



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Geociências

NÁDIA FRANQUEIRO CORRÊA

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DE FLUXO NO SISTEMA AQUÍFERO BAURU, MUNICÍPIOS DE
BASTOS E IACRI, SP.

CAMPINAS

2021

NÁDIA FRANQUEIRO CORRÊA

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E SIMULAÇÃO
NUMÉRICA DE FLUXO NO SISTEMA AQUÍFERO BAURU, MUNICÍPIOS DE
BASTOS E IACRI, SP.

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO INSTITUTO
DE GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE CAMPINAS PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRA EM GEOCIÊNCIAS NA
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

ORIENTADORA: PROFA. DRA. ANA ELISA SILVA DE ABREU

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA
PELA ALUNA NÁDIA FRANQUEIRO CORRÊA E
ORIENTADA PELA PROFA. DRA. ANA ELISA
SILVA DE ABREU

CAMPINAS

2021

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Geociências
Cássia Raquel da Silva - CRB 8/5752

C817m Corrêa, Nádia Franqueiro, 1981-
Modelo hidrogeológico conceitual e simulação numérica de fluxo no Sistema Aquífero Bauru, municípios de Bastos e Iacri, SP / Nádia Franqueiro Corrêa. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Ana Elisa Silva de Abreu.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Hidrogeologia. 2. Aquíferos - Bauru (SP). 3. Águas subterrâneas - Escoamento. I. Abreu, Ana Elisa Silva de, 1973-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Conceptual hydrogeological model and numerical flow simulation in the Bauru Aquifer System, municipalities of Bastos and Iacri, SP

Palavras-chave em inglês:

Hydrogeology

Aquifers - Bauru (SP)

Groundwater flow

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Mestra em Geociências

Banca examinadora:

Ana Elisa Silva de Abreu [Orientador]

Heraldo Luiz Giacheti

Sueli Yoshinaga Pereira

Data de defesa: 26-10-2021

Programa de Pós-Graduação: Geociências

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-8354-8773>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/0991553922973455>



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

AUTOR: Nádia Franqueiro Corrêa

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE
FLUXO NO SISTEMA AQUÍFERO BAURU, MUNICÍPIOS DE BASTOS E IACRI, SP**

ORIENTADORA: Profa. Dra. Ana Elisa Silva de Abreu

Aprovado em: 26 / 10 / 2021

EXAMINADORES:

Profa. Dra. Ana Elisa Silva de Abreu - Presidente

Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira

Prof. Dr. Heraldo Luiz Giacheti

***A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora consta no processo
de vida acadêmica do aluno.***

Campinas, 26 de outubro de 2021.

SÚMULA

Natural do município de Campinas, SP, é bacharel em Geologia pela Universidade Estadual de Campinas, em 2010. Atuou como geóloga no Departamento de Água e Esgoto de Bauru, entre 2012 e 2013. Atualmente trabalha como pesquisadora na Seção Planejamento Territorial, Recursos Hídricos, Saneamento e Florestas (SPRSF) no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT).

Dedico à minha mãe.

AGRADECIMENTO

A orientadora Profa. Dra. Ana Elisa Silva de Abreu pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa, além da sua dedicação e ensinamentos.

Ao colega José Luiz Albuquerque Filho pelo incentivo em continuar aprimorando os meus conhecimentos hidrogeológicos.

A colega Tatiana Tavares pela proposição inicial dessa pesquisa.

A Mara Iritani pela sua generosidade em avaliar e sugerir o aprimoramento desse trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas por permitir e incentivar que seus colaboradores continuem aperfeiçoando seus estudos e por disponibilizar o uso do *software* FEFLOW.

Aos colegas do então Laboratório de Recursos Hídricos e Avaliação Geoambiental (Labgeo) pela convivência e em especial ao colega Caio Pompeu Cavalhieri e Ana Candida M. C. Monteiro que disponibilizou as bases cartográficas.

Ao Comitê de Bacias Hidrográficas Aguapeí e Peixe por disponibilizar os dados para a realização dessa pesquisa.

A Universidade Estadual de Campinas e o Instituto de Geociências por sua infraestrutura que possibilita um aprendizado de muita qualidade.

A minha querida mãe e as minhas irmãs por sempre estarem presentes na minha caminhada.

Aos amigos que a Geologia me deu, apesar da distância, estamos conectados de alguma forma trocando mensagens de afeto, incentivo e escuta mútua, Thaís Trevisani, Rafael Reginato, Mariana Velcic, Andre Pestilho e Joël Viltus.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

O poder não é dado a você.

Você precisa conquistá-lo.

Beyoncé

RESUMO

O modelo hidrogeológico conceitual representa a dinâmica das águas subterrâneas e permite que as informações já compiladas e interpretadas sejam aplicadas no modelo numérico de fluxo, permitindo assim apoiar as decisões na utilização sustentável deste recurso hídrico. Nessa pesquisa, foi elaborado o modelo hidrogeológico conceitual para a área de estudo que compreende a Bacia do Córrego da Fartura (BCF), situada nos municípios de Bastos e Iacri, SP. O abastecimento da população nesta bacia depende exclusivamente das águas subterrâneas, bem como o abastecimento de atividades econômicas como: indústrias, serviços, agricultura e avicultura. A área de estudo assenta-se no Aquífero Adamantina, pertencente ao Sistema Aquífero Bauru (SAB), compreendendo rochas do Grupo Bauru. O objetivo deste estudo foi compreender a dinâmica do fluxo das águas subterrâneas na região. A metodologia aplicada consistiu na elaboração do modelo hidrogeológico conceitual por meio da análise e interpretação a partir das informações provenientes de diferentes bancos de dados (DAEE, SIAGAS e CBH-AP), de dados geológicos, dados pluviométricos, fluviometria, ensaios de bombeamento e parâmetros hidráulicos disponíveis na literatura. Em seguida, foi realizada a inserção dessas informações no modelo numérico de fluxo, em regime estacionário. Os resultados obtidos mostram que na área de estudo o Aquífero Adamantina se comporta como aquífero livre com profundidade máxima de 150 m, sotoposto encontra-se o Aquitardo Araçatuba que foi considerado como uma barreira hidráulica. A recarga de 202 mm/ano estimada foi a única fonte de entrada de água no modelo e os corpos hídricos superficiais são a área de descarga. A condutividade hidráulica obtida nos ensaios de bombeamento mostram valores mínimos e máximos entre 0,27 m/d e 2,86 m/d. A partir dessas informações a área de estudo foi dividida em 6 camadas espaçadas a cada 25,0 m e considerando a mesma forma litológica. As simulações foram realizadas em regime estacionário para duas situações: a primeira sem o funcionamento dos poços tubulares e a segunda com o funcionamento dos poços tubulares. A calibração do modelo foi realizada por meio da comparação entre carga hidráulica observada versus carga hidráulica calculada. Modificações foram feitas nos valores da condutividade hidráulica a fim de obter um valor de calibração adequado. A condutividade hidráulica horizontal utilizada foi de 2,75 m/d e vertical 0,275 m/d. O resultado da calibração foi NRMS de 11% considerado aceitável. O balanço de fluxo indica uma entrada de 44.533 m³/dia. A potenciométrica da BCF tem o fluxo das águas subterrâneas direcionados para o centro da área de estudo, onde se localiza a drenagem principal da bacia. As cargas hidráulicas de maiores valores (492 m e 481 m) encontram-se na porção norte da BCF. Para aprimoramento do modelo hidrogeológico conceitual e do modelo numérico de fluxo recomenda-se um detalhamento das formações litológicas, o monitoramento prolongado dos níveis piezométricos nos poços e das vazões no Córrego da Fartura. O modelo numérico de fluxo mostra-se uma representação simplificada da realidade, necessitando ser constantemente revisado e atualizado, para tornar-se uma ferramenta confiável para a gestão das águas subterrâneas.

Palavras-chave: Hidrogeologia; Aquífero – Bauru (SP); Águas subterrâneas - Escoamento.

ABSTRACT

The conceptual hydrogeological model represents the dynamics of groundwater and allows the information already compiled and interpreted to be applied to the numerical flow model, thus allowing to support decisions in the sustainable use of this water resource. In this research, a conceptual hydrogeological model was developed for the study area comprising the Córrego da Fartura Basin (BCF), located in the municipalities of Bastos and Iacri, SP. The supply of the population in this basin depends exclusively on groundwater, as well as the supply of economic activities such as: industries, services, agriculture and poultry. The study area is based on the Adamantina Aquifer, which belongs to the Bauru Aquifer System (SAB), comprising rocks from the Bauru Group. The aim of this study was to understand the dynamics of groundwater flow in the region. The methodology applied consisted in the elaboration of the conceptual hydrogeological model through analysis and interpretation based on information from different databases (DAEE, SIAGAS and CBH-AP), geological data, rainfall data, fluvimetry, pumping tests and parameters available in the literature. Then, this information was inserted in the numerical flow model, in steady state. The results obtained show that in the study area the Adamantina Aquifer behaves as a free aquifer with a maximum depth of 150 m, underneath is the Aquitardo Araçatuba which was considered as a hydraulic barrier. The estimated 202 mm/year recharge was the only water inlet source in the model and the surface water bodies are the discharge area. The hydraulic conductivity obtained in the pumping tests show minimum and maximum values between 0.27 m/d and 2.86 m/d. Based on this information, the study area was divided into 6 layers spaced every 25.0 m and considering the same lithological form. The simulations were carried out in a steady state for two situations: the first without the tube wells functioning and the second with the tube wells functioning. Model calibration was performed by comparing the observed hydraulic load versus the calculated hydraulic load. Modifications were made to the hydraulic conductivity values in order to obtain an adequate calibration value. The horizontal hydraulic conductivity used was 2.75 m/d and the vertical 0.275 m/d. The calibration result was NRMS of 11% considered acceptable. The flow balance indicates an inflow of 44,533 m³/day. The BCF potentiometry has the flow of groundwater directed to the center of the study area, where the main drainage of the basin is located. The hydraulic loads with the highest values (492 m and 481 m) are found in the northern portion of the BCF. To improve the conceptual hydrogeological model and the numerical flow model, it is recommended to detail the lithological formations, the prolonged monitoring of the piezometric levels in the wells and the outflows in the Córrego da Fartura. The numerical flow model is a simplified representation of reality, needing to be constantly revised and updated, to become a reliable tool for the management of groundwater.

Keywords: Hydrogeology; Aquifers – Bauru (SP); Groundwater flow.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Modelo conceitual hidrogeológico.....	22
Figura 2- Mapa de localização da área de estudo.....	26
Figura 3 – Subdivisão das unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru.....	28
Figura 4 – Mapa geológico regional.....	29
Figura 5 – Mapa geomorfológico regional.....	34
Figura 6 – Variação média de temperaturas entre o período de 2002 a 2019.....	35
Figura 7 – Variação da pluviometria média medida pela estação C7-062.....	35
Figura 8 – Localização da área de estudo na UGRHI 21.....	36
Figura 9 – Hidrografia da região da área de estudo.....	37
Figura 10 – Mapa pedológico da área de estudo.....	39
Figura 11 – Exemplo de curva de recessão.....	50
Figura 12 – Processos do modelo.....	56
Figura 13 – Distribuição dos poços tubulares na Bacia do Córrego da Fartura.....	63
Figura 14 - Elevação da Bacia do Córrego da Fartura.....	64
Figura 15 – Declividade da Bacia do Córrego da Fartura.....	65
Figura 16 – Localização das seções geológicas.....	67
Figura 17 – Seção geológica A-A’.....	68
Figura 18 – Seção geológica B-B’.....	69
Figura 19 – Seção geológica C-C’.....	70
Figura 20 – Seção geológica D-D’.....	71
Figura 21 – Localização dos poços tubulares do entorno.....	73
Figura 22 – Descrição dos perfis litológicos no entorno e na Bacia Córrego da Fartura.....	74
Figura 23 – Cotas da Formação Adamantina na Bacia do Córrego da Fartura e entorno.....	75
Figura 24 – Delimitação do topo do aquífero na Bacia do Córrego da Fartura.....	76
Figura 25 – Mapa de isoespessura da Formação Adamantina na Bacia do Córrego da Fartura.....	77
Figura 26 – Correlação entre o nível estático (NE) e a profundidade do poço.....	78
Figura 27 – Profundidades dos poços tubulares na Bacia do Córrego da Fartura.....	79

Figura 28 – Distribuição da condutividade hidráulica no Aquífero Adamantina na Bacia do Córrego da Fartura.....	81
Figura 29 – Monitoramento pluviométrico entre os anos de 1946 e 2020.....	83
Figura 30 – Bacia do Ribeirão da Copaíba e a Bacia do Córrego da Fartura.....	85
Figura 31 – Vazão diária do Ribeirão da Copaíba, em evidencia o período de recessão em 1995.....	86
Figura 32 – Vazão diária do Ribeirão da Copaíba, em evidencia o período de recessão em 1996.....	87
Figura 33 – Vazão diária do Ribeirão da Copaíba, em evidencia o período de recessão em 2001.....	87
Figura 34 – Curva de Permanência da Bacia Córrego da Fartura.....	89
Figura 35 – Potenciometria do aquífero na Bacia do Córrego da Fartura.....	91
Figura 36 – Mapa potenciométrico do município de Bastos.....	92
Figura 37 – Vazão específica na Bacia do Córrego da Fartura.....	94
Figura 38 – Vazão de exploração para cada tipo de uso na Bacia do Córrego da Fartura.....	95
Figura 39 – Tipos de uso das águas subterrâneas na Bacia do Córrego da Fartura.....	95
Figura 40 – Uso e ocupação do solo da Bacia do Córrego da Fartura.....	97
Figura 41 – Localização das atividades econômicas na área urbana da Bacia do Córrego da Fartura.....	99
Figura 42 – Modelo hidrogeológico conceitual.....	101
Figura 43 – Malha de elementos utilizada na área do domínio.....	103
Figura 44 – Superfície topográfica do topo da área modelada.....	104
Figura 45 – Representação tridimensional das condições de contorno.....	105
Figura 46 – Representação tridimensional transversal (Norte – Sul) da condição de contorno Tipo 4.....	106
Figura 47 - Distribuição dos poços de observação na área modelada.....	107
Figura 48 - Correlação entre os valores da carga hidráulica observada e carga hidráulica calculada.....	109
Figura 49 - Balanço de fluxo da Bacia Córrego da Fartura.....	113
Figura 50 - Potenciometria sem bombeamento.....	114
Figura 51 - Potenciometria com bombeamento.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Unidades mapeadas na região da área de estudo.....	38
Tabela 2 – Razão entre recarga e precipitação.....	49
Tabela 3 – Parâmetros para a região hidrológica R utilizados para o cálculo das vazões.....	53
Tabela 4 – Poços de observação da Bacia do Córrego da Fartura.....	59
Tabela 5 Classes de Declividade.....	64
Tabela 6 – Soma da precipitação nos meses de junho, julho e agosto dos anos selecionados.....	84
Tabela 7 – Soma da precipitação anual dos anos selecionado.....	85
Tabela 8 – Vazão, intervalo de tempo e coeficiente de recessão (k).....	87
Tabela 9 – Volume de água contribuinte para a Bacia do Ribeirão da Copaíba.....	87
Tabela 10 – Altura média da água destinada a recarga do Aquífero Adamantina.....	87
Tabela 11 – Parâmetros para a região hidrológica R utilizados para o cálculo das vazões.....	88
Tabela 12 – Diferença entre a carga hidráulica calculada e a carga hidráulica observada sem bombeamento.....	107
Tabela 13 – Diferença entre a carga hidráulica calculada e a carga hidráulica observada para situação com os poços em funcionamento.....	109
Tabela 14 – Valores de condutividade hidráulica no Aquífero Adamantina.....	110
Tabela 15 – Sensibilidade do modelo numérico.....	111

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 OBJETIVOS	20
2.1 Objetivo geral	20
2.2 Objetivos específicos	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual	21
3.2 Modelo numérico de fluxo utilizando o FEFLOW	23
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
4.1 Localização	26
4.2 Aspectos Físicos	27
4.2.1 Caracterização da geologia regional	27
4.2.2 Unidades Litoestratigráficas	29
4.2.2.1 Formação Serra Geral	29
4.2.2.2 Formação Santo Anastácio	30
4.2.2.3 Formação Araçatuba	31
4.2.2.4 Formação Adamantina	31
4.2.2.5 Formação Marília	33
4.2.2.6 Depósitos aluviais	33
4.2.3 Geomorfologia	33
4.2.4 Clima	34
4.2.5 Hidrografia	36
4.2.6 Pedologia	37
4.2.7 Caracterização hidrogeológica	39
4.2.7.1 Aquífero Santo Anastácio	40
4.2.7.2 Aquitardo Araçatuba	40
4.2.7.3 Aquífero Adamantina	40

4.2.7.4 Aquífero Marília	40
4.2.7.5 Aquífero Serra Geral	41
4.3 Aspectos da Quantidade	41
4.4 Aspectos da Qualidade	42
4.5 Aspectos Socioeconômicos	43
5 MATERIAIS E MÉTODOS	44
5.1 Materiais	44
5.1.1 Banco de Dados	44
5.1.2 Pluviometria, Fluviometria e Evapotranspiração	44
5.1.3 Bases Cartográficas	44
5.2 Métodos	45
5.2.1 Organização do banco de dados	45
5.2.2 Modelo conceitual	45
5.2.3 Delimitação da área de estudo	45
5.2.4 Determinação do topo da Formação Araçatuba	46
5.2.5 Espessura da formação sedimentar	46
5.2.6 Unidades hidroestratigráficas	46
5.2.7 Potenciometria	46
5.2.8 Condutividade hidráulica	47
5.2.9 Recarga	48
5.2.9.1 Recarga por Precipitação	48
5.2.9.2 Curva de recessão	49
5.2.9.3 Regionalização Hidrológica – Vazão de 95% de permanência no período (Q _{95%})	51
5.2.10 Uso e ocupação do solo	54
5.2.11 Modelo Numérico de Fluxo	54
5.2.11.1 Escolha do aplicativo	54

5.2.11.2 Modelo numérico de fluxo subterrâneo	54
5.2.11.3 Discretização da área modelada	57
5.2.11.4 Condições de contorno	57
5.2.11.5 Estado estacionário	58
5.2.11.6 Poços de observação	58
5.2.11.7 Calibração	60
5.2.11.8 Análise de sensibilidade	61
6 RESULTADOS	62
6.1 Modelo Conceitual Hidrogeológico	62
6.1.1 Tratamento do banco de dados	62
6.1.2 Relevô	63
6.1.1 Caracterização da geologia local	65
6.1.2 Unidades hidroestratigráficas	77
6.1.3 Condutividade hidráulica	79
6.1.4 Recarga	82
6.1.4.1 Caracterização do clima	82
6.1.4.2 Recarga por Precipitação	83
6.1.4.3. Recarga a partir da Curva de Recessão	83
6.1.4.3 Estimativa da recarga utilizando a vazão de $Q_{95\%}$	87
6.1.5 Potenciometria	89
6.1.6 Disponibilidade hídrica subterrânea	91
6.1.7 Uso e ocupação do solo	95
6.1.8 Síntese do modelo conceitual hidrogeológico elaborado	99
6.2 Modelo Numérico de Fluxo	101
6.2.1 Delimitação da área do modelo	101
6.2.2 Discretização da malha	101
6.2.3 Geometria da área modelada	101

6.2.4 Condição de contorno	104
6.2.5 Calibração do modelo	106
6.2.5.1 Carga hidráulica	106
6.2.6 Parâmetros hidráulicos	109
6.2.7 Análise de sensibilidade do modelo	110
6.2.8 Balanço de fluxo	111
6.2.9 Potenciometria simulada	112
7 CONCLUSÃO	114
8 RECOMENDAÇÕES	116
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são responsáveis em parte ou integralmente pelo atendimento a cidades ou áreas rurais e ainda se constituem em um recurso natural fundamental para diversas atividades econômicas. No Estado de São Paulo este recurso hídrico responde pelo abastecimento total ou parcial de cerca de 80% dos núcleos urbanos e aproximadamente 34% da população do Estado de São Paulo (CETESB, 2010). A região noroeste é uma das que mais dependem desse manancial, onde o Sistema Aquífero Bauru (SAB) abastece integralmente 32,5% dos municípios do estado (PAULA e SILVA et al., 2005).

A Bacia do Córrego da Fartura (BCF) está inserida nos municípios de Bastos, Iacri e Parapuã que são abastecidos exclusivamente por águas subterrâneas e apresentam diversas atividades econômicas como indústrias, serviços, agricultura e avicultura, sendo esta última responsável pela produção de grandes volumes de resíduos que, caso dispostos de forma inadequada, pode constituir em fonte potencial de contaminação das águas subterrâneas da bacia.

O IPT (2018) fez a caracterização hidrogeoquímica em 30 poços tubulares na área rural do município de Bastos e confirmou elevadas concentrações de nitrato encontradas previamente e ainda constatou a influência da proximidade dos poços em relação às fontes de contaminação (barracões de granjas, fossas e aterros de resíduos) com o aumento nas concentrações de nitrato.

As águas subterrâneas mostram-se um recurso estratégico para o abastecimento público, uso privado, portanto fundamental a economia. Logo é imprescindível garantir sua utilização quantitativa e qualitativamente e a elaboração de modelos conceitual e numérico propõe uma melhor representação do comportamento, da dinâmica visando uma melhor compreensão dos processos e características do aquífero. Esses modelos, quando aplicados em investigações de águas subterrâneas, indicam altos índices de sucesso em suas respostas, como pode ser observado, por exemplo, em Anderson; Woessner; Hunt (2015), Fitts (2015) e IG; DAEE (2012), pois permitem compreender a dinâmica do aquífero, fazer projeções de exploração, cenários de contaminação e remediação.

Ao final desta dissertação espera-se que o modelo contribua para a compreensão do comportamento das águas subterrâneas nessa bacia e no estabelecimento de futuras ações que auxiliem no uso desse recurso hídrico, como por exemplo, planejar a gestão das águas subterrâneas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da presente pesquisa diz respeito à caracterização hidrogeológica da região da Bacia do Córrego da Fartura (BCF), para construção de modelo hidrogeológico conceitual e simulação numérica computacional, com vistas à contribuição com subsídios para a gestão do recurso hídrico subterrâneo.

2.2 Objetivos específicos

- Reunir e consolidar as informações de interesse à hidrogeologia disponíveis para a região em bancos de dados diversos;
- Construir um modelo hidrogeológico conceitual de fluxo subterrâneo que permita compreender a dinâmica das águas subterrâneas na área de estudo;
- Executar uma simulação numérica de fluxo nas águas subterrâneas em estado estacionário.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual

O modelo hidrogeológico conceitual é uma representação esquemática simplificada do sistema de fluxos subterrâneos e tem a finalidade de representar a realidade hidrogeológica. A elaboração de um modelo conceitual requer um procedimento e informações de parâmetros e variáveis, como identificação dos sistemas aquíferos, espessuras do aquífero, características das diferenças faciológicas, definição das fronteiras da área modelada, definição das condições de contorno, geometria da área modelada, condutividade hidráulica, transmissividade, coeficiente de armazenamento, entradas e saídas hídricas (recargas e descargas), carga piezométrica, vazão dos poços, coeficiente de armazenamento, conectividade com água superficial e outros aquíferos, viscosidade, capacidade de infiltração, resistência hidráulica (camada semiconfinante) (e.g. SAHOO; JHA, 2017, URRUTIA, et al., 2018, LIN; LIN, 2019) (CABRAL; DEMÉTRIO, 2008).

O modelo conceitual hidrogeológico de fluxo possui as seguintes etapas de acordo Anderson; Woessner; Hunt (2015) Figura 1.

Embora, as diversas características sejam assumidas, uma completa reconstrução do sistema não é possível, e raramente existem dados que abranjam todo o sistema seja espacial ou temporal.

O desenvolvimento do modelo conceitual deve ser preconizado adotando-se o princípio da simplicidade, ou seja, o modelo deve ser tão simples quanto possível, porém, deve ser representativo o suficiente para: (a) conter adequadamente os elementos físicos do sistema, (b) reproduzir o comportamento do sistema estudado, (c) viabilizar a obtenção das respostas relacionadas aos objetivos da modelagem (CRUZ, 2014).

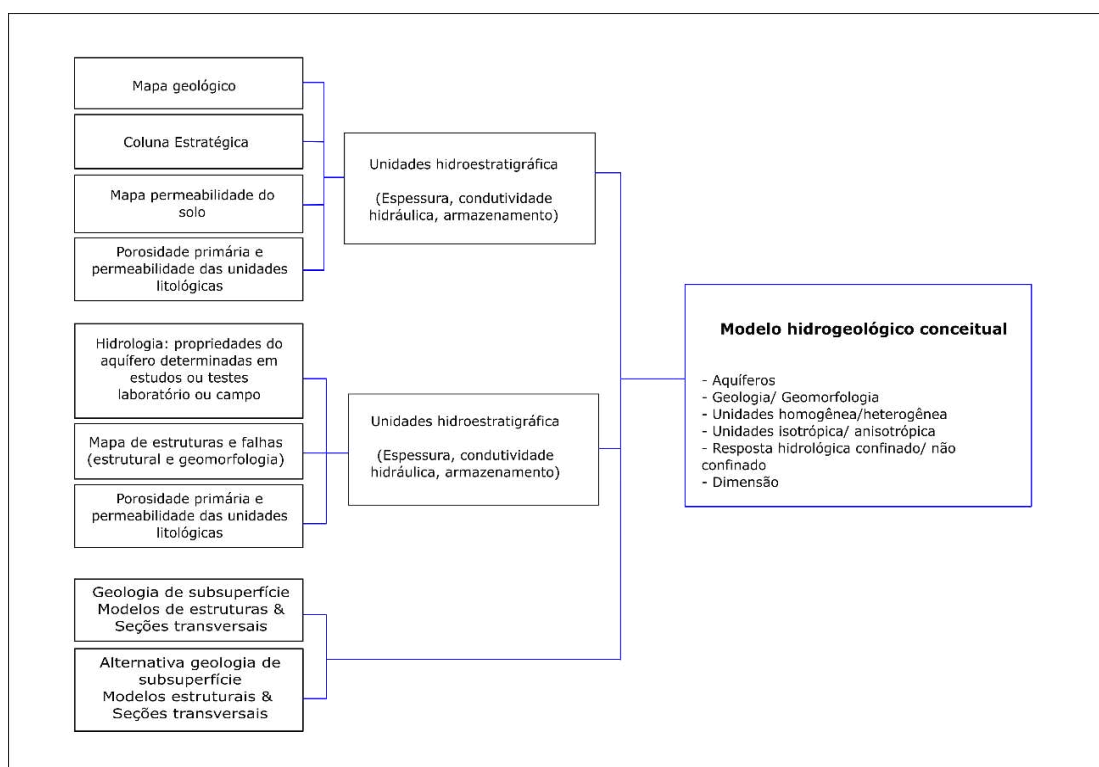
A representação do modelo hidrogeológico conceitual pode ocorrer de forma tridimensional, bidimensional horizontal, bidimensional vertical. O modelo conceitual tridimensional mostra as componentes de fluxo vertical. No modelo bidimensional horizontal não existem variações significativas na direção vertical e utilizam-se equações baseadas apenas nas variáveis X e Y. Já no modelo bidimensional vertical as características físicas e hidrogeológicas são constantes ao longo de uma

direção, sendo possível utilizar com sucesso um modelo vertical à direção das características constantes (CABRAL; DEMÉTRIO, 2008).

Segundo Anderson; Woessner; Hunt (2015) a maioria dos problemas de águas subterrâneas pode ser abordado com modelo numérico desenvolvido a partir de um modelo conceitual. Em geral, segundo os autores, quanto mais próximo o modelo conceitual se aproxima da situação de campo, mais provável é que o modelo numérico dê previsões razoáveis. Os autores recomendam que na prática tenha-se parcimônia na concepção do modelo conceitual, o que implica que o modelo conceitual é simplificado para incluir apenas os processos importantes para abordar o seu propósito, mas ainda tenha complexidade suficiente para representar o comportamento relevante do sistema. Caso seja necessário, mais complexidade pode ser adicionada subsequentemente no processo de modelagem, revisando o modelo conceitual.

O modelo hidrogeológico conceitual de fluxo possui as seguintes etapas de acordo Anderson; Woessner; Hunt (2015) Figura 1.

Figura 1 – Modelo conceitual hidrogeológico.



Fonte: Anderson; Woesnner; Hunt (2015), p. 33 (modificado).

Os resultados do modelo conceitual têm implicações significativas na gestão dos recursos hídricos, na projeção de sistemas de monitoramento e na avaliação das

águas subterrâneas. Burghof et al. (2018) desenvolveram um modelo conceitual que observa a interação entre as águas subterrâneas e águas superficiais na zona úmida da região nordeste de Kilombero Valley, Tanzânia. As autoras identificaram o fluxo das águas subterrâneas no aquífero poroso, a qualidade das águas subterrâneas e o tempo residência relacionados às condutividades hidráulicas. Os resultados deste estudo mostraram-se valiosos como base para pesquisas futuras relacionadas às águas subterrâneas e as interações das águas superficiais, sendo possível o modelo hidrogeológico conceitual ser usado no futuro para configurar o modelo numérico de fluxo de e transporte. Este trabalho revela como o sistema de águas subterrâneas – águas superficiais devem ser tratados juntos e a relação que existe entre eles.

Bayanzul et al., (2019) construíram um modelo conceitual para o fluxo de águas subterrâneas da Bacia Gunii Khooloi, região sul de Gobi, Mongólia. Uma área que possui escassez de água potável relacionada com as mudanças climáticas. Para a construção do modelo conceitual os citados autores utilizaram uma abordagem química e isotópica para caracterizar as águas subterrâneas e os processos de recarga na bacia e assim identificaram uma água moderna no aquífero raso e uma água mais antiga no aquífero profundo, concluindo a necessidade de se ter uma gestão estratégica para os recursos hídricos dessa bacia. Os autores indicam que a aplicação de diferentes técnicas pode contribuir para a compreensão da dinâmica das águas subterrâneas.

A compreensão da circulação das águas subterrâneas no meio poroso e as características geológicas do aquífero permitem elaborar o modelo conceitual que oportunamente servirá de base para o modelo numérico de fluxo e transporte. E ainda auxiliar na gestão dos recursos hídricos.

3.2 Modelo numérico de fluxo utilizando o FEFLOW

O FEFLOW (*Finite Element subsurface FLOW system*) opera com método de elementos finitos (*FEM – Finite Element Method*) que é subdividido em elementos discretos e nós. Este método utiliza formas de elemento que são um pouco mais flexíveis em relação aos retângulos ou caixas do método de diferenças finitas (FDM). As formas mais comuns para os elementos finitos são triângulos e trapezoides para o fluxo bidimensional, e prismas triangulares e trapezoidais para o fluxo tridimensional (FITTS, 2015).

O FEFLOW caracteriza-se pela modelagem de fluxo saturado variável, de transporte, massa de densidade de fluido variável, transporte de calor, e multitransporte reativo de espécies.

O modelo numérico possui a vantagem em simular vários domínios de escala com diferentes durações de tempo, tornando-se uma ferramenta eficaz para prever o comportamento das águas subterrâneas, incluindo o rendimento sustentável, através da determinação das características do aquífero (e.g. FENG et al., (2010), GAD; KHALAF (2014), LI, et al. (2017)) (LIN; LIN, 2019).

Alwathaf; Mansouri (2012) utilizaram o FEFLOW na aplicação do modelo numérico de fluxo na Bacia de Sana'a, no Iêmen, país semiárido com áreas muito limitadas em recursos hídricos. A Bacia de Sana'a é a principal fonte de água potável e de irrigação. Altas taxas de exploração na Bacia de Sana'a levaram a um grande declínio nos níveis de água e deterioração da qualidade da água subterrânea. A execução do modelo de fluxo de água subterrânea tornou-se uma ferramenta eficaz na gestão das águas subterrâneas da Bacia de Sana'a, sendo o FEFLOW usado para construir três cenários para potencial extração de água subterrânea para o período de 2006-2020. O primeiro representa o *status* de extração em 2006 sem introdução de qualquer medida de gestão. O segundo é baseado no máximo consumo doméstico, agrícola e industrial dos recursos hídricos. O terceiro simula o efeito do aumento dos recursos hídricos, ou seja, o aumento da recarga de água subterrânea e máxima sustentabilidade, reduzindo o consumo de água.

Giambastiani et al. (2012) aplicaram o modelo tridimensional nas águas subterrâneas utilizando o FEFLOW para melhorar a compreensão dos processos das águas subterrâneas no complexo estratigráfico aluvial de Maules Creek Catchment (New South Wales, Austrália). Neste caso observaram que a condição de bombeamento afeta a interação rio-aquífero, revertendo o fluxo. A elaboração do modelo é relevante para melhorar a compreensão da interação entre arquitetura do aquífero e processos de águas subterrâneas.

Arenas, et al. (2020) realizaram a análise de um modelo regional de água subterrânea via FEFLOW nas regiões tropicais utilizando duas técnicas: pontos piloto (PP) e zonas constantes (CZ). Essas metodologias permitem a identificação adequada de parâmetros enviesados e heterogeneidades das propriedades hidráulicas. Para este

propósito, desenvolveram um modelo numérico de densidade variável que é limitado a dados reinterpretados de medições reais. Para o CZ os autores consideram os parâmetros iniciais constantes; em contraste, na técnica PP, os parâmetros iniciais são atribuídos de acordo com interpolações usando medições de ponto in situ. O modelo desenvolvido foi aplicado em uma área sob influência da Zona de Convergência Intertropical, localizada no vale médio do Magdalena (MMV), na Colômbia, uma área importante para o desenvolvimento deste país por sua contribuição ao Produto Interno Bruto, e tem sofrido mudanças significativas no uso do solo, como resultado de uma intensa atividade econômica. Os resultados mostram que a abordagem do sistema PP fornece uma melhor representação da heterogeneidade e mostra que cada parâmetro é sensível e não depende de outros parâmetros.

O aplicativo FEFLOW possui uma versatilidade de aplicações que abrange desde geometrias complicadas, contornos irregulares, condições de contorno internas ao domínio, como rios ou zonas de falha, e níveis d'água dinâmicos (ANDERSON & WOESSNER, 2002).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

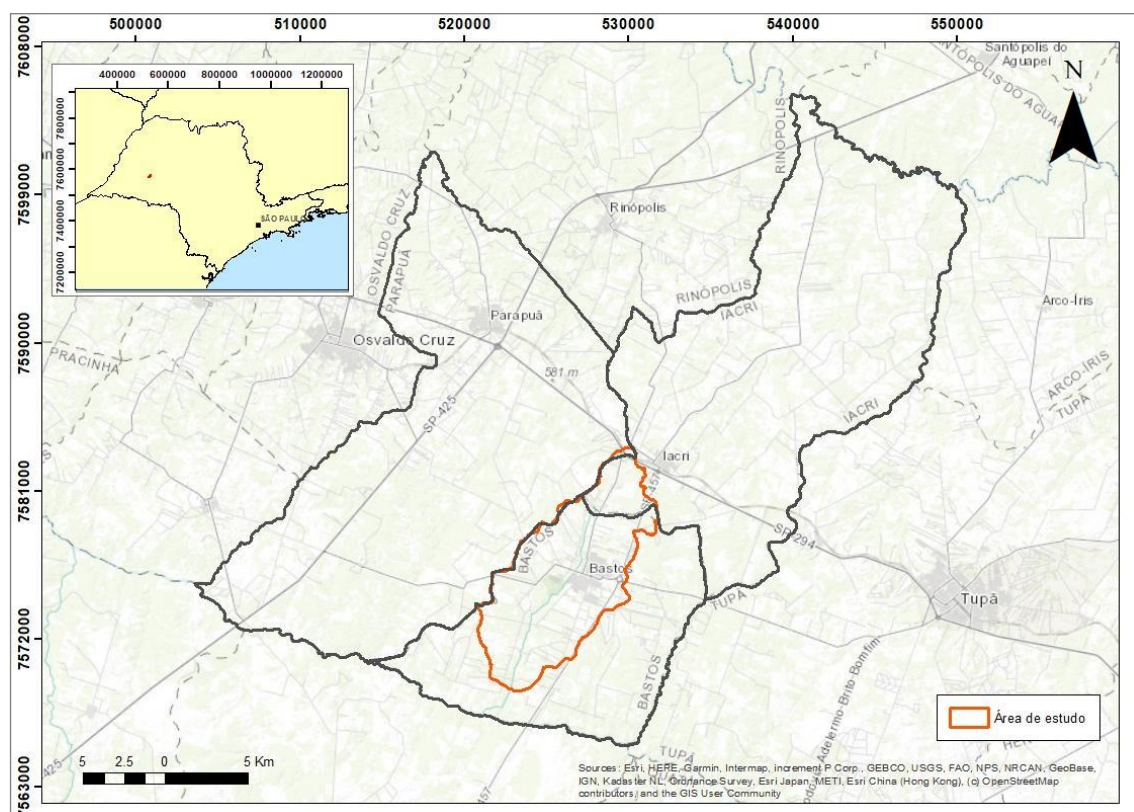
4.1 Localização

A área de estudo compreende a Bacia Córrego da Fatura (BCF), posicionada nos municípios de Bastos e Iacri, SP, com uma área territorial de 80,88 Km². O Córrego da Fatura (ou da Sede) é afluente do rio do Peixe pela margem direita, a sul do município de Bastos, situando-se a aproximadamente 550 Km da capital (São Paulo). A norte do município de Iacri encontra-se o rio Aguapeí, ambos desaguam do rio Paraná, a oeste da área de estudo.

O acesso ao local do estudo ocorre a partir das rodovias Castello Branco (SP-208), Marechal Rondon (SP-300) e Comandante João Ribeiro de Barros (SP-294) até Bastos.

A Figura 2 mostra a localização da área de estudo.

Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 Aspectos Físicos

4.2.1 Caracterização da geologia regional

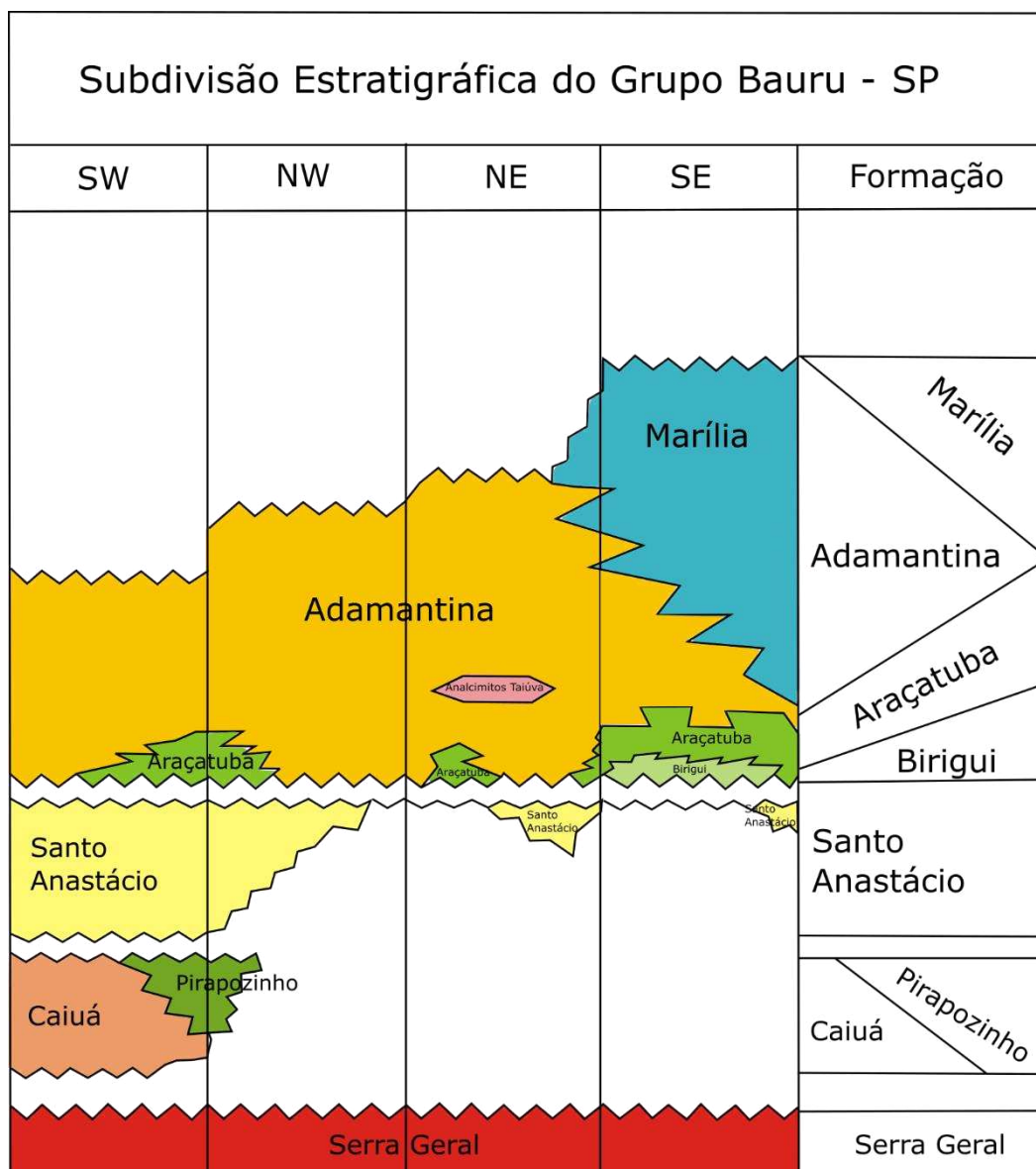
A Bacia do Córrego da Fartura assenta predominantemente sobre as rochas sedimentares da Formação Adamantina do Grupo Bauru, localmente aflora a Formação Marília e a Formação Serra Geral constitui a base desta bacia.

O Grupo Bauru ocupa uma área total de 370 mil km² distribuído entre cinco estados brasileiros, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul e Goiás, sendo que no planalto ocidental paulista abrange uma área de 117 mil km², e é constituído por sequências sedimentares cretáceas suprabasálticas (PAULA e SILVA, 2003).

A formação sedimentar do Grupo Bauru caracteriza-se pela presença de arenitos de granulometria variada, entre fina a grossa, esparsamente conglomerático, pouco argiloso, com ocorrência de cimento calcítico, enquanto sua espessura máxima conservada em sedimentos de 300 m, sendo a média atinge 100 m (PRANDI, 2010).

O arcabouço estratigráfico e hidroestratigráfico de subsuperfície do Grupo Bauru foi estabelecido pela análise de perfis geofísicos e poços tubulares realizada por Paula e Silva (2003). O autor citado evidenciou correlações litoestratigráficas nas formações deste grupo mantendo assim a subdivisão proposta por Soares et al., (1980) que propuseram que o Grupo Bauru abrangesse as formações Caiuá, Santo Anastácio e Adamantina (PRANDI, 2010). A Figura 3 apresenta as unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru.

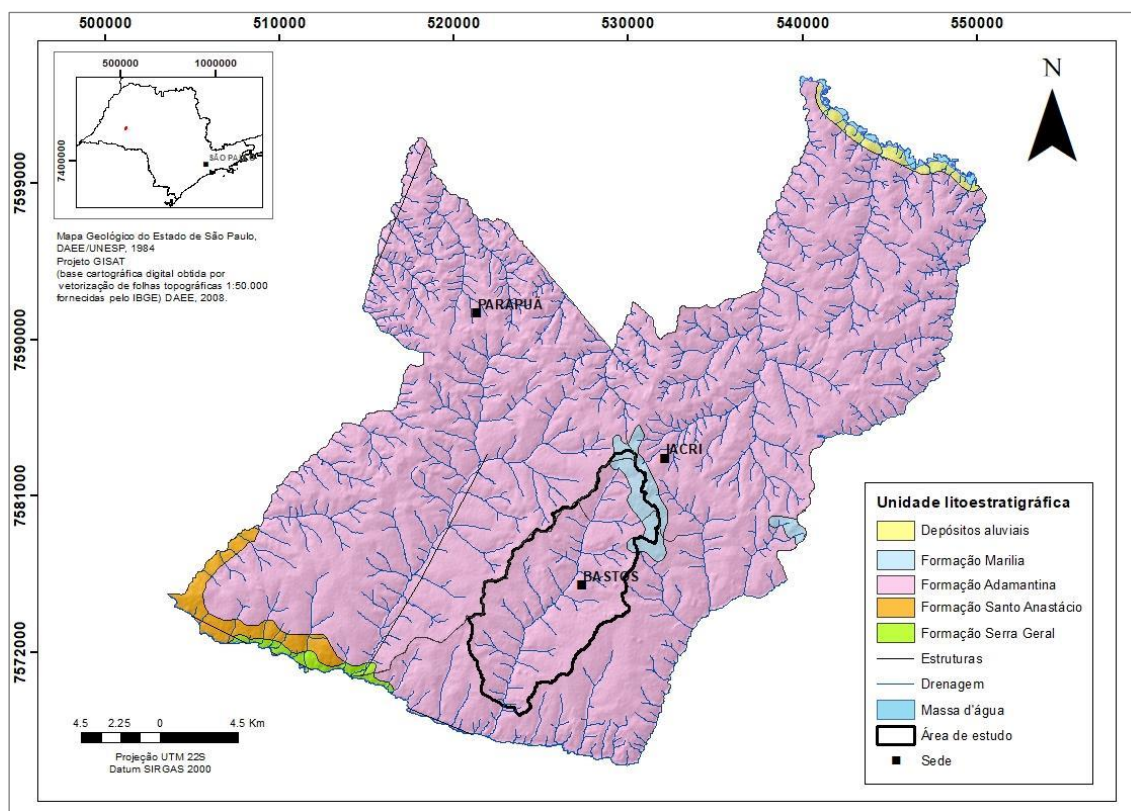
Figura 3 – Subdivisão das unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru.



Fonte: PAULA E SILVA, 2003, p.83.

Os estudos de Paula e Silva (2003) e Paula e Silva et al. (2005, 2009) identificaram as Formações Caiuá, Santo Anastácio, Araçatuba, Adamantina e Marília e acrescentaram novas unidades estratigráficas reconhecidas como as formações Pirapozinho e Birigui. As unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo são as formações Adamantina e Marília, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Mapa geológico regional.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2 Unidades Litoestratigráficas

4.2.2.1 Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral não é aflorante na área de estudo, mas ocorre em profundidade e aflora na porção sul dos municípios de Bastos e Parapuã, às margens do rio do Peixe. Logo, comporta-se como o embasamento da área de estudo.

A Formação Serra Geral é composta por basaltos toleíticos em derrames tabulares superpostos e arenitos intertrapianos (DAEE/UNESP, 1984). São rochas que se originam a partir de atividade vulcânica no Cretáceo entre 138 e 127 milhões de anos atrás (DAEE, 2005).

Na região da área de estudo o basalto identificado é marrom acastanhado a acinzentado, mole a semiduro, presença de minerais secundários, além de vesículas/amígdalas preenchidas por calcita, olivina e epidoto. A ocorrência do topo do basalto registra-se a profundidades entre 95 m e 150 m (IPT, 2018; TAVARES et al, 2016).

4.2.2.2 Formação Santo Anastácio

A ocorrência da Formação Santo Anastácio estende-se por uma grande porção do oeste do estado de São Paulo (SOARES, et al. 1979), em áreas que acompanham as cotas mais baixas dos vales dos rios afluentes do rio Paraná (MENDONÇA; GUTIERRE, 2000).

A Formação Santo Anastácio constitui-se de arenitos marrom-avermelhados a arroxeados, granulação varia de muito fina a média, com pouca matriz (inferior a 15%), grãos arredondados a subarredondados, cimentação ferruginosa e localmente carbonática, seleção para os arenitos de regular a boa, pouca variação de textura (MENDONÇA; GUTIERRE, 2000; PRANDI, 2010).

Segundo Soares et al (1980) o ambiente de deposição desta formação é fluvial meandrante e transicional para anastomosado com material psamítico, sendo o basalto uma das fontes de sedimento, principalmente em locais em que o embasamento é a própria Formação Serra Geral.

Nesta formação predominam bancos maciços com espessuras métricas a decimétricas, ocorrendo também incipiente estratificação plano-paralela ou cruzada (MENDONÇA; GUTIERRE, 2000).

A análise de padrões de variação granulométrica realizada nos perfis geofísicos por Paula e Silva (2003) e Paula e Silva et al (2005) apontam que a Formação Santo Anastácio foi depositada em um ambiente fluvial, tipo meandrante, com fácies de canal e de transbordamento delineadas, que evoluíram para um modelo entrelaçado com carga psamítica dominante e escassez de fácies pelíticas (PRANDI, 2010).

Segundo Paula e Silva et al (2009) em subsuperfície a Formação Santo Anastácio estende-se de oeste até o município de Iacri.

Prandi (2010) assinala que há indícios de ausência de rochas pelíticas ao sul do município de Bastos e isso colocaria a Formação Santo Anastácio em contato direto com a Formação Adamantina nesta região.

4.2.2.3 Formação Araçatuba

A Formação Araçatuba segundo Soares et al (1979, 1980) compreende uma unidade de até 15 m constituída de lamitos, lamitos arenosos e siltitos de cor castanho-claro-acinzentada.

Fernandes (2004) caracterizou a Formação Araçatuba como uma sucessão de estratos tabulares silto-arenosos de aspecto maciço interno e espessura centimétrica a decimétrica, sendo composto por siltitos e arenitos muito finos, de cor cinza-esverdeado (típica).

No município de Bastos a ocorrência desta formação compõe-se de lamito avermelhado, arenito muito argiloso, passando a argilito marrom escuro médio, siltito amarronzado, com níveis arenosos; e siltito cinza esverdeado, com níveis de arenito silicificado, compacto. A formação aflora em cotas variadas, entre 322 m e 351 m, pois o topo do basalto da Formação Serra Geral encontra-se sotoposto a ela. A espessura média da Formação Araçatuba mostra-se entre 13 m e 34 m (TAVARES et al., 2016).

4.2.2.4 Formação Adamantina

A Formação Adamantina possui uma ampla distribuição em área nas bacias dos rios Aguapeí e Peixe. Esta formação é sobreposta apenas pela Formação Marília, na porção leste dessas bacias. A espessura máxima dessa formação ocorre na região central, atingindo mais de 100 m de espessura no município de Iacri. Nos vales dos principais rios e no extremo oeste a Formação Adamantina foi suprimida pela erosão, onde afloram os sedimentos da Formação Araçatuba, no Vale do Rio do Peixe (PRANDI, 2010).

A Formação Adamantina é formada por arenitos de granulometria fina a muito fina, cor rósea a castanha, com estratificações cruzadas, alternadas com lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, castanho-avermelhados a cinza-acastanhados, maciços ou com acamamento plano-paralelo grosseiro, frequentemente com marcas de onda e microestratificações cruzadas e ocorrências de seixos de argilito, cimento e nódulos carbonáticos (SOARES et al. 1980).

Esta formação foi descrita por Paula e Silva; Cavaguti (1994) como um pacote sedimentar composto por arenitos avermelhados e acastanhados, finos a muito

finos, argilosos, carbonáticos, quartzosos, com intercalações de lamitos marrons avermelhados.

Fernandes (2004) descreveu a Formação Vale do Rio do Peixe, correspondente a Formação Adamantina (SOARES et al, 1980), que assenta-se diretamente sobre os basaltos da Formação Serra Geral e compõe-se de arenitos muito fino a fino intercalados com siltitos e lamitos arenosos, em camadas de espessura submétrica, marrom-claro rosado a alaranjado, de seleção moderada a boa, com estruturação tabular típica, possui aspecto maciço ou estratificação cruzada tabular e acanalada de médio a pequeno porte.

A avaliação dos perfis geofísicos feita por Paula e Silva (2003) mostra indicativos de depósitos de canais meandrantos com pouco material pelítico e isso reflete na grande variabilidade dos depósitos continentais de origem fluvial.

CETEC (1997) descreve que a Formação Adamantina possui uma variação faciológica na área de estudo denominada de unidades Ka1 e Ka4. A unidade Ka1 caracteriza-se por ser mais arenosa constituída por arenitos finos a muito finos, siltitos arenosos, arenitos argilosos, e subordinadamente arenitos com granulometria média, quartzosos, localmente arcoseanos. Possui uma matriz siltosa e argilosa, com presença de bancos com cimentação carbonática. A unidade Ka4 constitui-se de arenitos finos a muito finos dispostos em espessos bancos alternados, com intercalações e lentes de argilitos, siltitos, e mais restritamente, arenitos com pelotas de argila. A ocorrência de cimentação carbonática e raros nódulos carbonáticos, a coloração avermelhada também pode ser observada.

No município de Bastos a Formação Adamantina aflora em média na cota 453 m, atingindo cotas menores em direção aos vales (cerca de 381 m) e a espessura desta pode variar entre 80 m e 150 m (TAVARES et al., 2016).

O contato inferior desta formação normalmente ocorre com a Formação Santo Anastácio, ou diretamente com o embasamento basáltico (MENDONÇA; GUTIERRE, 2000).

4.2.2.5 Formação Marília

A Formação Marília depositou-se em um embaciamento localizado, desenvolvido ao término da deposição do Grupo Bauru, em situação parcialmente marginal, repousando sobre a Formação Adamantina (PRANDI, 2010; IPT, 1981).

Segundo Soares et al. (1980) a Formação Marília constitui-se de arenitos grossos a conglomeráticos, com grãos angulosos, teor de matriz variável, seleção pobre, ricos em feldspato, minerais pesados e minerais instáveis, ocorrem em bancos com espessura média entre 1 e 2 m, maciços ou acamamento incipiente, subparalelos e descontínuos, raramente apresentando estratificação cruzada de médio porte, com seixos concentrados nos estratos cruzados, raras camadas descontínuas de lamitos vermelhos e calcário.

Os nódulos carbonáticos são característicos da formação e se mostram dispersos nos sedimentos, ou concentrados em níveis ou zonas, cimento carbonático também é muito frequente (PRANDI, 2010; MENDONÇA; GUTIERRE, 2000).

Paula e Silva (2003) descreveu o comportamento dessa formação quando perfilada mostra um formato serrilhado e linear nas curvas de resistividade e raio gama e indica a presença predominante de depósitos arenosos e finas intercalações de material pelítico e pouca matriz argilosa.

4.2.2.6 Depósitos aluviais

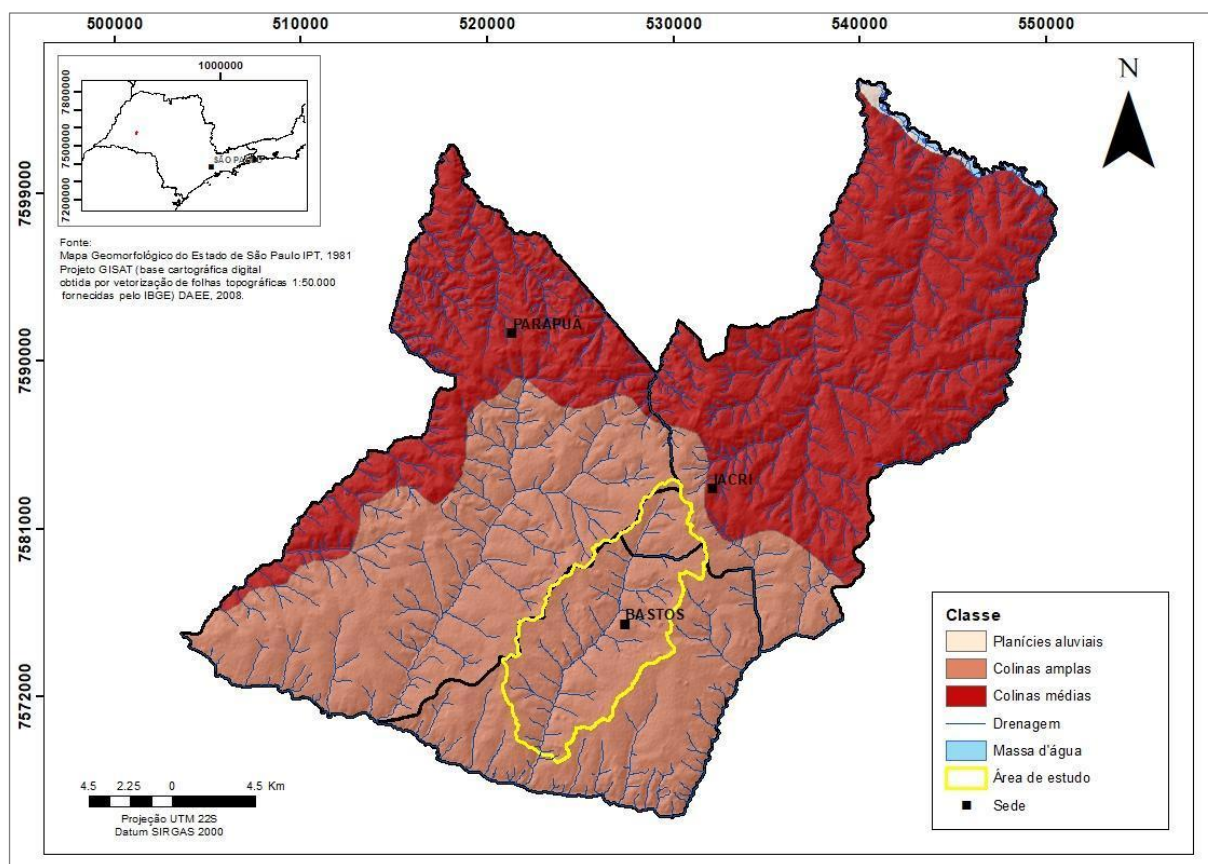
Os depósitos aluvionares são compostos por areias e argilas e possuem conglomerados na base (DAEE/UNESP, 1984).

4.2.3 Geomorfologia

A área de estudo está inserida na unidade morfológica do Planalto Ocidental que se caracteriza por relevo levemente ondulado, monótono, com predomínio de colinas e morrotes, constituído essencialmente por rochas de formações areníticas, com ocorrência de cimento de carbonato de cálcio.

No relevo colinoso (colinas amplas (212) e colinas médias (213)) predominam amplitudes locais inferiores a 100 m e de declividades inferiores a 15% (IPT, 1981). As planícies aluviais (111) ocorrem nas proximidades dos grandes rios. A Figura 5 mostra a geomorfologia da área de estudo.

Figura 5 – Mapa geomorfológico regional.

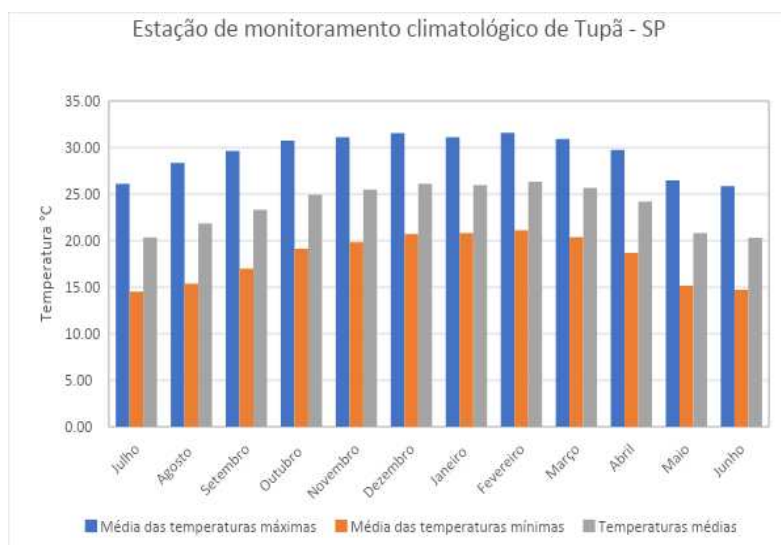


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Clima

A área de estudo encontra-se na faixa do clima subtropical, quente e úmido, com chuvas de verão, segundo a Classificação Climática de Koeppen. A temperatura média anual de 23,7°C obtida pela Estação de Monitoramento Climatológico de Tupã, pertencente ao Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO), localizado próximo à área de estudo. A Figura 6 apresenta a variação média, máxima e mínima da temperatura média medida em estação no período de 2002 a 2019.

Figura 6 – Variação média de temperaturas entre o período de 2002 a 2019.

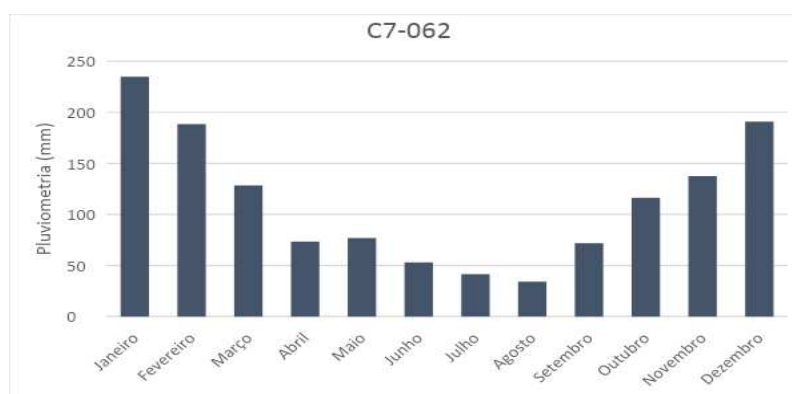


Fonte: Elaborado pela autora.

O registro mensal das precipitações é feito pelo posto pluviométrico C7-062 pertencente à rede hidrometeorológica DAEE localizada no município de Bastos tem indicado que no mês menos chuvoso a altura da lâmina d'água registrada mostra-se superior a 30 mm e, no mês mais chuvoso a 200 mm.

As médias mensais dos índices pluviométricos para o período chuvoso variam entre 137,38 mm e 234,88 mm e no período seco as médias mensais variam entre 34,15 mm e 53,00 mm. A precipitação média anual atinge 1.347,28 mm. A Figura 7 traz um gráfico com a pluviometria média de 1946 a 2020.

Figura 7 – Variação da pluviometria média medida pela estação C7-062.

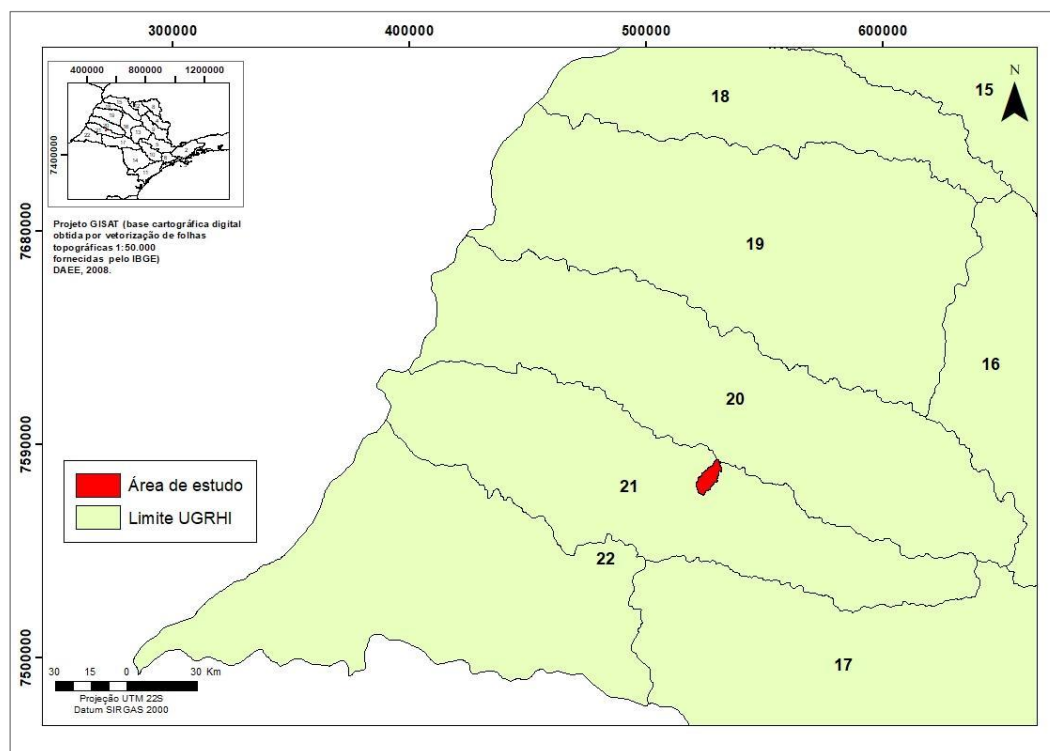


Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.5 Hidrografia

A rede hidrográfica da área de estudo está inserida entre as sub-bacias Médio Aguapeí e Médio Peixe e situada na UGRHI 21 (FIGURA 8).

Figura 8 – Localização da área de estudo na UGRHI 21.



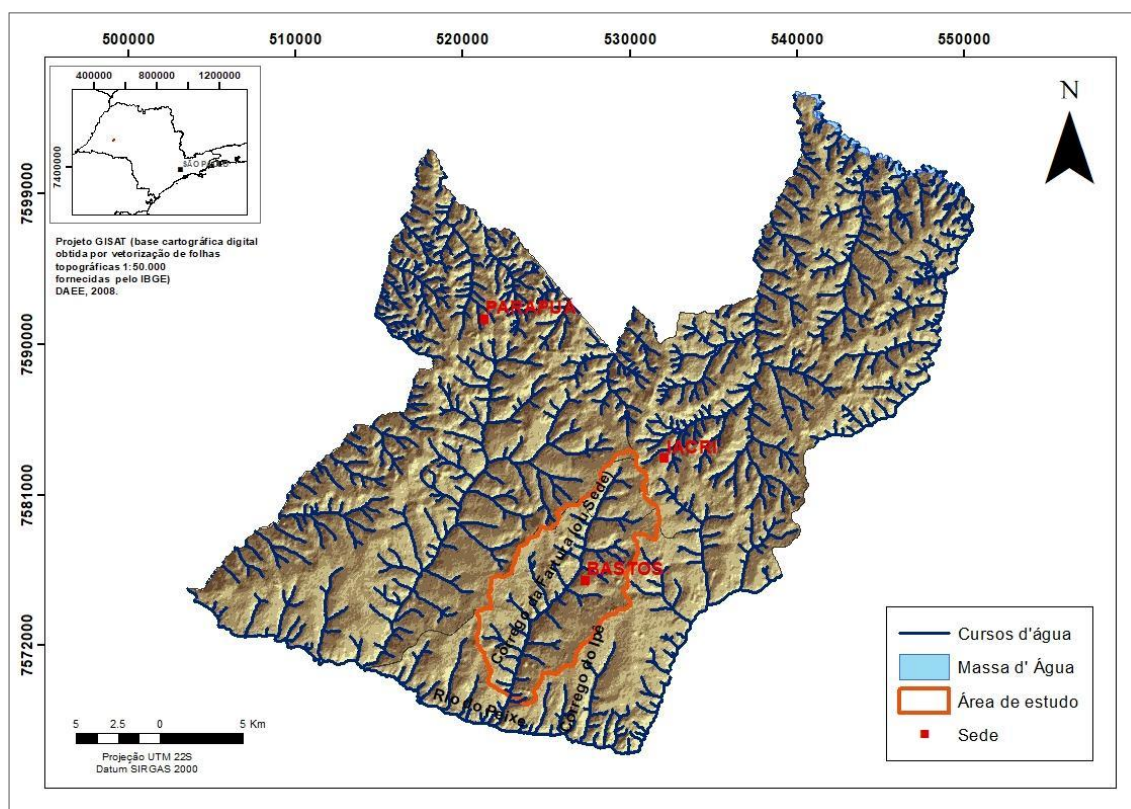
Fonte: Elaborado pela autora.

O Córrego da Fartura (ou Córrego da Sede) nasce no município de Iacri, na Fazenda Alvorada, próximo ao espigão divisor dos rios Aguapeí e Peixe. O córrego percorre aproximadamente 17 Km da nascente até atingir sua foz no rio do Peixe, divisa entre os municípios de Bastos e Rancharia. Destes 18 quilômetros, 15 Km estão dentro da área de estudo.

O córrego é receptor de efluentes do município de Bastos e está enquadrado na classe 2 (BRASIL, 2017).

A Figura 9 mostra a distribuição de cursos d'água na região da área de estudo.

Figura 9 – Hidrografia da região da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.6 Pedologia

A formação pedológica da região da área de estudo, segundo Rossi (2017), compreende uma diversidade de tipos de solos como argissolos, latossolos e gleissolos. A Tabela 1 mostra essa variedade e a Figura 10 a distribuição das unidades mapeadas.

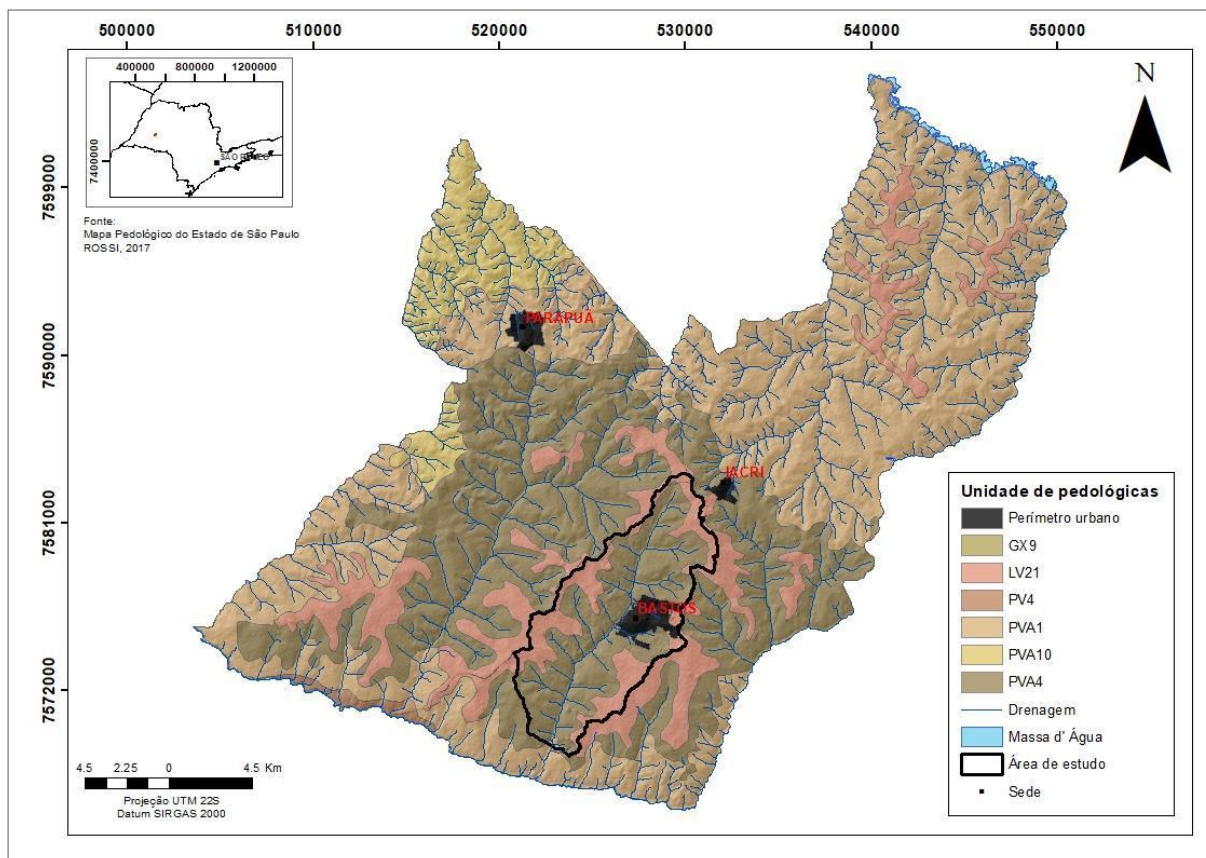
Tabela 1 – Unidades mapeadas na região da área de estudo.

Unidade mapeada	Descrição
PV4	Associação de argissolo vermelho textura média/argilosa mais argissolo vermelho-amarelo textura a arenosa/média, ambos eutróficos típicos A moderado, fase relevo suave ondulado.
PVA1	Argissolo vermelho-amarelo ou vermelho, eutrópico arênci ou abruptico A moderado ou fraco textura arenosa/média, fase relevo suave ondulado e ondulado.
PVA10	Associação de argissolo vermelho-amarelo, eutrópico ou distrópico espessoarênico ou abruptico, textura média/argilosa, arenosa/argilosa ou arenosa/média mais latossolo vermelho-amarelo, distrópico típico, textura média, álico, ambos A moderado, fase relevo ondulado.
PVA4	Associação de argissolo amarelo típico, textura arenosa/média e média/média mais neossolo litólico típico A moderado, textura média e arenosa, substrato arenito, ambos distróficos, A moderado, fase relevo ondulado.
LV21	Latossolo vermelho ou vermelho-amarelo, distrópico típico A moderado ou fraco, textura média álico ou não álico, fase relevo suave ondulado.
GX9	Complexo de gleissolo háplico eutrópico/distrópico, textura argilosa mais planossolo háplico eutrópico Tb A moderado, textura arenosa/média e arenosa/argilosa mais neossolo flúvico eutrópico A moderada textura argilosa, todos fase relevo plano.

Fonte: Mapa Geológico do Estado de São Paulo. ROSSI, 2017.

A área de estudo é composta por três tipos de solo: PVA4, com maior ocorrência na bacia, LV21, assenta-se nos divisores topográficos da bacia e PVA1, localiza-se em uma pequena porção da parte sul da bacia. Estes tipos de solos estão descritos conforme a Tabela 1.

Figura 10 – Mapa pedológico da região área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.7 Caracterização hidrogeológica

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) representa uma das principais fontes de exploração de águas subterrâneas no Estado de São Paulo (CHANG, et al., 2012, PAULA E SILVA, 2003).

O SAB é composto pelos aquíferos: Marília, Adamantina, Birigui, Santo Anastácio e os aquíferos Araçatuba e Pirapozinho. Os aquíferos presentes na área de estudo possuem características hidrodinâmicas próprias devido à constituição litológica, relações de contato e espessuras de cada um e são descritos a seguir.

4.2.7.1 Aquífero Santo Anastácio

O Aquífero Santo Anastácio possui uma extensão limitada, com textura granular, sendo livre a semi-confinado, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico. A espessura, em média, varia em 80 m, condutividade hidráulica de 2,0 m/d, porosidade 25 % e porosidade efetiva 12% (CARVALHO; HIRATA, 2012).

O Aquífero Santo Anastácio segundo Mendonça e Gutierre (2000) possui uma composição litológica que favorece o armazenamento e transmissão de águas subterrâneas, por ser predominantemente arenosa. As principais características hidrodinâmicas são, em média, vazão varia de 5,0 m³/h a 20,0 m³/h, vazão específica entre 0,3 m³/h/m a 1,0 m³/h/m e transmissividade varia em 20,0 m²/dia a 200,0 m²/d.

4.2.7.2 Aquitardo Araçatuba

O Aquitardo de Araçatuba compõem de sedimentos finos da Formação Araçatuba, servindo como base para o escoamento das águas da bacia do rio do Peixe. O aquitardo controla com a sua baixa permeabilidade, a infiltração na bacia. Estas características o fazem um limite impermeável (barreira hidráulica negativa) que isola as unidades hidroestratigráficas subjacentes (PAULA E SILVA, 2003; PRANDI, 2010).

4.2.7.3 Aquífero Adamantina

A constituição litológica do Aquífero Adamantina é composta por arenitos que se intercalam com bancos de siltitos ou arenitos lamíticos. Este aquífero fornece, em geral, baixos valores hidrodinâmicos, sua produtividade relaciona-se com a espessura das camadas arenosas atravessadas. As características hidrodinâmicas compreendem, em média, uma vazão entre 5,0 m³/h a 50,0 m³/h, uma vazão específica que varia entre 0,5 m³/h/m a 3,0 m³/h/m e transmissividade de 10,0 m²/dia a 100,0 m²/dia (MENDONÇA; GUTIERRE, 2000).

O Aquífero Adamantina possui uma extensão limitada, com textura granular, sendo livre a semi-confinado, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico. Apresenta uma espessura média de 130 m, condutividade hidráulica de 1,5 m/d, porosidade 15 % e porosidade efetiva 10% (CARVALHO; HIRATA, 2012).

4.2.7.4 Aquífero Marília

A formação do Aquífero Marília ocorre a partir de arenitos grosseiro e imaturos, com abundantes nódulos e cimento calcífero e bancos de arenitos finos

intercalados com lamitos e siltitos, e isso lhe confere baixos valores hidrodinâmicos, quando explorados isoladamente, podendo ser considerado um aquitardo por alguns autores (MENDONÇA; GUTIERRE, 2000).

Os valores hidrodinâmicos médios apontados por esses autores compreendem: vazão específica de 0,1 m³/h/m a 1,0 m³/h/m e transmissividade de 10,0 m²/dia a 50,0 m²/dia.

O Aquífero Marília possui uma extensão limitada, com textura granular, sendo livre a semi-confinado, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico. Apresenta uma espessura média de 120 m, condutividade hidráulica de 1,0 m/d, porosidade 13% e porosidade efetiva 10% (CARVALHO; HIRATA, 2012).

4.2.7.5 Aquífero Serra Geral

O Aquífero Serra Geral é um aquífero fraturado constituído por basaltos e rochas associadas da Formação Serra Geral. Este aquífero ocorre em superfície na região das Cuestas Basálticas, na porção intermediária do Estado e nas regiões mais rebaixadas junto às margens dos rios. Este aquífero encontra-se, em sua grande parte, recoberto pelos sedimentos que constituem o Sistema Aquífero Bauru (DAEE, 2005).

4.3 Aspectos da Quantidade

Prandi (2010) mostra que a reserva permanente de um aquífero é obtida a partir de toda água acumulada e não varia em função das precipitações anuais. O Sistema Aquífero Bauru composto por diversas unidades possui uma reserva constituída pela soma das unidades que compõem este Sistema.

No Aquífero Santo Anastácio o volume de água disponível foi atingido o valor de 27,5 Km³ de água, o Aquífero Adamantina tem sua reserva permanente superior a 99 Km³ e no Aquífero Marília a reserva permanente de água é de aproximadamente 6,5 Km³ (PRANDI, 2010).

A disponibilidade hídrica subterrânea corresponde a uma combinação de fatores geológicos e climáticos em uma determinada região. Assim sendo, as formações sedimentares possuem uma potencialidade de armazenamento da água maior e assim têm condições de regularizar a vazão e permanecer menos dependente do clima (TUCCI; CABRAL, 2003). A estimativa feita a partir dos aquíferos livres aflorantes, de

forma grosseira, na UGRHI 21 indica uma reserva explotável de 9 m³/s (CBH-AP, 2020).

4.4 Aspectos da Qualidade

A qualidade das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru monitorada sistematicamente pela CETESB tem mostrado que as concentrações de nitrato estão acima do padrão de potabilidade (10 mg/L) em alguns pontos de monitoramento (CETESB, 2020).

Em 2019, a Rede de Qualidade da CETESB observou que a presença de nitrato em concentrações superiores ao padrão de potabilidade apenas no Sistema Aquífero Bauru.

Estudos realizados na área rural do município de Bastos têm mostrado que a ação antrópica tem interferido na qualidade dessas águas.

Freitas (2015) realizou um estudo na área rural do município de Bastos que evidencia as concentrações elevadas de nitrato (até 51,2 mg/L N-NO₃⁻) em poços tubulares. A ocorrência desses valores estaria possivelmente associada às atividades das granjas que operam na região e que, futuramente, poderiam comprometer a qualidade da água dos poços de abastecimento público. Segundo este autor, faz-se necessário um estudo mais detalhado para melhor caracterização do problema no local.

IPT (2018) na caracterização hidrogeoquímica em alguns poços na área rural do município de Bastos confirmou elevadas concentrações de nitrato, acima do limite de potabilidade (10,0 mg/l), realizando duas campanhas de amostragem de água (2015/2016) e levantamento de fontes potenciais de contaminação próximas aos poços. Observou que os metais pesados (Al, Ba, Co, Mn e Ni) ocorrem em poços que captam água do Sistema Aquífero Bauru, sendo que muitos desses instalados em avícolas e os resultados de isótopos de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$) mostraram que a principal origem de nitrato está associada aos dejetos orgânicos (humanos ou animais), embora alguns pontos demonstrem misturas destes com os fertilizantes nitrogenados.

A concentração de nitrato obtida pelo IPT (op.cit) no período de estiagem em 2015 foi uma média 22,72 mg/L, mínimo 2,08 mg/L e máximo 105 mg/L. No período chuvoso em 2016 os valores foram média de 28,30 mg/L, mínimo de 0,0 mg/L e máximo de 159,93 mg/L. O autor citado concluiu que as maiores concentrações de

nitrato estão relacionadas com a forma e disposição inadequada de esterco, bem como a presença de aviários próxima às captações, e ao poço, além de problemas construtivos no próprio poço.

4.5 Aspectos Socioeconômicos

A ocupação e o crescimento demográfico nos municípios da região da área de estudo caracterizam-se pela pouca densidade demográfica, pequenas taxas de crescimento populacional e, nas últimas décadas, diminuição da população (PRANDI, 2010; CETEC, 1997).

A população dos três municípios corresponde a 20.296 habitantes em Bastos, 6.272 habitantes em Iacri e 10.507 habitantes em Parapuã (SEADE, 2021).

As atividades econômicas desses municípios apontam para a prestação de serviços, exploração da pecuária extensiva, suinocultura, avicultura e produção de algodão, amendoim, arroz, cana-de-açúcar, feijão, mamona, mandioca, milho, tomate, abacate, banana, borracha, café, caqui, coco, laranja, limão, maracujá, tangerina, uva, dentre outras (CETEC, 1997).

As áreas ocupadas por culturas temporárias correspondem à cana-de-açúcar e ocupam 19,69% da UGRHI 21. As culturas perenes e áreas com reflorestamento por pinus e eucalipto correspondem, respectivamente, a 0,87% e 0,36% da área da Bacia do Rio do Peixe. As áreas com cobertura vegetal nativa cobrem pouco mais de 2,49% da Bacia do Rio do Peixe (PRANDI, 2010).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Os materiais empregados consistem em dados secundários dos poços tubulares que compõem o banco de dados, dados hidrológicos e as bases cartográficas.

5.1.1 Banco de Dados

O banco de dados desta dissertação é composto por dados de poços tubulares profundos outorgados provenientes do projeto intitulado “Estudos de restrições em aquíferos no Alto Aguapeí e Alto Peixe (Bauru e Guarani)” (IPT, 2018), da base de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIDAS) pertencente ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e compreende o município de Iacri, e por fim, o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS/CPRM) para os municípios de Bastos, Iacri, Parapuã, Quatá, Rancharia e Tupã. Ao todo compreende 386 poços tubulares, sendo que 165 poços pertencem a Bacia Córrego da Fatura.

5.1.2 Pluviometria, Fluviometria e Evapotranspiração

Os dados de pluviometria e fluviometria aplicados a esta dissertação foram obtidos a partir do Banco de Dados Hidrológicos - DAEE, no período de 1946 a 2020. Os valores da evapotranspiração são provenientes do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (CIIAGRO) entre 2002 e 2019.

5.1.3 Bases Cartográficas

A base cartográfica utilizada na elaboração do trabalho provém de diferentes fontes e escalas, isto pode ocasionar em uma superestimação da representação da realidade.

A área de estudo é coberta pelas cartas topográficas Rancharia, Quatá, Osvaldo Cruz, e Tupã (SF-22-X-A-I-1 SF-22-Z-A-I-2, SF-22-X-C-IV-3, SF-22-X-C-IV-4, respectivamente), escala 1: 50.000 (IBGE, 1973; IBGE, 1974). A partir dessas cartas foram extraídas feição, drenagem e curvas de nível pelo Projeto GISAT (DAEE, 2008).

As formações geológicas foram observadas a partir do Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000 (DAEE/UNESP, 1984). Os padrões geomorfológicos foram definidos a partir do Mapa Geomorfológico do Estado de São

Paulo, escala 1:1.000.000, (IPT, 1981). As informações dos tipos de solos foram obtidas no Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado, escala 1:500.000 (ROSSI, 2017).

O modelo digital de elevação (MDE) foi gerado a partir da imagem de radar do ALOS PALSAR que possui 12,5 m de resolução espacial, o que permite uma cartografia de precisão, obtida no *website* Alaska.

Para a definição do uso e ocupação do solo utilizou-se imagem *raster* Landsat 8, órbita/ponto 222/075 (INPE, 2019) de setembro/2019 e o Mapa de Uso do solo do Estado de São Paulo, escala 1:50.000 (SMA, 2005).

A fotointerpretação das avícolas presentes na área de estudo foi realizada por meio de imagens do *basemap* do ArcMap, versão 10.8.

5.2 Métodos

Os métodos utilizados para desenvolver o trabalho são detalhados a seguir:

5.2.1 Organização do banco de dados

Os dados do banco de dados foram interpretados e organizados em planilhas eletrônicas, separados de acordo com as seguintes informações: identificação, coordenadas geográficas, profundidade, vazão, nível estático, nível dinâmico perfil construtivo (seção filtrante), descrição litológica e teste de bombeamento (nível estático, nível dinâmico e rebaixamento).

5.2.2 Modelo conceitual

O modelo conceitual foi construído a partir da compilação e interpretação das informações obtidas no adequado detalhamento do estudo bibliográfico em artigos científicos, teses, dissertações e da interpretação e organização do banco de dados.

5.2.3 Delimitação da área de estudo

A bacia do Córrego da Fartura foi delimitada aplicando a extensão ArcHydro do aplicativo ArcMap, versão 10.8. Inicialmente foi obtido um MDE em seguida, a delimitação da bacia foi realizada a partir do seguinte procedimento: *Fill Sinks, Flow Direction, Flow Accumulation, Stream Definition, Stream Segmentation, Catchment Grid Delineation, Catchment Polygon Processing, Drainage Line*

Processing, Adjoint Catchment Processing, Drainage Point Processing, Batch Point Generation, e finalmente *Watershed Delineation*.

5.2.4 Determinação do topo da Formação Araçatuba

A Formação Araçatuba constitui o limite inferior na bacia do Córrego da Fartura, e para determinar o topo dessa unidade foi utilizada a cota do aquitardo identificadas na descrição de perfis litológicos dos poços tubulares do banco de dados.

A partir dos dados gerados foi aplicado a função *Topo to Raster* presente no aplicativo ArcMap, versão 10.8, e um arquivo do tipo *raster* foi gerado como resultado.

5.2.5 Espessura da formação sedimentar

O mapa de espessura foi elaborado a partir da descrição da formação sedimentar presente nos perfis litológicos dos poços tubulares pertencentes ao banco de dados. Em seguida, aplicou-se o método de interpolação *Topo to Raster* no aplicativo ArcMap 10.8 para determinar o contorno estrutural da camada. Por fim, foi feita a subtração do MDE com a interpolação gerada utilizando a ferramenta *Minus* do ArcMap, versão 10.8.

5.2.6 Unidades hidroestratigráficas

A seção geológica é uma ferramenta que descreve a distribuição das camadas e estruturas geológicas em profundidade e lateralmente de uma determinada região. Ela permite a visualização das camadas que auxilia na compreensão da área de estudo. Então, as unidades hidroestratigráficas foram definidas a partir da elaboração de seções geológicas distribuídas na bacia nas direções Norte-Sul e Leste-Oeste.

Para a interpretação da geologia local da área de estudo foram confeccionadas 04 (quatro) seções, sendo duas seções Norte-Sul e outras duas seções Leste-Oeste, a partir do georreferenciamento dos poços tubulares locados na BCF e das descrições litológicas fornecidas pelo banco de dados. As seções foram feitas em aplicativo de desenho vetorial.

5.2.7 Potenciometria

A elaboração de um mapa potenciométrico representa o contorno das isolinhas das cargas hidráulicas de um aquífero, assim permite caracterizar a circulação das águas das subterrâneas, e definir o sentido de fluxo subterrâneo principal. O mapa potenciométrico possibilita o conhecimento de zonas de descarga, recarga e trânsito do

aquífero, sentido de fluxos secundário e áreas com maior ou menor transmissividade (LUCENA, et al., 2004).

O mapa potenciométrico possui diversas aplicações, entre elas (MANZIONE, 2015):

- Identificação de zonas de recarga, trânsito e descarga dos aquíferos;
- Identificação dos divisores de água dos aquíferos;
- Determinação da velocidade aparente de fluxo subterrâneo, em combinação com valores de permeabilidade do meio poroso (Lei de Darcy);
- Determinação dos locais favoráveis para a extração das águas subterrâneas ou para seleção de sítios de deposição de potencial poluição;

Os padrões de fluxo em uma bacia podem ser condicionados pela variação da forma da bacia, pela topografia do lençol freático e por diferenças espaciais na condutividade hidráulica devido a peculiaridades geológicas. As variações de carga hidráulica devido a variações no relevo topográfico são, na maioria dos casos, as principais forças motrizes do fluxo das águas subterrâneas. (MANZIONE, 2015).

A potencimetria da área de estudo foi realizada a partir dos valores de nível estático (NE) do banco de dados da pesquisa e das cotas topográficas dos poços extraídas do MDE, pois nem todos os poços possuem este dado. Para sua obtenção foi utilizado método de interpolação pela função *Topo to Raster* presente no aplicativo ArcMap, versão 10.8. Ressalta-se que esta função foi desenvolvida a partir do método de interpolação baseado no programa ANUDEM, desenvolvido originalmente por HUSTSCHINSON que tem por objetivo gerar modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes utilizando dados topográficos como pontos cotados, curvas de nível, drenagens, lagos (IPT, 2018; MACEDO, et al., 2014).

5.2.8 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica (K) (L/T) é a habilidade do meio poroso transmitir um fluido, e depende tanto das propriedades do meio quanto do fluido e ainda considera as características do meio, incluindo porosidade, tamanho, distribuição,

forma e arranjo de partículas, e as características do fluido (MANZIONE, 2015; CABRAL; DEMÉTRIO, 2008).

Os valores de condutividade hidráulica (K) expresso em m/dia foram obtidos a partir da interpretação dos testes de bombeamento do tipo vazão provenientes do banco de dados da pesquisa. Esta informação ainda não havia sido interpretada e para isto foi utilizado o método Cooper-Jacob para cálculo da K, conseqüentemente foi determinado o valor de transmissividade também, em m/d. Para isso foi empregada a planilha pré-preparada do Serviço Geológico Americano (*Spreadsheets for the Analysis of Aquifer-Test – Cooper-Jacob – USGS*, 2002).

Para a porosidade tomou-se como base os valores encontrados na literatura, pois o banco de dados desta pesquisa não ofertou essa informação.

5.2.9 Recarga

A disponibilidade das águas subterrâneas no aquífero relaciona-se diretamente com o escoamento básico da bacia de drenagem instalada na sua área de ocorrência. Portanto, as águas subterrâneas constituem uma parcela desse escoamento que corresponde à recarga transitória do aquífero (ZANETTI, 2012).

A determinação da recarga da BCF contou com o uso de três métodos, devido à ausência de uma medição periódica dentro da área de estudo. Assim, com os valores obtidos espera-se compará-los com os resultados já apontados para o Aquífero Adamantina na literatura. O primeiro foi realizado na própria área de estudo utilizando o método recarga por precipitação, o segundo método consiste na Curva de Recessão que foi adotado para uma bacia adjacente a BCF e o terceiro método refere-se à regionalização hídrica do Estado de São Paulo ($Q_{95\%}$).

5.2.9.1 Recarga por Precipitação

Para determinar a recarga da bacia do Córrego da Fartura foi adotado o método de Recarga por Precipitação que consiste em estimar a recarga considerando a precipitação média anual na bacia, conforme explica a Organização Mundial de Meteorologia (WMO), 2012.

Essas estimativas variam dependendo da zona climática e das condições hidrogeológicas, tendo em vista que os tipos de rochas diferem em sua capacidade de infiltração. Assim este método pode ser combinado com fator específico para o aquífero

que varia de 0,5 para aquíferos de baixa permeabilidade e 1,5 para aquíferos primários (WMO, 2012).

Para aplicação deste método os dados da Estação Pluviométrica C7-062 adotados correspondem ao período de 1946 a 2020.

A Tabela 2 mostra as razões de recarga-precipitação existentes.

Tabela 2 – Razão entre recarga e precipitação.

Variação da precipitação média anual (MAP)		Média anual de infiltração
Mínimo	Máximo	Porcentagem de MAP
0	300	3
300	600	6
600	900	9
900	1200	12
1200	1500	15
1500	1800	18
1800	2100	21

Fonte: WMO, 2012, p.71.

5.2.9.2 Curva de recessão

A curva de recessão foi obtida por meio da equação 1 (CELLIGOI, 2000; ROSA FILHO, 1993).

$$Q = Q_0 e^{-kt} \quad (1)$$

Onde:

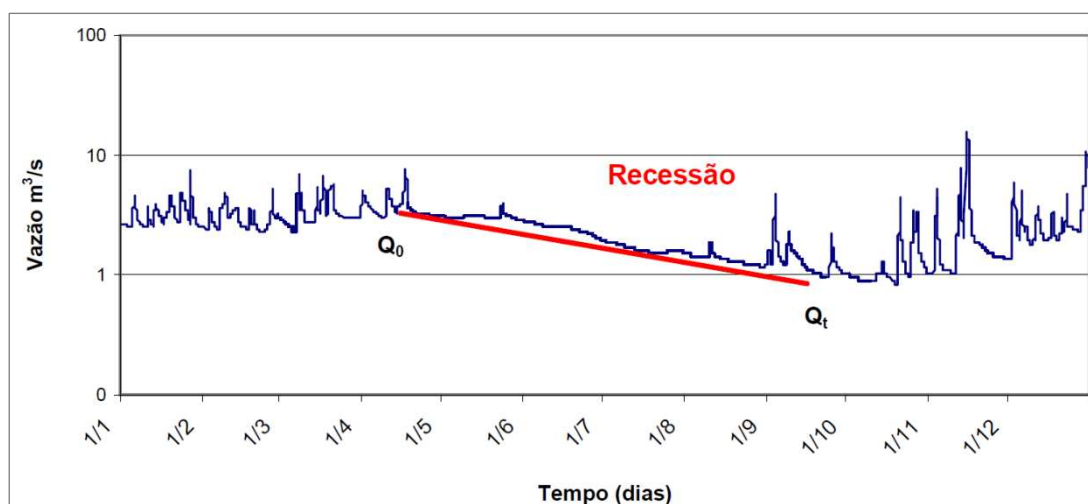
Q = representa a descarga do rio em m³/s após um período t (dias);

Q_0 = a descarga do rio no início da recessão em m³/s;

k = a constante de recessão.

A curva de recessão é gerada em escala logarítmica, em formato semelhante à Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de curva de recessão.



Fonte: VIANA; CELLIGOI, 2002, p.8.

A aplicação do logaritmo e rearranjo da equação (1), a constante de recessão (k) é encontrada por:

$$k = - \frac{\ln(Q) - \ln(Q_0)}{\Delta t} \quad (2)$$

Onde:

Δt = intervalo de tempo decorrido desde o início até o final da recessão.

O volume de água contribuinte para a bacia para cada ano selecionado (V) em m^3 /ano foi encontrado por:

$$V = \frac{Q_0 \cdot 86400}{k} \quad (3)$$

A restituição (h) em mm foi obtida por:

$$h = \frac{V}{A} \quad (4)$$

Onde:

A = área da bacia do Ribeirão da Copaíba, $65,35 \text{ km}^2$.

Para a seleção dos hidrogramas que representaram as melhores curvas de recessão, foi montada uma planilha com os dados de precipitação (P) e vazão diária (Q), para cada ano da série histórica (1995 a 2005), bem como as médias de precipitação anual.

No período seco o fluxo de base do rio passa a ser alimentado somente pela reserva subterrânea (excluindo os efluentes urbanos), devido às precipitações pouco significativas. Assim, torna-se possível estimar, por meio da aplicação de métodos adequados, o volume anual da reserva hídrica subterrânea.

Conforme ilustra a Figura 7 apresentada no item 2.4.2, o período de menor precipitação na bacia são os meses de junho, julho e agosto. Assim sendo, optou-se por calcular, a partir da série histórica, os intervalos secos, ou seja, o período de estiagem citado, resultando na seleção dos anos que representam as curvas ideais para o emprego do método de recessão.

Para realizar o cálculo, foi somada a precipitação diária de junho, julho e agosto, de cada ano da série histórica. Os valores encontrados foram colocados em ordem crescente, escolhendo-se assim três anos com as menores precipitações deste período analisado, sendo excluídos os anos que estão com informações faltantes.

Para certificar que os três anos apresentaram as melhores curvas de recessão, foram confrontados os gráficos de precipitação média mensal e de vazão diária em escala logarítmica, de todos os anos.

5.2.9.3 Regionalização Hidrológica – Vazão de 95% de permanência no período ($Q_{95\%}$)

A Metodologia de Regionalização Hidrológica do Estado de São Paulo (LIAZI et al., 1988), baseou-se nos totais anuais precipitados em 444 postos pluviométricos e nas séries de descargas mensais observadas em 219 estações fluviométricas de vazões diárias de 88 postos fluviométricos (WOLFF, 2013).

A metodologia consiste em estimar a disponibilidade hídrica através de vazões de referência, tais como $Q_{7,10}$, $Q_{95\%}$, $Q_{\text{médio}}$ (superficial) e Reserva Explotável (subterrâneo). Esta metodologia permite obter uma estimativa da ordem de grandeza de vazões em locais onde não se dispõe de medições de vazão ou, ainda, obter uma estimativa preliminar e expedita de vazões disponíveis para cálculo do balanço hídrico em qualquer região do Estado de São Paulo. Deve-se ter em mente que este método parte da variação regional da precipitação e considera a eficiência na transformação em vazão, fruto do comportamento diferenciado da evapotranspiração e do tipo de solo (SÃO PAULO, 2011).

O método para estimativa de recarga Q_{95} considera a recarga como sendo o volume de água necessário para a regularização do curso d'água em períodos de estiagem, ou seja, o fluxo de base (MALUTA, 2014).

As etapas para aplicação da metodologia compreendem:

- Classificar a região de interesse dentro da região hidrológica correspondente;
- Obter os parâmetros da reta de regressão (a e b) conforme a Tabela 3;
- Calcular a Vazão Média Plurianual (Q), a partir da precipitação média anual local e a área de drenagem da região de interesse (área da bacia);
- A partir do parâmetro probabilístico regional (q_p) para 95 % e a vazão média plurianual anteriormente calculada, é obtida a Q_{95} .

Tabela 3 – Parâmetros regionais: a e b (vazão média), parâmetro probabilístico regional q_p para as frequências acumuladas 50,90,95 e 100.

Região Hidrogeológica	Média Plurianual		Curvas de Permanência q_p			
	a	b	Frequência Acumulada em Porcentagem			
			50	90	95	100
A	-22.14	0.0292	0.081	0.393	0.348	0.26
B	-29.47	0.0315	0.846	0.43	0.371	0.165
C	-29.47	0.0315	0.846	0.43	0.371	0.165
D	-22.14	0.0292	0.897	0.56	0.51	0.423
E	-22.14	0.0292	0.834	0.504	0.44	0.358
F	-22.14	0.0292	0.905	0.598	0.558	0.465
G	-26.23	0.0278	0.789	0.42	0.363	0.223
H	-29.47	0.0315	0.845	0.49	0.434	0.324
I	-29.47	0.0315	0.895	0.585	0.54	0.413
J	-29.47	0.0315	0.807	0.462	0.414	0.288
K	-26.23	0.0278	0.845	0.49	0.434	0.324
L	-26.23	0.0278	0.915	0.583	0.527	0.42
M	-4.62	0.0098	0.874	0.57	0.516	0.429
N	-26.23	0.0278	0.789	0.42	0.363	0.223
O	-26.23	0.0278	0.775	0.374	0.316	0.17
P	-26.23	0.0278	0.775	0.374	0.316	0.17
Q	-4.62	0.0098	0.915	0.583	0.527	0.42
R	-4.62	0.0098	0.873	0.527	0.463	0.34
S	-4.62	0.0098	0.81	0.488	0.42	0.293
T	-4.62	0.0098	0.781	0.38	0.316	0.241
U	-4.62	0.0098	0.781	0.38	0.316	0.241

Fonte: Adaptado LIAZI et al. (1988).

Segundo o método de Liazi et al (1988), a Vazão Média de Longo Período pode ser calculada como:

$$\overline{Q} = [a + (b \cdot \overline{P})] \cdot A$$

Onde:

$$\overline{Q} = \text{Vazão Média Plurianual (l/s);}$$

a e b = parâmetro da reta de regressão;

$$\overline{P} = \text{Precipitação pluriométrica em mm/ano;}$$

$$A = \text{Área em Km}^2.$$

As vazões de permanência que geram a Curva de Permanência podem ser calculadas pela equação:

$$Q_p = q_p \cdot \overline{Q}$$

Onde:

Q_p = Vazão média de permanência de p% do período;

Q_p = Parâmetro probabilístico regional em p % do período.

5.2.10 Uso e ocupação do solo

Para a definição do uso e ocupação do solo utilizou-se imagem *raster* Landsat 8, órbita/ponto 222/075 (INPE, 2019) de setembro/2019, e o Mapa de Uso do solo do Estado de São Paulo, escala 1:50.000 (SMA, 2005). A geração do mapa ocorreu em ambiente SIG (Sistema de Georreferenciamento) com o uso da ferramenta *Image Classification* no ArcMap, versão 10.8. Amostras da imagem foram selecionadas e classificadas, a partir do Mapa do uso do solo do Estado de São Paulo.

A fotointerpretação das avícolas presentes na área de estudo foi realizada por meio de imagens do *basemap* do ArcMap, versão 10.8.

5.2.11 Modelo Numérico de Fluxo

5.2.11.1 Escolha do aplicativo

O aplicativo FEFLOW, versão 7.1, foi escolhido por utilizar o método de elementos finitos que permite representar melhor a geometria e condições de contorno, tanto externa como interna ao domínio do modelo, complexas e irregulares (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015). Outro motivo a ser apontado é a interface gráfica amigável e a comunicação com aplicativos de geoprocessamento (ArcMap, por exemplo) e planilhas eletrônicas.

5.2.11.2 Modelo numérico de fluxo subterrâneo

Os modelos de fluxo de águas subterrâneas são aplicados para diversas finalidades, que variam desde estudos de abastecimento de água até o projeto de sistemas de reparo de contaminadores, sendo usados para assimilar informações e ajudar a responder perguntas específicas que vêm de diversos problemas nas áreas de construção, contaminação e gestão de águas (FITTS, 2015). Tornando assim, a principal

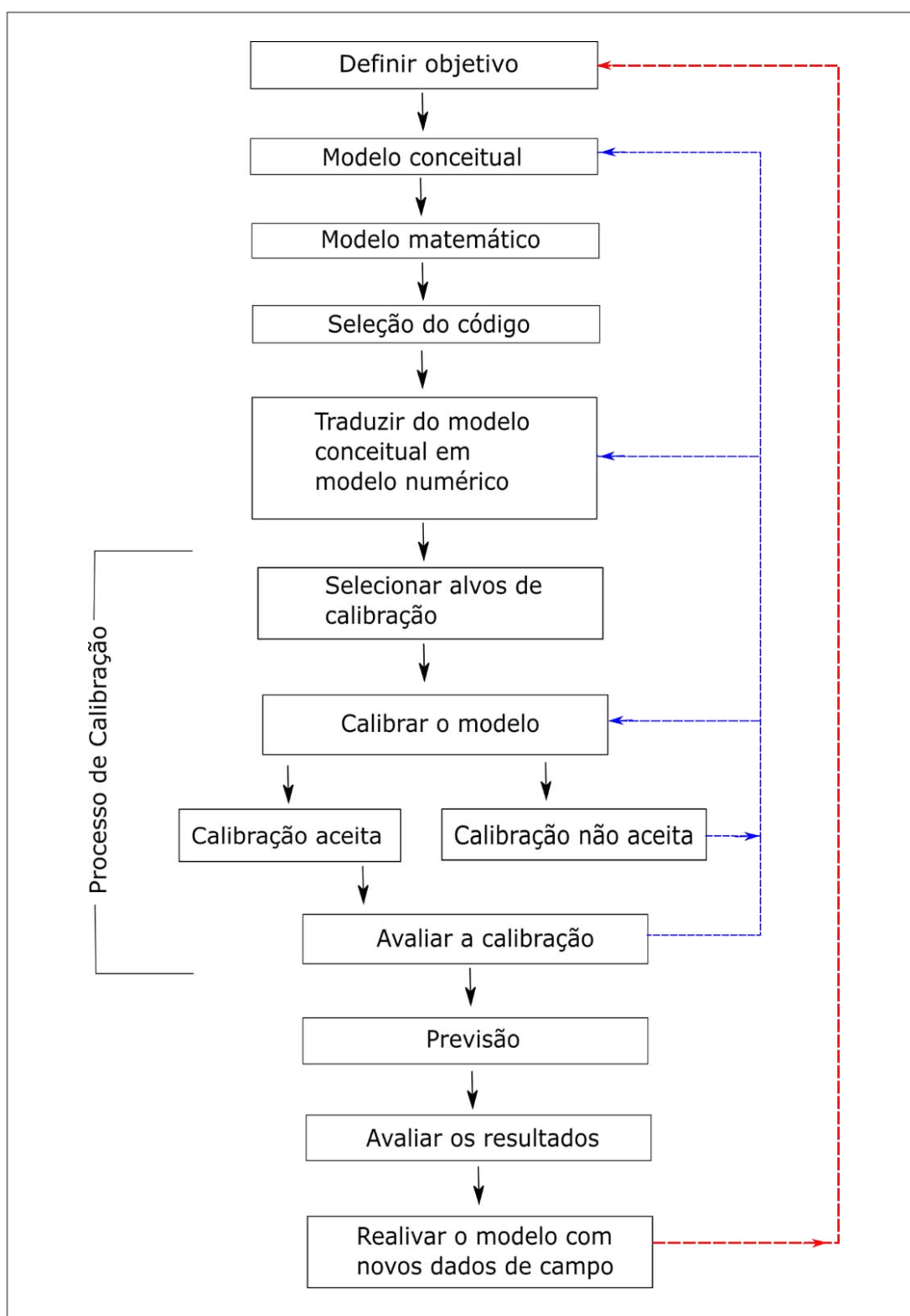
ferramenta quantitativa para a investigação de águas subterrâneas (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Um modelo de águas subterrâneas fornece uma estrutura quantitativa para sintetizar informações de campo para conceituar processos hidrogeológicos, representar de maneira simplificada uma situação real (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

O processo de modelagem abarcam etapas para entradas com base nas informações do sistema para produzir um modelo que gera saídas coerentes com as informações do sistema. Os procedimentos recomendados para a confecção do modelo numérico de fluxo são divididos nas seguintes etapas representadas na Figura 12.

O modelo numérico se constitui a partir da tradução do modelo conceitual concebido, item 6.1, para o código do aplicativo que será implantado, no caso o FEFLOW. Portanto, os dados e informações que foram utilizados na definição do modelo conceitual a partir das simplificações e suposições foram introduzidos no aplicativo escolhido para a construção do modelo numérico para assim representar as condições reais do sistema hidrogeológico da área de estudo, são eles: discretização da área modelada, geração da malha, delimitação das condições de contorno, parâmetros hidrodinâmicos, e definição dos poços para observação.

Figura 12 – Processos do modelo.



Fonte: ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015, p.9 (modificado).

5.2.11.3 Discretização da área modelada

A discretização da área modelada compreende a definição da malha de elementos finitos gerada automaticamente pelo programa FEFLOW por meio do uso do gerador *Triangle* que por sua vez forma uma malha final constituída por triângulos ligados por nós. O número de nós na malha afeta a precisão da solução, o tempo necessário para resolver o modelo e a quantidade de saída que será gerada (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

A discretização espacial vertical corresponde a geometria da área modelada concebida a partir das cotas topográficas extraídas do MDE, das cotas do contato entre a unidades hidroestratigráficas e a cota do basalto. Essas informações são importadas para o FEFLOW em formatos de *shapefiles* ou planilha eletrônica.

5.2.11.4 Condições de contorno

As condições de contorno são elementos numéricos inseridos no modelo para determinarem a relação de fluxo da água no meio físico subterrâneo. Sendo fundamentais para a estruturação do modelo, pois delineiam uma solução única para o infinito número de soluções das equações matemáticas (ANDERSON; WOESSNER, 1992).

Para esta relação existem os seguintes tipos:

1) Condição de contorno com carga hidráulica especificada (condição de Dirichlet) (Tipo 1), a carga hidráulica é conhecida em alguns locais do modelo, logo esses valores da carga podem ser utilizados como referência no cálculo de pontos internos do modelo. É utilizada quando são conhecidas as cargas hidráulicas de rios e lagos conectado ao aquífero (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

2) Condição de contorno de fluxo especificado (condição de Neumann) (Tipo 2), a derivada da carga (fluxo) por meio da fronteira é conhecido. Esse valor pode ser nulo e representar uma condição em que não há fluxo transversal ao contorno local. Pode ocorrer quando há presença de um divisor de águas subterrâneas, rochas do embasamento, zona de falhas impermeáveis nos limites do domínio (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

3) Condição de fluxo dependente da carga hidráulica (condições mistas ou de Robin ou de Cauchy) (Tipo 3), o fluxo que atravessa a região de contorno é

calculado a partir do valor da carga hidráulica (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

Para alguns programas computacionais (e.g.: FEFLOW) é considerado a condição de contorno do Tipo 4, que corresponde a fonte pontual (ou poços).

A condição de contorno Tipo 4 é muito eficiente quando se trata de injeção ou extração de água por meio de poços em sistemas de aquíferos 3D, nos quais podem existir diferentes camadas ou formações heterogêneas, no qual os poços de bombeamento parcialmente penetrantes são impostos (CRUZ, 2014).

Para a área modelada foram adotadas condições de contorno do Tipo 3 (fluxo dependente da carga hidráulica) nos cursos d'água. Os valores dessa condição de contorno foram estabelecidos a partir da superfície topográfica interpolada no FEFLOW.

A condição de contorno do Tipo 2 (fluxo especificado) foi aplicada nos divisores de água e no limite inferior do domínio e para os poços de bombeamento a condição de contorno do Tipo 4 (*Multilayer Well*).

5.2.11.5 Estado estacionário

No estado estacionário as cargas hidráulicas não variam ao longo do tempo, há equilíbrio das propriedades e características do aquífero, uma vez que não sofrem interferência com o bombeamento (FEITOSA, 2008). O modelo é independente do armazenamento específico, mesmo depois de calibrado e verificado. Isso ocorre porque neste tipo de regime o aquífero atua somente como uma fonte de transmissão, não fornecendo água proveniente de seu armazenamento. Nesse regime é mais comum em aquíferos livres, principalmente quando próximos de corpos hídricos (CÂNDIDO, 2018).

As cargas hidráulicas obtidas no banco de dados servem como base para a confecção do mapa potenciométrico inicial. Logo após, são comparados os níveis de água observados nos poços com os calculados pela simulação.

5.2.11.6 Poços de observação

O modelo numérico de fluxo foi concretizado em duas situações para permitir a verificação do modelo calibrado. A primeira situação corresponde ao não

bombeamento, nenhum poço estava ativo, o que representa o cenário real. A segunda situação considera os poços em funcionamento, representando um cenário de bombeamento.

Os poços inseridos no modelo numérico apresentam as seguintes características construtivas e hidráulicas: intervalo de filtros e vazão obtida nos autos que compõem o banco de dados (TABELA 4).

A seleção dos poços de observação atendeu ao critério de explorarem o Aquífero Adamantina, possuírem informações construtivas (filtros) nesta formação e terem resultado do teste de bombeamento. Para as situações *sem bombeamento* e *com bombeamento* foram consideradas as condições de contorno apresentadas no item 5.2.11.4.

Tabela 4 – Poços de observação da Bacia do Córrego da Fartura.

Identificação do poço	Coordenadas UTM		Início do filtro (m)	Final do filtro (m)	Vazão (m³/d)
	X	Y			
10	529127	7578699	20	54	256.8
11	529757	7578455	20	60	168
30	527342	7576848	12	95	146.16
35	526703	7574427	48	60	144
38	527724	7578291	100	120	240
39	528254	7578233	92	115	240
53	527450	7577183	52	64	192
54	526853	7576981	58	70	192
55	527761	7578015	62	76	192
56	523732	7570521	64	76	240
58	526635	7576989	36	44	168
59	525027	7577956	52	66	120
60	526762	7576779	60	70	192
61	526296	7577000	36	44	168
67	528969	7576175	64	88	96
89	525680	7572826	20	60	165.6
104	527382	7575938	24	39	96
105	528497	7575404	82	94	312
106	523286	7575832	68	80	312
113	527651	7576249	48	60	192
158	525463	7577463	54	68	156

5.2.11.7 Calibração

A calibração do modelo compreende em ajustar os dados de entrada de forma que os resultados simulados do modelo numérico representem os dados observados, revelando a realidade do sistema de fluxo de águas subterrâneas da área de estudo.

Entre os dados de entrada que interferem nas simulações de fluxo de águas subterrâneas, destacam-se, condutividade hidráulica, precipitação, evapotranspiração, vazão dos cursos d'água, recarga e condição de contorno e coeficiente de armazenamento (simulações em regime transiente). Logo, para a obtenção de uma calibração adequada, deve-se avaliar as características da construção do modelo numérico, como a geometria, condições de contorno e parâmetros hidrodinâmicos bem como a definição do modelo conceitual (SEYF-LAYE, et al., 2012).

A precisão da calibração pode ser medida pela discrepância percentual do balanço de massa, bem como pela avaliação do erro médio, do erro absoluto médio, da raiz do erro médio quadrático (RMS), sendo este último a raiz quadrada da soma do quadrado das diferenças entre dados calculados e observados, dividido pelo número de poços de observação e do RMSE normalizado (SEYF-LAYE, et al., 2012).

A calibração foi feita a partir da correlação dos valores observados (reais) e calculados (modelo numérico), em regime estacionário, onde as condições de contorno e as propriedades hidrodinâmicas permaneceram em equilíbrio ao longo do tempo, até que o erro quadrático médio normalizado (NRMSE) fosse menor que 10%. O erro quadrático médio normalizado, expresso pela Equação 14 é aceitável quando é menor que 10%. Quando é menor, 5% é considerado muito bom (ANDERSON; WOESSNER; HUNT, 2015).

$$NRMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_m - v_s)_i^2 \right] \quad (14)$$

Onde:

NRMSE = erro quadrático médio normalizado

v_m = valor medido; e .

v_s = valor simulado.

Importante ressaltar que, devido principalmente à limitação nos dados de campo, tanto quantitativa quanto qualitativamente, a calibração e a verificação dos modelos numéricos nem sempre são realizadas rigorosamente, embora se tornem extremamente necessárias. Apesar das limitações, uma calibração pertinente não é obtida simplesmente comparando os níveis d'água em cada poço e fazendo mudanças específicas que resultem em melhorias somente locais, mas sim através da escolha adequada dos parâmetros hidrodinâmicos médios e obtenção de boa representação das diferentes tendências nos níveis de água, rebaixamento e entradas e saídas hídricas (CÂNDIDO, 2018).

Para realizar a calibração do modelo foi seguida as orientações do documento D5490-93/ASTM (2014), que apresenta o guia padrão de comparação das simulações de modelo de fluxo de água subterrânea com informações já existentes de fluxo.

Neste trabalho a calibração foi realizada a partir da comparação dos valores das cargas hidráulicas calculadas e das observadas até que o erro quadrático normalizado fosse menor e igual a 10%, ou seja, foram feitos ajustes sucessivos nos valores de condutividade hidráulica (K_x ; K_y ; K_z).

5.2.11.8 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada, com o modelo já calibrado, para identificar imprecisões, limitações e capacidade de previsibilidade do modelo numérico obtido, incluindo correções ao modelo.

Neste processo o modelo é realimentado com uma gama de parâmetros de entrada e assim, avalia-se o grau de dependência dos resultados, sendo esboçado a precisão dos parâmetros calculados na simulação (GONÇALVES, 2016).

Para análise de sensibilidade foram seguidas as orientações do documento D5611-94/ASTM (2016), que aborda um guia padrão para a condução de análise de sensibilidade para verificar os parâmetros mais sensíveis ao modelo, com a finalidade de concentrar os esforços de calibração e ainda identificar imprecisões, limitações e capacidade de previsibilidade do modelo numérico, como já dito anteriormente.

Para a verificação da influência de cada parâmetro utilizado na calibração foi feita modificações de 25%, 50%, 75%, 125% e 150% dos seus valores, sendo que os

todos os dados obtidos possibilitam a compreensão da dinâmica do fluxo das águas no modelo.

6 RESULTADOS

6.1 Modelo Conceitual Hidrogeológico

Para a obtenção do modelo conceitual hidrogeológico foi feita uma contextualização das informações presentes no banco de dados, bases cartográficas e aplicação da metodologia já discutida.

6.1.1 Tratamento do banco de dados

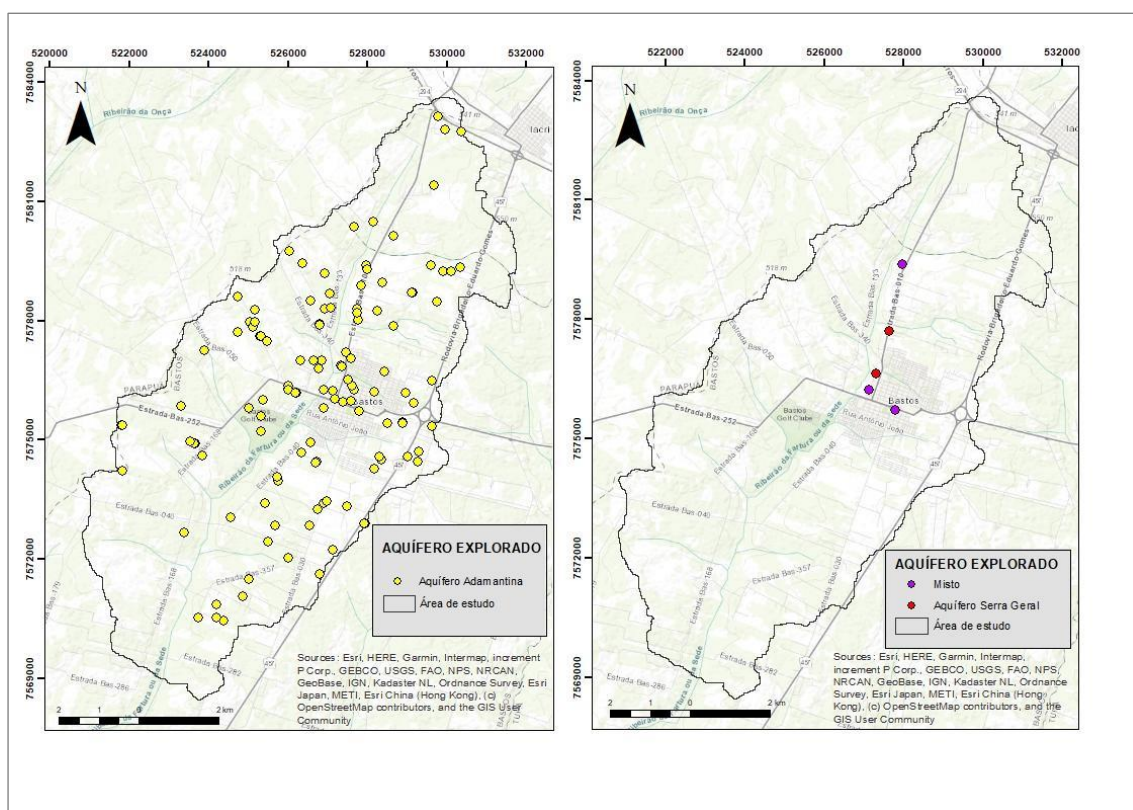
O banco de dados foi elaborado a partir de arquivos digitais dos relatórios de perfuração dos poços tubulares outorgados provenientes IPT (2018), SIDAS e SIAGAS.

As informações mais relevantes encontradas nos relatórios e que contribuem para a elaboração deste trabalho compreendem as características construtivas dos poços, parâmetros hidráulicos do aquífero, descrições litológicas e estratigráficas, consequentemente essas informações foram organizadas em planilhas eletrônicas.

A área de estudo comporta 151 poços constam como ativos e equipados, 137 poços possuem descrição do perfil litológico, 43 poços possuem descrição do perfil construtivo, 162 poços têm indicação qual o aquífero explorado, nenhum possui perfilagem elétrica, 26 poços apresentam resultado do teste de bombeamento, 141 poços apresentam valores de profundidade, 100 poços indicam o valor do nível estático e 101 poços o valor do nível dinâmico.

A Figura 13 mostra a distribuição dos poços tubulares na área de estudo conforme o aquífero explorado.

Figura 13 – Distribuição dos poços tubulares na Bacia do Córrego da Fartura.



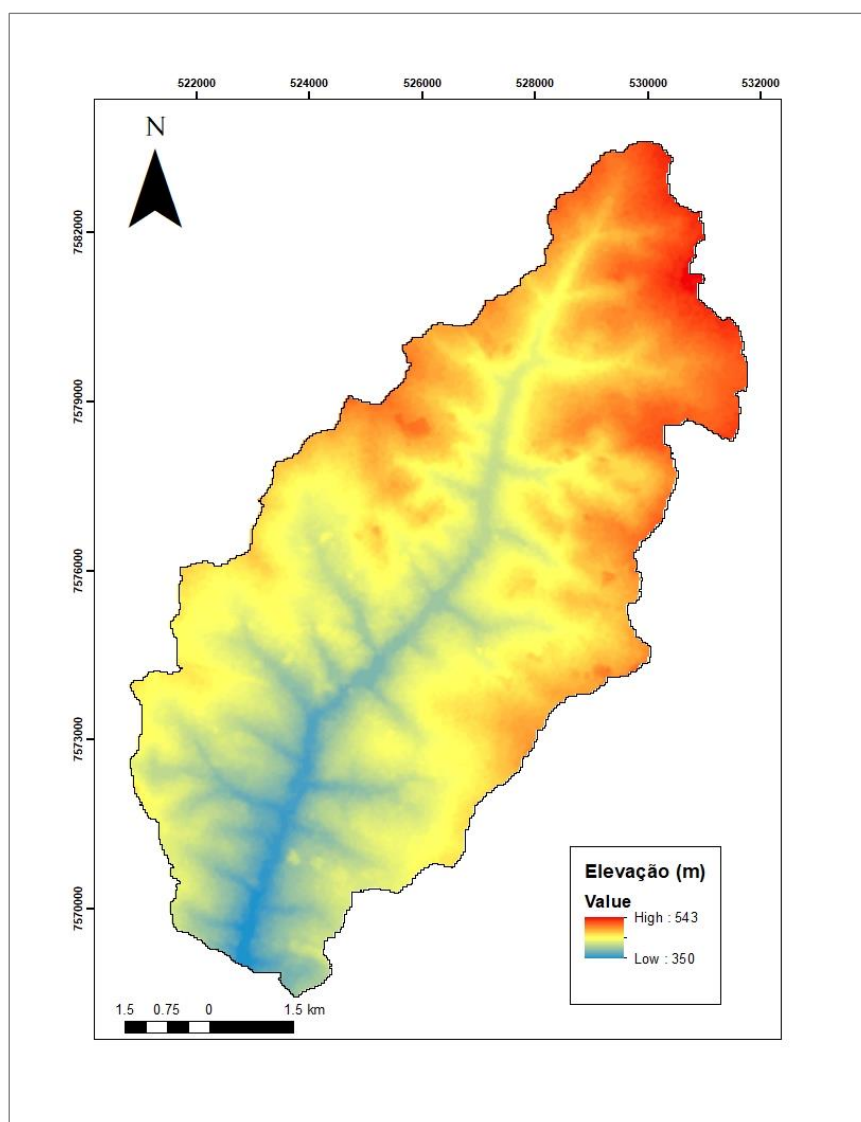
Fonte: Elaborado pela autora.

6.1.2 Relevo

A partir do MDE observa-se a ocorrência de altitudes que variam de 346 m a 543 m, conforme a Figura 14. Os divisores de água que delimitam a bacia do Córrego da Fartura estão nas altitudes mais elevadas, local em que também ocorrem as nascentes dos cursos d'água que abastecem a bacia. Nas áreas de menor altitude encontra-se o leito do Córrego da Fartura e seus tributários.

A variação da declividade da bacia está entre 0% e 39,1%, em geral, a declividade varia de 0% a 8%, o que caracteriza um relevo plano e um relevo suave – ondulado. Nas proximidades dos cursos d'água a declividade varia de 8% e 20%, sendo caracterizado como um relevo ondulado. Há ocorrência de 20% a 45% em áreas declivosas (FIGURA 15 e TABELA 5).

Figura 14 – Elevação da Bacia do Córrego da Fartura.



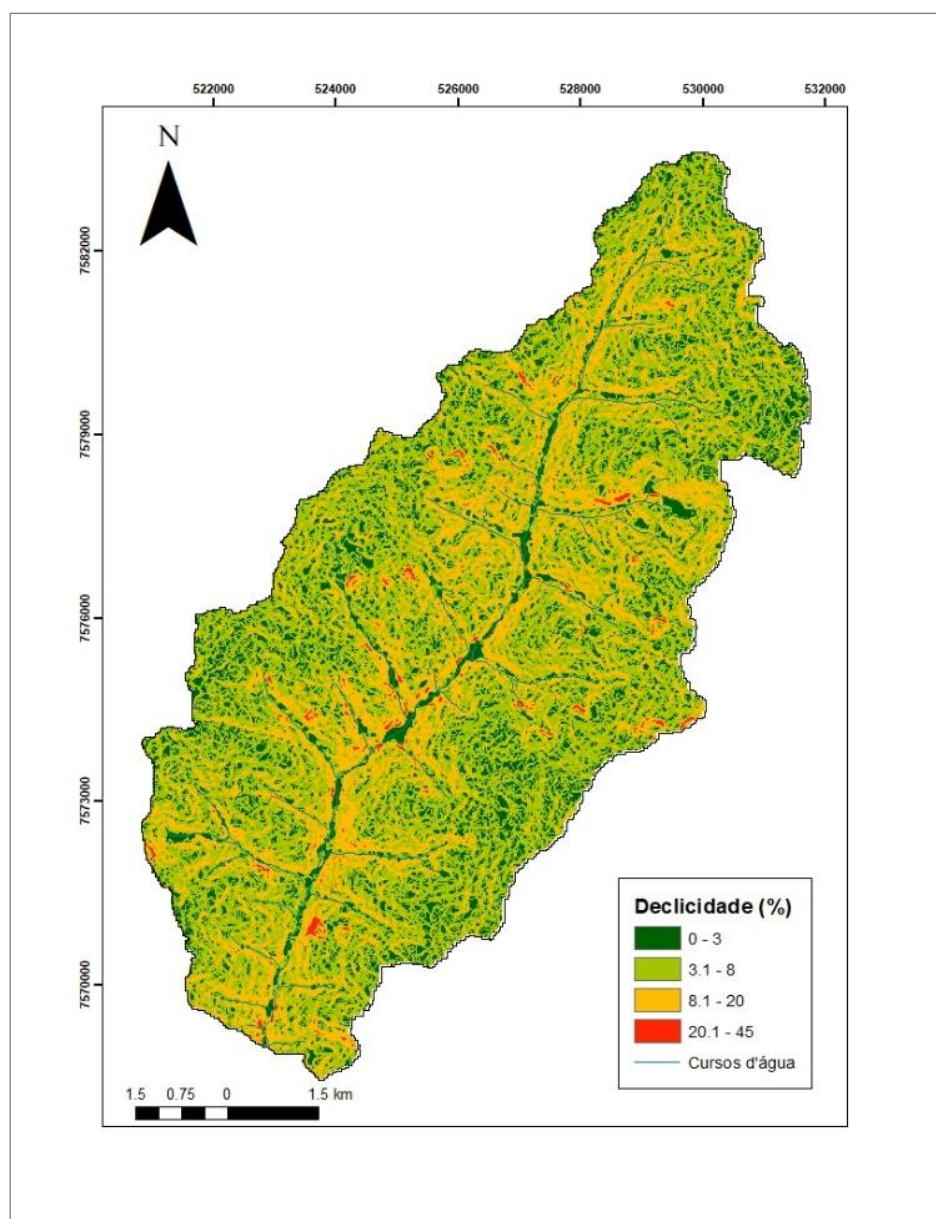
Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5 – Classes de Declividade

Declividade (%)	Relevo
0 - 3	Plano
3 - 8	Suave - ondulado
8 - 20	Ondulado
20 - 45	Forte - ondulado

Fonte: EMBRAPA, 1979

Figura 15 – Declividade da Bacia do Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.1.1 Caracterização da geologia local

A descrição da geologia local da bacia do Córrego da Fartura foi feita com base nas descrições litológicas dos poços tubulares que compõem o banco de dados. Essas descrições se mostraram pouco detalhadas, às vezes, vagas em informação, o que tornou difícil subdividir as camadas da bacia.

Em posse dessas informações foram elaboradas quatro seções geológicas (A-A', B-B', C-C' e D-D') que permitissem compreender a organização das formações

litológicas em profundidade e lateralmente. As Figuras 16 a 20 ilustram a geologia local.

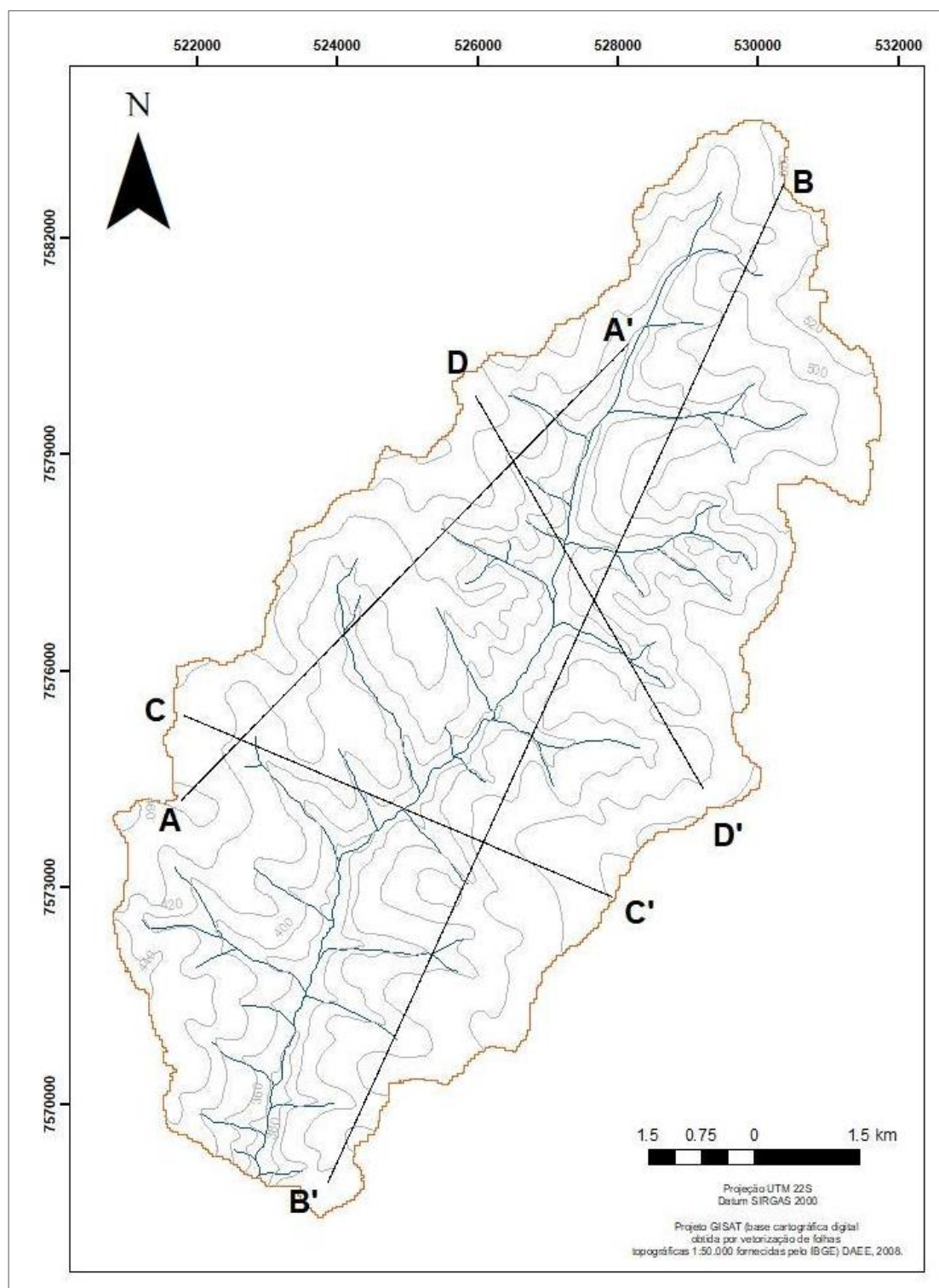
A Seção A-A' possui direção Norte-Sul e observa-se a ocorrência de forma lateral de um contato interdigitado do arenito fino e muito fino com arenito médio a grosso na porção norte, que se repete ao longo da seção e encerra na parte sul com o arenito médio a grosso. Na Seção B-B' foi observado uma camada contínua de arenito fino a muito fino, sotoposto uma camada de lamito que ocorreu de forma muito localizada e por fim, a presença do basalto, também de forma localizado, muito decorrência da profundidade dos poços.

A Seção C-C', direção Leste-Oeste, permitiu observar a extensão da camada de arenito médio a grosso, tendo seu contato interdigitado com o arenito fino a muito fino na porção leste da bacia, após o Córrego da Fartura. Já a Seção D-D' indicou que a extensão lateral do arenito fino a muito fino é menor, em comparação a Seção C-C' e o contato interdigitado ocorre antes do córrego.

Ao observar as seções geológicas nota-se uma transição granulométrica lateral onde espessos pacotes se interdigitam, marcando uma variação faciológica. Provavelmente, isso ocorreu devido às descrições litológicas serem pouco detalhadas, às vezes, genéricas em demasiado. Porém, pode-se afirmar a partir das descrições que na porção norte e central há predomínio de arenito muito a muito fino e na porção sul - sudeste um arenito médio a grosso.

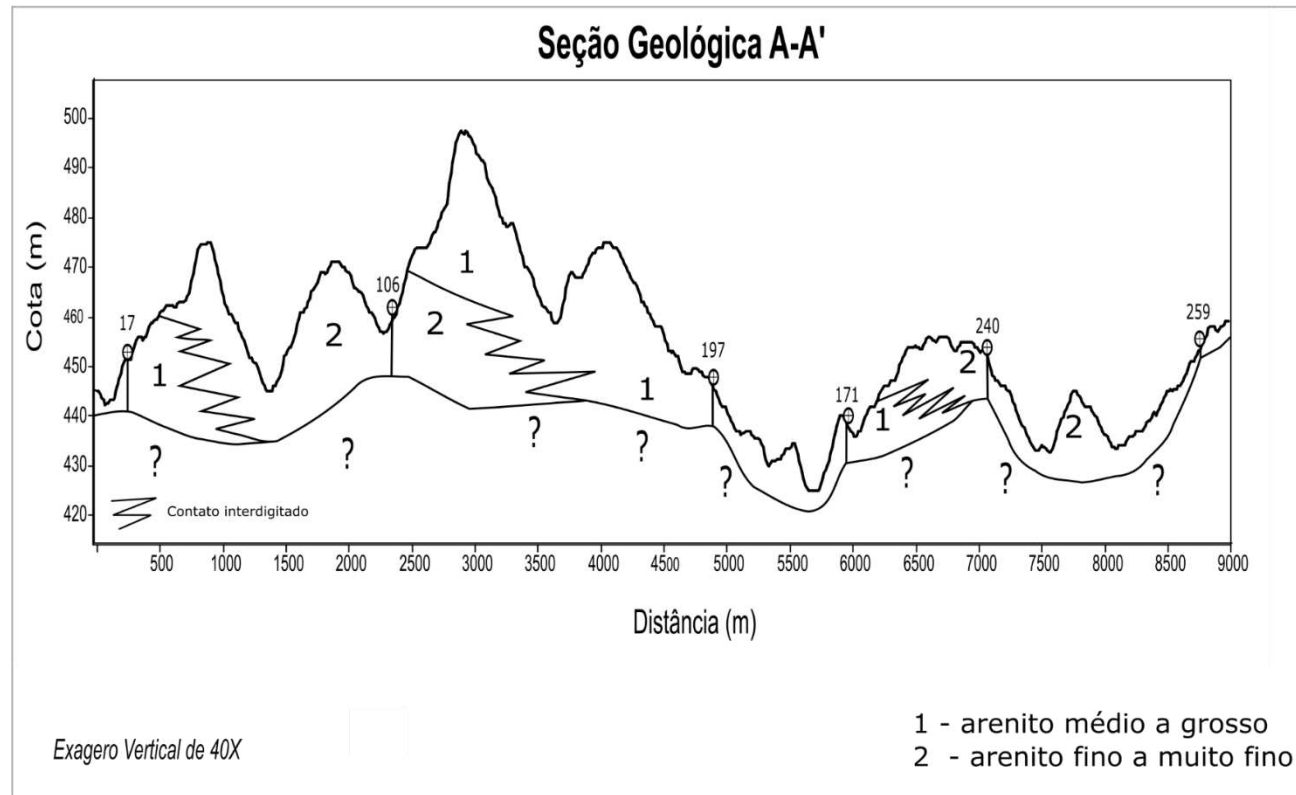
Na BCF identificou-se nessas descrições um arenito fino a muito de coloração creme a róseo, marrom e alaranjado, com intercalações de siltito e argilito de coloração escura, maciça. Também descrito na bacia um arenito fino a médio, arenito médio a grosso maciço de coloração avermelhada, presença de lamito avermelhado, duro. Essas informações assemelham-se a Formação Adamantina descrita no item 4.2.2.4, caracterizando assim o Aquífero Adamantina.

Figura 16 – Localização das seções geológicas.



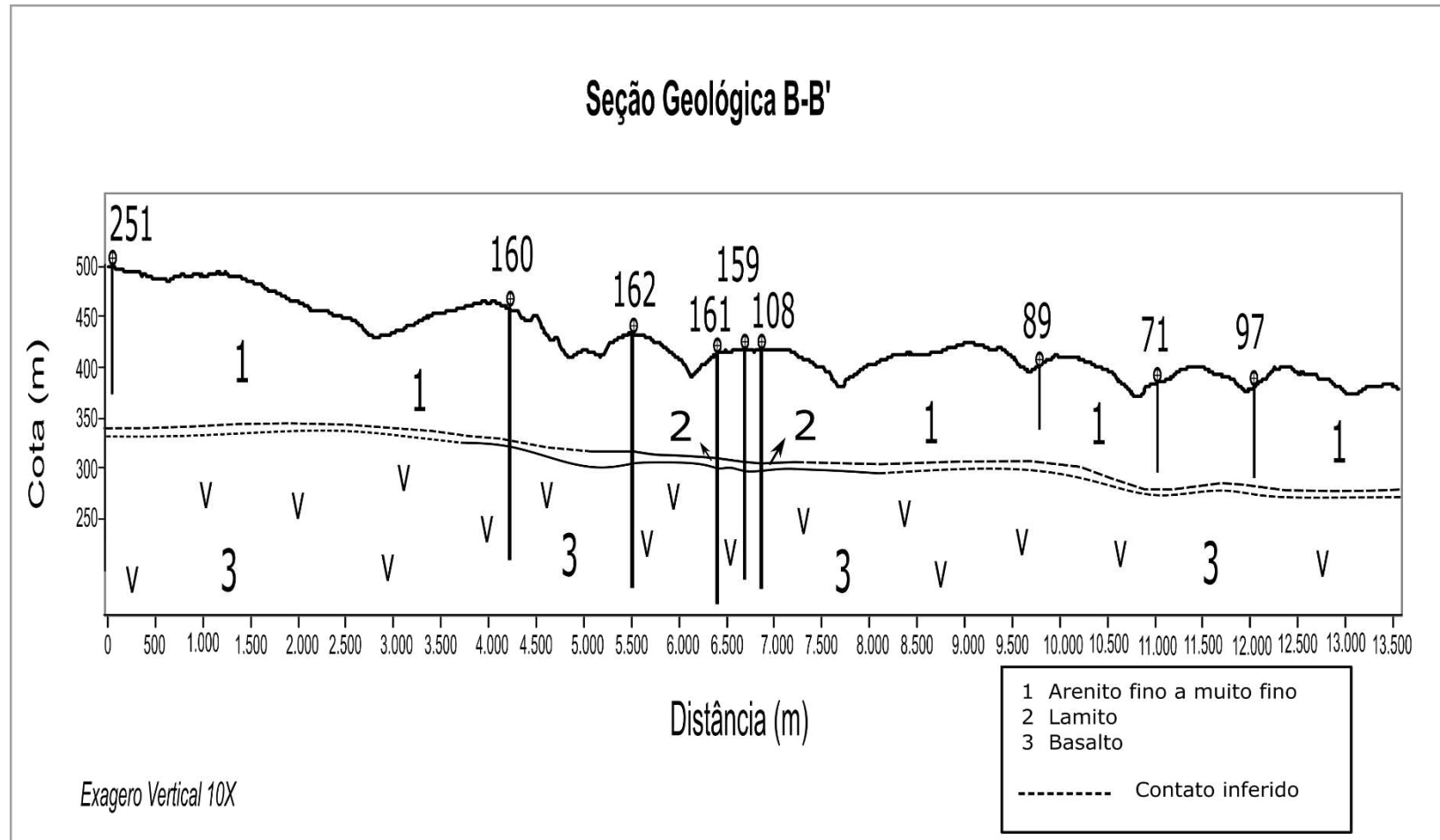
Fonte: Elaborado pela autora

Figura 17 – Seção geológica A-A'



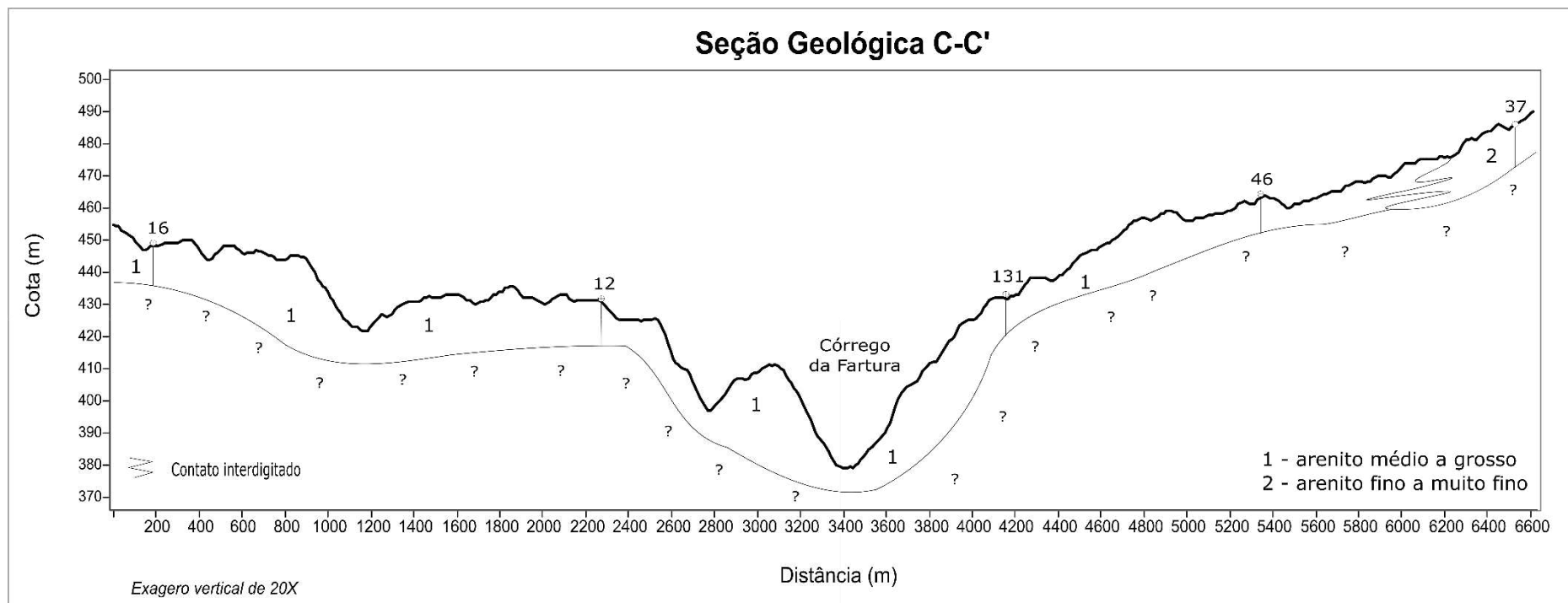
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 18 – Seção geológica B-B'



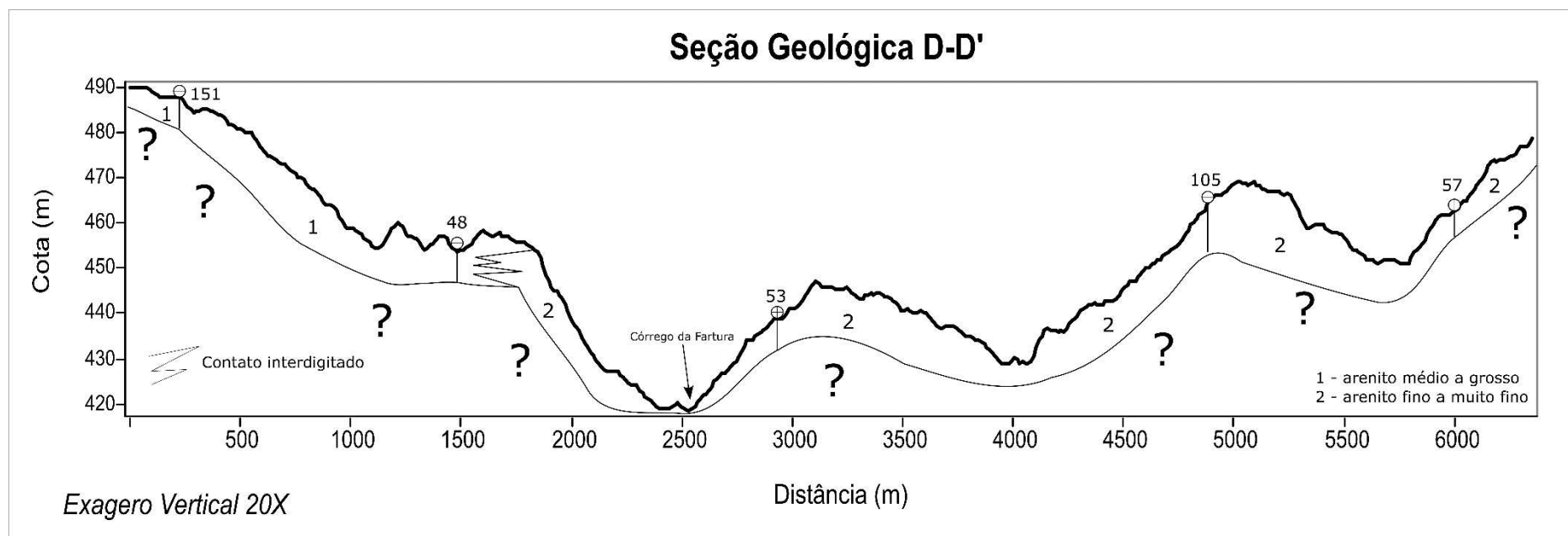
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 19 – Seção geológica C-C'



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 – Seção geológica D-D'



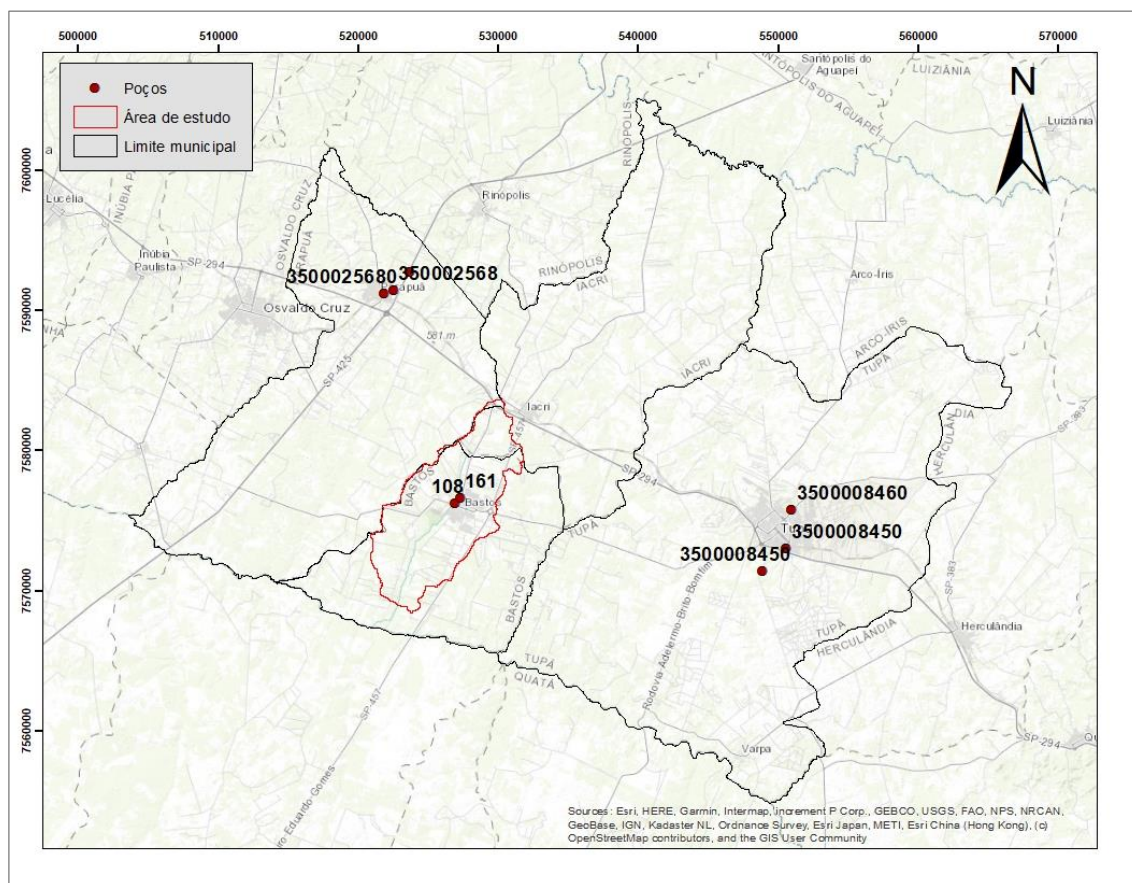
Fonte: Elaborado pela autora.

Na camada subsequente a Formação Adamantina encontra-se o siltito amarronzado, com níveis arenosos, siltito cinza esverdeado compacto e lamitos de coloração avermelhada a cinzenta, duro e compacto, com espessura de 10 a 26 m e assenta-se sobre a Formação Serra Geral. A litologia observada assemelha-se às feitas por Soares et al (1980) e Fernandes (2004) para a Formação Araçatuba. Porém, conforme as descrições presentes no banco de dados não possível identificar de forma precisa esta formação em toda a extensão da bacia, mostrando assim, uma ocorrência muito localizada na bacia (Figura 18).

O basalto ocorre sotoposto as camadas de arenitos, conforme a Seção Geológica B-B' (Figura 18) e mostra-se parcialmente alterado, pouco fraturado, apresentando incrustações de epidoto, anisotrópico e heterogêneo com coloração escura, cinza chumbo, cinza marrom, conforme a descrição dos poços 108, 161 e 162.

Devido a pouca quantidade de poços tubulares que identificam e descrevem a Formação Araçatuba na área de estudo (108 e 161) optou-se pela busca de informações fora dos limites da BCF. A descrição litológica dos poços tubulares do entorno apresentaram a ocorrência dessa formação e serviram de base para realizar a interpolação dessa informação (Figura 21).

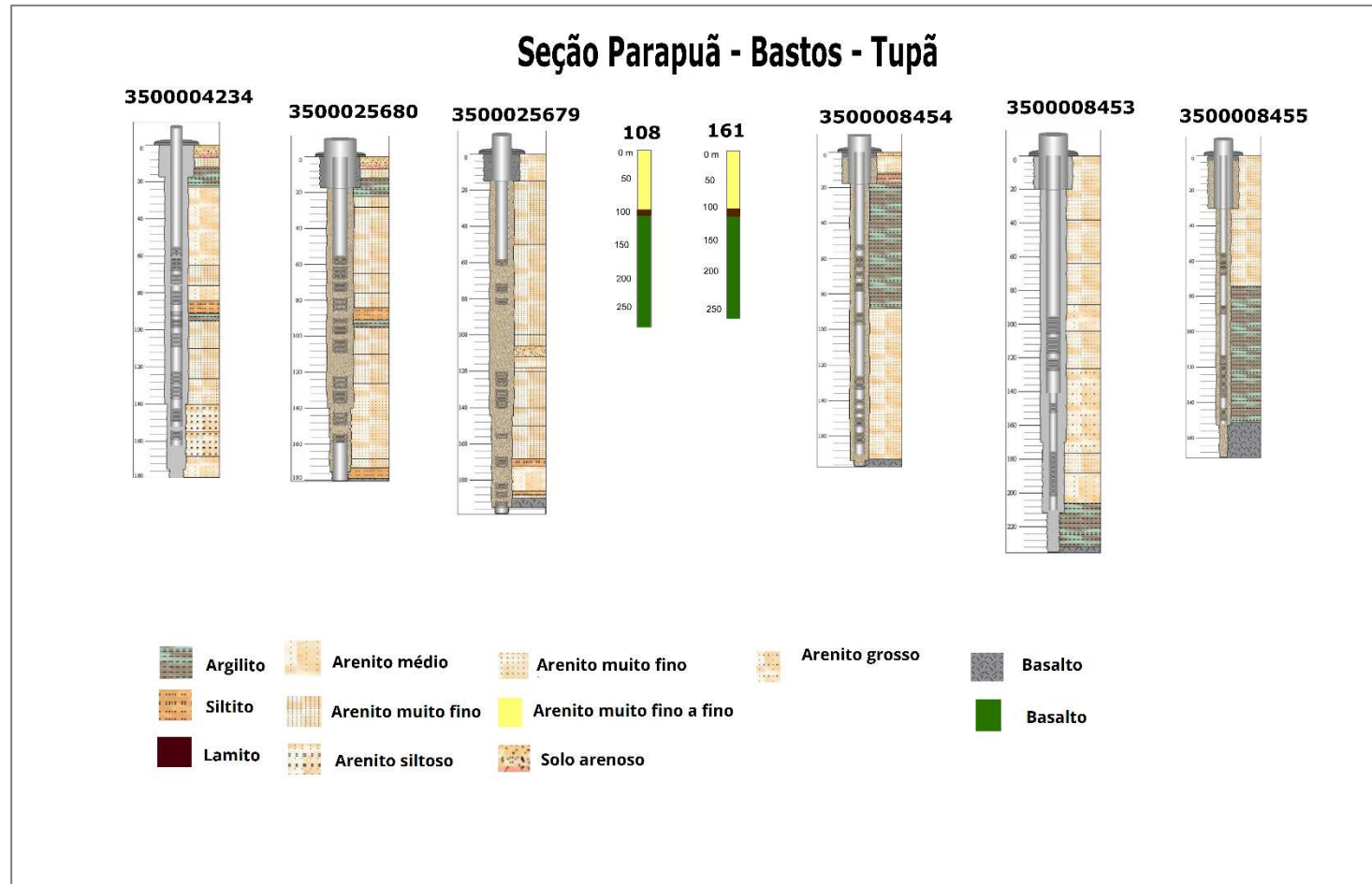
Figura 21 – Localização dos poços tubulares do entorno.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 22 apresenta os perfis litológicos desses poços tubulares que auxiliaram na delimitação da camada de lamito/silito/argilito na BCF.

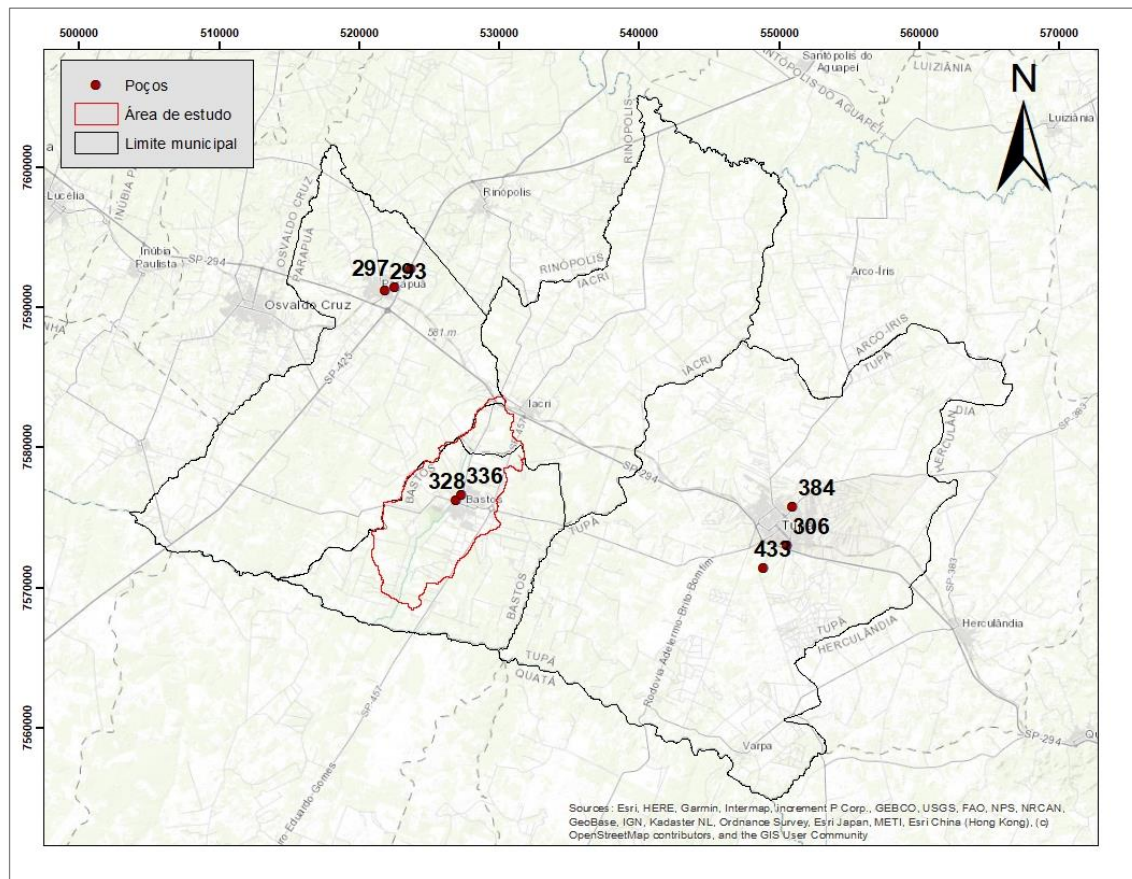
Figura 22 – Descrição dos perfis litológicos no entorno e na Bacia Córrego da Fatura.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 23 mostra a cota do aquífero na BCF e nos municípios do entorno.

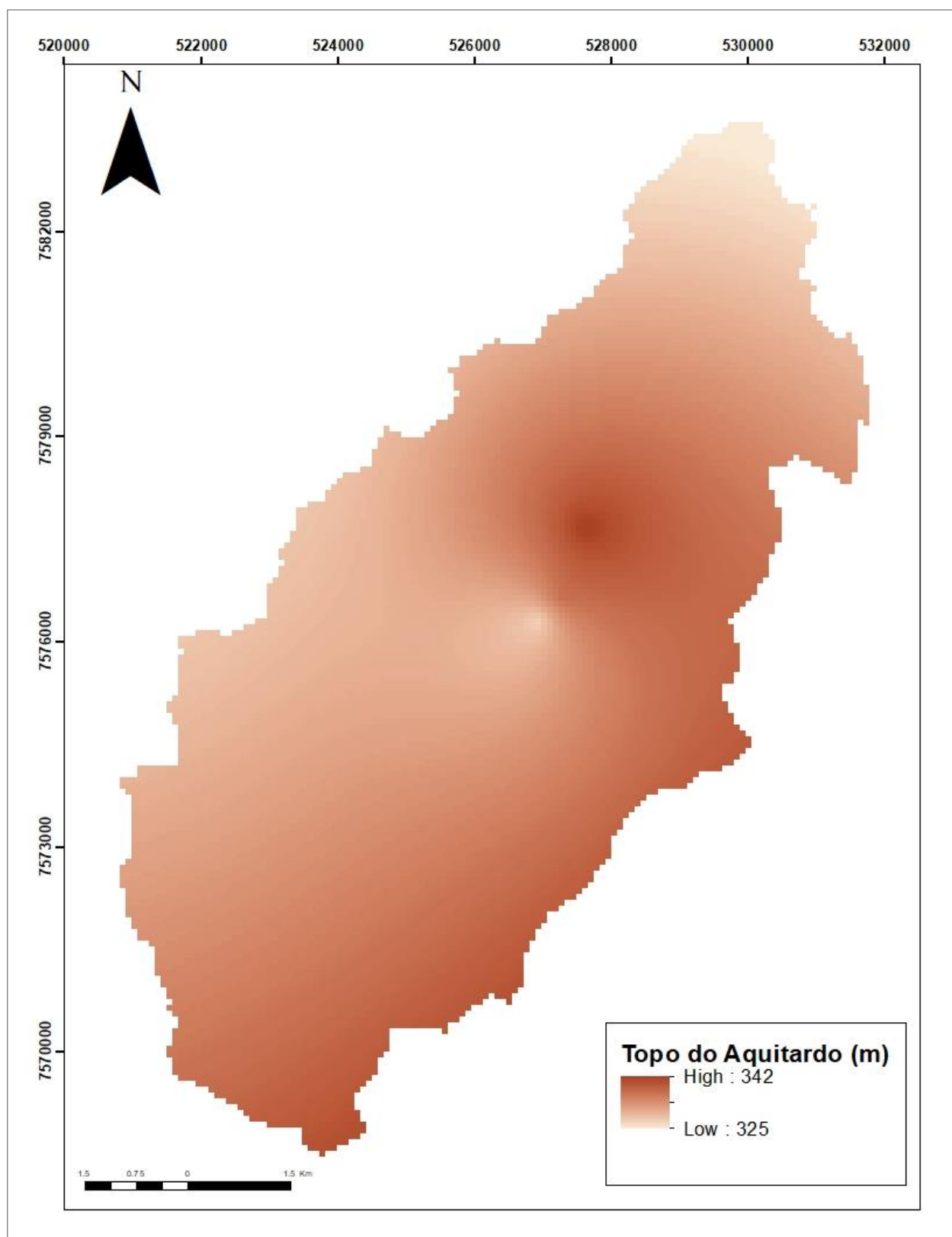
Figura 23 – Cotas da Formação Adamantina na Bacia do Córrego da Fartura e entorno.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como resultado da interpolação das cotas do topo do aquífero o intervalo obtido corresponde a 325 m e 342 m na BCF (Figura 24).

Figura 24 – Delimitação do topo do aquífero na Bacia do Córrego da Fartura.

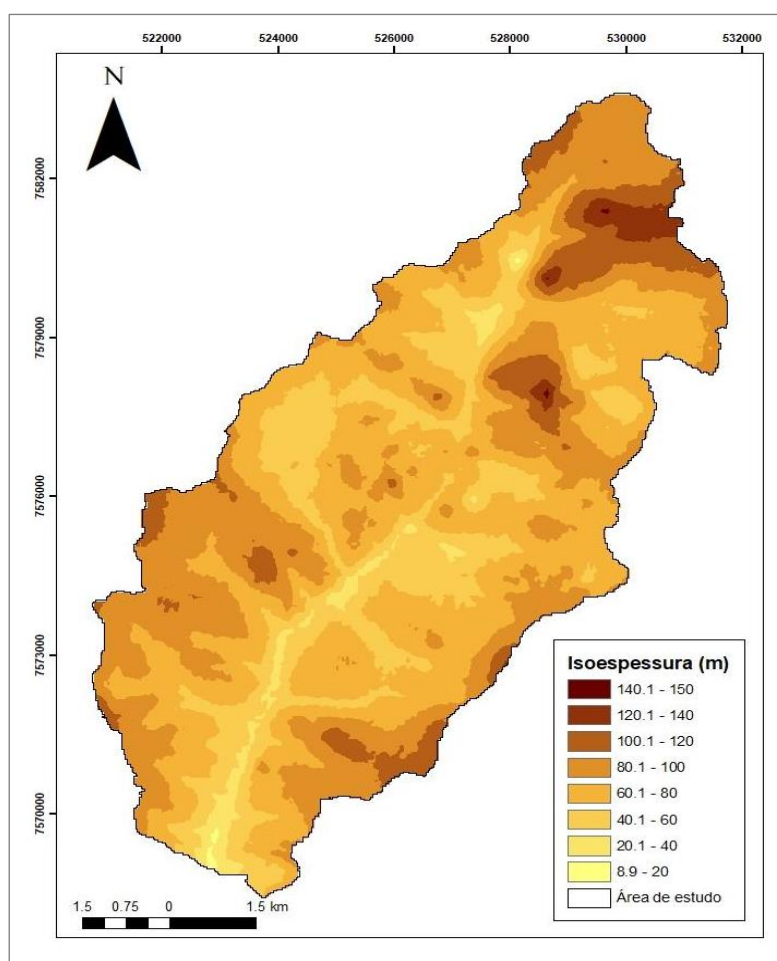


Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda, nas descrições litológicas dos poços do banco de dados não foi encontrado nenhuma referência à Formação Marília, logo esta formação não foi considerada na elaboração do modelo conceitual.

A Figura 25 traz o mapa de isoespessura da Formação Adamantina presente na área de estudo que permite observar a distribuição da espessura da formação sedimentar na BCF. Na parte norte da bacia a espessura sedimentar varia 80 m a 150 m, já na parte sul há uma diminuição, entre 40 m e 100 m e na porção central a variação atinge de 8,9 a 60 m.

Figura 25 – Mapa de isoespessura da Formação Adamantina na Bacia do Córrego da Fatura.



Fonte: Elaborado pela autora.

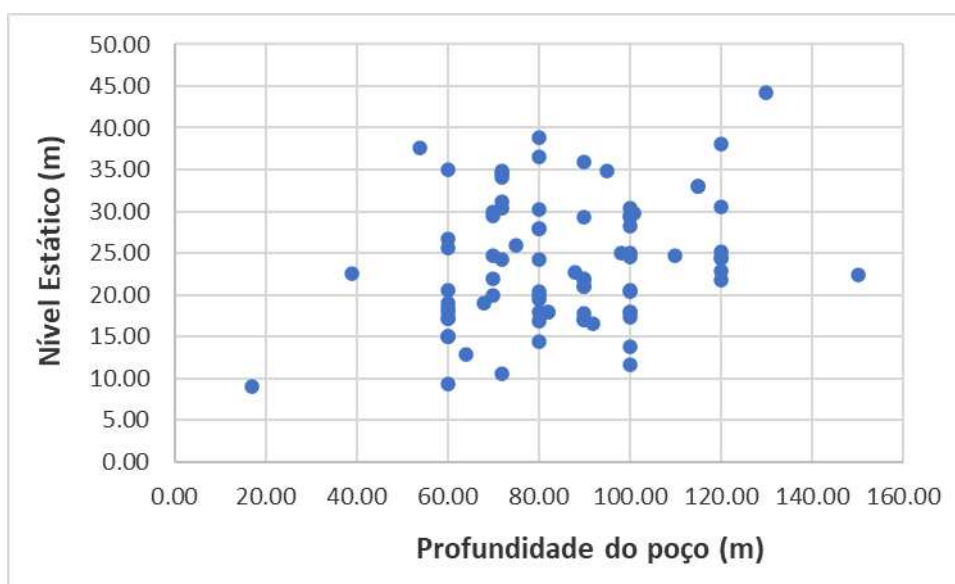
6.1.2 Unidades hidroestratigráficas

A partir da definição da geologia local adotou-se a unidade hidroestratigráfica Aquífero Adamantina que na área de estudo comporta-se como um

aquífero livre, de porosidade primária, encontra-se sobreposto ao Aquitardo Araçatuba e ao Sistema Aquífero Serra Geral, semiconfinado, de porosidade secundária.

Na BCF o Aquífero Adamantina possui os poços instalados em uma profundidade média de 96 m, sendo a mínima 17,0 m e a máxima 150,0 m. Os níveis estáticos (NE) e dinâmicos (ND) observados são rasos, em média 25,88 m e 45,61 m respectivamente. A Figura 26 mostra que o NE se mantém raso (menor que 60 m de profundidade) mesmo com o aumento da profundidade do poço.

Figura 26 – Correlação entre o nível estático (NE) e a profundidade do poço.



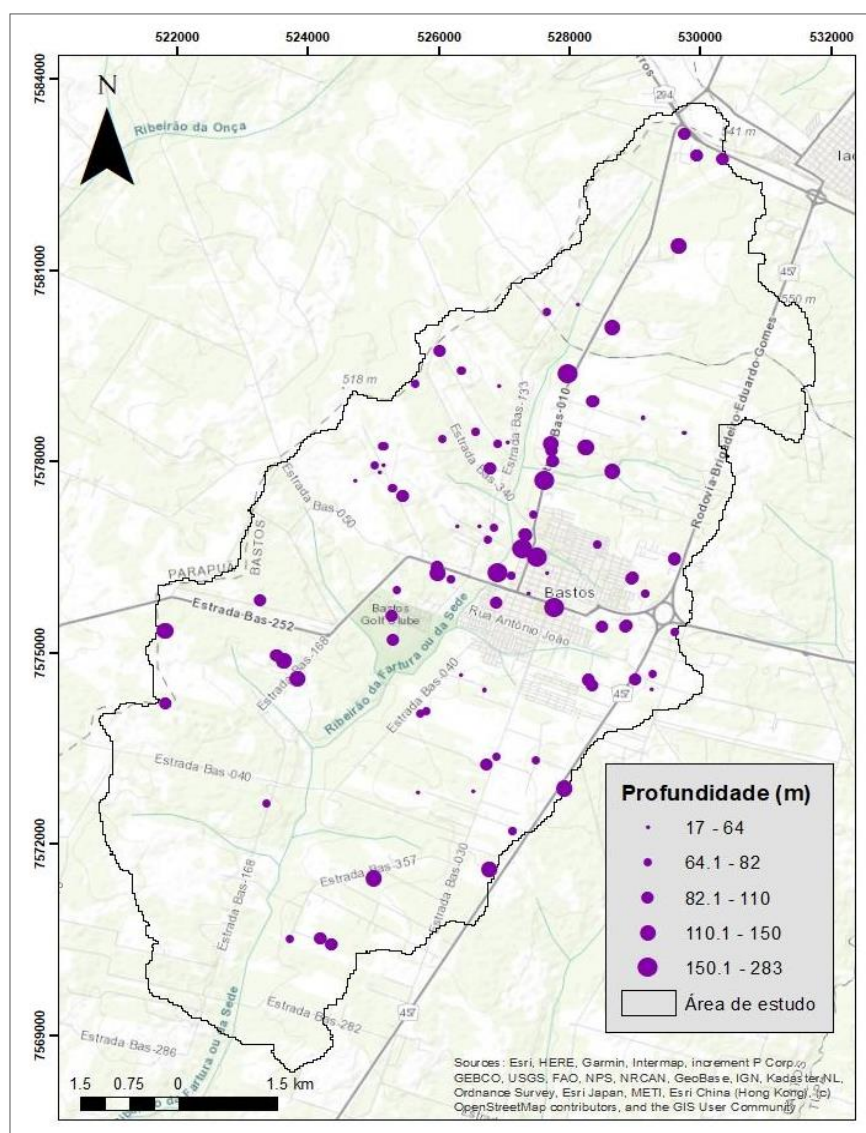
Fonte: Elaborado pela autora.

O Aquitardo Araçatuba foi identificado em apenas dois poços que estão dentro da BCF conforme ilustra a Figura 21, sendo a espessura média de 17 m, a mínima 10 m e a máxima 26 m. Devido a pouca informação obtida sobre este aquitardo na BCF foi adotado que esta formação se estende por toda área de estudo sotoposta ao Aquífero Adamantina.

O Aquífero Serra Geral na BCF o topo do basalto tem profundidade média 104,3 m, sendo a mínima 95,0 m e a máxima 150,0 m. A espessura mínima do Aquífero Serra Geral explotada na BCF corresponde a 136 m. Os poços instalados neste aquífero tem uma profundidade média de 255 m, sendo a mínima 240 e a máxima 283 m.

Os poços que captam apenas no Aquífero Serra Geral possuem níveis estáticos e dinâmicos em média a 116,52 m e 146,41 m, respectivamente. Os poços tubulares mistos, que exploram a mistura de águas dos aquíferos Adamantina e Serra Geral, possuem nível estático e nível dinâmico em média, 111,57 m e 124,54 m. A Figura 27 mostra a distribuição das profundidades dos poços tubulares na Bacia Córrego da Fartura.

Figura 27 – Profundidades dos poços tubulares na Bacia do Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.1.3 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica da BCF foi interpretada a partir dos ensaios de bombeamento dos poços tubulares pertencentes a bacia do banco de dados.

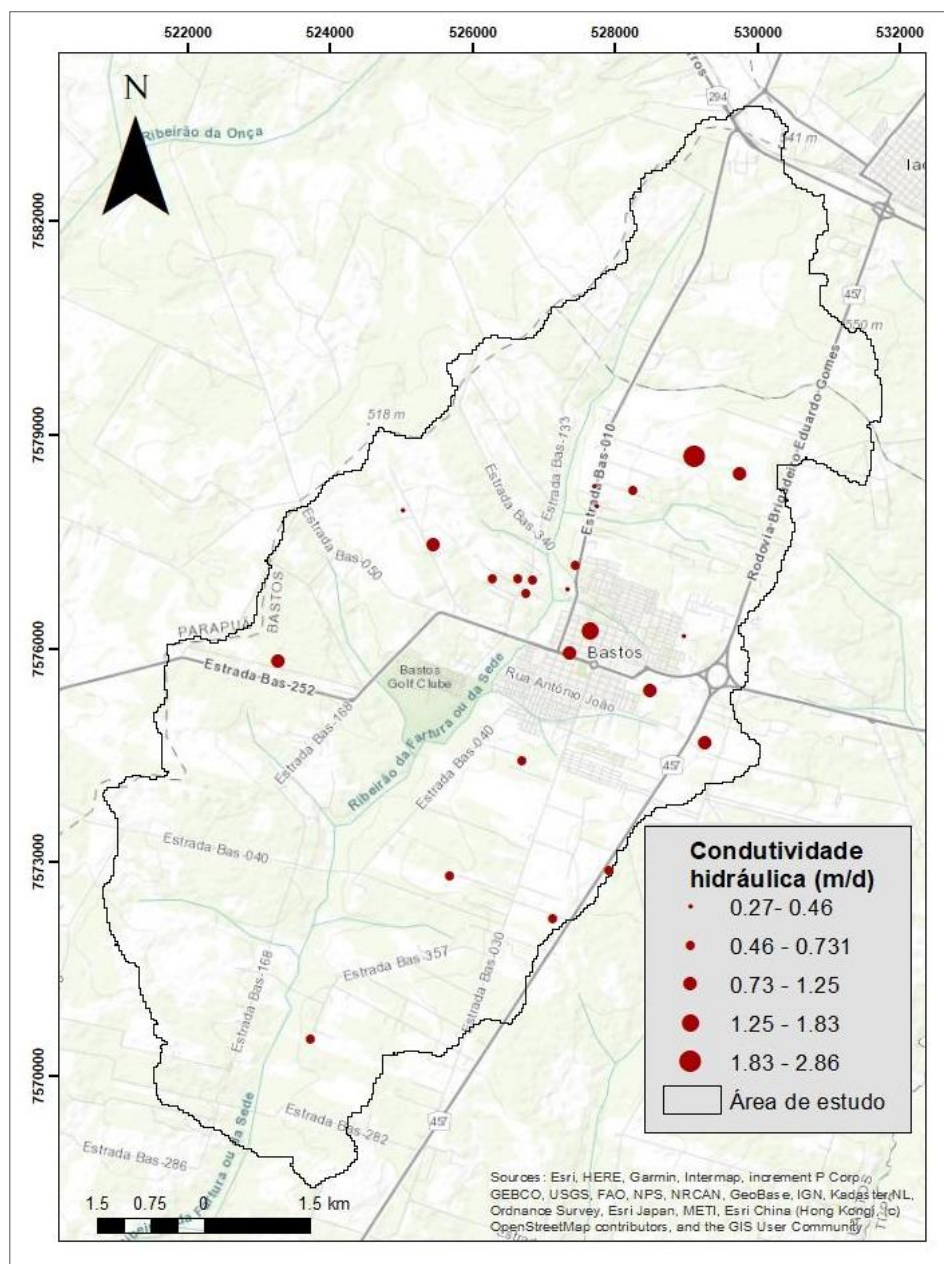
O parâmetro foi obtido a partir de 26 ensaios de bombeamento sem poço de observação que captam água do Aquífero Adamantina, com poços tubulares de 39 m a 130 m de profundidade utilizando a planilha pré-preparada do Serviço do Geológico Americano (*Spreadsheets for the Analysis of Aquifer-Test* – Cooper-Jacob – USGS, 2002) como base para o cálculo.

Os resultados alcançados mostram uma condutividade hidráulica mínima de 0,27 m/d, máxima de 2,86 m/d e média de 0,81 m/d (Figura 28). Nesta porção da bacia em que foram identificados os valores das condutividades hidráulicas o que indica uma heterogeneidade dos materiais litológicos na BCF conforme o item 6.1.1 que descreve a formação litológica. Carvalho; Hirata (2012) apontam para a Formação Adamantina uma condutividade hidráulica média 1,50 m/d. Já o DAEE (2005) confere uma condutividade hidráulica mínima 0,002 m/d e máxima 3,66 m/d para o Aquífero Bauru. Assim sendo, os valores calculados para a BCF encontram-se dentro do esperado para o Aquífero Adamantina.

Conforme as Seções B-B' e D-D' a litologia da porção leste da BCF apresenta uma granulometria fina (arenito fino a muito fino) o que justifica os valores encontrados com os cálculos da condutividade hidráulica.

Para a Formação Serra Geral a condutividade hidráulica foi calculada em um único poço (162) corresponde a 2,72 m/d. Ucci (2015) encontrou os valores mínimo e máximo 0,04 m/d e 4,30 m/d para esta formação no Estado de São Paulo.

Figura 28 – Distribuição da condutividade hidráulica no Aquífero Adamantina na Bacia do Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

A porosidade efetiva aplicada ao Aquífero Adamantina na BCF corresponde a 0,1 (CARVALHO; HIRATA, 2012).

6.1.4 Recarga

A recarga natural do Aquífero Adamantina segundo Bertolo (2001) ocorre diretamente pelas precipitações. A característica essencialmente livre do aquífero faz surgir superfícies potenciométricas que seguem a geometria da superfície do terreno, com linhas de fluxo de água subterrânea convergindo para as calhas dos rios, tendo assim um caráter efluente, e com os divisores das microbacias hidrogeológicas coincidindo com os divisores das microbacias hidrográficas (BERNICE, 2010).

A determinação da recarga da BCF contou com o uso de três métodos para melhor compreender a recarga. O primeiro foi realizado na própria área de estudo utilizando o método recarga por precipitação, o segundo consiste na Curva de Recessão que foi adotado para uma bacia adjacente à BCF o terceiro método refere-se à regionalização hídrica do Estado de São Paulo ($Q_{95\%}$).

6.1.4.1 Caracterização do clima

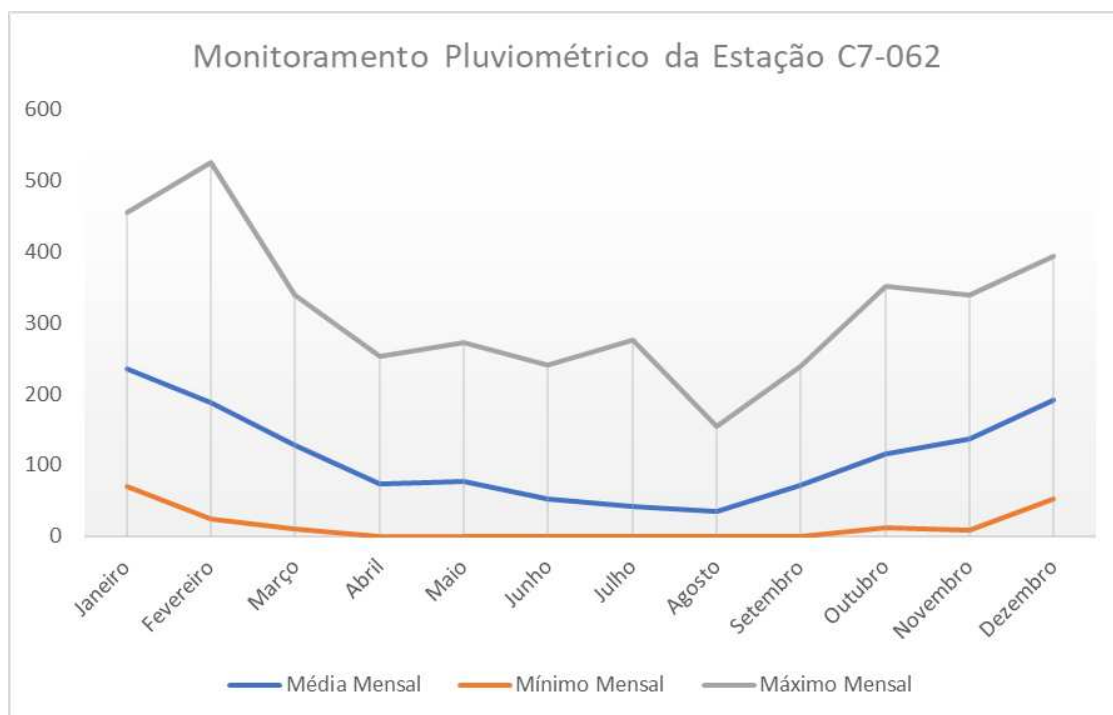
A BCF encontra-se na faixa do clima subtropical, com temperatura do mês mais frio em 18 °C e no mês mais quente a temperatura mostra-se superior a 22 °C. Quanto às precipitações, no mês menos chuvoso, as alturas das lâminas d'água registradas são superiores a 30 mm e no mês mais chuvoso esses registros superam 200 mm.

As médias mensais dos índices pluviométricos para o período chuvoso variam entre 137,38 mm e 234,88 mm. As médias no período mais seco estão entre 34,15 mm e 54,99 mm. A precipitação média anual obtida para a BCF é de 1347,28 mm.

Observa-se que os índices pluviométricos mais elevados foram medidos a partir de 2009, sendo 1.701 mm em 2009, 1.416 mm em 2012 e 1.923 mm em 2015.

A Figura 29 ilustra o monitoramento pluviométrico da Estação C7-062 a partir de valores médios, máximos e mínimos compreendidos entre os anos de 1946 e 2020.

Figura 29 – Monitoramento pluviométrico entre os anos de 1946 e 2020.



Fonte: Elaborado pela autora.

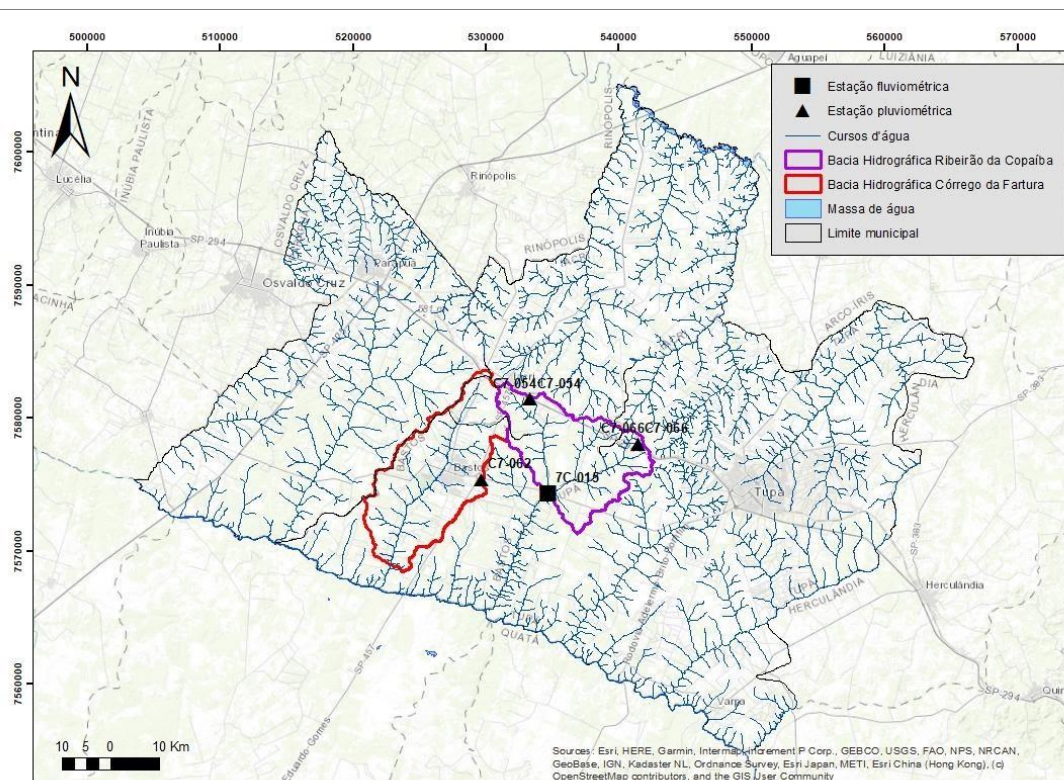
6.1.4.2 Recarga por Precipitação

A estimativa de recarga para BCF foi feita conforme a metodologia Recarga por Precipitação da WMO (2012). Esta metodologia sugere a extração de 15% da média plurianual da precipitação (1347 mm/ano) como sendo a recarga do aquífero, ou seja, 202 mm/ano.

6.1.4.3. Recarga a partir da Curva de Recessão

A aplicação da curva de recessão ocorreu na Bacia do Ribeirão da Copaíba, nas adjacências da BCF, conforme a Figura 30. Sendo assim, foram utilizados os dados da estação fluviométrica (7C-015) da Rede Hidrológica DAEE.

Figura 30 – Bacia do Ribeirão da Copaíba e a Bacia do Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os anos mais secos selecionados para a construção da curva de recessão foram 1995, 1996, 2001. A escolha desses anos deu-se a partir da soma das precipitações dos meses de junho, julho e agosto para todo o período analisado (1995 a 2005). Os anos com medidas incompletas foram desconsiderados. Os dados foram retirados da estação pluviométrica C7-054, da Rede de Hidrologia DAEE.

O ano de 1996 mostrou-se o mais seco com a menor soma das precipitações do período selecionado. A Tabela 6 mostra a soma das precipitações para os anos selecionados.

Tabela 6 – Soma da precipitação nos meses de junho, julho e agosto dos anos selecionados.

Ano	Precipitação (mm)
1995	59,3
1996	42,1
2001	98,5

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 7 apresenta a soma das precipitações durante os anos de 1995, 1996 e 2001.

Tabela 7 – Soma da precipitação anual dos anos selecionados.

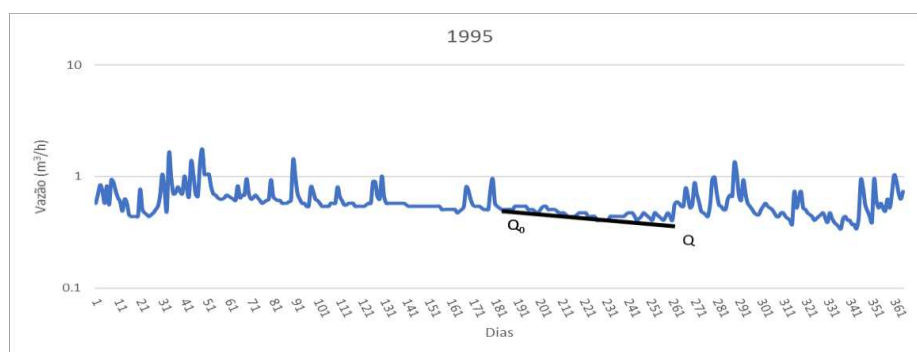
Meses	1995	1996	2001
Janeiro	190.2	137.1	154.6
Fevereiro	286.6	208.7	341.9
Março	77.2	246.2	48.9
Abril	153.7	45.2	91.3
Maio	71.3	80.2	80.4
Junho	35.8	13.9	38.7
Julho	23.5	3.5	41.8
Agosto	0	24.7	18
Setembro	48.9	157.1	52.3
Outubro	161.9	167.5	116
Novembro	62.5	261.4	144.3
Dezembro	231.2	178.2	186.7
Soma	1342.8	1523.7	1314.9

Fonte: Elaborado pela autora.

Para os anos 1995 e 1996 foi observado que o início da recessão ocorreu entre os meses de junho a agosto, e o término em agosto, respectivamente. No ano de 1995 por 76 dias o valor da vazão final diminuiu aproximadamente 80% em relação à vazão inicial. Em 1996 a diminuição da vazão final foi 83% em relação à vazão inicial. O ano 1996 teve o maior período de recessão que somou 98 dias.

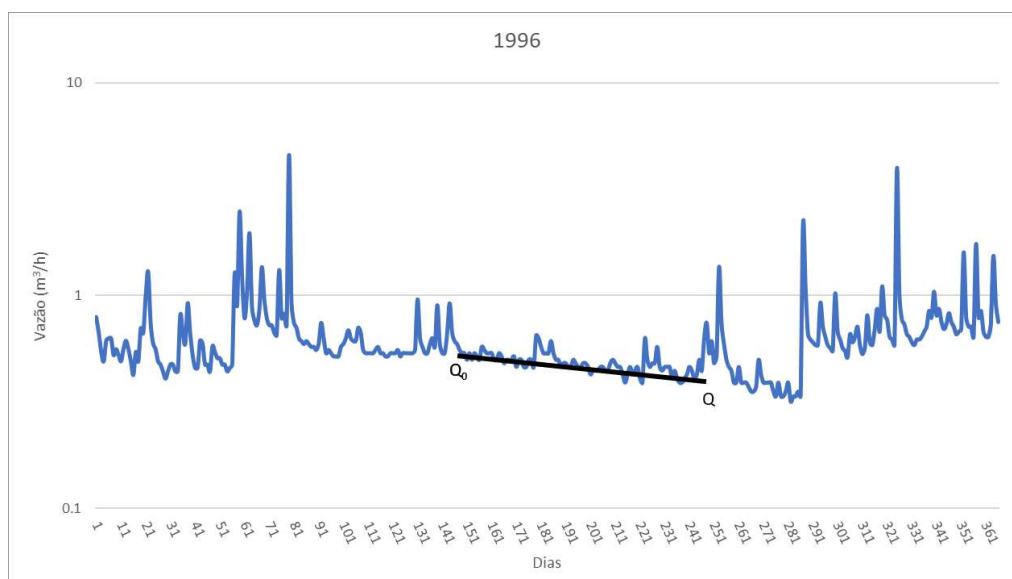
No ano 2001 notou-se que o início da recessão ocorreu junho com o término em agosto. A diminuição da vazão final foi 85% em relação à vazão inicial. As Figuras 31 a 33 ilustram as curvas de recessão.

Figura 31 – Vazão diária do Ribeirão da Copaíba, em evidencia o período de recessão em 1995.



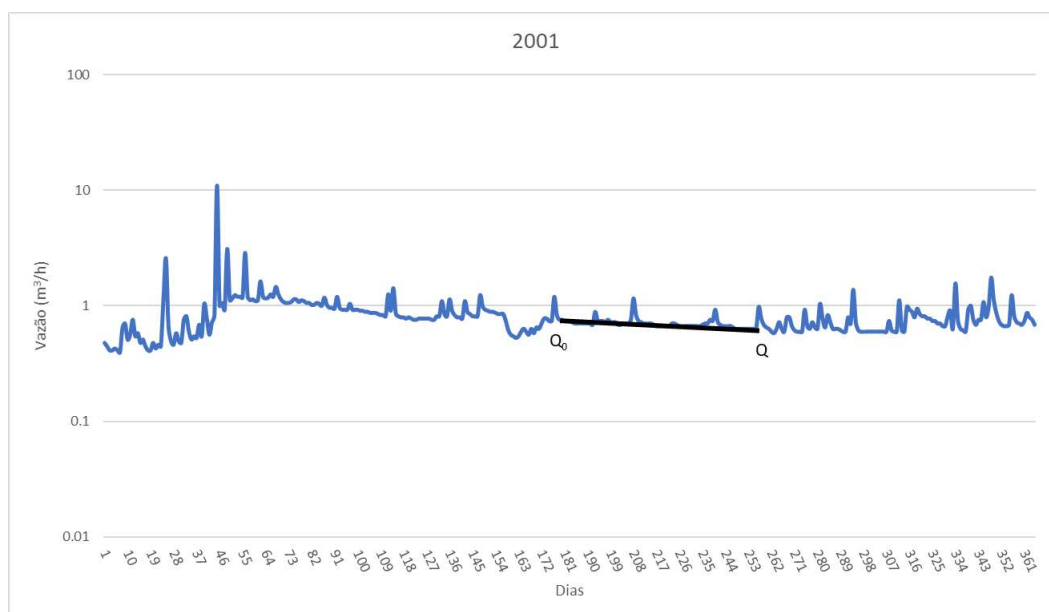
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 32 – Vazão diária do Ribeirão da Copaíba, em evidência o período de recessão em 1996.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 – Vazão diária do Ribeirão da Copaíba, em evidência o período de recessão em 2001.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 8 apresenta os valores das vazões iniciais e finais assim como o coeficiente de recessão (k) para os anos secos selecionados. Esses valores mostram proximidade mostrando uma coesão de aplicabilidade do método.

Tabela 8 – Vazão, intervalo de tempo e coeficiente de recessão (k)

Ano	Q_0 (m^3/s)	Q (m^3/s)	Intervalo de tempo (dias)	k
1995	0,508	0,407	76	0,0029
1996	0,536	0,444	98	0,0019
2001	0,736	0,629	75	0,0093

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos coeficientes de recessão e das vazões iniciais obtém-se os volumes contribuintes da bacia para os anos selecionados. Esses valores são observados na Tabela 9. Para Honorato (2013) esse volume corresponde ao total infiltrado na bacia e armazenado acima do nível de base.

Tabela 9 – Volume de água contribuinte para a Bacia do Ribeirão da Copaíba.

Ano	V ($m^3 \cdot 10^7 / \text{ano}$)
1995	1.5
1996	1.0
2001	1.0

Fonte: Elaborado pela autora.

O volume contribuinte calculado e considerando a área da bacia do Ribeirão da Copaíba é possível estimar a restituição ou altura média da destinada à recarga do Aquífero Adamantina. A estimativa deste valor encontra-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Altura média da água destinada a recarga do Aquífero Adamantina.

Ano	h (mm/ano)	h (%)
1995	230	17,1
1996	160	10,5
2001	160	12,1

Fonte: Elaborado pela autora.

Prandi (2010) aplicou na estação 7C-015 o método da curva de recessão e obteve o valor de recarga de 14,6% da precipitação, quando comparados com os valores aqui obtidos mostram-se dentro do esperado.

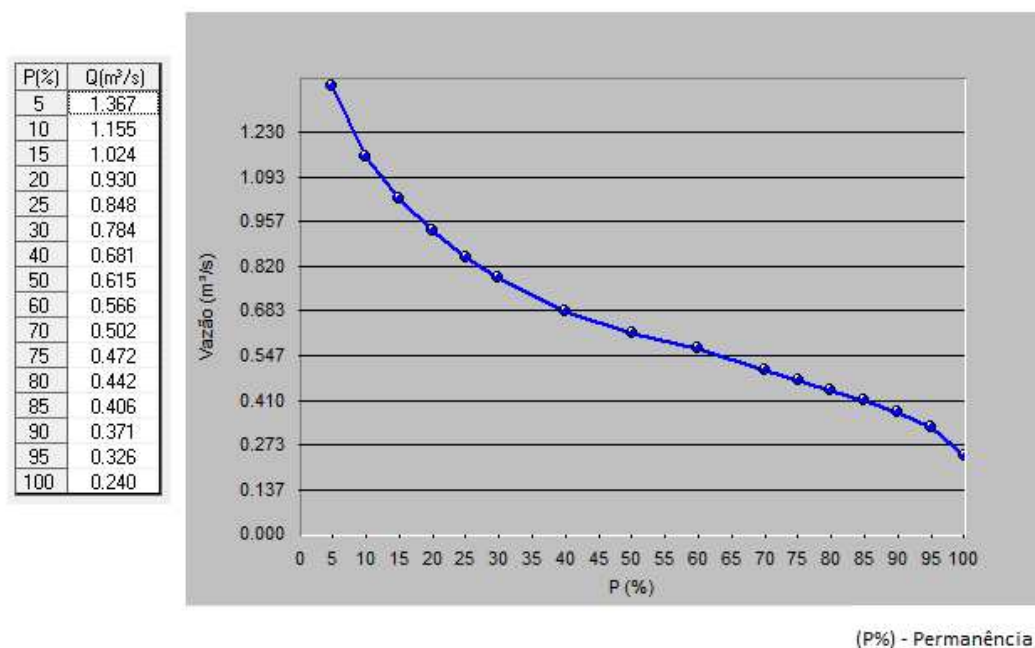
6.1.4.3 Estimativa da recarga utilizando a vazão de $Q_{95\%}$

A curva de permanência da área de estudo foi obtida a vazão com 95% de permanência no período (Figura 34) a partir da metodologia apresentada por LIAZI et al

(1988) para a regionalização de vazões e a recarga do aquífero Adamantina foi estimada em uma área de 80,88 Km² pertencente à BCF.

Para a BCF, os parâmetros de entrada para as equações são apresentados na Tabela 11.

Figura 34 – Curva de Permanência da Bacia Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 11 – Parâmetros para a região hidrológica R utilizados para o cálculo das vazões.

Parâmetro	Valor
Valor a	-4,62
Valor b	0,0098
q _p para 95 %	0,463

Fonte: LIAZI et al. (1988)

A substituição dos parâmetros de entrada e utilizando a área de 80,88 Km² e os valores de precipitação acumulada referente ao período, foi obtida a vazão Q₉₅ em litros por segundo.

Para isso, o valor em litros por segundo foi convertido para litros por ano, em seguida, dividido pela área da bacia em metros quadrados, de modo a determinar a lâmina de água em milímetros por ano, estimando assim a recarga de 125 mm/ano.

Ao aplicar os três métodos para estimar a recarga observa-se que os resultados se encontram dentro do esperado para o Aquífero Adamantina conforme Carvalho e Hirata (2012) indicam para área de ocorrência deste aquífero, uma recarga de 250 mm/ano, sendo que o ano 1995 mostrou-se mais próximo do esperado, 230 mm/ano, e já o $Q_{95\%}$ indicou um valor mais baixo, 125 mm/ano.

6.1.5 Potenciometria

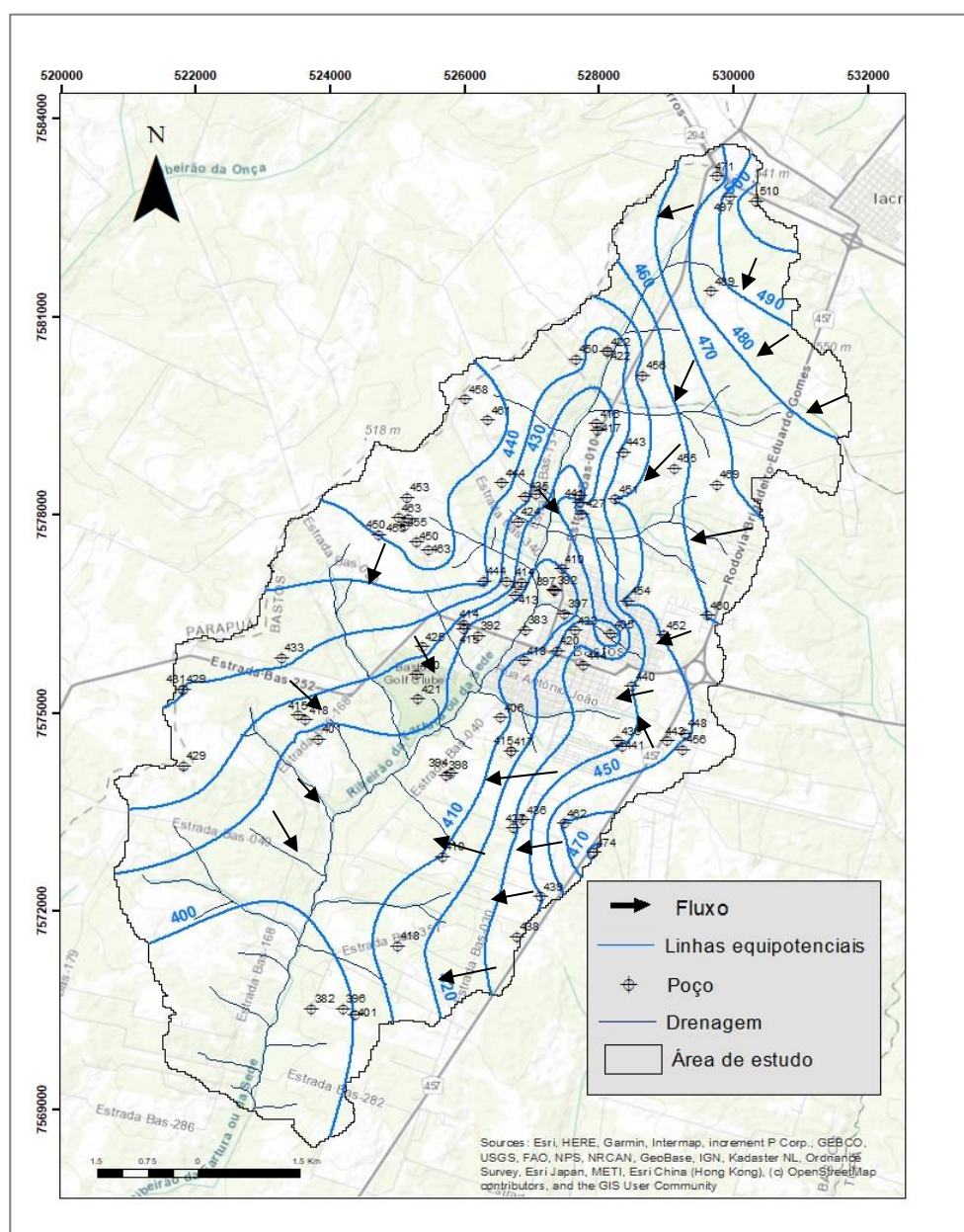
A potenciometria da BCF foi realizada no Aquífero Adamantina (Figura 35) verifica-se que o fluxo das águas subterrâneas se movimenta em direção à drenagem principal, ou seja, o fluxo converge para a calha do Córrego da Fartura, considerado a área de descarga do aquífero livre na BCF. A variação da cota equipotencial elevada corresponde a 500 m e a cota equipotencial baixa 390 m.

IPT (2018) observou que no município de Bastos a potenciometria do Aquífero Adamantina indica que o fluxo das águas subterrâneas está direcionado para as drenagens principais, que atuam como área de descarga (Figura 36). A variação da superfície potenciométrica ocorre entre as cotas de 490 m a 350 m, sendo as cotas mais altas encontram-se na porção nordeste do município. As mais baixas (350 m), encontram-se no limite sul do município, constituído pelo rio do Peixe, uma das principais áreas de descarga regional, que possui uma grande extensão.

Observa-se que as linhas e direções de fluxo se assemelham em ambos os mapas, o que indica mesmo com a variação do tamanho da área da bacia e a inserção de novos poços provenientes de outros bancos de dados às características do fluxo se mantiveram.

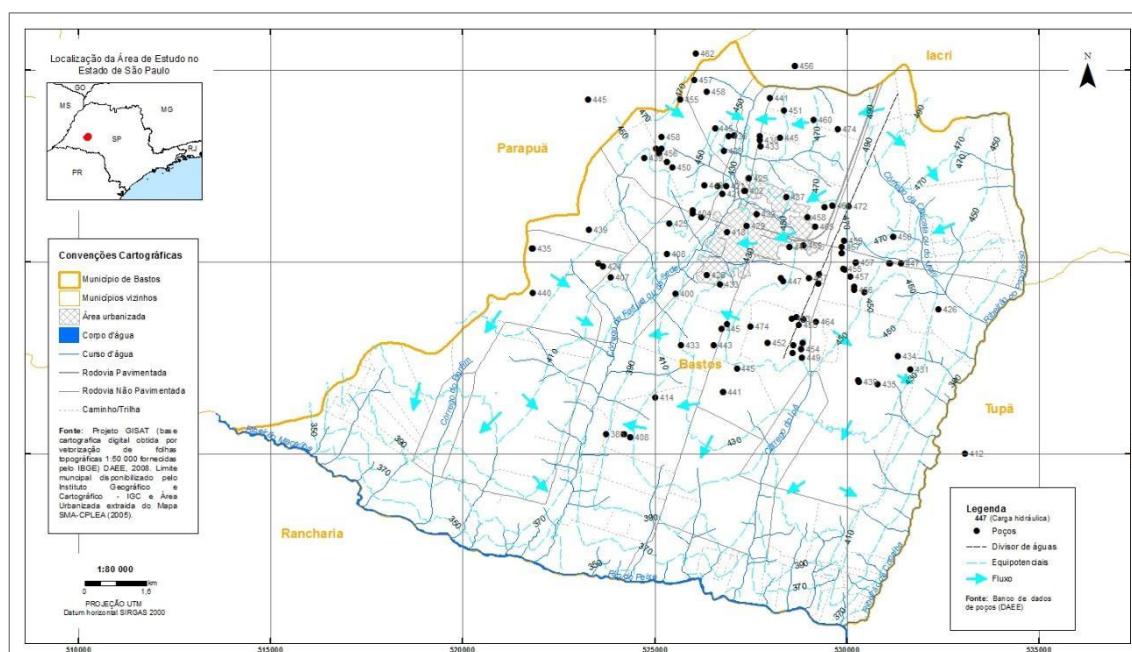
Durante a compilação das informações foi observado que grande parte dos poços não possui data de construção, assim como os ensaios de bombeamento, o que inviabiliza reconstituir a existência ou não de uma evolução do rebaixamento do nível potenciométrico da BCF.

Figura 35 – Potenciometria do aquífero na Bacia do Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 36 – Mapa potenciométrico do município de Bastos.



Fonte: IPT (2018).

6.1.6 Disponibilidade hídrica subterrânea

A estimativa da disponibilidade hídrica é realizada a partir de algumas vazões de referência, como $Q_{7,10}$, $Q_{95\%}$, $Q_{\text{médio}}$ (superficial) e Reserva Explotável (subterrânea). $Q_{7,10}$ que estabelece que a vazão mínima superficial registrada em 7 dias consecutivos em um período de 10 anos, sendo o volume restritivo e conservador. Já $Q_{95\%}$ representa a vazão disponível em 95% do tempo da bacia. A representação da disponibilidade desse parâmetro representa a vazão “natural” (sem interferência) das bacias. $Q_{\text{médio}}$ corresponde a vazão média de água presente na bacia durante o ano e é considerado um volume menos restritivo ou conservador (SÃO PAULO, 2011).

Na UGRHI 21 a disponibilidade hídrica superficial, conforme o Relatório de Situação dos Recursos Hídricos (2020), apresenta vazão média ($Q_{\text{médio}}$) $82 \text{ m}^3/\text{s}$, vazão mínima ($Q_{7,10}$) $29 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{95\%}$ $38 \text{ m}^3/\text{s}$. A disponibilidade hídrica subterrânea possui uma Reserva Explotável de $9 \text{ m}^3/\text{s}$. A disponibilidade per capita (vazão média em relação à população total) em 2019 representa $5.573,40 \text{ m}^3/\text{hab.ano}$ para uma população total 463.981 habitantes.

A demanda de águas subterrâneas na BCF está relacionada com os 151 poços tubulares ativos e outorgados, sendo que 96 poços apresentam informação da vazão explorada e tempo de funcionamento da bomba submersa por hora/dia.

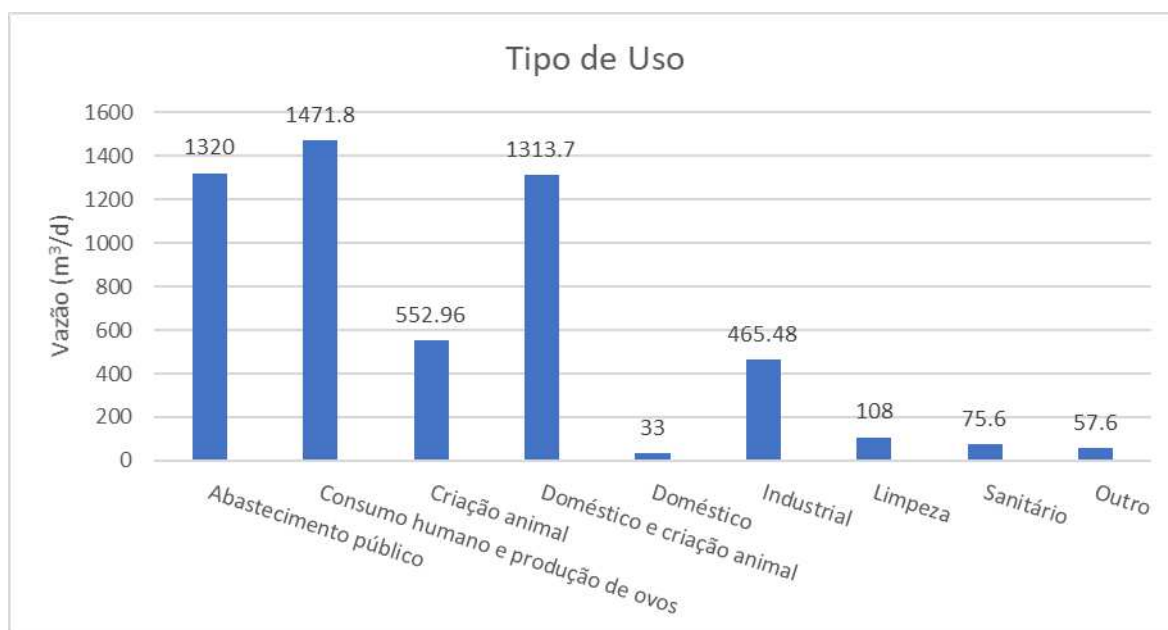
A quantidade de vazão explotada da bacia baseia-se na informação do banco de dados da pesquisa, assim o volume explotado de 96 poços soma 5.887,68 m³/dia, ou seja, 176.630,40 m³/mês. A população da BCF corresponde a população do município de Bastos, 20.296 habitantes (SEADE, 2021) o que corresponde ao consumo de 290,10 L/hab.dia.

A vazão específica é utilizada para expressar a produtividade de um poço e no Aquífero Adamantina os valores foram calculados a partir dos resultados dos ensaios de bombeamento de rebaixamento de 24 horas apresentados dos SIDAS que compõem o banco de dados.

A Figura 37 mostra a distribuição da vazão específica no Aquífero Adamantina na BCF. As menores vazões específicas ocorrem entre 0,07 m³/h/m e 0,25 m³/h/m, as maiores vazões específicas estão entre 1,97 m³/h/m e 3,88 m³/h/m, indicando que a maior produção de água do Aquífero Adamantina na BCF ocorre na porção central da bacia. Nesta região a espessura sedimentar entre 80 m e 120 m.

Devido à ausência de poços tubulares com informações nas porções norte e sul da bacia não há como caracterizar hidraulicamente estas áreas.

Figura 38 – Vazão de exploração para cada tipo de uso na Bacia do Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 – Tipos de uso das águas subterrâneas na Bacia do Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os poços de abastecimento público presentes na BCF captam do Aquífero Adamantina e do Sistema Aquífero Serra Geral para abastecer a área urbana de Bastos, já o abastecimento na zona rural dos municípios é feito por poços tubulares e cacimbas que captam água do Aquífero Adamantina. Na área rural a água captada é aplicada em diversas atividades como: consumo humano, sanitário, dessedentação de animais,

irrigação, doméstico, entre outros. Por sua vez, o esgoto gerado por essas atividades é lançado em fossas sépticas.

6.1.7 Uso e ocupação do solo

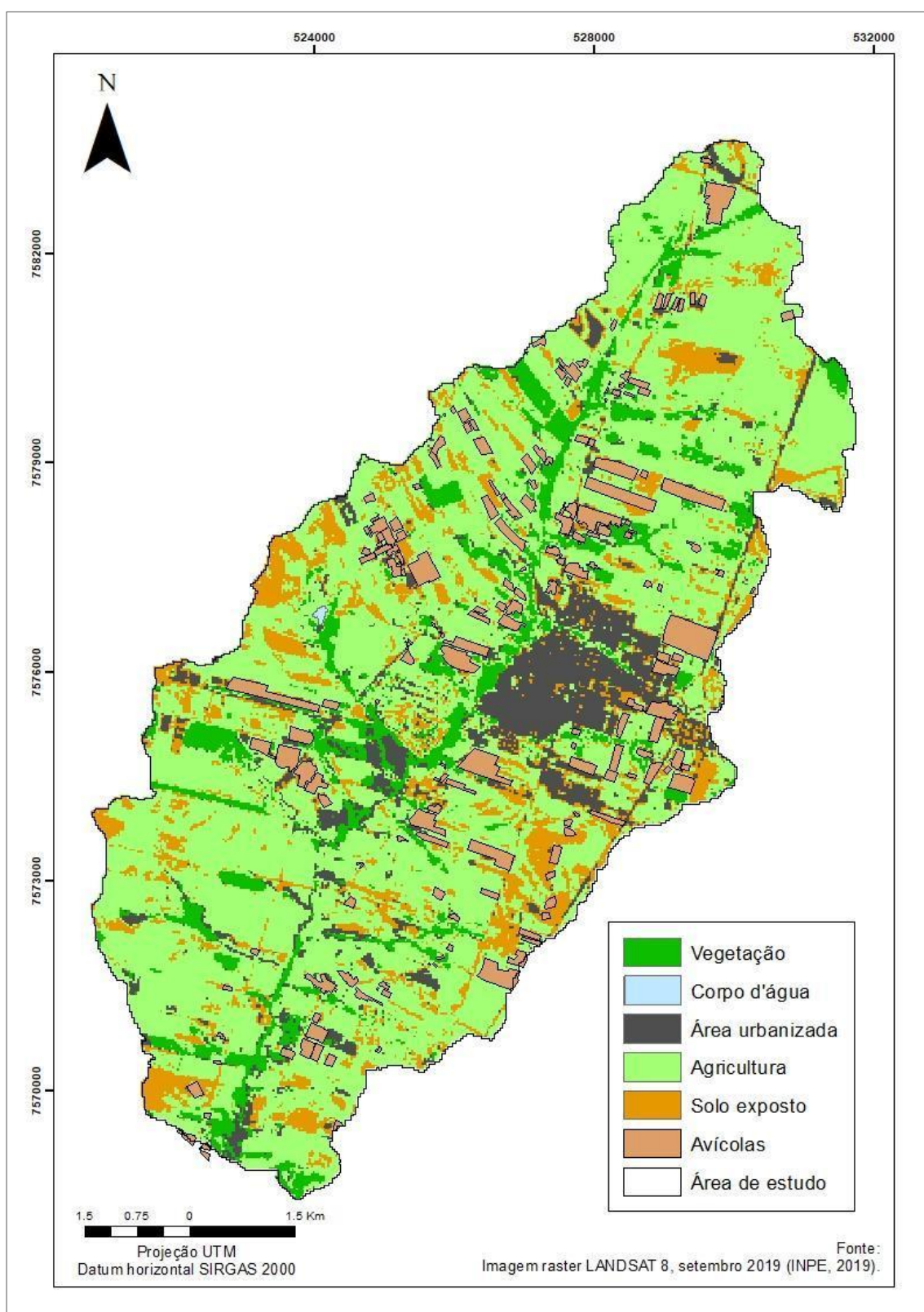
Na BCF é predominante a ocupação agrícola de cultura sazonal ou perene, além disso, a avicultura é a principal atividade econômica da bacia (Figura 40).

A cultura sazonal constitui-se da cana-de-açúcar e milho, amendoim e outros; já a cultura perene é formada principalmente por pomares (lichia, manga, tangerina, amora), gramíneas de pastagens. A cobertura vegetal natural é composta por mata, capoeira e vegetação de várzea (IPT, 2018).

Na área rural da BCF existem fontes difusas como aplicação de fertilizantes químicos e adubos orgânicos e fontes pontuais como fossas sépticas e disposição inadequada de resíduos da avicultura (IPT, 2018).

Atualmente os resíduos sólidos da área urbana da BCF são dispostos em um Consórcio Intermunicipal para Tratamento e Disposição Final do Lixo (COTRALIX) localizado no município de Parapuã. Na área rural não há coleta de resíduos sólidos, sendo estes enterrados no terreno da propriedade. A coleta e o tratamento de esgoto do perímetro urbano correspondem a 100% com 7.000 ligações existentes (ENGFLORA, 2015).

Figura 40 – Uso e ocupação do solo da Bacia do Córrego da Fartura.

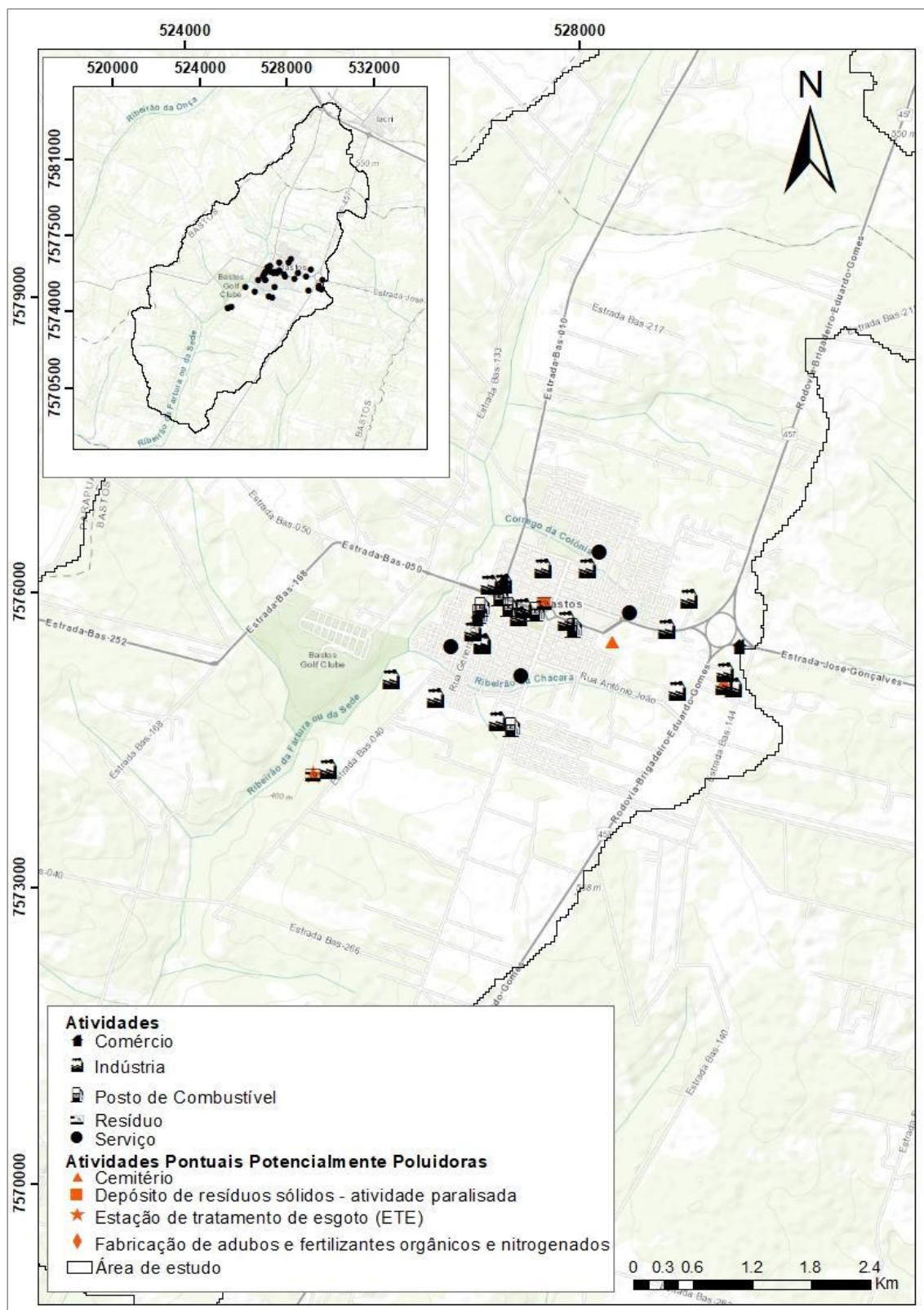


Fonte: Elaborado pela autora.

Na BCF foram identificadas 41 atividades econômicas presentes na área urbana (ou próxima) entre elas estão às indústrias (produtos alimentícios tendo ovo com matéria prima, fabricação de adubos, fabricação de ração para animais), postos de combustíveis, serviços, comércio, mineração e resíduos sólidos (FIGURA 40).

Entre essas atividades econômicas quatro se destacam por apresentarem o contaminante principal é o nitrato. São elas: cemitério que apresenta seu potencial poluidor como reduzido, fábrica de adubos e fertilizantes orgânicos e nitrogenados com potencial poluidor moderado, depósito de resíduos sólidos (atividade paralisada) e estação de tratamento de esgoto (ETE) possuem potencial poluidor elevado, conforme a classificação Iritani; Ezaki (2012). A Figura 36 mostra a distribuição espacial dessas atividades econômicas.

Figura 41 - Localização das atividades econômicas na área urbana da Bacia do Córrego da Fartura.



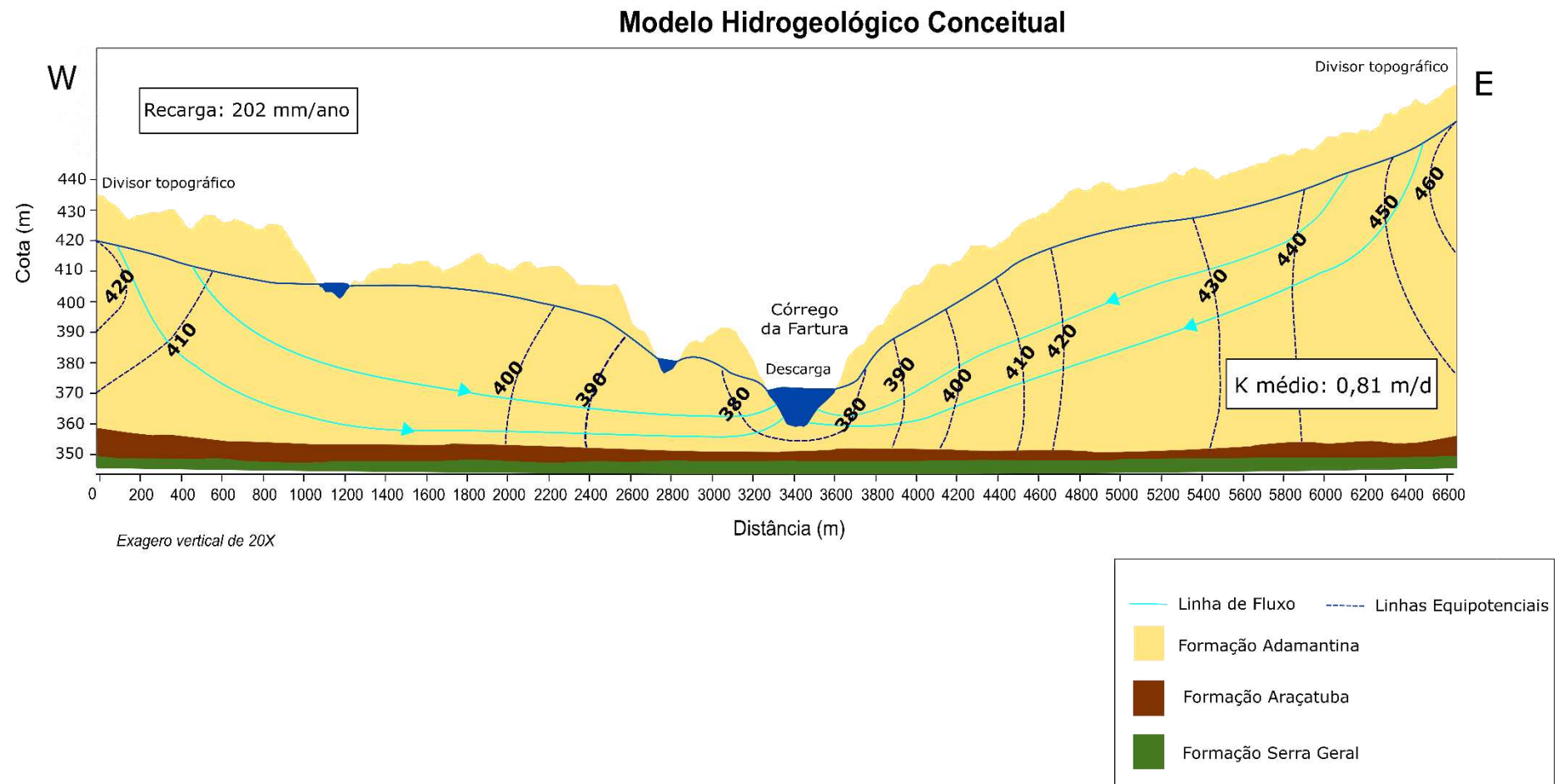
Fonte: Elaborado pela autora.

6.1.8 Síntese do modelo conceitual hidrogeológico elaborado

A partir da compilação e da análise das informações hidroestratigráficas, geológicas, recarga, características do fluxo subterrâneo e resultados dos testes de bombeamento desta pesquisa e dos trabalhos anteriores, torna-se possível propor um modelo conceitual para a área de estudo. Como dito anteriormente o modelo conceitual busca reunir os principais aspectos do sistema hidrogeológico para assim inseri-lo no modelo numérico para que este responda da maneira mais adequada as questões abordadas nesta pesquisa.

As premissas impostas ao modelo conceitual elaborado compreendem que o Formação Adamantina é um aquífero do tipo livre em toda a extensão da bacia do Córrego da Fartura, o material se mostra homogêneo e foi adotada a anisotropia vertical, ou seja, as condutividades hidráulicas K_x e K_y possuem o mesmo valor, já K_z equivale a 10% dos valores de K_x e K_y . A Formação Araçatuba, unidade sotoposta à Formação Adamantina, foi considerada um limite impermeável, devido as suas características litológicas, e assim comporta-se como barreira hidráulica negativa, logo isola as unidades hidroestratigráficas subjacentes e possui condição de fluxo nulo. Nos divisores da bacia foi adotado não-fluxo devido a posição topográfica e a saída da água da BCF ocorre nos cursos d'água. A Figura 42 ilustra de forma esquemática o modelo conceitual.

Figura 42 – Modelo hidrogeológico conceitual.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.2 Modelo Numérico de Fluxo

6.2.1 Delimitação da área do modelo

A definição da área modelada dos modelos numérico e conceitual considerou os divisores topográficos e de água da bacia do Córrego da Fatura, com uma área de 80,88 Km², conforme apresentado na Figura 2.

6.2.2 Discretização da malha

A discretização da área modelada ocorreu em malhas de elementos finitos, gerada automaticamente no programa FEFLOW, com a aplicação do gerador *Triangle*, desenvolvido por Jonathan Richard Shewchuk, com formato prisma triangular.

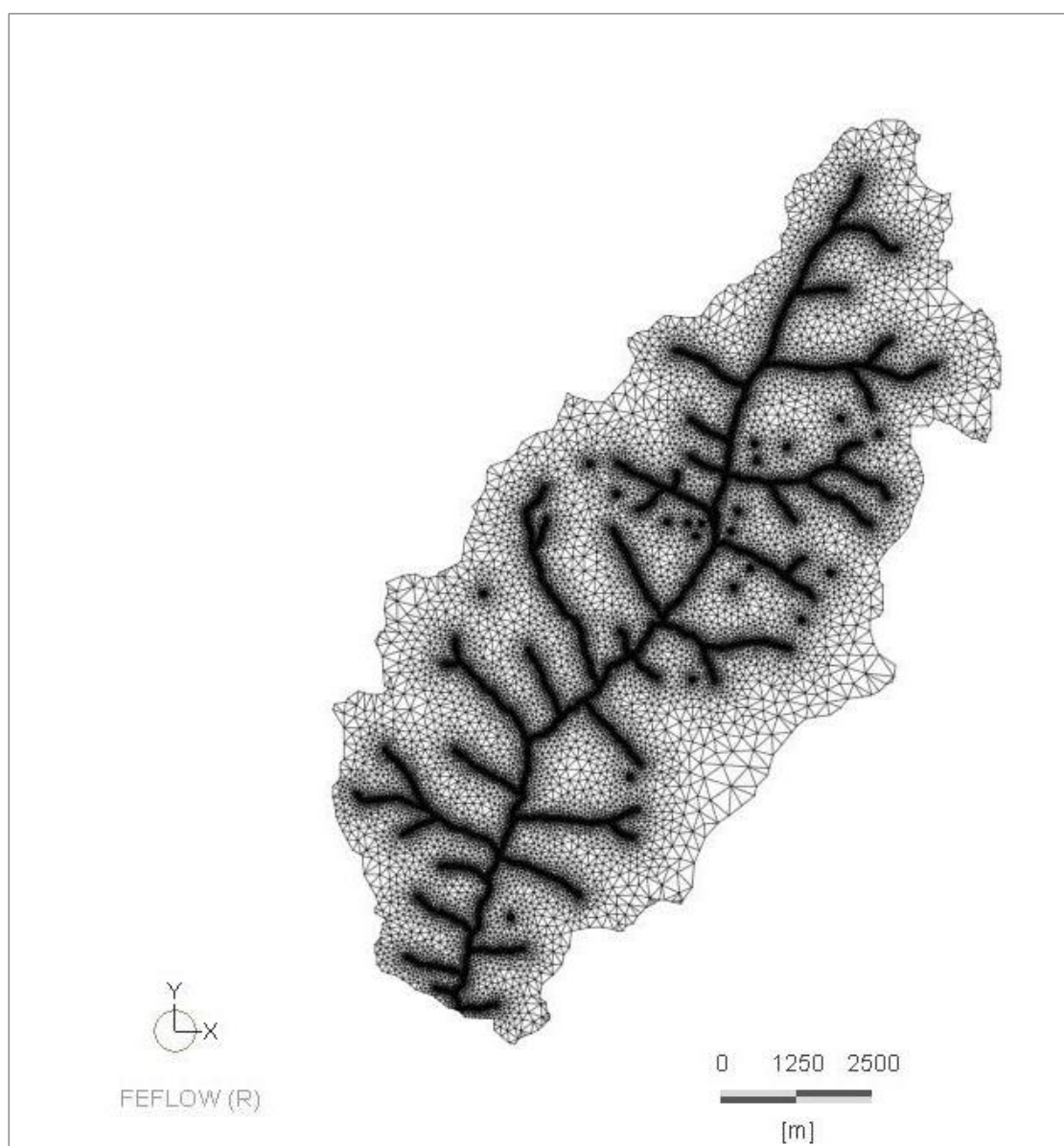
No desenvolvimento da malha utilizaram-se os poços de observação como elementos pontuais e a rede de drenagem da bacia como elementos lineares. A malha de elementos finitos (prisma triangulares) utilizada compõe-se de 897.714 elementos e 524.951 nós (FIGURA 43). O refinamento da malha foi feito no entorno dos poços de observação e ao longo das drenagens.

6.2.3 Geometria da área modelada

A geometria da área modelada foi concebida a partir cotas topográficas extraídas do modelo digital de elevação (MDE) que foram importadas para o FEFLOW em formato *shapefile* e interpoladas gerando a superfície topográfica (relevo) da área de estudo. Dentre os métodos de interpolação existente no aplicativo utilizado, adotou-se o método Distância Inversa, Figura 44.

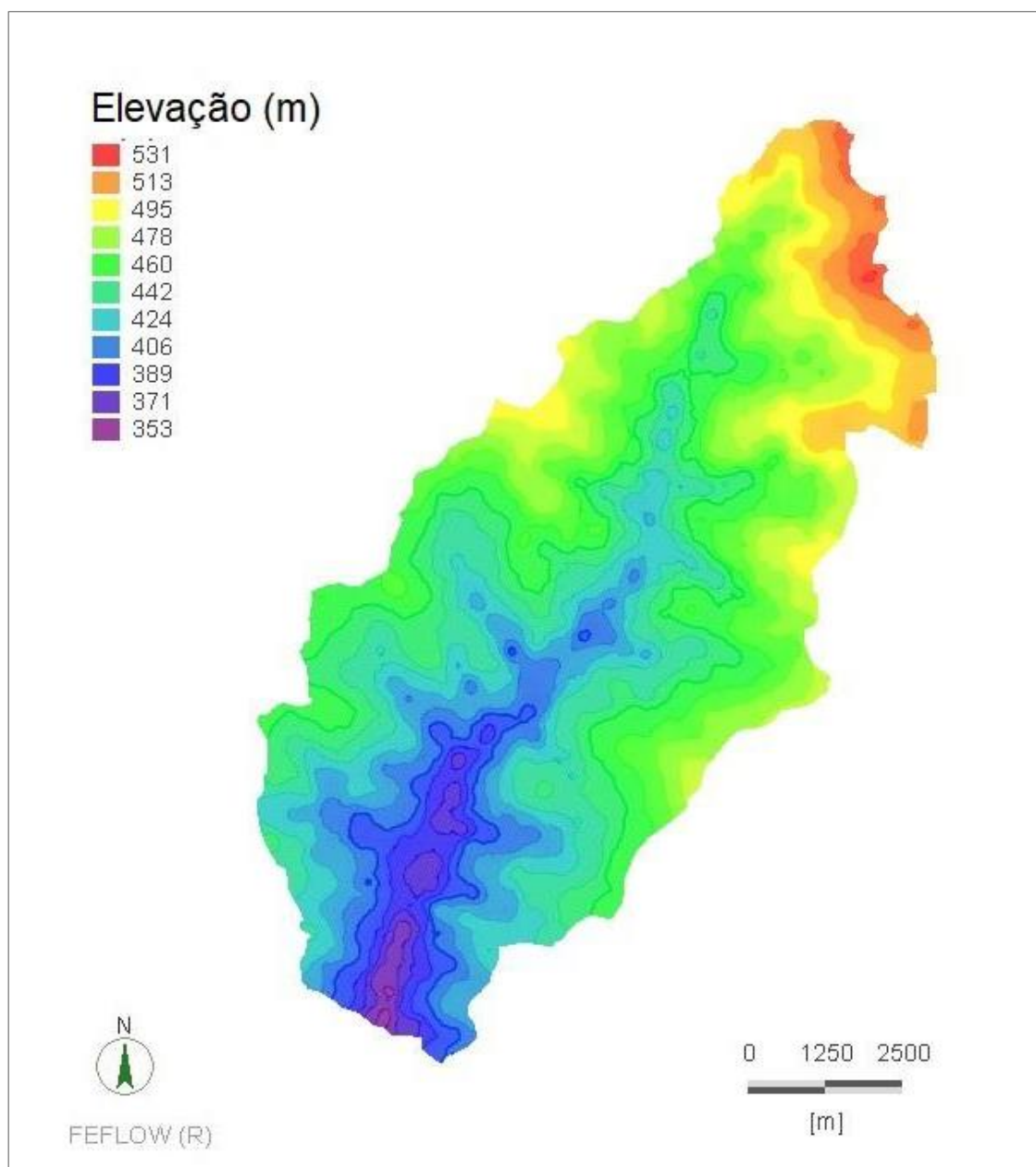
O modelo hidrogeológico introduzido resultou no modelo conceitual estabelecido no item 6.1, constituído por 7 fatias de 25 m entre as fatias, totalizando 6 camadas correspondente ao aquífero livre Adamantina.

Figura 43 – Malha de elementos utilizada na área do domínio.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 44 – Superfície topográfica do topo da área modelada.

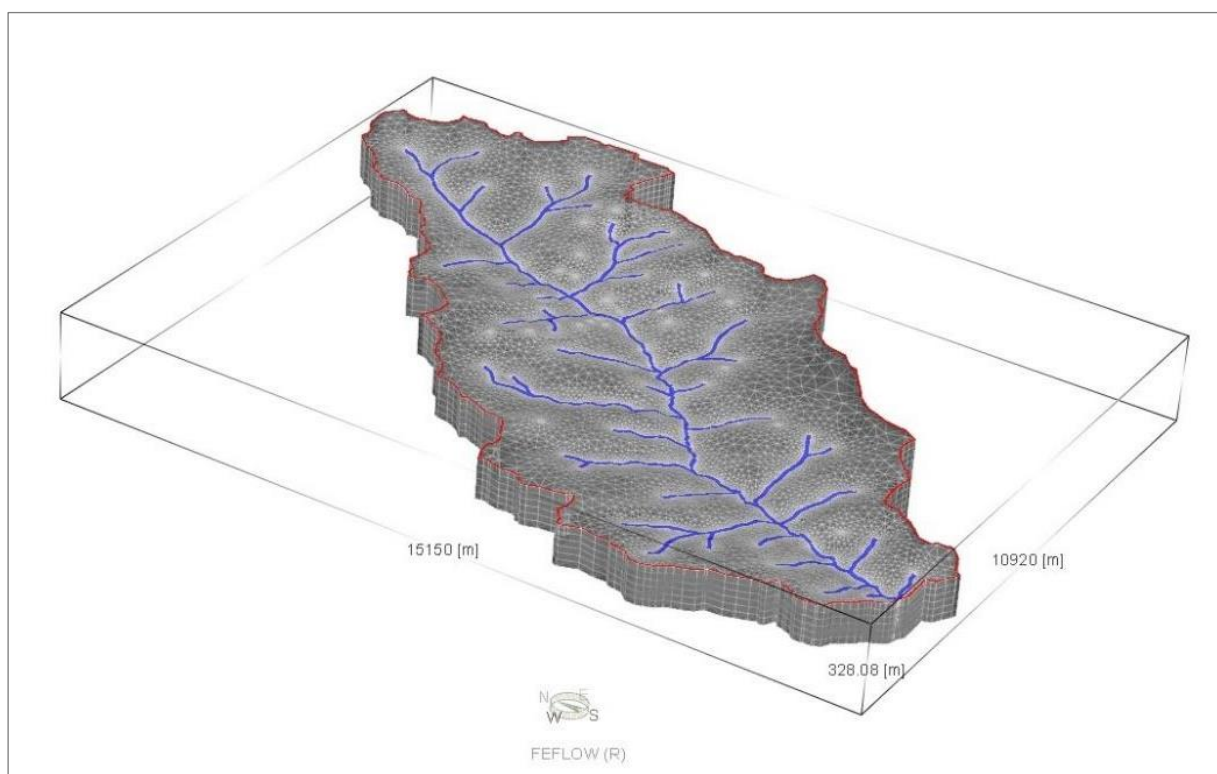


Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.4 Condição de contorno

As condições de contorno adotadas estão condizentes com o proposto no modelo hidrogeológico conceitual, sendo inserida a restrição seepage *face* nos cursos d'água presentes na área de estudo, esta condição assume recarga nula nos locais indicados. Os limites laterais (divisores de água) e a base da área de domínio do modelo são impermeáveis, portanto, atribuídos condição de fluxo nulo, Tipo 2, inserido de forma automática pelo aplicativo (FIGURA 45).

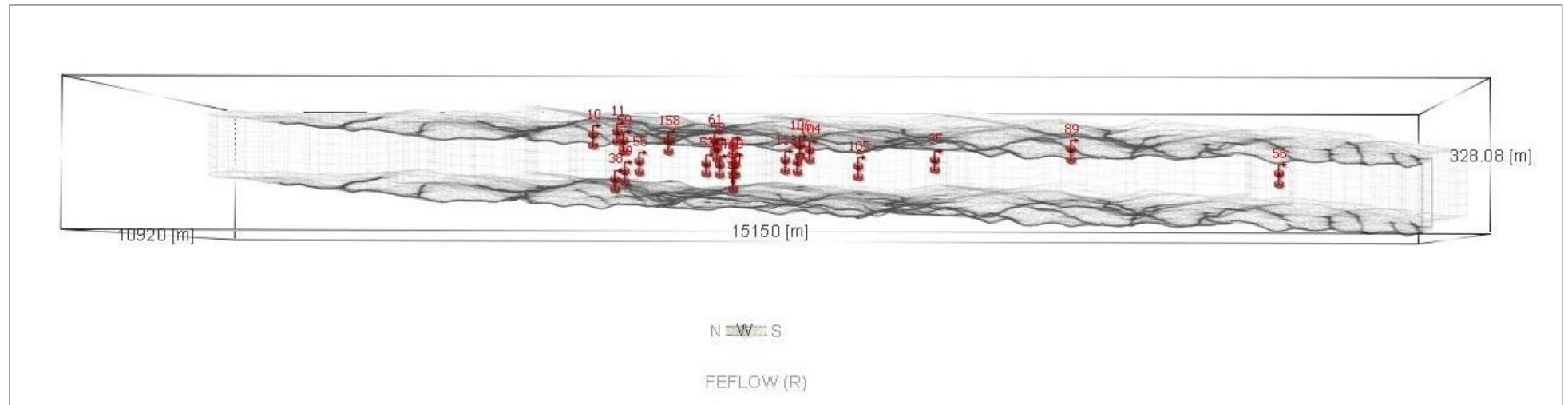
Figura 45 – Representação tridimensional das condições de contorno.



Fonte: Elaborado pela autora.

A condição de contorno do Tipo 4 (*Multilayer Well*) foram inseridas topo e base das seções filtrantes dos poços de observação. As simulações foram realizados em regime estacionário em duas situações: os poços tubulares sem operação das bombas submersas e uma segunda situação os poços em operação, conforme já disposto no item 5.2.15.6. A Figura 46 mostra a distribuição dos 21 poços tubulares, evidenciando assim, a posição dos filtros nas diferentes camadas.

Figura 46 – Representação tridimensional transversal (Norte – Sul) da condição de contorno Tipo 4 .



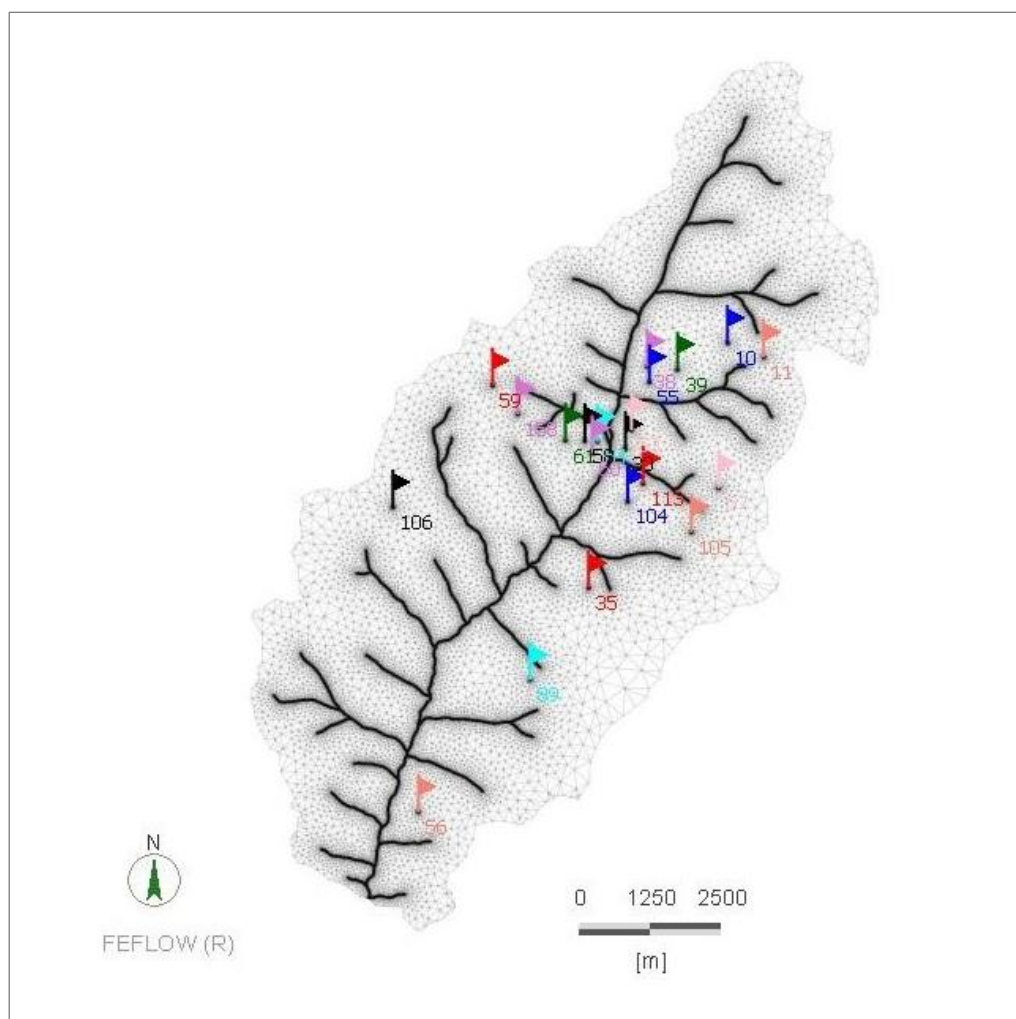
Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.5 Calibração do modelo

6.2.5.1 Carga hidráulica

A correlação da carga hidráulica simulada com os valores das cargas hidráulicas observadas foi critério de calibração do modelo. Para isso, foram utilizados 21 poços de observação com filtros localizados no Aquífero Adamantina (Figura 47).

Figura 47 - Distribuição dos poços de observação na área modelada.



Fonte: Elaborada pela autora.

A calibração do modelo numérico ocorreu em dois momentos: o primeiro com os poços sem bombear o aquífero e o segundo com os poços em funcionamento.

O processo de calibração consistiu em variar o parâmetro condutividade hidráulica, a partir de 0,81 m/d, até obter um valor aceitável entre a carga hidráulica simulada e a carga hidráulica observada e como critério de avaliação da calibração foi

aplicado o erro quadrático médio normalizado (NRMS), conforme descrito no item 5.2.15.7.

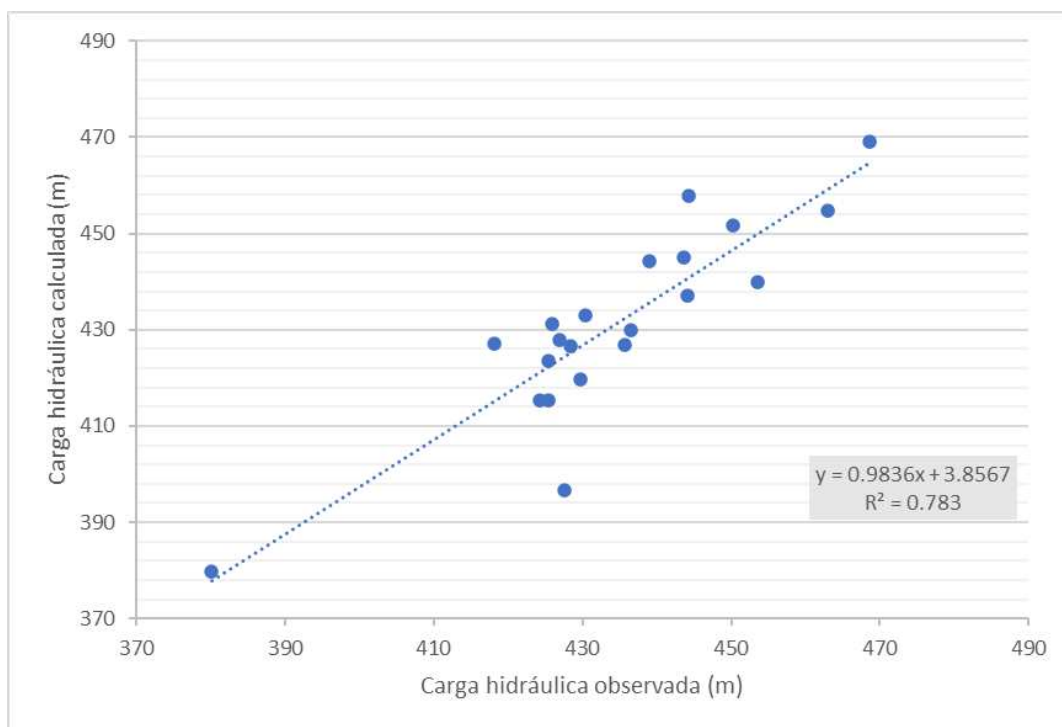
A Tabela 12 apresenta os valores de carga hidráulica calculada e carga hidráulica observada na calibração sem bombeamento e a diferença entre eles. Já a Figura 48 mostra o gráfico de correlação entre os valores.

Tabela 12 – Diferença entre a carga hidráulica calculada e a carga hidráulica observada sem bombeamento.

Poço	Carga Hidráulica Calculada (m)	Carga Hidráulica Observada (m)	Diferença (m)
10	463	455	8
11	469	469	0
30	428	397	31
35	427	428	-1
38	437	430	7
39	453	440	13
53	430	420	10
54	425	415	10
55	436	427	9
56	380	380	0
58	426	431	-5
59	444	458	-13
60	424	415	9
61	439	444	-5
67	450	452	-1
89	418	427	-9
104	425	424	2
105	444	437	7
106	430	433	-3
113	428	427	2
158	444	445	-2

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 48 - Correlação entre os valores da carga hidráulica observada e carga hidráulica calculada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se na Tabela 11 que os valores da carga hidráulica observada em relação a calculada possuem diferença variável entre 2 m e 31 m, o provável motivo seja a diferença topográfica que há área modelada.

Na situação sem bombeamento o processo de calibração atingiu o valor RMS de 9.7, ou seja, uma NRMS de 11%, mesmo ajustando sucessivamente o valor da condutividade hidráulica este foi o melhor resultado alcançado para esta situação. A aplicação de monitoramento do nível d'água e o levantamento topográfico das cotas dos poços permitiram dados mais fidedignos para o modelo.

Para a situação dos poços em funcionamento o processo de calibração atingiu a porcentagem de NRMS esperada, 8,9%, e RMS de 8,8. Observa-se alguns poços, cerca de 10, rebaixamento de 2 e 12 metros. A Tabela 13 apresenta os valores da diferença entre a carga hidráulica observada e a carga hidráulica calculada.

Tabela 13 – Diferença entre a carga hidráulica calculada e a carga hidráulica observada para situação com os poços em funcionamento.

Poço	Carga Hidráulica Calculada (m)	Carga Hidráulica Observada (m)	Diferença (m)
10	458	455	4
11	465	469	-4
30	421	397	25
35	422	428	-6
38	430	430	0
39	446	440	6
53	424	420	4
54	420	415	5
55	429	427	2
56	377	380	-3
58	426	431	-5
59	443	458	-14
60	419	415	3
61	434	444	-10
67	440	452	-12
89	412	427	-16
104	428	424	4
105	434	437	-3
106	423	433	-10
113	423	427	-3
158	443	445	-2

Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.6 Parâmetros hidráulicos

Para as camadas do modelo foi adotado um valor médio para a condutividade dos arenitos da Formação Adamantina de 0,81 m/d, assim foi considerado que a formação geológica como isotrópica nos eixos x e y, no entanto anisotrópica no eixo z devido à disposição da camada ser menor no eixo z, logo, assumiu-se $K_x=K_y=0,1K_z$ (FITTS, 2015; ANDERSON; WOESSNER, 1992). A Tabela 14 traz os valores de condutividade hidráulica para o Aquífero Adamantina obtido em diferentes localidades e a condutividade hidráulica obtida após a calibração do modelo.

Para a recarga da área de estudo foi considerado que toda a superfície topográfica recebe 202 mm/ano.

A porosidade foi considerada o valor de 0,1, indicado para o Aquífero Adamantina conforme indicado na literatura (CARVALHO; HIRATA, 2012).

Tabela 14 – Valores de condutividade hidráulica no Aquífero Adamantina.

Autores	Valores (m/d)		Localidade
	Mínimo	Máximo	
Cagnon (2003)	0,74	6,20	Município de Urânia
Rocha et al. (1982)	0,034	1,00	Estado de São Paulo
Safre; Manzione (2019)	1,75		Município de Águas de Santa Bárbara
Carvalho; Hirata (2012)	1,50		Estado de São Paulo
Simulação	2,75		BCF (Município de Bastos - Iacri)

Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.7 Análise de sensibilidade do modelo

A análise de sensibilidade foi empregada para avaliar a influência dos parâmetros nas cargas hidráulicas em novas simulações com mudanças de 25%, 50%, 75%, 125% e 150% da condutividade hidráulica e recarga.

A Tabela 15 apresenta as sucessivas alterações feitas no modelo e nota-se que a condutividade hidráulica se mostra mais sensível, principalmente com 25%, 50% e 150% deste parâmetro modificado. Já recarga se mostra menos sensível, sendo mais evidente esta sensibilidade para 25% e 150%.

Tabela 15 – Sensibilidade do modelo numérico.

Parâmetro	Porcentagem	Valor modificado	RMS Normalizado
Condutividade hidráulica (m/d)	25	0,6	16,5
	50	1,3	17,1
	75	2,0	12,4
	125	3,4	11,2
	150	4,1	14,1
Recarga (mm/ano)	25	50,7	12,1
	50	101,5	10,2
	75	152,2	11,3
	125	253,7	11,5
	150	304,5	15,0

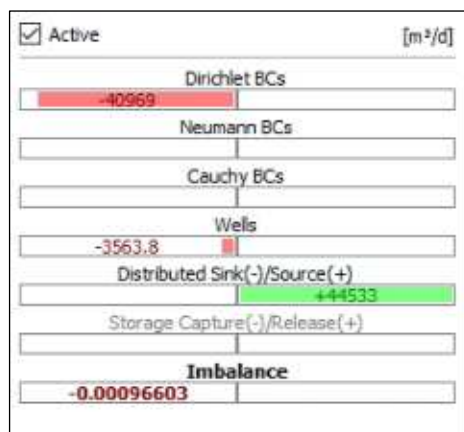
Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.8 Balanço de fluxo

O Balanço de Fluxo no estado estacionário tem como objetivo mostrar que o volume de água que entra no modelo é igual ao volume que sai, conforme prediz a lei de conservação de massa. Logo, o modelo calibrado deve apresentar um balanço de fluxo nulo.

A situação com os poços em funcionamento mostra que o balanço de fluxo calculado equivale a $-0,00096603 \text{ m}^3/\text{d}$ (Figura 49). A recarga ocorre por precipitação sendo a principal responsável pela entrada de água no modelo que corresponde a $44.533 \text{ m}^3/\text{dia}$. A saída de água abastece o fluxo de base das drenagens e o bombeamento dos poços representa a $3.563,8 \text{ m}^3/\text{dia}$, cerca de 8% da recarga.

Figura 49 – Balanço de fluxo da Bacia Córrego da Fartura.



Fonte: Elaborado pela autora.

6.2.9 Potenciometria simulada

A potenciometria gerada na simulação para o aquífero sem o bombeamento mostrou que o fluxo das águas subterrâneas dirige para o centro da BCF e direciona-se para o sul área de estudo, mostrando em conformidade com a potenciometria observada no modelo conceitual (Figuras 50 e 51).

Para o aquífero com os poços em funcionamento nota-se que a direção do fluxo das águas subterrâneas se mantém em direção ao centro da BCF para sul, e ocorre um rebaixamento entre 9 m a 11 m para as cargas hidráulicas mais elevadas (481 m e 469 m). O rebaixamento se concentra na porção norte e central da bacia, onde está o maior de número de atividades econômicas e a ocupação do solo é mais intensa.

Figura 50 – Potenciometria sem bombeamento.

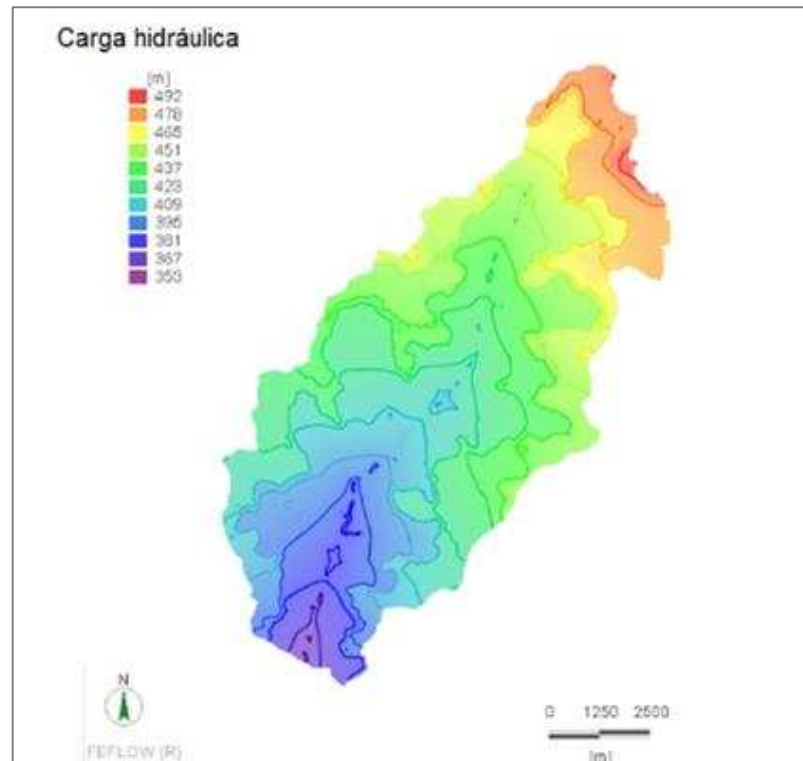
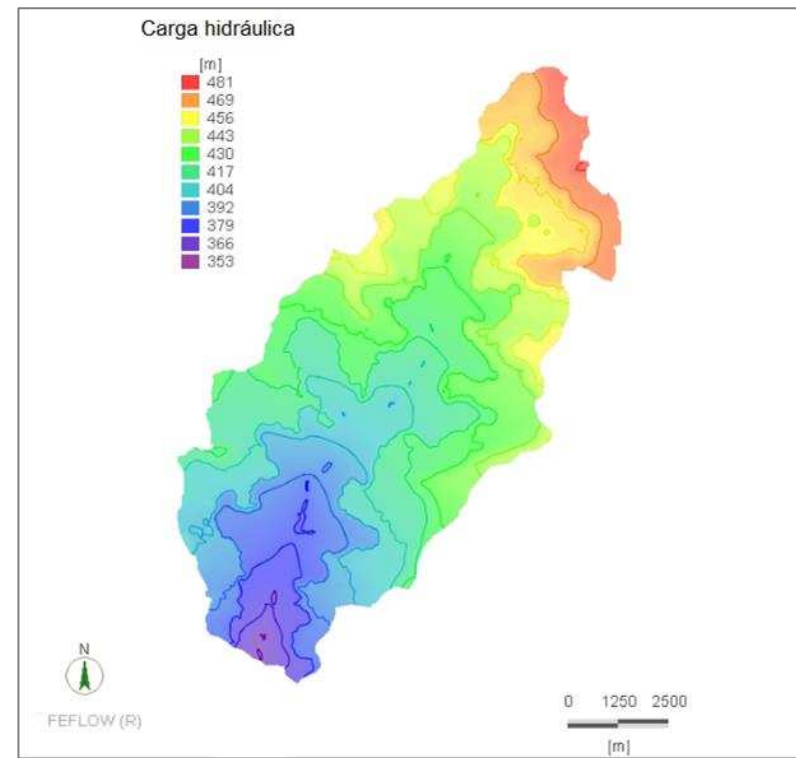


Figura 51 – Potenciometria com bombeamento.



Fonte: Elaborado pela autora

7 CONCLUSÃO

A realização do presente estudo compreendeu em um primeiro momento a elaboração do modelo hidrogeológico conceitual para compreender a circulação das águas subterrâneas na Formação Adamantina na Bacia Córrego da Fartura. Após a compilação das informações e interpretação das características geológicas e parâmetros hidrodinâmicos foi feita, em um segundo momento, a inserção dos dados modelo numérico de fluxo, utilizando assim, o *software* FEFLOW.

A simulação ocorreu em regime estacionário que permitiu observar o comportamento do aquífero em duas situações: a primeira sem bombeamento (estado natural) e a segunda com os poços tubulares em funcionamento.

O modelo hidrogeológico conceitual representa de forma simplificada a dinâmica do fluxo subterrâneo da BCF. O modelo reorganiza de forma tangível as informações que podem ser extraídas de ensaios de bombeamento, laboratoriais, mapeamento geológico, entre outros, para compreender a área de estudo. A elaboração desde estudo contou com dados secundários disponíveis, foi capaz de representar os processos da BCF quando feita a inserção das informações *software* FEFLOW.

Embora existente a restrição de informações a geologia local da BCF foi compreendida e definição o domínio da área modelada identificada. Porém alguns aspectos necessitam de maior investigação como a delimitação do lamito (Formação Araçatuba) em extensão e uma descrição faciológica mais detalhada da Formação Adamantina.

O modelo numérico de fluxo mostra-se uma ferramenta importante para o estudo do movimento das águas subterrâneas, assim como, para a previsão do uso adequado desde recurso hídrico e para configurar um modelo mais consistente torna-se importante monitorar o nível estático dos poços, dados fluviométricos, a medição da vazão do Córrego da Fartura e mapeamento de detalhe das formações geológicas. Logo este modelo deve ser constantemente revisado e atualizado como um processo de melhoria contínua.

O modelo numérico de fluxo, após sucessivas tentativas para a calibração, apresentou NRMS de 11% para a situação sem bombeamento, próximo ao recomendado, e 8,9% para a situação com bombeamento, como a finalidade do estudo

aponta para uma compreensão da área de estudo e entende-se a necessidade de aquisição de dados de campo seja fundamental para uma melhor representação do modelo, logo os resultados são considerados aceitáveis. A análise de sensibilidade mostrou um modelo sensível para os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga. Os mapas potenciométricos obtidos pelo modelo numérico com a situação sem bombeamento e a situação com os poços funcionando revelam um rebaixamento entre 9 m e 11 m, principalmente na porção norte e central da bacia. A potencimetria observada no modelo conceitual foi confirmada com a simulação do fluxo em regime estacionário.

Por fim, deve ser considerado que o modelo numérico de fluxo sempre será uma representação simplificada da realidade, sendo necessário ser revisado e atualizado a fim de ser aplicado de forma confiável a gestão das águas subterrâneas.

8 RECOMENDAÇÕES

Para um refinamento e melhoria do modelo aqui apresentado, recomenda-se: a realização de um monitoramento constante do nível estático dos poços tubulares; uma distribuição espacial mais equilibrada entre os poços de monitoramento; medição da vazão do Córrego da Fartura, para um cálculo mais preciso para a recarga e calibração; medição das cotas diárias para melhor indicação da condição de contorno e ensaio de bombeamento com poços de observação para definir melhor as características do aquífero local, fornecendo assim maior confiabilidade ao modelo ajustado. Além disso, investimento em estudos e pesquisa de mapeamento geológico.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALWATHAF, Y.; MANSOURI, B. E. 2012. Hydrodynamic modeling for groundwater assessment in Sana'a Basin, Yemen. *Hydrogeology Journal*. 20: 1375–1392.
- ANA – Agência Nacional das Águas. 2017. Atlas de Despoluição de Bacias Hidrográficas. *Relatório de esgotamento sanitário*. p.4.
- ANDERSON, M.P; WOESSNER, W.W.; HUNT, R. J. 2015. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. San Diego: Academic Press. p.381.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. 1992. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. San Diego: Academic Press. p.381.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. 2002. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. San Diego: Academic Press. p.381.
- ARENAS, M. C.; PESCADOR, J. P.; GARZÓN, L. D. D.; SAAVEDRA, E. Y.; OBANDO, P. F. A. 2020. Hydrogeological modeling in tropical regions via FeFlow. *Earth Science Research. Journal*. 24: 285-295.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M. 1999. Automated methods for estimating baseflow baseflow and groundwater recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association*. 35: 411-424.
- ARSESP – Agência reguladora de saneamento e energia do estado de São Paulo. 2017. *Relatório analítico*. p. 58.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2014. D5490: Standard guide for comparing groundwater flow model simulations to site-specific information. 2014. United States. p.9.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2016. D 5611: Standard guide for conducting a sensitivity analysis for a groundwater flow model application. United States. p.6.
- BAALOUSHA, H. 2008. *Fundamentals of groundwater modelling*. Groundwater Modelling, Management. Nova Science Publishers, Inc. p.18.
- BAILY, A.; ROCKC, L.; WATSOND, C.J.; FENTONA, O. 2011. Spatial and temporal variations in groundwater nitrate at an intensive dairy farm in south-east Ireland:

Insights from stable isotope data. *Agriculture, Ecosystems and Environment*.144:308 – 318.

BAYANZUL, B.; NAKAMURA, K.; MACHIDA, I.; WATANABE, N.; KOMAI, T. 2019. Construction of a conceptual model for confined groundwater flow in the Gunii Khooloi Basin, Southern Gobi Region, Mongolia. *Hydrogeology Journal*. 27:1581–1596.

BERNICE, A. M. 2010. Evolução da contaminação por nitrato em aquíferos urbanos: estudos de caso em Urânia (SP). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. p. 127.

BERTOLO, R. A. 2001. Hidrodinâmica e hidrogeoquímica da zona não saturada do Aquífero Adamantina em Urânia, SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. p. 231.

BONGANHA, C. A.; GUIGER, N.; PEREIRA, S.Y.; OLIVEIRA, L. C.; RIBEIRO, M. L. 2007. Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. *Revista Analytica*. São Paulo, v. 30, ago/set.

BONTON, A.; BOUCHARD, C.; ROULEAU, A.; RODRIGUEZ, M. J.; THERRIEN, R. 2012. Calibration and validation of an integrated nitrate transport model within a well capture zone. *Journal of Contaminant Hydrology*. 128:1–18.

BURGHOF, S.; GABIRI, G.; STUMPP, C.; CHESNAUX, R.; REICHERT, B. 2018. Development of a hydrogeological conceptual wetland model in the data-scarce north-eastern region of Kilombero Valley, Tanzania. *Hydrogeology Journal*. 26:267–284.

CABRAL, J. J. S. P e DEMÉTRIO, J. G. A. 2008. Aplicação de modelos em Hidrogeologia. In: FEITOSA, F. A. C. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 3ª Edição. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID. p. 687-707.

CARVALHO, A. M. 2014. Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas em São José do Rio Preto, SP. 2014. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. p.172.

CARVALHO, A. M.; HIRATA, R. 2012. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. *Geologia USP*. São Paulo. 12:53-70.

CAGNON F. A. 2003. Origem e hidroquímica do nitrato nas águas subterrâneas do Aquífero Adamantina em Urânia, SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 148.

CÂNDIDO, E. G. S. 2018. Modelagem hidrogeológica aplicada à análise de transporte de contaminantes: estudo prospectivo da propagação de contaminação em aquífero livre poroso. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 153.

CANTER, L. W. 1996. Nitrates in groundwater. Lewis Publishers. p.217

CBH-AP – COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS AGUAPEÍ E PEIXE. *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2020 – Ano Base 2019*. Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí – Peixe, CBH-AP. 2020.

CELLIGOI, A. 2000. Hidrogeologia da Formação Caiuá no Estado do Paraná. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 95.

CETEC – CENTRO TECNOLÓGICO DA FUNDAÇÃO PAULISTA. *Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias dos Rios Aguapeí - Peixe - Relatório Zero*. Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Aguapeí – Peixe, CBH-AP. 1997.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2010. *Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2007 – 2009*. São Paulo. p.166.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2016. *Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2013 – 2015*. São Paulo. p. 311,

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2018. *Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2017*. São Paulo. p.81,

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2019. *Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2016 - 2018*. São Paulo. p. 29.

CHANG, H. K.; STRADIOTO, M. R.; PAULA E SILVA, F. 2012. Hidroquímica do Sistema Aquífero Bauru na região sudoeste do Estado de São Paulo. XVII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. p. 17.

CHEONG, J. Y.; HAMM, S. Y; LEE, J. H.; LEE, K. S.; WOO, N. C. Groundwater nitrate contamination and risk assessment in an agricultural area, South Korea. 2012. *Environ Earth Science*. 66: 1127 – 1136.

CLEARY, R.W. 1991. Hidrologia de Águas Subterrâneas. In: RAMOS *et al.* *Engenharia Hidrológica*. Rio de Janeiro: ABRH e Ed. UFRJ, p. 293-404.

CRUZ, H. D. N. de la. 2014. Modelagem numérica para avaliação do controle das águas na mineração. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. p. 157.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Diretoria de Procedimentos de Outorga e Fiscalização. Instrução Técnica DPO nº 10, atualizada em 25/07/2017. São Paulo: DAEE, 2017. Disponível em: <http://www.daee.sp.gov.br/images/documentos/outorgaefiscalizacao/it_dpo10_captsubterranea.pdf>. Acessado em 03 ago 2020.

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; LEBAC - INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS e LABORATÓRIO DE ESTUDO DE BACIAS. 2013. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Secretaria de Saneamento e Recursos, São Paulo. p. 44.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. *Base cartográfica digital, escala 1:50.000 - Projeto GISAT*. São Paulo: DAEE, 2008.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. UNESP - Universidade Estadual Paulista. 2009. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000. Folhas Dracena e Araçatuba. São Paulo: Convênio DAEE/UNESP, Secretaria de Obras e do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 1984. (Compilação eletrônica Lebac/ IGCE/ Unesp, 2009).

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; IG - INSTITUTO DE GEOLÓGICO; CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo. Coordenação geral: Gerônimo Rocha. Escala 1:1.000.000.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1979. *Estudo de águas subterrâneas, Regiões Administrativas 10 e 11: Presidente Prudente e Marília*. São Paulo: DAEE. v.1 e v.2.

DIERSCH, H. J. 2013. *FEFLOW – Finite element modelling of flow, mass and heat transport*. Springer Verlag NY. p. 996.

- DEVRIES, J. J., SIMMERS, I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*. 10:5-17.
- DHI – WASY GMBH. *Modelagem de águas subterrâneas*. 2018. p. 238.
- DHI. 2017. Feflow 7.1. Introductory Tutorial. Disponível em: https://www.mi.fu-berlin.de/en/math/groups/ag-numerik/dateien_summer_2018/FEFLOW-Introductory-Tutorial.pdf. Acessado em 03 mar 2019.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 1979. *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos*. In: Reunião Técnica de Levantamento de, 10, Rio de Janeiro. Súmula. Rio de Janeiro. p. 83.
- ENGIFLORA - Engenharia e Meio Ambiente. 2015. *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos*. Relatório Final. p.: 255.
- EXNER, M. E.; PEREA-ESTRADA, H; SPALDING, R. F. 2010. Long-Term Response of Groundwater Nitrate Concentrations to Management Regulations in Nebraska's Central Platte Valley. *The Scientific World Journal*. 10: 286 – 297.
- FEITOSA, F. A. C. 2008. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3ª Edição. CPRM: Rio de Janeiro. p. 835.
- FENG, S.; HUO, Z.; KANG, S.; TANG, Z.; WANG, F. 2011. Groundwater simulation using a numerical model under different water resources management scenarios in an arid region of China. *Environ Earth Sci*. 62:961–971
- FERNANDES, L. A. 1992. A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo. p.129.
- FERNANDES, L.A.; COIMBRA, A. M. 1992. Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo. 24: 164-176.
- FERNANDES, L.A. 2004. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), Escala 1:1.000.000. *Boletim Paranaense de Geociências*. 55: 53-66.
- FITTS, C. R. 2015. *Águas subterrâneas*. 2ª Edição. Elsevier: Rio de Janeiro. p.580.
- FOSTER, S. et al. 2006. *Proteção da qualidade da água subterrânea*. Um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial. Washington, D.C. p. 114.

FREITAS, J. L. M. 2015. Avaliação preliminar da contaminação do aquífero Bauru em um município com vocação para avicultura. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru. p.68.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice Hall. p. 604.

GAD, M.I.; KHALAFB, S. 2015. Management of Groundwater Resources in Arid Areas Case Study: North Sinai, Egypt. *Water Resources*. 42, No. 4, pp. 535–552

GIAMBASTIANI, B. M. S.; MCCALLUM, A. M.; ANDERSEN, M. S.; KELLY, B. F. J.; ACWORTH, R. I. 2012. Understanding groundwater processes by representing aquifer heterogeneity in the Maules Creek Catchment, Namoi Valley (New South Wales, Australia). *Hydrogeology Journal*. 20: 1027–1044.

GONÇALVES, R. D. 2016. Modelagem numérica e hidrogeológica do Aquífero Rio Claro. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. p. 107.

HOUNSLOW, A.W. 1995. *Water Quality Data: Analysis and Interpretation*. CRC Press LLC, Lewis Publishers, Boca Raton.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Carta topográfica: folha Osvaldo Cruz. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro, 1974. SF-22-X-C-IV-3.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Carta topográfica: folha Tupã. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro, 1974. SF-22-X-C-IV-4.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Carta topográfica: folha Rancharia. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro, 1973. SF-22-X-A-I-1.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Carta topográfica: folha Quatá. Escala 1:50.000. Rio de Janeiro, 1974. SF-22-Z-A-I-2.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000. São Paulo: IPT, 1981,

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala 1:500.000. São Paulo: IPT, 1981,

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 2018. *Estudo de problemas que podem levar a restrição do uso das águas subterrâneas nas UGRHIs 20 e 21 (rios Aguapeí e Peixe)*

– *Produto 02: Avaliação da contaminação por nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, na área rural do município de Bastos (SP)*. IPT, São Paulo. p.166.

IRITANI, M. A. 1998. Modelação matemática tridimensional para proteção das captações de água subterrânea. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 210.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. 2014. *Roteiro orientativo para delimitação de área de proteção de poço*. São Paulo: Instituto Geológico. 60 p.

KOEFENDER, A.; MARCUZZO, F. F. N. Análise de diferentes MDE no cálculo de área de drenagem e perímetro de Estações F e FD na Sub-Bacia 76. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 21. 2015, Brasília. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2015. Artigos, p. 1-8. CD-ROM. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/0B6T7sNg_aVgOZIN4UF9WdVFHSWc/view?usp=sharing. Acessado em 05 mai 2020.

KOURAKOS, G.; HARTE, T. 2014. Vectorized simulation of groundwater flow and streamline transport. *Environmental Modelling & Aplicativo*. 52:207-231.

LI, J.; MAO, X.; LI, M. 2017. Modeling hydrological processes in oasis of Heihe River Basin by landscape unit-based conceptual models integrated with FEFLOW and GIS. *Agricultural Water Management*. 179: 338–351.

LIAZI, A.; CONEJO, J. L.; PALOS, J. C. F.; CINTRA, P. S. 1988. Regionalização Hidrológica no Estado de São Paulo. São Paulo: Revista Águas e Energia Elétrica - DAEE, ano 5, nº 14.

LIN, L.; LIN, H. 2019. Determination of groundwater sustainable yield using a numerical modelling approach for the Table Mountain Group sandstone aquifer, Rawsonville, South Africa. *Hydrogeology Journal*. 27:841–855.

LIU, S.; TUCKER, P.; MANSELL, M. 2010. A conceptual nitrate transport model and its application at different scales. *Environ Model Assess*. 15:251–259.

LUCENA, L. R.; ROSA FILHO, R. F; BITTENCOURT, A. V. 2004. A potenciometria do Aquífero Barreiras no Setor Oriental da Bacia do Rio Pirangi – RN e considerações sobre a relação com mananciais superficiais. *Revista de Águas Subterrâneas*. 18:19-28.

- MACEDO, L. G. M; SILVA, M. V. A.; VITORIO, J. A.; ABUD, M. C. 2014. Geoestatística aplicada a Hidrogeologia para confecção de mapas potenciométricos. XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. p. 12.
- MANZIONE, R. L. 2015. Águas Subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma Visão Multidisciplinar. Paco Editorial. p. 386.
- MALUTA, M.C. 2014. Estimativa da recarga natural do Aquífero Rio Claro: uma abordagem da Regionalização Hidrológica através da vazão de permanência. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. p. 73.
- MENDONÇA, J. L. G.; GUTIERRE, T. M. C. 2000. O Potencial Hidrogeológico no Estado de São Paulo. I Congresso Internacional de Água Subterrânea. p.12.
- MODESTO, R. P.; BARBOUR, E. D. A.; LEMOS, M. M. G.; TOFFOLI, F. F.; VALE, F.R. C. do.; VALE, F. R. C. do.; RUBY, E. C.; OHBA, M. S.; CAMARGO, G. G. de; MORENO, F. N.; RODRIGUES, P.F. 2010. Concentrações de nitrato nas águas subterrâneas do Aquífero Bauru – Estado de São Paulo. XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. p. 12.
- MODESTO, R. P., DIAS, C. L., TOFFOLI, F. F.; VALE, F.R. C. do. 2009. Evolução das concentrações de nitrato no Sistema Aquífero Bauru no estado de São Paulo – 1992 a 2007. I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. p. 11.
- MONTANHEIRO, F. 2014. Contaminação por nitrato no Aquífero Adamantina: o caso do município de Monte Azul Paulista - SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. p. 93.
- MOURA, C. C. 2014. Ocorrência de nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru em áreas rurais. 2014. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. p.104.
- MS – MINISTÉRIO DA SAÚDE. Portaria Nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acessado em: 05 mai. 2020.

OLIVEIRA, J. N. 2002. Ferramental de gestão de águas subterrâneas para a cidade de São José do Rio Preto, SP. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. p. 153.

PAULA E SILVA F.; CAVAGUTI N. 1994. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na Cidade de Bauru, SP. *Revista Geociências*. 13 (1): 83-99.

PAULA e SILVA, F. 2003. Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. p. 166.

PAULA e SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M. R. 2005. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, 19: 19-36.

PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M. R. 2009. Sedimentation of the Cretaceous Bauru Group in São Paulo, Paraná Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 28:25-39.

PRANDI, E. 2010. Gestão integrada das águas do Sistema Aquífero Bauru nas bacias hidrográficas dos rios Aguapeí e Peixe/SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. p. 145.

ROCHA, G. A.; BERTACHINI, C. A.; CAMPOS, H. C.N.S.; CAIXETA, J. B. 1982. Tentativa de zoneamento das características hidráulicas e hidroquímicas do Aquífero Bauru. Encontro de Geologia e Hidrogeologia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo. p. 37-57.

RODRIGUES, P. F. 2011. Concentrações de nitrato nas águas do Aquífero Bauru – estado de São Paulo. XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. p. 12.

ROSA FILHO, E. F. 1993. Caracterização de depleção de um aquífero através do coeficiente de descarga, α , de Maillet. *Boletim Paranaense de Geociências*. 41:125-144.

ROSSI, M. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. Escala 1: 750.000. São Paulo, 2017.

SAFRE, A. L. DOS S.; MANZIONE, R. L. 2019. Simulação numérica do fluxo das águas subterrâneas na Estação Ecológica de Santa Bárbara – SP. *Ciência Geográfica*. 23:359-374.

- SAHOO, S.; JHA, M.K. 2017. Numerical groundwater-flow modeling to evaluate potential effects of pumping and recharge: implications for sustainable groundwater management in the Mahanadi delta region, India. *Hydrogeology Journal*. 25:2489–2511.
- SÃO PAULO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Câmara Técnica de Águas Subterrâneas. 2019. Nitrato nas águas subterrâneas: desafios frente ao panorama atual. SIMA. São Paulo. p.128.
- SÃO PAULO. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. 2018. Situação dos recursos hídricos no estado de São Paulo 2016. p. 200.
- SÃO PAULO. Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. 2011. Situação dos recursos hídricos no estado de São Paulo 2009. p. 210.
- SEADE – FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. Portal de Estatísticas do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://www.seade.gov.br/> Acessado em: 06.mar.2021.
- SEFELNASR, A.; GOSSEL, W.; WYCISK, P. 2014. Three-dimensional groundwater flow modeling approach for the groundwater management options for the Dakhla oasis, Western Desert, Egypt. *Environ Earth Sci*. 2: 1227-1241.
- SETZER, J. 1966. Atlas climático e ecológico do estado de São Paulo. São Paulo. Comissão Interestadual da Bacia do Paraná – Uruguai, CESP.
- SEYF-LAYE, A-S. M.; MINGZHU, L.; DJANÉYÉ-BOUINDJOU, G.; FEI, L.; LYUTSIYA, K.; MOCTAR, B. L.; HONGHAN, C. 2012. Groundwater flow and contaminant transport modeling applications in urban area: scopes and limitations. *Environ Science Pollution Research*. 19:1981-1993.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M.B.; FÚLFARO, V. J.; AMARAL, G.; SUGUIO, K.; COIMBRA, A. M.; SOBREIRO NETO, A. F.; GIANCURSI, F.; CORREA, W. A. G.; CASTRO, C. G. J. 1979. Geologia da região sudoeste do estado de São Paulo. II *Simpósio Regional de Geologia. Boletim de Resumos*. p. 307-319.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. 1980. Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*. São Paulo, 10:177-185.
- SILVA, F.P.; KIANG, C.H.; CAETANO-CHANG, M.R. 2005. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, 19:19-36.

- STRADIOTO, M. R.; TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K. 2019. Nitrato em águas subterrâneas do Estado de São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*. 40:1-12.
- TAVARES, T.; VARNIER, C.; BEVILACQUA, R.; CORRÊA, N.; FACCINI, L. G.; CARVALHO, A. M. DE; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; IRITANI, M. A.; ODA, G.; FERREIRA, L. M. R.; PRANDI, E.; MODAELLI, S. 2016. Caracterização hidrogeológica e hidroquímica do Sistema Aquífero Bauru no município de Bastos (SP). XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. p.20.
- TOLEDO, P. H. O. 2016. Modelagem de pluma de contaminação de nitrato em aquífero urbano considerando os efeitos da sazonalidade do clima em parte da Região Metropolitana de Maceió – AL. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió. p.72.
- TUCCI, C. E. M., CABRAL, J. J. da S. P. 2003. *Qualidade da Água Subterrânea – Documento Final*. CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Recursos Hídricos, Prospecção Tecnológica. Anexo II-b. p.52.
- UCCI, M. S. 2015. Subsídios para o manejo do Sistema Aquífero Guarani em São José do Rio Preto (SP). Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. p.121.
- URRUTIA, J.; JÓDAR, J.; MEDINA, A.; HERRERA, C.; CHONG, G.; URQUETA, H.; LUQUE, J. A. 2018. Hydrogeology and sustainable future groundwater abstraction from the Agua Verde aquifer in the Atacama Desert, northern Chile. *Hydrogeology Journal*. 26:1989–2007.
- USEPA - US Environmental Protection Agency. 2006. Nitrates and nitrites TEACH chemical summary. Toxicity and exposure assessment for Children's Health. Disponível em: Acessado em 24.mar.2021.
- VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; VIOTTI, M.; ODA, G. H.; FERREIRA, L. M. R. 2010. Nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP). *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo. 31:1-21.
- WHEELER, D. C.; NOLAN, B. T.; FLORY, A. R.; DELLAVALLE, C.T.; WARDD, M.H. 2015. Modeling groundwater nitrate concentrations in private wells in Iowa. *Science of the Total Environment*. 536: 481– 488.

WICK, K.; HEUMESSER, C.; SCHMID, E. 2012. Groundwater nitrate contamination: Factors and indicators. *Journal of Environmental Management*. 111:178 - 186.

WMO – World Meteorological Organization. 2012. Technical material for water resources assessment. Chair: Publications Board. p. 122.

WOLFF, W. 2013. Avaliação e proposta de regionalização hidrológica do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. p. 113.

ZANETTI, N. 2012. Estimativa na vulnerabilidade natural do Aquífero livre do município de Rio Claro, SP. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. p. 110.

ZHAI, Y.; LEI, Y.; WU, J.; TENG, Y.; WANG, J.; ZHAO, X.; PAN, X. 2017. Does the groundwater nitrate pollution in China pose a risk to human health? A critical review of published data. *Environ Sci Pollution Research*. 24:3640–3653.