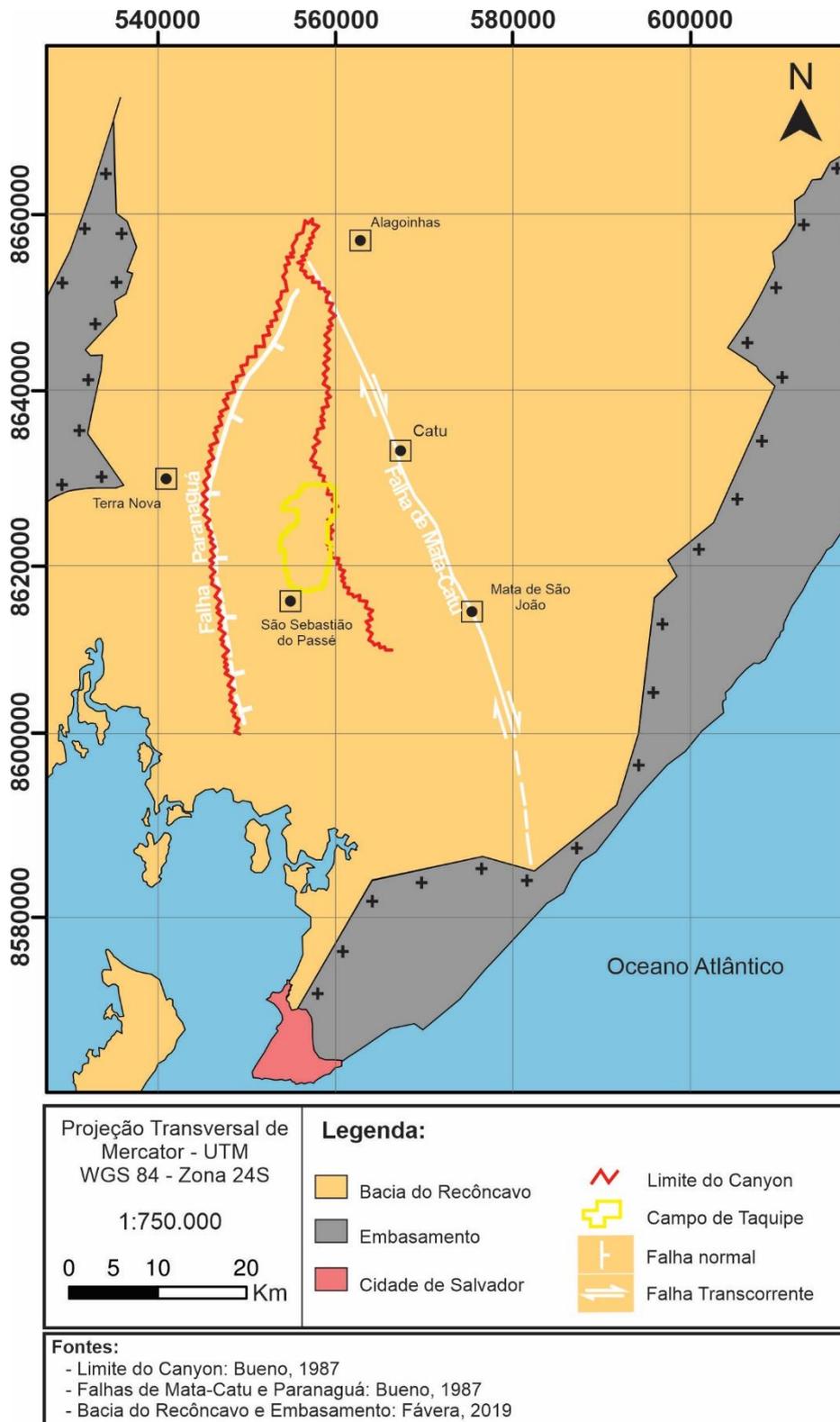
Eletrofácies I: Os perfis SP e GR apresentam um padrão de “funil”, estando tipicamente envolvido pela eletrofácies G. É composto litologicamente por arenitos finos a médios de composição arcosiana. Interpreta-se uma deposição em crevasses subaquosas mediante ao extravasamento dos canais.

Eletrofácies J: Os perfis SP e GR são semelhantes aos da eletrofácies G, diferenciando-se pela forma cilíndrica obtida na resistividade. O conteúdo litológico é composto por arenitos finos, siltitos, às vezes, calcíferos. Representam uma sequência progradante de norte a sul.

4.3.2 Caracterização estrutural

O Canyon de Taquipe é caracterizado como uma calha alongada de orientação 5-20°NE com largura variável de 1-16 Km e comprimento de 60 Km, compreendendo uma área de aproximadamente 650 Km². O canyon de idade Meso-Aratu é delimitado a leste por uma falha 40-50°NW denominada Falha de Mata-Catu, e a oeste por uma falha 10-20°NE denominada Paranaguá (Figura 7) (BUENO, 1987).

Figura 7 - Mapa de localização do Canyon de Taquipe (vermelho), Campo de Taquipe (amarelo) e Falhas de Paranaguá e Mata-Catu (branco).

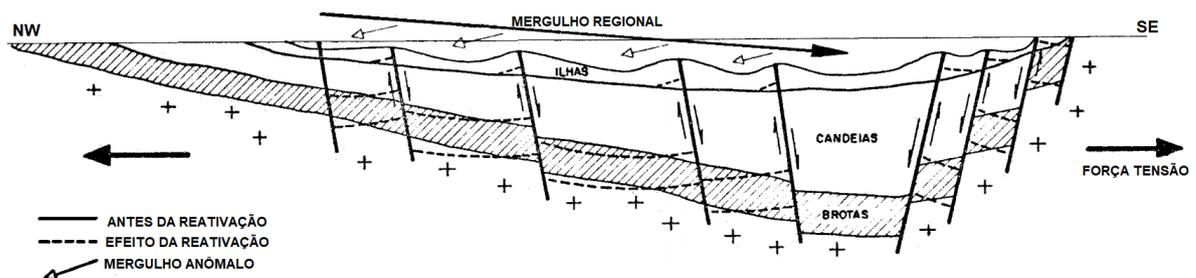


Fonte: Autora, 2022.

A área inserida dentro desses dois falhamentos principais apresenta fraturas com três orientações predominantes são: 10-20°NE junto a borda oeste e concordante com a Falha de Paranaguá, 20-40°NE na região centro-sul do compartimento e 30-40°NW na região centro-norte. Os dois primeiros sistemas dão origem a um conjunto de blocos escalonados no sentido do depocentro da bacia, posteriormente esses sistemas foram reativados, acarretando um mergulho suave para NW (Figura 8) (BUENO, 1987).

Além disso, em sua margem leste, estão presentes canyons tributários menores dispostos de forma subparalela entre si com orientação de 20-40°NE (BUENO, 1987).

Figura 8 - Seção estratigráfica esquemática mostrando o efeito da reativação no Andar Aratu, de falhamentos de idade Rio da Serra. Blocos basculados em sentido oposto ao mergulho regional.



Fonte: Bueno, 1987.

4.3.3 Origem e desenvolvimento

Durante o Aratu a reativação de falhas acarretou no basculamento das camadas, o que gerou mergulhos de sentido NW, oposto ao mergulho regional. Além disso, a reativação também proporcionou o aparecimento de falhas de crescimento e de um graben, esses são relativos, respectivamente, aos marcos 11-7 e 15-7 da Formação Pojuca (BUENO, 1987).

A nova configuração gerada pela reativação das falhas fez com que a deposição sedimentar fosse favorecida na porção leste, onde o gradiente era menor, o que gerou uma instabilidade sedimentar no oeste. Essa instabilidade possibilitou que correntes de densidade dessem início a formação do canyon (BUENO, 1987).

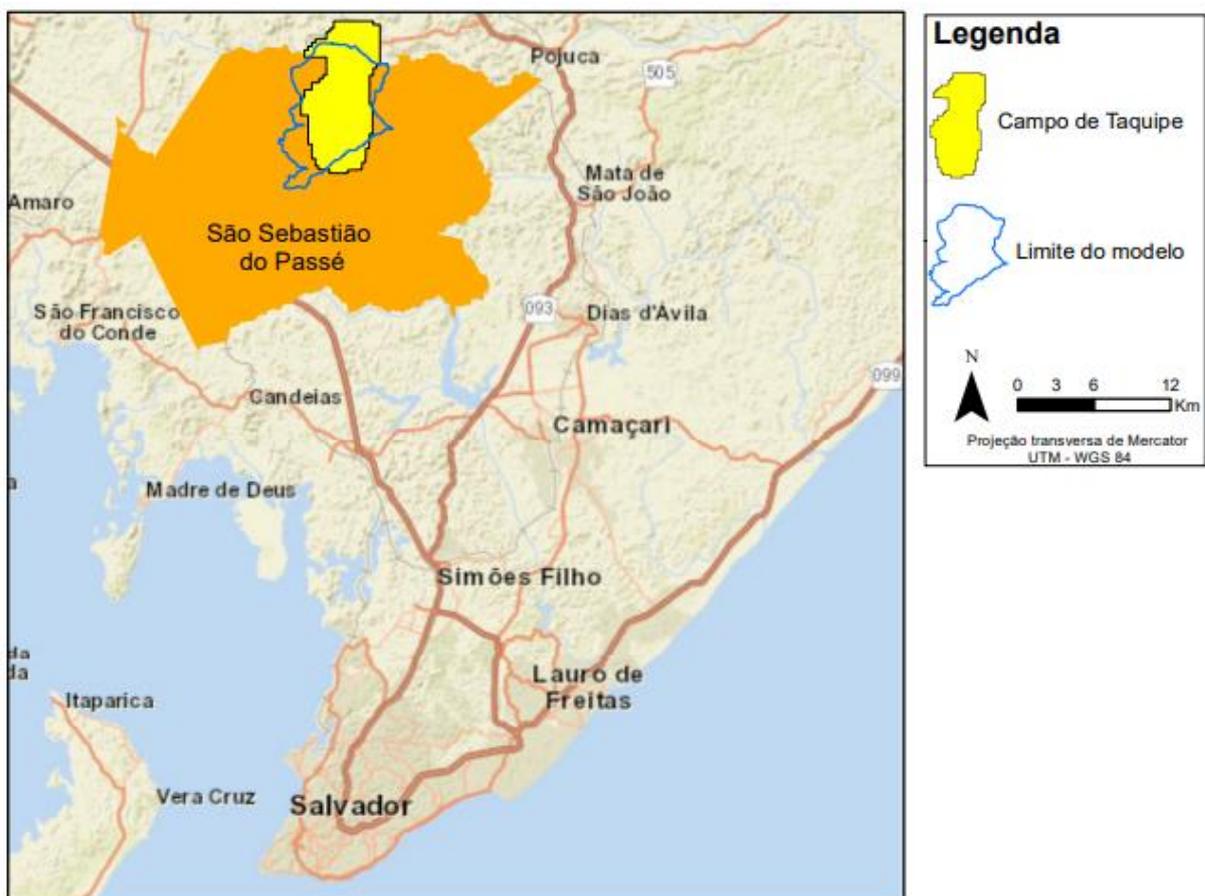
No estágio inicial, o canyon atuou como um conduto no transporte de sedimentos em direção a plataforma. Posteriormente, o aumento do nível do lago

desfavoreceu o avanço da sedimentação regressiva e dos eventos de escorregamento de massa, possibilitando a alternância entre momentos de erosão e deposição na faixa axial do canyon. A contínua sedimentação produziu uma superfície deposicional suavizada, que permitiu a instalação de uma sequência silto-arenosa disposta lateralmente a depósitos turbidíticos provenientes da porção leste do canyon. Por fim, registra-se a porção final da Fm. Pojuca e o soterramento do Canyon de Taquipe (BUENO, 1987).

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo está localizada ao norte do município de São Sebastião do Passé, região metropolitana de Salvador, e fica uma distância de aproximadamente 50 km da capital da Bahia (Figura 10).

Figura 9 - Localização da área de estudo no município de São Sebastião do Passé-BA.



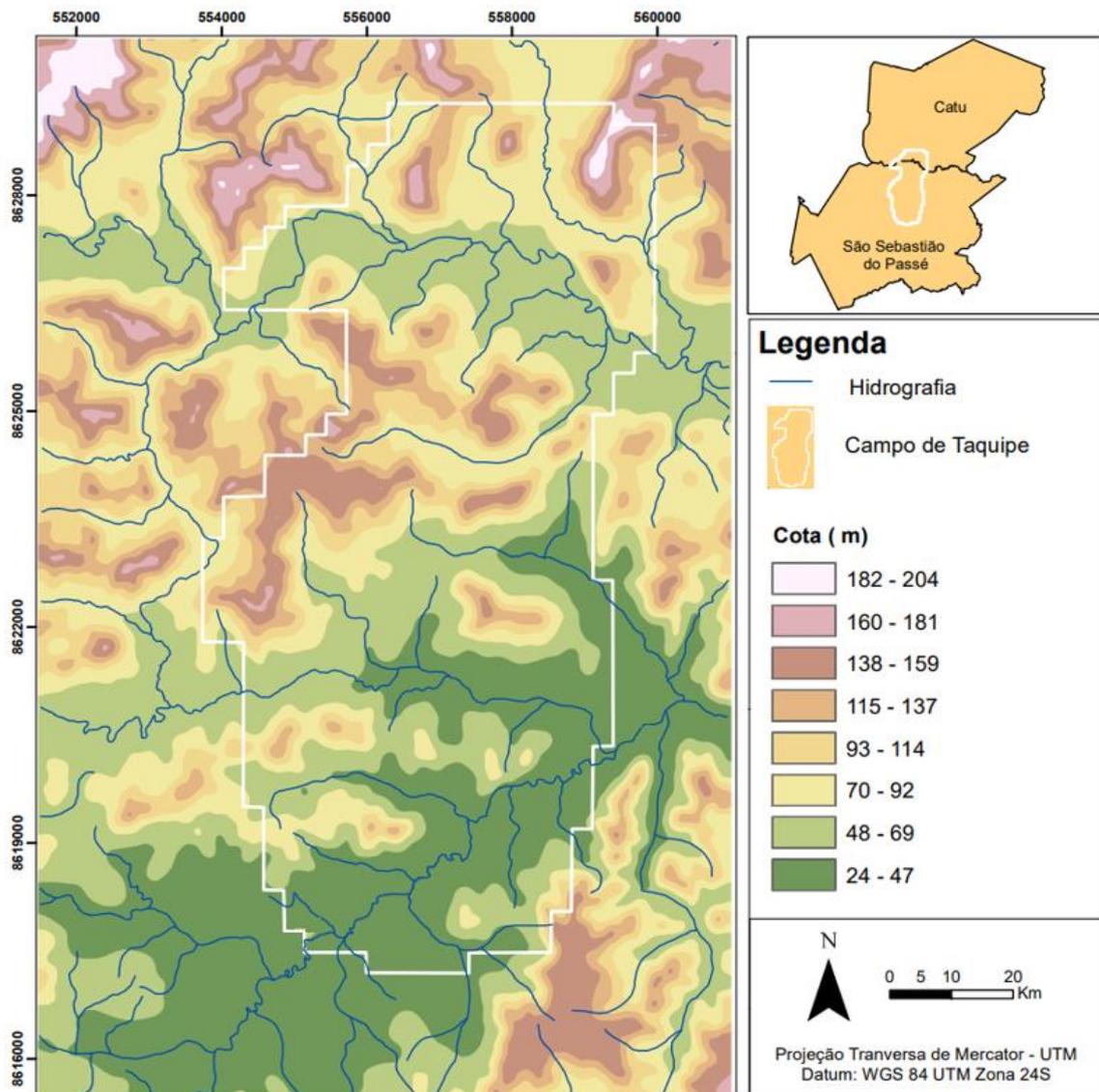
Fonte: Autora, 2022.

5.1 Geomorfologia

Com base no estudo geomorfológico do estado da Bahia, desenvolvido pela CPRM em 1979, a região está compreendida no domínio morfoestrutural das Bacias Sedimentares do Recôncavo/Tucano e encontra-se na unidade denominada de Tabuleiro. A paisagem apresenta feições de tabuleiros com áreas de denudação sendo bem dissecadas em alguns trechos.

A Figura 10 mostra a topografia da região do Campo de Taquipe. A porção mais central é uma região de cota mais elevada, chegando a até 204 metros. As áreas mais rebaixadas acompanham o traçado dos rios, sendo a parte sul a que apresenta as menores cotas e um perfil mais aplainado.

Figura 10 - Mapa topográfico do Campo de Taquipe e entorno.



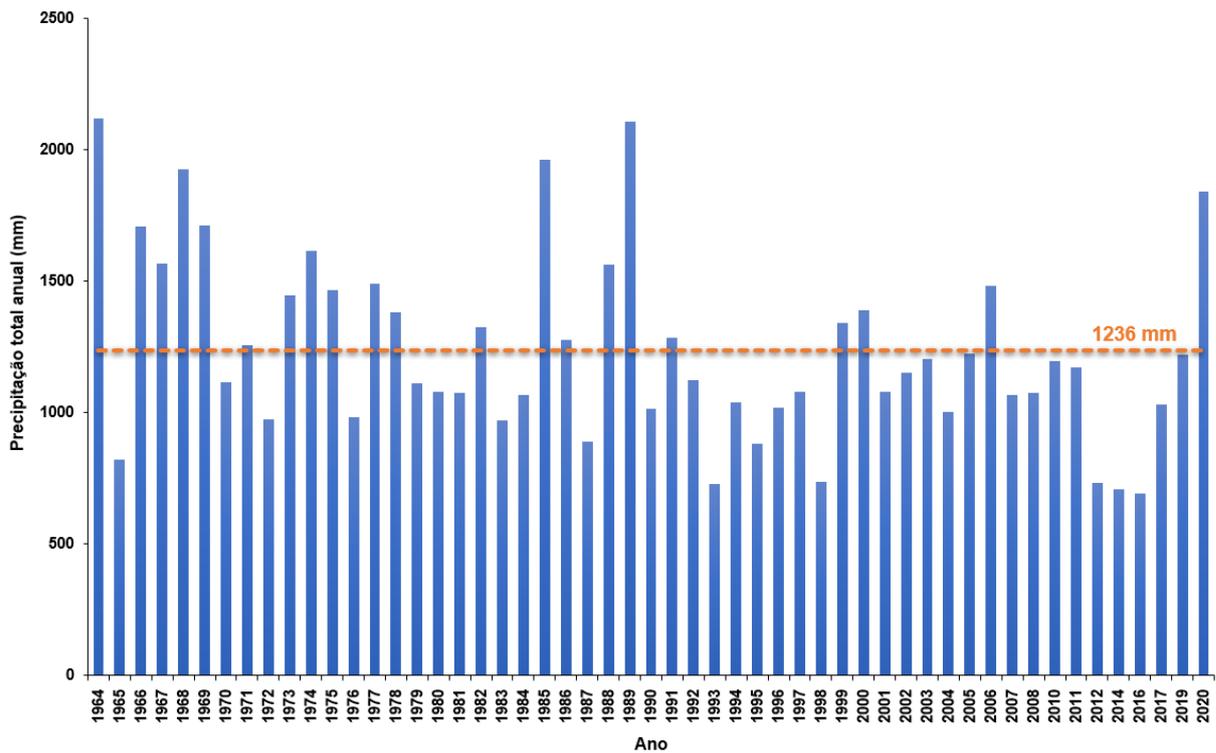
Fonte: Autora, 2022.

5.2 Clima

De acordo com a classificação climática de Thornthwaite (1948), para o estado da Bahia, o clima é predominantemente semiárido, caracterizado por ser quente e úmido com estações secas. Na área de pesquisa, a temperatura varia de 20°C a 33°C e raramente é inferior a 18°C. Apresenta duas estações bem definidas, uma estação de maior precipitação, que vai de março a agosto e uma estação mais seca, de setembro a fevereiro.

A compilação da pluviometria foi realizada com dados de séries históricas da estação 1238042 da Agência Nacional das Águas (ANA) durante os anos de 1964 até 2020 (Figura 12). Com base na série de dados atualizada, a média global pluriannual é 1236 mm/ano. O histórico de precipitações indica que os anos de 2012 a 2016 apresentaram a sequência de menores precipitações da série.

Figura 11 - Pluviometria anual no período de 1964 a 2020 com média global de 1236 mm/ano.



5.3 Hidrogeologia

O aquífero presente na área de estudo é denominado de Aquífero São Sebastião. Esse é um aquífero multicamadas, intergranular e de alta permeabilidade (Peixinho, 2016).

Em alguns trechos da Fm. São Sebastião, onde há intercalação entre camadas de arenitos com folhelhos, o comportamento é de aquífero semi-confinado, ou seja, a água encontra-se sob pressão graças ao confinamento pelos folhelhos. A recarga ocorre diretamente através da precipitação pluviométrica nas áreas de afloramento (Nascimento, 2006).

Além disso, a salinidade das águas deste aquífero pode variar muito de acordo com a profundidade e a localização do poço, podendo apresentar-se salobras em profundidades superiores a 400 metros (Nascimento, 2006).

Os valores de condutividade hidráulica apresentados na literatura para o Aquífero São Sebastião são apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Valores de condutividade hidráulica da literatura.

Autores	Condutividade Hidráulica (m/s)		
	K mínimo	K máximo	K médio
Cunha (1986)			2.70E-05
Petrobras/UFBA (2013)	1.80E-06	5.50E-05	2.84E-05
Peixinho (2016)	9.21E-07	6.24E-05	3.17E-05

6 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida durante o trabalho compreende seis etapas, são elas: (1) Revisão bibliográfica; (2) aquisição e confecção do banco de dados; (3) definição do modelo conceitual; (4) elaboração do modelo matemático; (5) calibração; e, por fim, (6) análise e discussão dos resultados. Essas etapas são descritas com detalhe, a seguir.

6.1 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica é a primeira etapa do trabalho e mantém-se durante todo o desenvolvimento do projeto. Os objetivos da pesquisa incluem a caracterização geológica e a identificação dos parâmetros hidráulicos do aquífero.

6.2 Aquisição e confecção do banco de dados

Para o desenvolvimento do trabalho foram consultadas duas bases de dados, uma de domínio público e outra de caráter confidencial, respectivamente, o SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas) e a base de dados da ANP (Agência Nacional do Petróleo). Do SIAGAS foram obtidas informações que incluem o perfil geológico descritivo e o nível d'água dos poços. Da ANP foram coletadas informações relativas à descrição de amostras de calha e de coluna geológica.

Esses dados foram compilados e organizados em planilhas com suas respectivas coordenadas, níveis d'água e informações litológicas.

Além disso, a partir do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) foi possível adquirir dados do terreno estudado, esses foram processados no *software ArcGis 10.5*, permitindo obter a topografia e hidrografia da área.

6.3 Definição do Modelo Conceitual

A partir da análise e interpretação dos dados geológicos e delimitação da bacia hidrográfica adquiridos e compilados tem -se o modelo conceitual.

6.4 Modelo matemático

Dentro do ambiente do software *Feflow 7.4* o modelo conceitual é representado na forma de modelo numérico, e então são realizadas as simulações numéricas de fluxo de águas subterrâneas.

6.5 Calibração

Nesta etapa o modelo numérico é calibrado em regime permanente, ou seja, é feita uma adequação dos parâmetros hidrogeológicos do modelo conceitual até obter-se uma correlação satisfatória entre os valores de carga hidráulica observados e calculados.

6.6 Análise e discussão dos resultados

Na última etapa, é feita uma análise do resultado da calibração em permanente tendo como base o resultado do balanço hídrico e os valores de carga hidráulica calculados obtidos.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

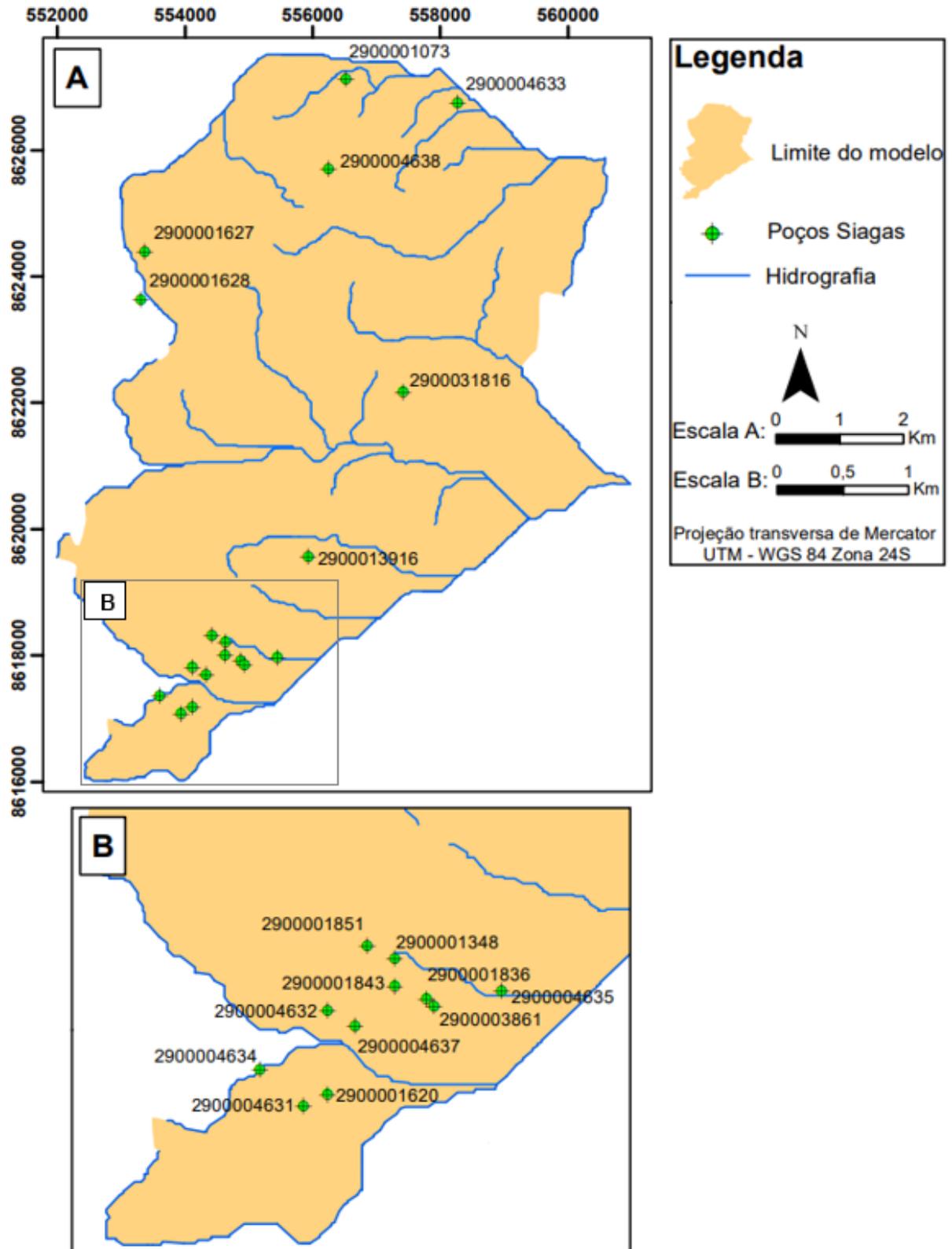
7.1 Caracterização Geológica Local

A partir da descrição litológica dos 18 poços do SIAGAS (Tabela 2 e Figura 12) e dos perfis geológicos, mais amostras de calha dos 50 poços da ANP (Tabela 3 e Figura 13), observou-se que na área de estudo aflora a Fm. São Sebastião com uma espessura média de 500 metros e contato inferior com a Fm. Pojuca.

Tabela 2 - Relação de poços compilados do Siagas.

ID POÇOS SIAGAS	Coordenadas UTM WGS 84			N.E. (m)
	X	Y	Z	
2900001073	556519	8627132	71	3.4
2900001348	554630	8618227	33	
2900001620	554115	8617184	36	
2900001627	553374	8624404	116	50.85
2900001795	555020	8616814	35	
2900001836	554871	8617920	42	6
2900001843	554629	8618012	42	14
2900001851	554419	8618320	36	23
2900003861	554931	8617858	43	23.01
2900004631	553934	8617092	44	11.57
2900004632	554116	8617829	44	11.43
2900004633	558269	8626760	64	2.5
2900004635	555444	8617980	33	5.54
2900004637	554327	8617706	35	7.49
2900004638	556244	8625720	108	38.58
2900006183	555382	8616813	40	
2900013916	555930	8619577	78	32.75
2900031816	557415	8622185	79	13.98

Figura 12 - Mapa de poços do SIAGAS.



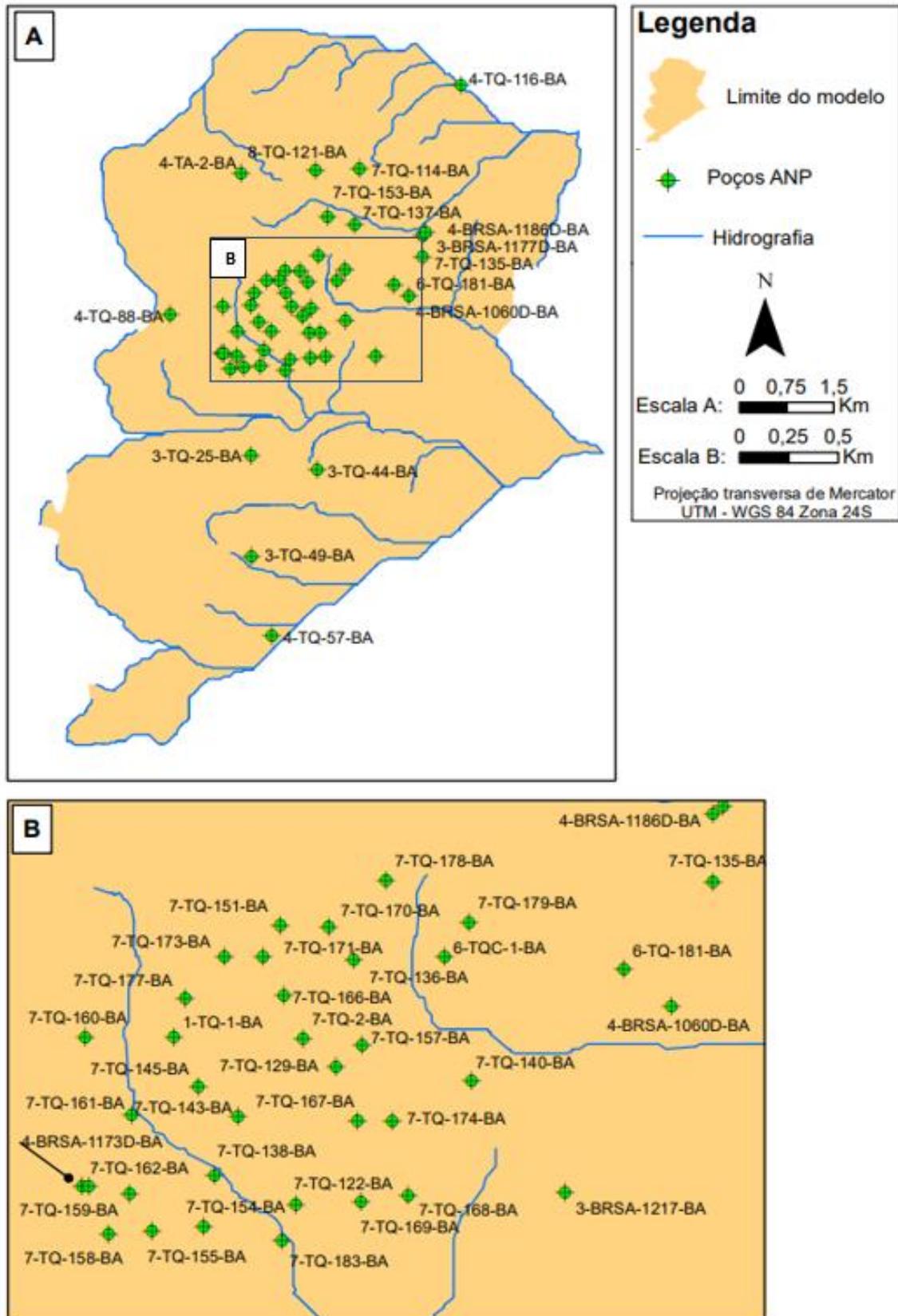
Fonte: Autora, 2022.

Tabela 3 - Tabela de poços compilados da ANP.

ID POÇOS	Coordenadas UTM WGS84			PROF. DO CONTATO (m)
	X	Y	Z	
1-TQ-1-BA	555363.63	8623078.23	84	467
3-BRSA-1177D-BA	558097.86	8624217.43	73	560
3-BRSA-1217-BA	557345.19	8622278.14	75	525
3-TQ-25-BA	555360.67	8620684.26	91	493
3-TQ-44-BA	556426.11	8620435.59	52	546
3-TQ-49-BA	555371.74	8619038.72	60	420
4-BRSA-1060D-BA	557887.44	8623234.96	52	535
4-BRSA-1173D-BA	554898.24	8622314.08	99	614
4-BRSA-1186D-BA	558149.35	8624259.12	70	559
4-TA-2-BA	555205.65	8625202.56	85	590
4-TQ-57-BA	555698.98	8617774.86	31	482
4-TQ-88-BA	554079.77	8622933.47	84	605
4-TQ-116-BA	558716.47	8626620.44	56	563
6-NET-2-BA	559504.13	8628511.51	135	653
6-TQ-181-BA	557646.22	8623421.11		
6-TQC-1-BA	556737.91	8623490.37	69	440
7-TQ-2-BA	556016.66	8623071.00	65	451
7-TQ-114-BA	557092.04	8625274.98	108	574
7-TQ-122-BA	555982.73	8622218.55	47	424
7-TQ-129-BA	556186.02	8622924.03	62	445
7-TQ-135-BA	558098.69	8623873.28	149	638
7-TQ-136-BA	556273.70	8623468.28	99	468
7-TQ-137-BA	557015.62	8624389.33	75	498
7-TQ-138-BA	555569.52	8622369.53	54	432
7-TQ-140-BA	556873.26	8622852.35	63	456
7-TQ-143-BA	555688.23	8622672.31		
7-TQ-145-BA	555488.24	8622825.08		
7-TQ-151-BA	555904.54	8623648.92	109	495
7-TQ-153-BA	556580.68	8624501.77	86	512
7-TQ-154-BA	555514.68	8622107.21	61	434
7-TQ-155-BA	555250.56	8622085.71	80	452
7-TQ-157-BA	556317.73	8623033.36	61	442
7-TQ-158-BA	555033.50	8622068.88	102	495
7-TQ-159-BA	555139.31	8622274.92	86	451
7-TQ-160-BA	554912.84	8623076.66		
7-TQ-161-BA	555148.67	8622677.54	58	430
7-TQ-162-BA	554930.07	8622311.70	95	469
7-TQ-166-BA	555921.02	8623291.69	93	486
7-TQ-167-BA	556293.83	8622647.80		

7-TQ-168-BA	556550.21	8622263.89	61	459
7-TQ-169-BA	556312.92	8622235.49	51	437
7-TQ-170-BA	556146.56	8623643.25		
7-TQ-171-BA	555814.68	8623487.63	102	495
7-TQ-173-BA	555619.06	8623490.44		
7-TQ-174-BA	556469.78	8622647.34		
7-TQ-177-BA	555420.31	8623277.51		
7-TQ-178-BA	556439.05	8623881.55	109	485
7-TQ-179-BA	556860.41	8623665.41	86	480
7-TQ-183-BA	555911.20	8622035.45		
8-TQ-121-BA	556393.26	8625258.32	98	546

Figura 13 - Mapa de poços da ANP.

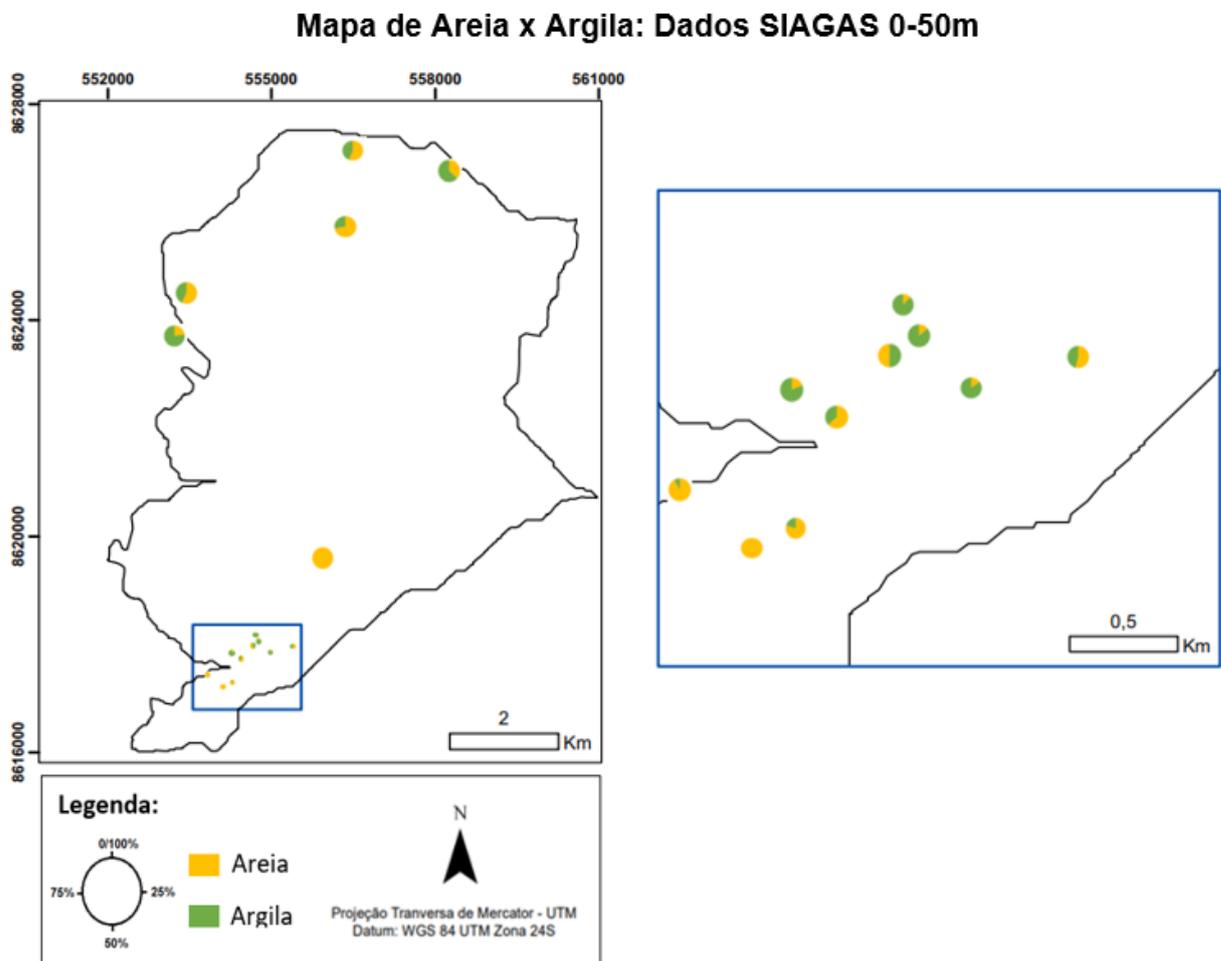


Fonte: Autora, 2022.

Como já descrito, a Fm. São Sebastião é uma unidade predominante arenosa com grande quantidade de intercalações de finos, por isso para melhor definir o caráter desse espesso pacote, foram gerados mapas de Areia vs. Argila nas profundidades de 0-50 m, 50-150 m e de 150 m até a base (Figura 14 a Figura 18).

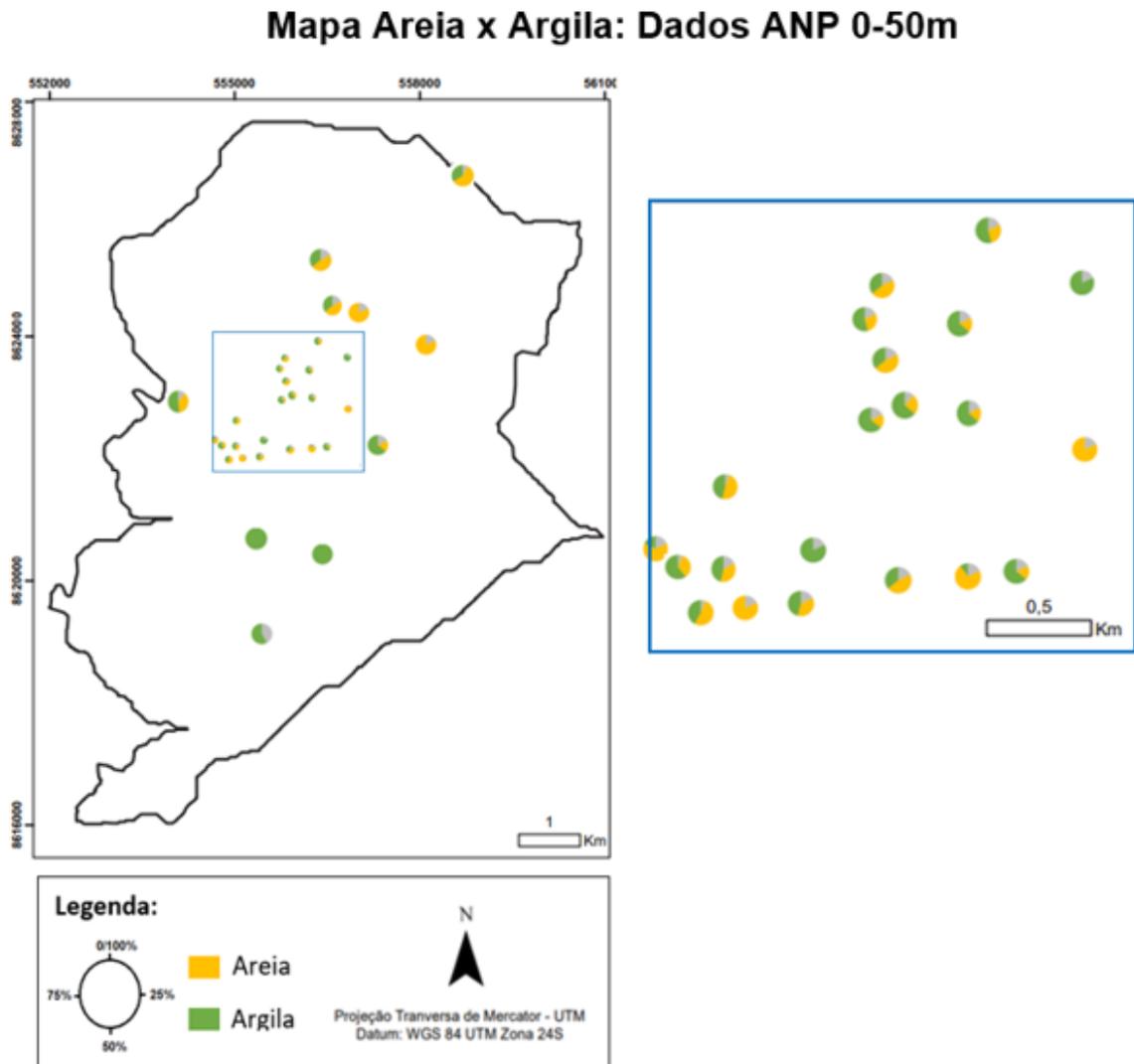
De 0-50 m de profundidade, percebe-se que há uma tendência, tanto dos dados do SIAGAS quanto dos dados da ANP, em exibir uma predominância de areia no norte e argila no sul, indicando duas zonas com aspectos distintos.

Figura 14 – Mapa de Areia vs Argila de 0-50 m com base nos dados do SIAGAS.



Fonte: Autora, 2022

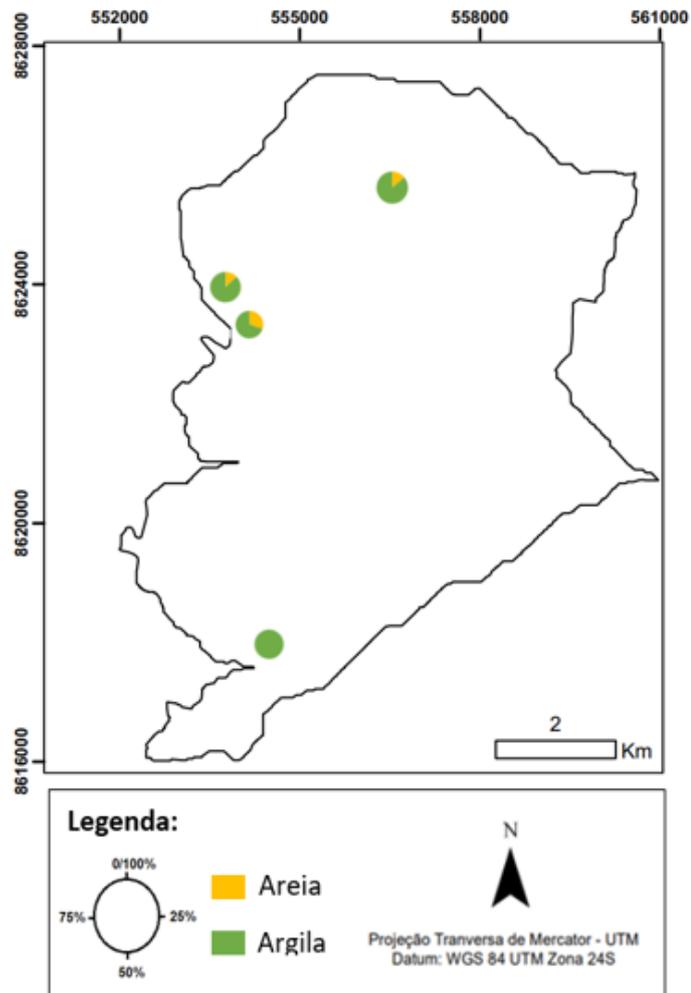
Figura 15 - Mapa de Areia vs Argila de 0-50m com base nos dados da ANP.



Fonte: Autora, 2022.

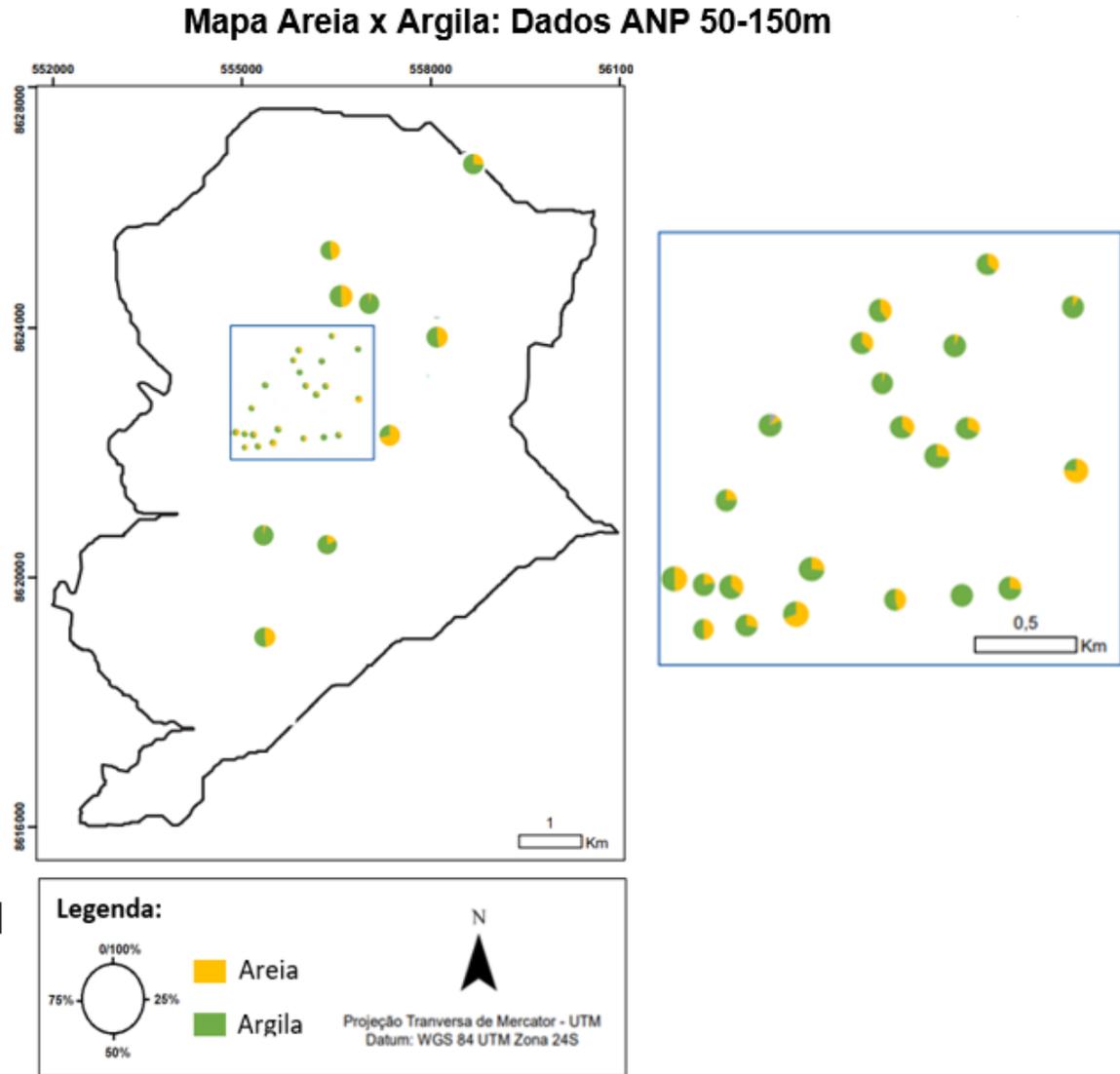
De 50 a 150 m de profundidade existe uma escassez de dados do SIAGAS, o que acaba limitando a análise da porção mais ao sul do modelo, mas de forma geral, pode-se constatar que nesta profundidade prevalece a presença da material argiloso.

Figura 16 - Mapa de Areia vs Argila de 50-150 m com base nos dados do SIAGAS.

Mapa Areia x Argila: Dados SIAGAS 50-150m

Fonte: Autora, 2022

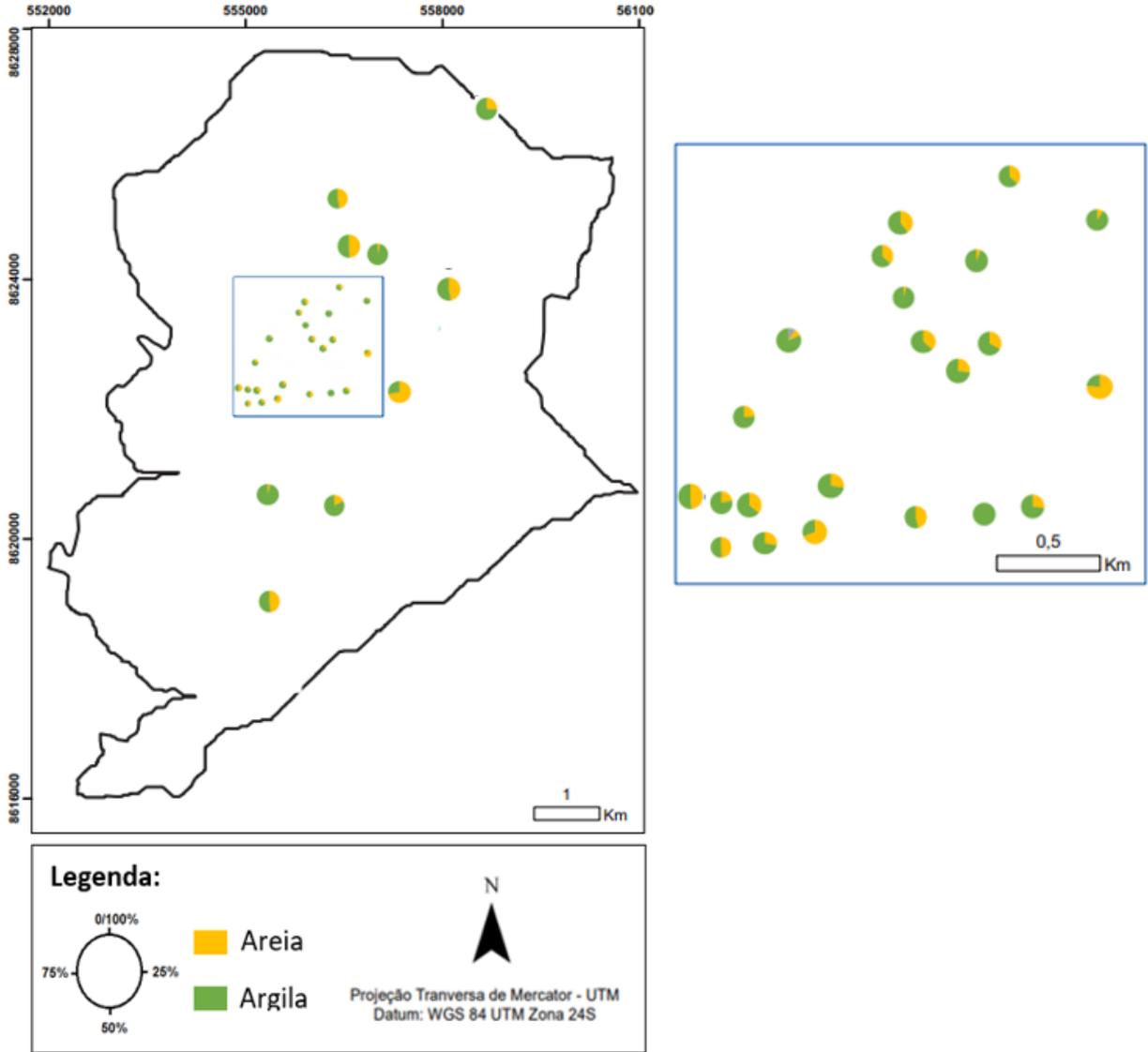
Figura 17 - Mapa de Areia vs Argila de 0-150m com base nos dados da ANP.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 18 - Mapa de Areia vs Argila de 150m-base utilizando dados da ANP.

Mapa Areia x Argila: Dados ANP 150m-base



Fonte: Autora, 2022

7.2 Simulação numérica de fluxo

7.2.1 Modelo conceitual

O conteúdo aqui apresentado corresponde a uma representação simplificada das informações de forma a descrever o cenário hidrogeológico que reproduza o comportamento do sistema hídrico em questão.

A seguir são descritos os parâmetros estabelecidos para a representação deste modelo:

Por apresentar níveis de areia intercalados com níveis de argila, pode ser considerado um aquífero multicamadas.

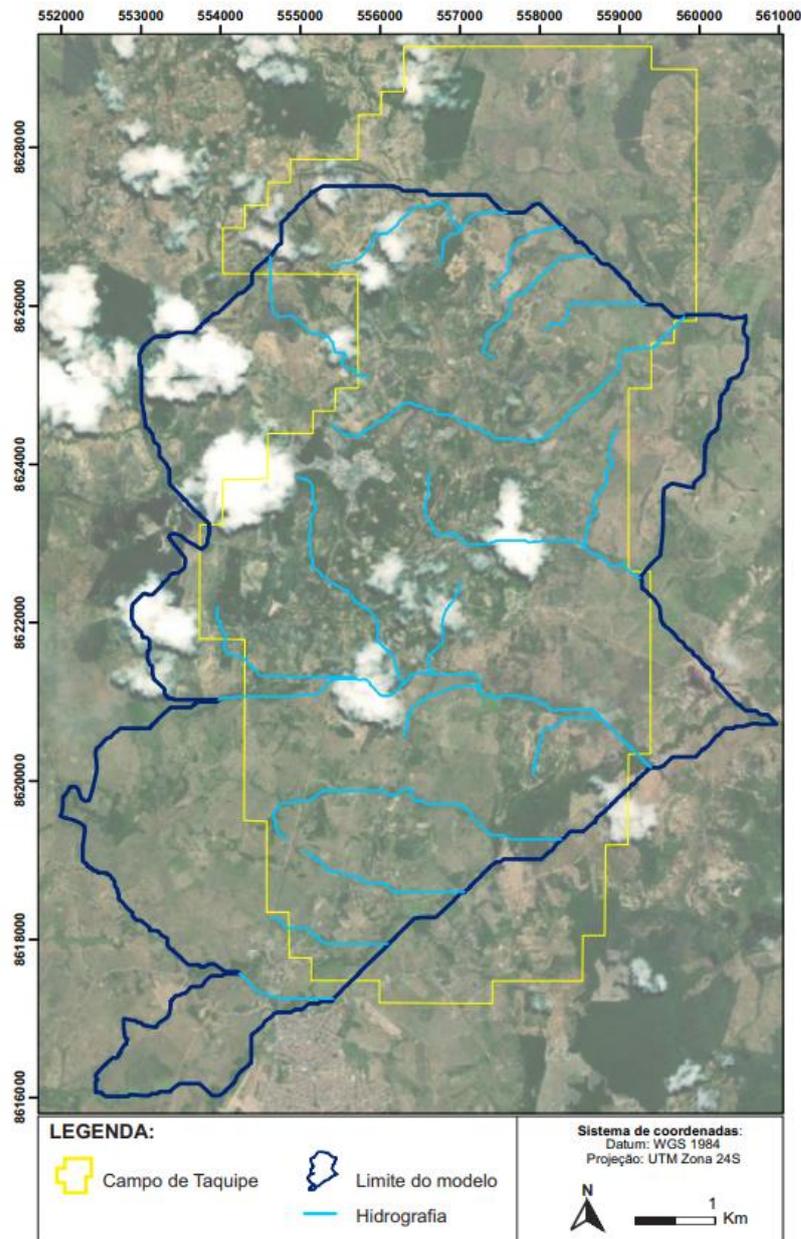
Heterogeneidade litológica caracterizada, principalmente, por estratos arenosos intercalados com argilosos.

As análises das colunas geológicas dos poços da ANP permitiram verificar que o contato entre a Fm. São Sebastião (superior) e Fm. Pojuca (inferior) ocorre a aproximadamente 500m de profundidade, sendo estabelecidas por uma camada de folhelhos. Esta fronteira impermeável corresponde ao limite inferior do modelo.

Os limites laterais são paralelos e concordantes com drenagens, sendo definidos como condições de contorno de carga conhecida. Além disso, também foram estabelecidos limites concordantes com os divisores de água, de modo que a ausência de conectividade lateral impede um que haja um fluxo transversal para dentro do modelo (Figura 19 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Admite-se que as drenagens são exclusivamente zonas de descarga do aquífero.

Figura 19 - Limite estabelecido para a modelagem.



Fonte: Autora, 2022

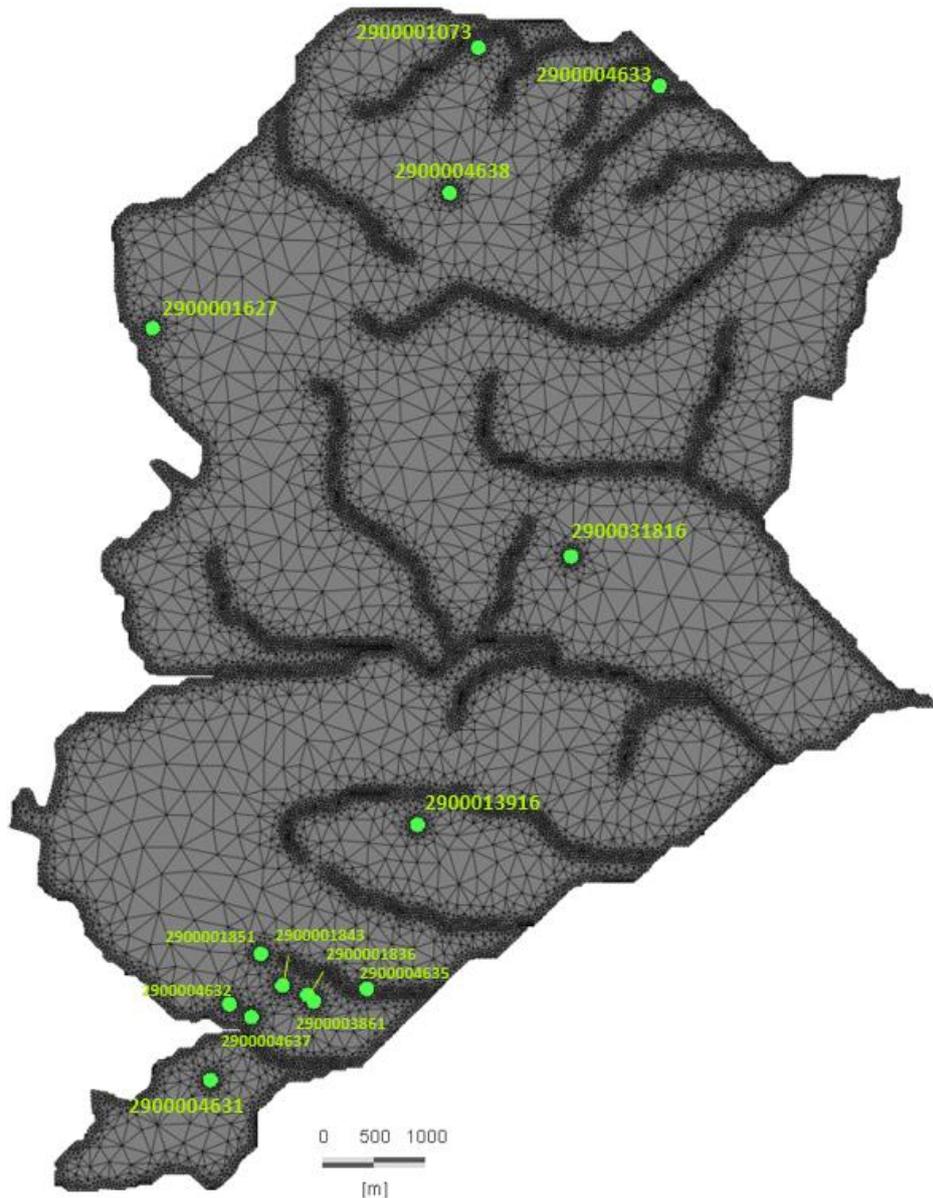
7.2.2 Modelo numérico

7.2.2.1 Discretização da área de estudo

O domínio do modelo numérico abrange uma área superficial de aproximadamente 60 km². Sua malha contempla 131.700 elementos finitos (triângulos irregulares) e 86.205 nós, podendo ser considerada de boa qualidade, uma vez que apenas 1% dos elementos possuem ângulo obtuso maior do que 120° e

apenas 21,8% possuem ângulo maior do que 90°. Foi considerado e realizado um maior refinamento nas bordas do modelo, ao redor das drenagens e dos poços de monitoramento.

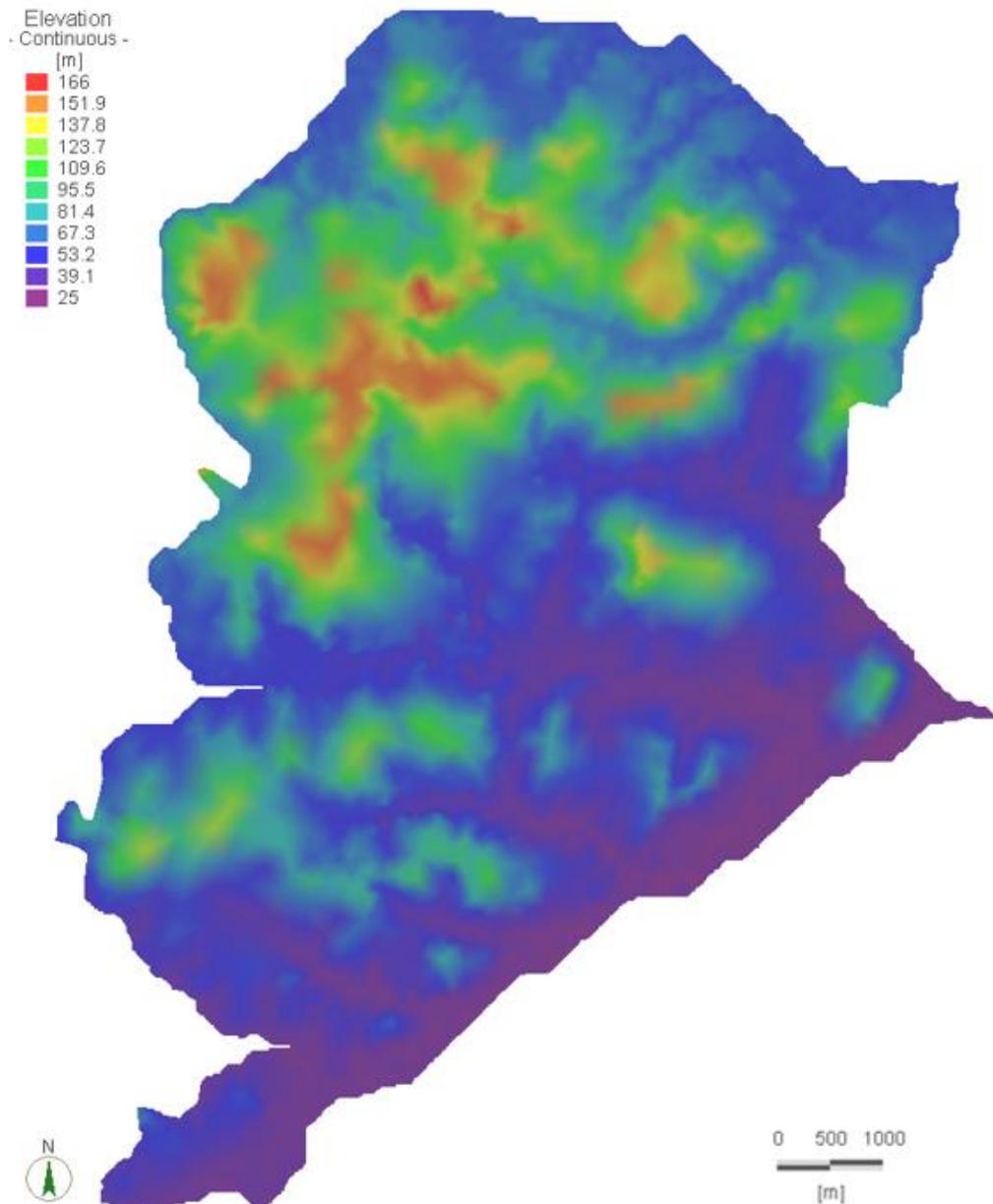
Figura 20 - Malha de elementos finitos com refinamento nas bordas, drenagens e nos 14 poços de observação.



Fonte: Autora, 2022.

A Figura 21 mostra a topografia que foi gerada a partir dos dados do modelo digital do terreno obtido do ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*). A base da área corresponde a superfície de contato da Fm. São Sebastião e Pojuca, obtida através da interpolação de dados de poços da ANP.

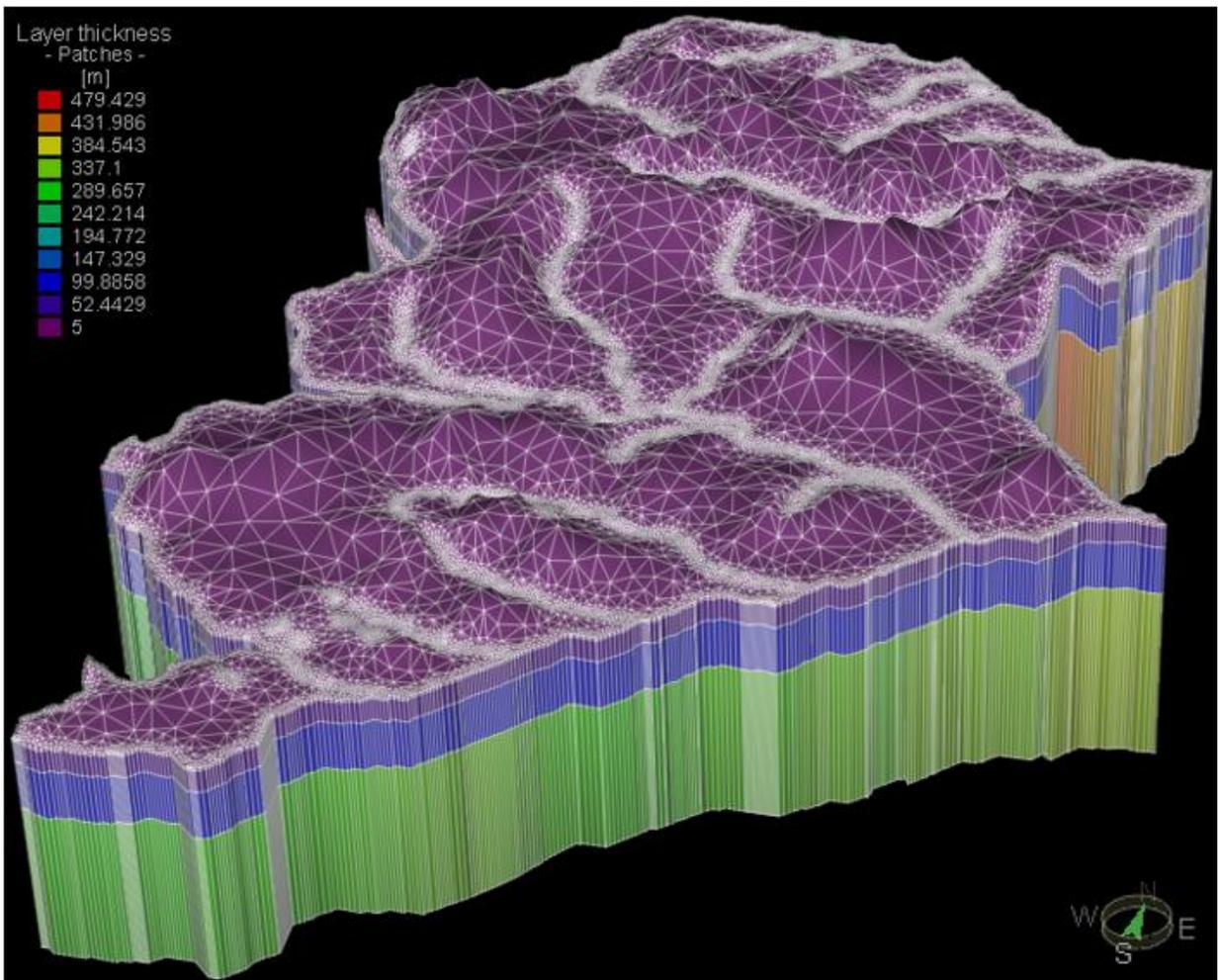
Figura 21 - Cota altimétrica do topo do modelo.



Fonte: Autora, 2022.

O modelo foi dividido em quatro camadas (Figura 23), que dentro do *software* são denominadas de *Layers* 1, 2, 3 e 4. Apresentam, respectivamente, as seguintes espessuras: 5 m; 45 m; 100 m; e aproximadamente 300 m. A espessura da última camada é variável dependendo da cota da superfície de contato. A configuração das camadas foi definida a partir da avaliação dos perfis de poços da ANP e do SIAGAS.

Figura 22 - Visualização tridimensional do modelo numérico com valores de espessura.

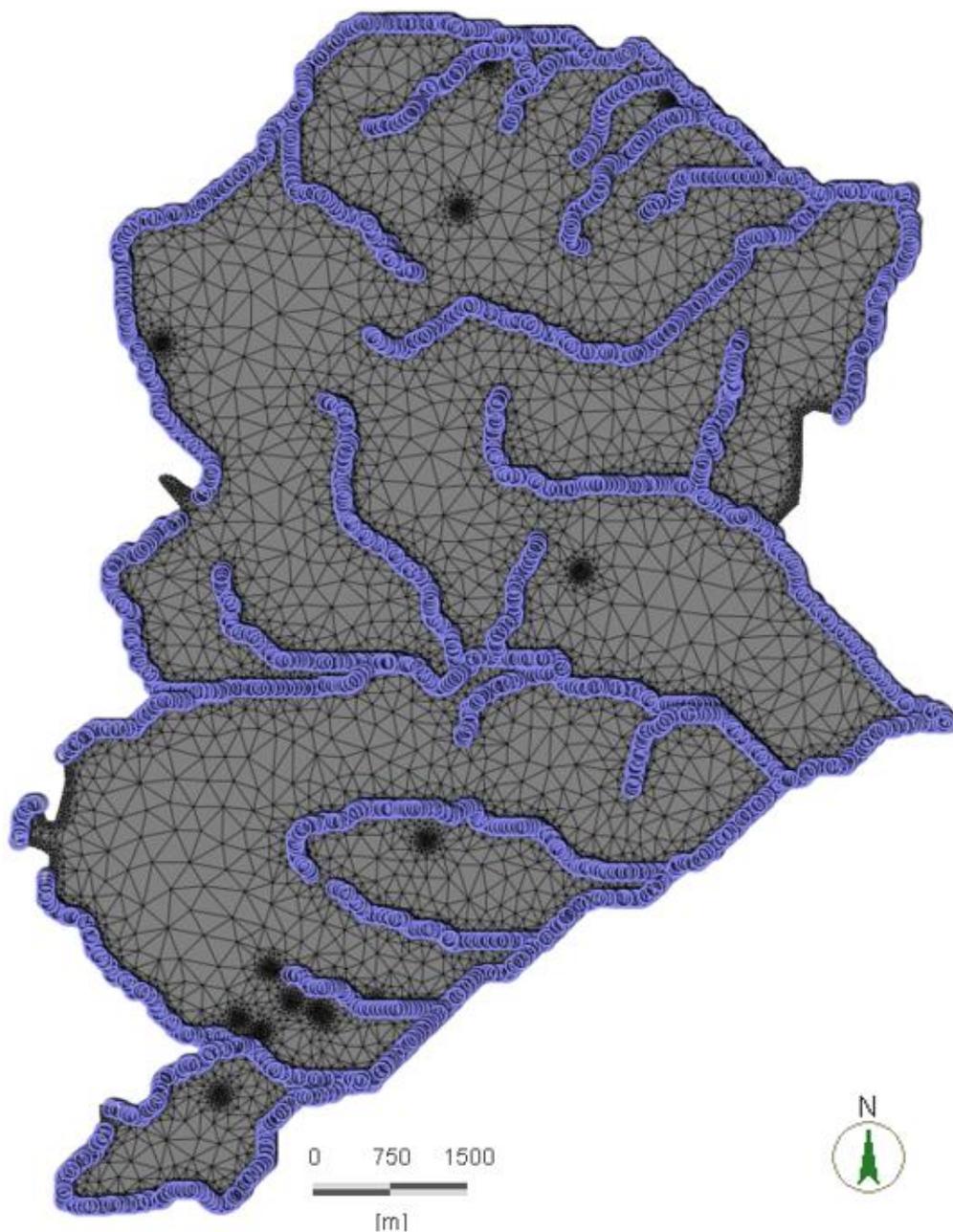


Fonte: Autora, 2022.

7.2.2.2 Condições de contorno

As drenagens, ou cursos d'água superficiais, são correspondentes à condição de contorno do Tipo 1 (*Seepage Face*). Como elementos, representam apenas a retirada de água do aquífero e são relacionadas às cotas topográficas dos pontos nos quais se assentam. Esse condicionamento retirará água caso a carga hidráulica seja igual ou superior à cota topográfica no ponto.

Figura 23 - Representação das condições de contorno do Tipo 1 *Seepage Face* na Layer 1.



Fonte: Autora, 2022.

7.2.3 Condutividade Hidráulica e Recarga

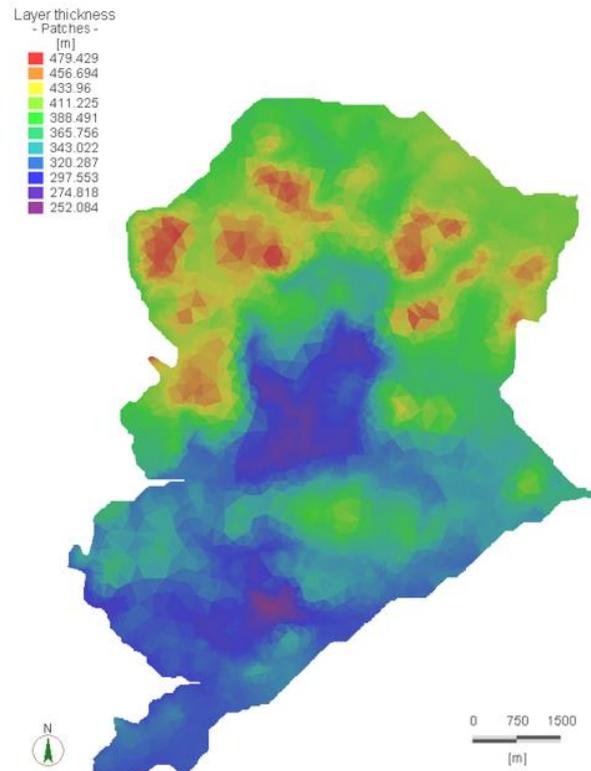
A configuração final do modelo, separado em Zona Norte e Zona Sul, foi definida a partir da avaliação dos resultados obtidos durante a fase de calibração e embasados pelos mapas de Areia-Argila apresentados na seção 7.1. Dessa forma, a condutividade hidráulica variou devido a heterogeneidade das camadas em relação a predominância de cada litologia.

Tabela 4 - Valores de condutividade hidráulica (K) em m/s definidos para as camadas e setores norte e sul.

	Condutividade Hidráulica (m/s)	
	Zona Norte	Zona Sul
Camada 1	1,00E-05	6,24E-05
Camada 2	1,00E-06	6,24E-05
Camada 3	9,21E-07	3,00E-05
Camada 4	5,0E-06 a 9,21E-07	3,00E-05

A Zona Norte apresenta os menores valores de condutividade hidráulica (K) do modelo nas camadas inferiores. A Camada 3, por ter maior teor de argila (Figura 16 e Figura 17), apresenta um K de $9,21 \times 10^{-7}$ m/s. Já na camada 4, tem-se uma variação de condutividade que pode ser justificada pelas isópacas, uma vez que existem regiões com espessuras discrepantes entre si com diferenças de aproximadamente 100 metros (Figura 24). Por isso, apesar dessa camada possuir um caráter mais arenoso, a variação da condutividade pode se dar pela maior espessura de algumas zonas.

Figura 24 - Mapa de espessura da Camada 4.

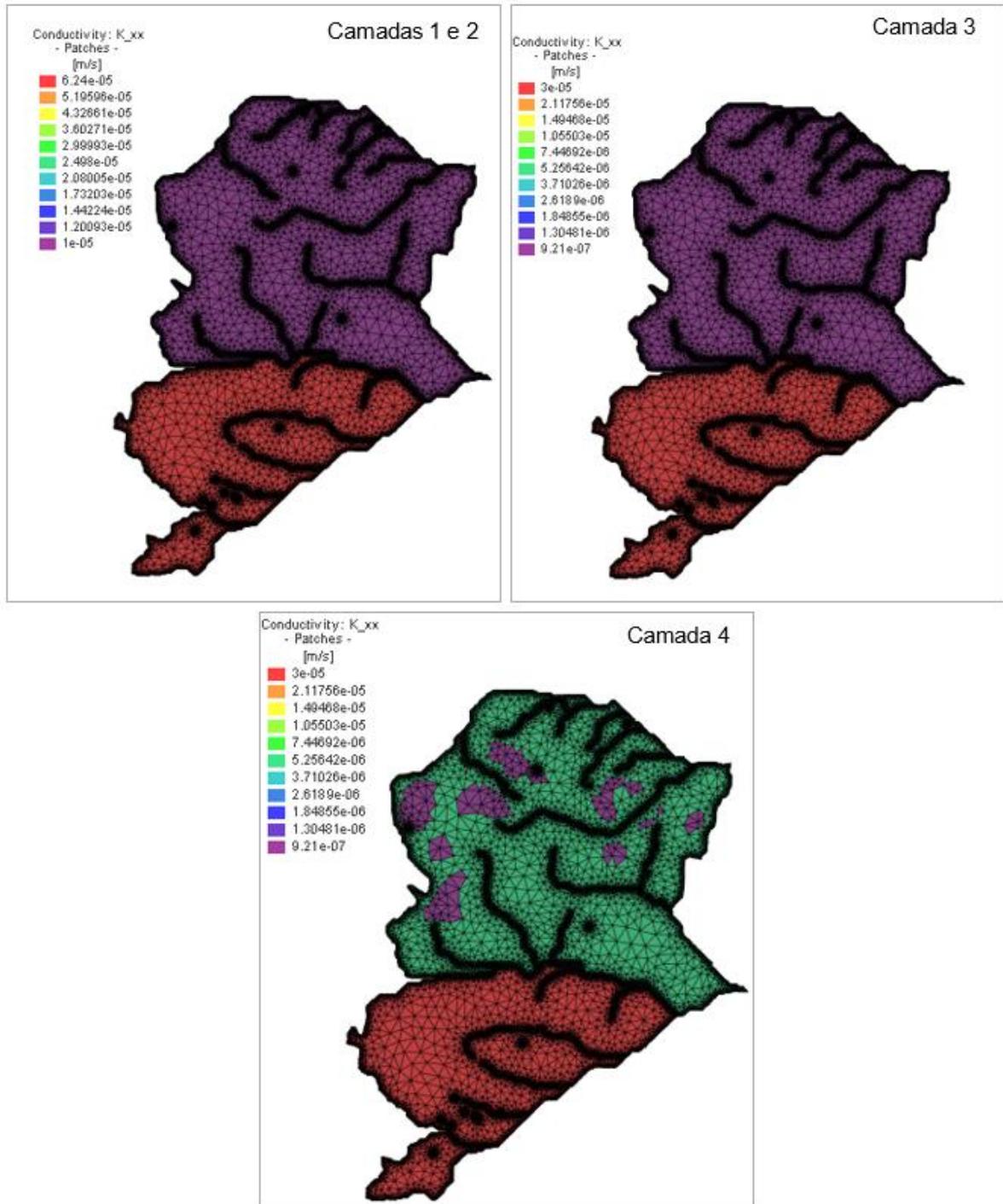


Fonte: Autora, 2022.

A Zona Sul apresenta os maiores valores de condutividade hidráulica do modelo nas duas camadas superiores. Para essa zona, as respostas obtidas nos pontos de observação durante a calibração eram, em sua maioria, de um valor calculado maior que o observado (real), exigindo assim valores de condutividade maiores do que os apresentados anteriormente.

A distribuição da condutividade hidráulica das camadas é apresentada na Figura 25, a seguir.

Figura 25 - Distribuição da condutividade hidráulica horizontal nas camadas de 1 a 4.

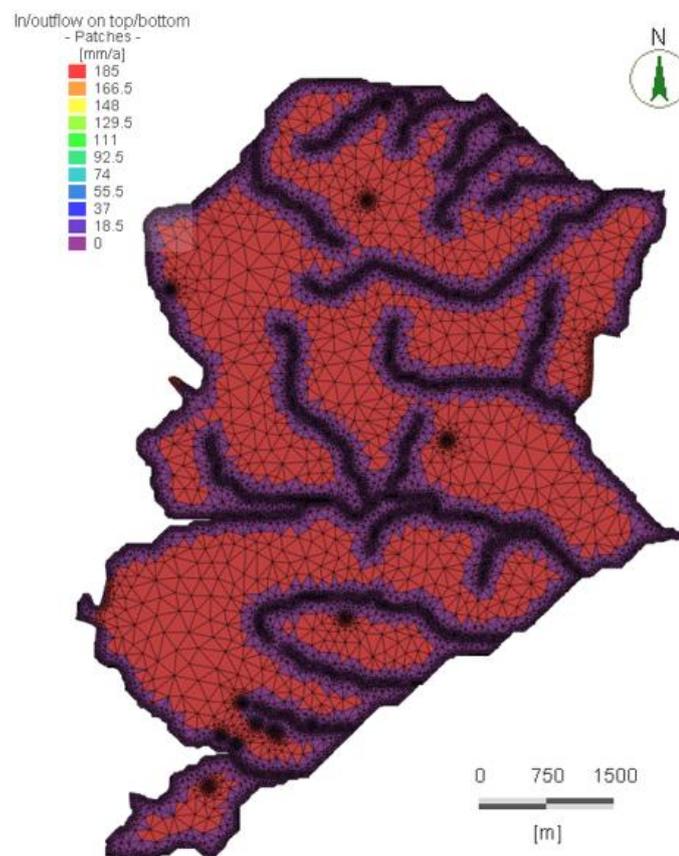


Fonte: Autora, 2022.

Os valores de condutividade hidráulica da Fm. São Sebastião utilizados na calibração ficaram dentro do intervalo estabelecido na literatura, vide Tabela 1.

Para a recarga, não existem trabalhos representativos que auxiliem a balizar valores de taxas médias para a Formação São Sebastião. Dessa forma, foram testados valores convencionais de recarga, entre 10 e 20%. A melhor resposta obtida, em termos de balanço hídrico e RMS, foi utilizando-se uma taxa de 15%, correspondente a 185 mm/ano (Figura 26 - Distribuição dos valores de recarga por precipitação.**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

Figura 26 - Distribuição dos valores de recarga por precipitação.

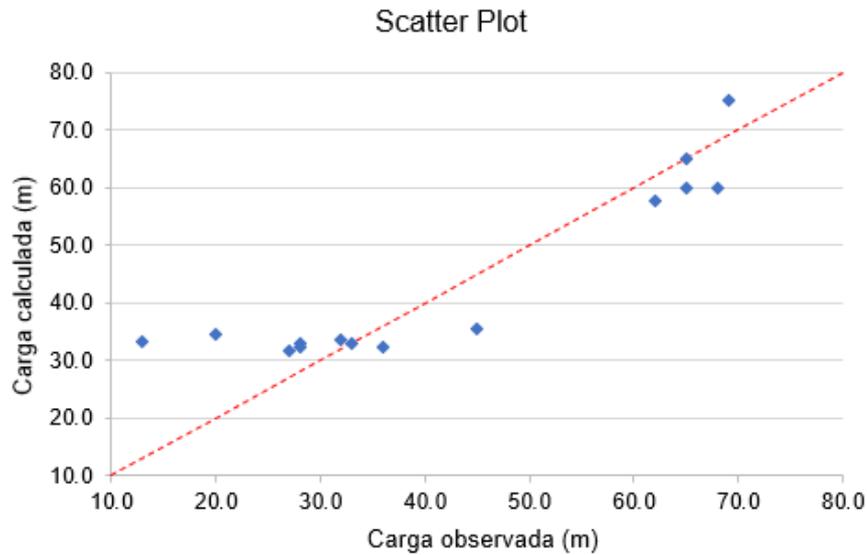


Fonte: Autora, 2022.

7.2.4 Calibração dos pontos de observação

A partir dos dados de monitoramento de nível estático de 14 poços do SIAGAS, foram comparados os valores de cargas hidráulicas computados pelo modelo (calculados) com os valores reais obtidos em campo (observados) em um gráfico do tipo *Scatter Plot* (Figura 27).

Figura27 - Gráfico de correlação dos valores de carga hidráulica observados versus calculados.



Fonte: Autora, 2022.

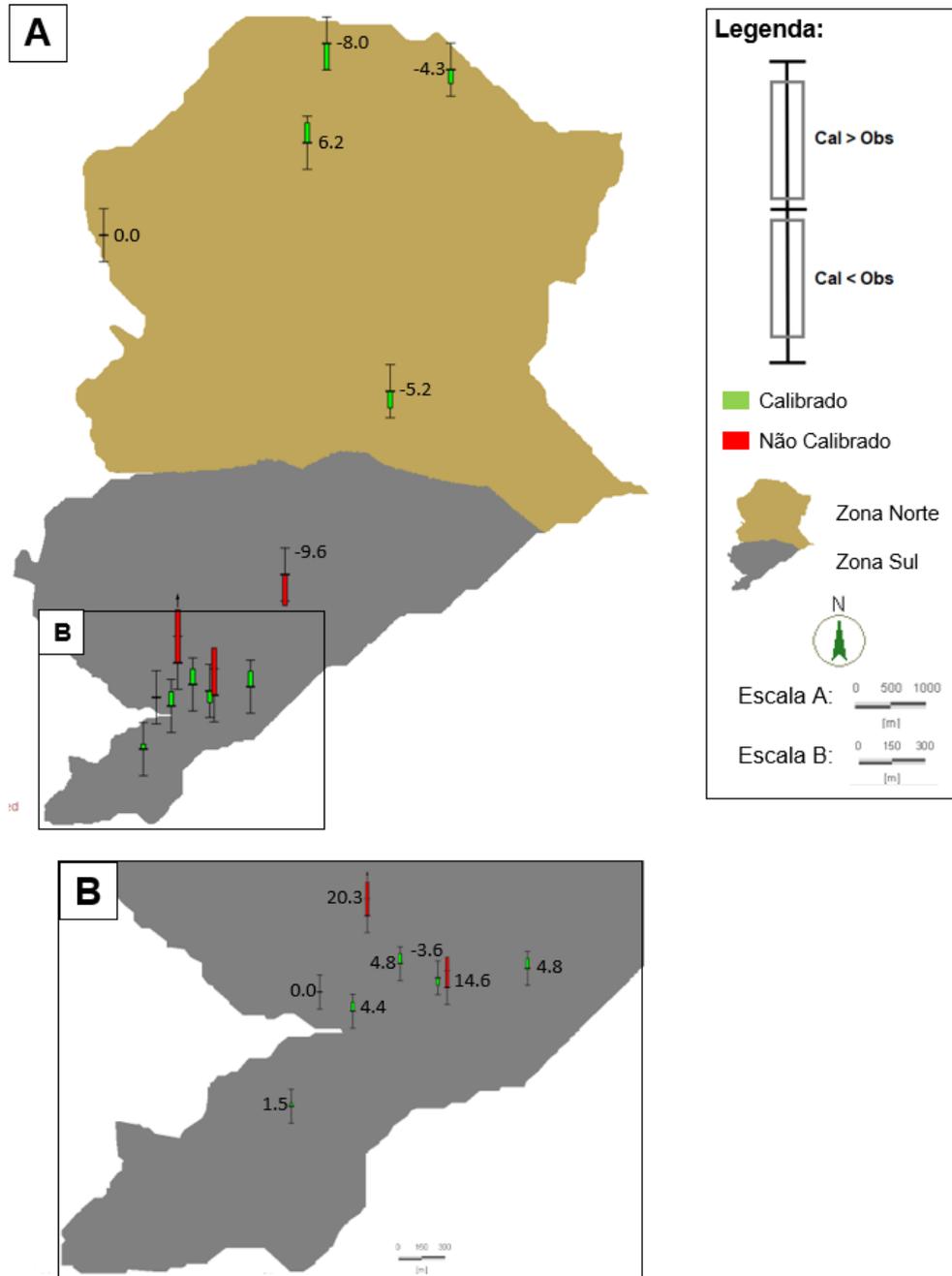
Após 96 simulações visando a calibração do modelo, o melhor resultado obtido apresentou valores de RMS= 8,22; NRMS = 14,6%; erro absoluto: $\hat{E} = 6,23$; e desvio padrão $\sigma = 8,53$. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra o valor da carga hidráulica de cada poço monitorado em relação ao calculado.

Tabela 5 Carga hidráulica observada (real) versus calculada, em metros, nos 14 pontos de observação. A localização dos poços pode ser vista na Figura 21.

	Poço	Observado	Calculado	Calc - Obs (m)
Zona Norte	2900001073	68.0	60.0	-8.0
	2900001627	65.0	65.0	0.0
	2900004633	62.0	57.7	-4.3
	2900004638	69.0	75.2	6.2
	2900031816	65.0	59.8	-5.2
Zona Sul	2900004635	27.0	31.8	4.8
	2900004637	28.0	32.4	4.4
	2900013916	45.0	35.4	-9.6
	2900001836	36.0	32.4	-3.6
	2900001843	28.0	32.8	4.8
	2900001851	13.0	33.3	20.3
	2900003861	20.0	34.6	14.6
	2900004631	32.0	33.5	1.5
	2900004632	33.0	33.0	0.0

Do total dos poços de observação, onze estão calibrados considerando um erro de até 8 metros, sendo que somente os poços 2900013916, 2900001851 e 2900003861, todos localizados na Zona Sul, encontram-se menos calibrados (Figura 28).

Figura 28 - Distribuição da diferença de carga hidráulica (Calculado-Observado) no modelo.



Fonte: Autora, 2022.

O poço 2900013916 apresenta um valor calculado menor que o observado, cuja diferença é de 9,6m. Esse fato dificultou a calibração do poço, visto que na Zona Sul a predominância de erros é positiva, ou seja, valores calculados maiores que observados. Essa discrepância entre as respostas obtidas na Zona Sul evidenciam um comportamento contrário da região onde está localizado o poço em questão, que exige um valor de condutividade hidráulica menor que o restante da área. Essa é uma informação valiosa da etapa de calibração, uma vez que demonstra que há uma significativa diferença geológica no setor sul que precisa ser melhor discretizada. Apesar da constatação, não foi possível estabelecer uma nova zona de K devido à ausência de dados geológicos disponíveis nessa porção da área, já que são essas as informações que norteiam a tomada de decisão em relação ao traçado de uma nova zona.

Os poços 2900001851 e 2900003861 apresentam os maiores erros no modelo, respectivamente 20,3 e 14,6 metros. Os testes de calibração nesses dois pontos mostram um resultado mais efetivo quando alterados os valores de condutividade das 4 camadas, entretanto, mesmo assim são insuficientes para reproduzir rebaixamentos que sejam significantes. Dessa maneira, entende-se que o modelo ainda não alcançou a complexidade necessária para que haja a calibração nesses dois poços. Além dos resultados da etapa de calibração, esse argumento é fortalecido devido a presença de uma camada de aproximadamente 70m de folhelho que se encontra acima do nível dos filtros nos perfis construtivos destes dois poços. Portanto, se tratando de um aquífero multicamadas, há a possibilidade do aquífero estar parcialmente confinado, o que acaba por afetar o nível d'água.

Por fim, outro poço que destoa na calibração do modelo é o 2900001836, localizado na Zona Sul. Apesar de estar calibrado, com um erro de apenas -3,6 metros, ele se destaca dos demais por ser o único a apresentar um valor calculado menor do que o observado na área onde está localizado. Neste caso, é passível de se questionar a confiabilidade do dado obtido no SIAGAS.

7.2.5 Análise qualitativa da sensibilidade das camadas

Após as 92 simulações realizadas durante a etapa de calibração, foi possível adquirir a percepção de quais camadas estariam impactando mais em cada zona e em cada poço.

Na Zona Norte, percebe-se que os poços 2900004638 e 2900031816 são mais sensíveis a alterações na Camada 1, já os poços 2900001073, 2900001627 e 2900004633 são mais afetados pela camada 4. Além disso, ambas as camadas passam a perder efetividade de resposta a partir de certo ponto, ou seja, alterações nos valores de K deixam de ser relevantes. Para a camada 1, são os valores de condutividade iguais ou menores do que $1E-06$ m/s e para a camada 4 são valores menores do que $1E-06$ que representam os patamares de estabilidade.

Na Zona Sul, os poços 2900001851 e 2900003861 são mais impactados pela camada 2, entretanto todas as alterações nessa camada apresentam um efeito contrário na calibração do poço 29000013916. Os outros poços da Zona sul aparentam ser mais sensíveis a alterações na camada 1.

7.2.6 Balanço de fluxo

O regime permanente (*steady state*) obedece a lei da conservação de massa, ou seja, todo o volume de água que entra no modelo é igual ao que sai. Portanto, para que um modelo seja considerado calibrado, este deve apresentar um balanço de fluxo nulo ou insignificante.

O resultado obtido na simulação apresenta um balanço de fluxo igual a $+0,061276$ m³/dia, que corresponde a 0,0004% da entrada da água total, indicando que o modelo está balanceado, além de calibrado (Figura 29).

Figura 29 - Balanço de fluxo do modelo calibrado.

<input checked="" type="checkbox"/> Active	[m ³ /d]
Dirichlet BCs	-15471
Neumann BCs	
Cauchy BCs	
Wells	
Distributed Sink(-)/Source(+)	+15471
Storage Capture(-)/Release(+)	
Imbalance	+0.061276

8 CONCLUSÕES

Um modelo é uma representação simplificada do complexo mundo natural, e um bom modelo de água subterrânea é aquele que representa adequadamente as complexas condições e relações hidrogeológicas no tempo e no espaço. Definir o compromisso ideal entre simplicidade da representação e complexidade do mundo real faz parte do processo e é um dos maiores desafios na modelagem.

As simplificações vêm em muitas formas, por exemplo, nos processos incluídos ou excluídos do modelo, na discretização de espaço e tempo, seleção de condições de contorno e atribuição de parâmetros. Cada decisão de simplificar o complexo mundo natural influenciará na capacidade do modelo de simular alguma faceta das condições hidrogeológicas reais.

O Sistema Aquífero São Sebastião é formado predominantemente por areia com grande quantidade de intercalações de finos, depositados por sistemas fluviais da fase final do assoreamento do rifte. Essa heterogeneidade acaba por agregar complexidade ao modelo, devido as simplificações inerentes do processo.

As informações geológicas compiladas compreendem 19 poços do SIAGAS e 50 poços da ANP, a base de dados conta com descrição de amostras de calha, bem como interpretações de perfilagens geofísicas. A partir deles foram feitas divisões do padrão litológico nos mapas de Areia vs Argila. Para o modelo numérico foram inseridos os pontos de observação correspondentes ao dado de nível estático de 14 poços do SIAGAS.

A calibração consistiu na análise do NRMS e do balanço de massa. Para modificar os valores de carga hidráulica calculados pelo modelo, foram feitas alterações nos valores de condutividade hidráulica (K) de cada camada, tendo como base os valores identificados na literatura.

A recarga de 185 mm/ano utilizada na calibração corresponde a 15% da média da precipitação anual e foi definida a partir dos resultados obtidos na etapa de calibração. Essa distribuição ocorre de forma homogênea na área, retirando-se apenas as zonas que são naturalmente de descarga.

Atingida a calibração do modelo com um NRMS de 14,6 %, foram obtidas duas zonas de condutividade, uma no setor norte e outra no setor sul, sendo possível correlacioná-las com o padrão litológico identificado.

Existem três poços do modelo que não foram calibrados de maneira inteiramente satisfatória, sendo que todos estão localizados na Zona Sul. Apesar do aparente insucesso nesses três pontos, a análise dos resultados obtidos é interpretada como uma importante fonte de informação para melhorias no modelo. Os poços 2900013916, 2900001851 e 2900003861 indicam que há espaço para melhorias na discretização do modelo, de forma que se possa alcançar uma calibração mais assertiva nesses locais.

Com os dados de geologia disponíveis para esse trabalho, foi possível estabelecer 4 camadas. Entretanto, tudo indica que se trata de uma área geologicamente mais complexa, implicando que mais dados geológicos devam ser adicionados para melhor representação da realidade. Dessa forma, a tendência é que aumentando a complexidade do modelo possa se chegar cada vez mais perto da representação da geologia.

Portanto, a análise dos resultados permitiu identificar as incertezas inerentes ao método de modelagem, e o modelo possui representatividade regional adequada em relação às condições reais, contribuindo assim para uma melhor compreensão da dinâmica das águas subterrâneas na região do Campo de Taquipe, na Bahia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, G.A.G.; MATO, L.F. 1990. Definição e relações estratigráficas da Formação Afligidos nas Bacias do Recôncavo, Tucano Sul e Camamu, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36, Natal. Anais Sociedade Brasileira de Geologia, 157-170, 1990
- ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W.W. Applied Groundwater Modelling: Simulation of Flow and Advective Transport. London: Academic Press, Inc., 1992. 381 p.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. Plano de desenvolvimento de Taquipe. 2016. Disponível em <http://www.anp.gov.br/images/planosdesenvolvimento/Taquipe>
- BEAR, J. & VERRUIJT, A. Modeling Groundwater Flow and Pollution: With Computer Programs for Sample Cases. New Jersey: Kluwer Academic Pub, 1987
- BRANDÃO, Aglaia Trindade. Análise Estratigráfica e Hidrogeológica da Formação São Sebastião no Campo de Araçás, Bacia do Recôncavo–Bahia. 2008.
- BUENO, G. V. Considerações sobre a sedimentação e origem do paleocanyon de Taquipe, Bacia do Recôncavo (Brasil). Dissert. de Mestrado, UFOP, Ouro Preto, 1987.
- CAIXETA, J. M.; BUENO, G. V.; MAGNAVITA, L. P. & FEIJÓ, F. J. Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Rio de Janeiro, Boletim de Geociências da Petrobrás, 8 (1):163-172. 1994.
- COWAN, E. et al. Practical implicit geological modelling. In: Fifth International Mining Geology Conference, 2003. p. 17–19.
- CUNHA, JEM; NEGRÃO, F. I.; SANTOS, PRP dos. Panorama atual das águas subterrâneas no Estado da Bahia. In: 4º Congresso ABAS, Brasília. 1986.
- EMBRAPA. embrapa.br, 2018. ALOS – Advanced Land Observing Satellite. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/alos>. Acesso em: 01, março de 2021.

FALLARA, F.; LEGAULT, M.; RABEAU, O. 3-D integrated geological modeling in the Abitibi Subprovince (Québec, Canada): techniques and applications. *Exploration and Mining Geology*, v. 15, n. 1-2, p. 27-43, 2006.

FETTER, Charles Willard. *Applied hydrogeology*. 3 ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2000.

IFC, 2007. Environmental, health and safety guidelines for offshore oil and gas development. International Finance Corporation – World Bank Group, 25p.

MME-MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Relatório do Balanço Energético Nacional. 2018 Disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>

MAGNAVITA, L.P.; Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, NE Brasil. Tese de Doutorado, Universidade de Oxford, 493p. 1992

MAGNAVITA, L.P.; SILVA, R.R.DA.; SANCHES, C.P. Guia de campo da Bacia da Recôncavo, NE do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*: Rio de Janeiro, v. 13, p. 301-334, 2005.

MARIANO, Antonio Huoya. Análise Hidrogeológica e Petrofísica do Aquífero São Sebastião, no Campo de Miranga, Bacia do Recôncavo-B – 2013.

NASCIMENTO. S.; Avaliação quantitativa e qualitativa das Águas subterrâneas como componente do plano municipal de saneamento ambiental de Alagoinhas, Bahia. Congresso Internacional do Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano: Biodiversidade, Recursos Hídricos e Responsabilidade Social – Modelhuman, 2006.

O'ROURKE, D. & CONNOLLY, S. 2003. Just oil? The distribution of environmental and social impacts of oil production and consumption. *Annual Reviews Environmental Resources*, 28: pp. 567-617.

PEIXINHO, Marco Antonio Lima. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Marizal/São Sebastião na Sub-Bacia do Tucano Central, Estado da Bahia. 2016.

SILVA, D. Signed distance function modeling with multiple categories. 2015. Artigo publicado no site geostatisticslessons.com. Disponível em: <<http://>

[/www.geostatisticslessons.com/lessons/signeddistancefunctions](http://www.geostatisticslessons.com/lessons/signeddistancefunctions)> Acesso em: 10-02-2021.

SILVA, O.B.; CAIXETA, J.M.; MILHOMEM, P.S., KOSIN, M.D. Bacia do Recôncavo. Rio de Janeiro: Boletim de Geociências da Petrobras, 2007. v.15, n.2. p.423-431. 2007.

TURNER, A. Keith; GABLE, Carl W. A review of geological modeling. Three-dimensional geologic mapping for groundwater applications, p. 81, 2007.

VAQUEIRO, R.L.C. Avaliação de contaminação de aquíferos porosos a partir da perfuração de poços de petróleo utilizando fluido n-parafina. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Recurso Minerais e Hidrogeologia, São Paulo, São Paulo, 2006.

VIANA, C. F.; GAMA JR, E. G.; SIMÕES, I. A.; MOURA, J. A.; FONSECA, J. R. & ALVES, R. J. Revisão estratigráfica da bacia do Recôncavo/Tucano. Boletim Técnico da Petrobras, 14 (3/4): 157-178. 1971.

WANG, H. F. & ANDERSON, M. P. Introduction to groundwater modeling: finite difference and finite element methods. Academic Press, 1995