

ANDERSON LUIZ DOS SANTOS SAFRE

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA
ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE SANTA BARBÁRA/SP**

Botucatu

2018

ANDERSON LUIZ DOS SANTOS SAFRE

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA
ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE SANTA BARBÁRA/SP**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Rodrigo Lilla Manzione

Botucatu

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

S128s Safre, Anderson Luiz dos Santos, 1992-
Simulação numérica do fluxo das águas subterrâneas na Estação Ecológica de Santa Bárbara/SP / Anderson Luiz dos Santos Safre. - Botucatu: [s.n.], 2018
104 p.: fots. color., ils. color., grafos., tabs.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Rodrigo Lilla Manzione
Inclui bibliografia

1. Águas subterrâneas. 2. Modelos hidrológicos. 3. Estações de água - Santa Bárbara/SP. I. Manzione, Rodrigo Lilla. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**“SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRANEAS NA
TÍTULO: ESTAÇÃO ECOLÓGICA DE SANTA BÁRBARA/SP.”**

AUTOR: ANDERSON LUIZ DOS SANTOS SAFRE

ORIENTADOR: RODRIGO LILLA MANZIONE

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE
Coordenadoria de Curso de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP
- Tupã/SP

Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu

PROF. DR. PAULO HENRIQUE FERREIRA GALVÃO
GEOLOGIA / UNIVERSIDADE DE OURO PRETO - UFOP

Botucatu, 11 de maio de 2018.

AGRADECIMENTOS

A minha família pelo apoio durante todos esses anos, especialmente a minha tia Maria Aparecida, minha mãe Neusa, meu pai Luiz Carlos, minha irmã Julia e meu irmão Lucca.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Lilla Manzione, pela orientação, ensinamentos e paciência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida.

A Faculdade de Ciências Agrômicas da Unesp de Botucatu, pelas disciplinas oferecidas e as relações de amizade com os colegas discentes.

Aos amigos músicos que fizeram a minha estadia em Botucatu a melhor possível.

Que sejamos sempre parceiros, pois em relação ao conhecimento, nunca se trata de competir e sim de construir.

RESUMO

Os usos de técnicas de modelagem em águas subterrâneas vêm sendo amplamente utilizado para entender a variabilidade e as incertezas associadas às condições hidrodinâmicas dos aquíferos. Os modelos numéricos de fluxo das águas subterrâneas são utilizados para representar a distribuição da carga hidráulica, bem como a velocidade e volume de escoamento da água no aquífero. O Estado de São Paulo possui algumas unidades de conservação de proteção integral, chamadas de Estações Ecológicas. Na região hidrográfica do Médio Paranapanema (UGRHI-17), destaca-se a Estação Ecológica de Santa Barbara (EEcSB), localizada sob uma transição do Sistema Aquífero Bauru (SAB) e o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG). A principal atividade econômica na região é a agricultura, onde as águas subterrâneas e superficial são captadas para a irrigação. A demanda excessiva pode ameaçar os recursos hídricos e os ecossistemas da região. Desse modo, foi analisado nesse estudo qual o papel da EEcSB como área de garantia de recarga, utilizando a modelagem do fluxo das águas subterrâneas a partir da plataforma FREEWAT, que utiliza o código MODFLOW de diferenças finitas para simulação numérica. Gerou-se uma camada de espessura variada, representando o SAB. A discretização horizontal foi de 7.789 células ativas, com extensões de 100 m x 100 m. Foram utilizados 23 poços de observação, distribuídos por entre as microbacias da EEcSB, para calibração do modelo. A recarga foi dividida em duas zonas para representar a EEcSB ou outros usos da terra no entorno. Os valores variaram entre 15% de recarga da precipitação média. As duas formações do SAB contidas na EEcSB (Adamantina e Marília) foram representadas por zonas com diferentes condutividades hidráulicas, a primeira com 1,75 m/d e a segunda com 0,9 m/d. A análise de sensibilidade foi realizada automaticamente pelo módulo UCODE_2014 e demonstrou que os parâmetros com maior sensibilidade foram a condutividade hidráulica na zona 1 e a recarga. A calibração teve um erro médio quadrático residual de 0,52 m. O valor total de afluxo simulado pelo modelo em regime permanente é de 66.893,882 m³/d, onde 59.079 m³/d correspondem ao volume escoado pelos drenos, e 7.813 m³/d ao valor de saída pela evapotranspiração. Foram observados três padrões principais de fluxo, com um divisor de águas subterrâneas no centro do domínio simulado. Um padrão de fluxo possui sentido Oeste em direção ao Rio Capivari, apresentando segmentações nas direções de fluxo próximas aos córregos afluentes (Divisa, Santana, Guarantã e Boi). Foram simulados dois cenários, o primeiro com a remoção de 50% da área e o segundo com remoção total da EEcSB. O primeiro cenário apresentou redução de 53,6% no volume da recarga e 47,5% no volume das drenagens, com quedas de até 11m no nível freático. O segundo cenário apresentou uma redução de 61,68% na recarga e de 77,79% na vazão das drenagens com rebaixamentos de até 14m no nível freático.

Palavras-chave: FREEWAT. MODFLOW. Fluxo Subterrâneo. Sistema Aquífero Bauru.

ABSTRACT

The uses of groundwater modeling techniques have been widely applied to understand the variability and uncertainties associated with the hydrodynamic conditions of aquifers. Numerical groundwater models are used to represent the hydraulic head distribution, as well as the velocity and volumetric flow. The São Paulo State has some Conservation Units of integral protection, called Ecological Stations. In the Médio Paranapanema Hydrographic region (UGRHI-17), stands out the Santa Bárbara Ecological Station (EEcSB), located under a transition from the Bauru Aquifer System (BAS) and the Serra Geral Aquifer System (SGAS). The main economic activity in the region is agriculture, where the groundwater and surface water are extracted for irrigation. The excessive demand of water threatens the region's water resources and ecosystems. Thus, in this study, the role of EEcSB as a recharge guarantee area, was analyzed through groundwater flow modeling through the FREEWAT platform, that uses the MODFLOW finite difference code for numerical approximation. One layer of varied thickness, representing the BAS was generated. The horizontal discretization was made of 7,789 active cells, with 100 m x 100 m extension. Twenty three observation wells were used, distributed among EEcSB micro-basins for calibration. The recharge was divided in two zones, to represent the EEcSB and the other land uses in the environment. Recharge values varied around 15% of average rainfall. The two BAS formations (Adamantina and Marília) at EEcSB were represented by two zones with different hydraulic conductivity, the first with 1.75 m.d^{-1} , and the second with 0.9 m.d^{-1} . The sensitivity analysis was performed automatically by UCODE_2014 module and showed that the parameters with the highest sensitivity were the hydraulic conductivity at zone 1 and the recharge. The calibration had a mean square residual error of 0.52 m. The total value of simulated inflow by the steady state model is $66,893,882 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ where outflow was $59,079 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ by the leakage into the drains, and $7,813 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$ by evapotranspiration. Three main flow patterns were observed, with a groundwater divide at the center of the simulated domain. A flow pattern runs westward toward the Capivari Rver, showing segmentations in the flow directions near the tributaries (Divisa, Santana, Guarantã and Boi). Two scenarios were simulated, the first with the removal of 50% of the area and the second one with total removal of the EEcSB. The first scenario presented a reduction of 53.6% in the recharge volume and 47.5% in the drainage volume, with decreases up to 11 m in the water table. The second scenario presented a reduction of 61.685 in recharge and 77.79% n drainage flow with decreases up to 14 m in the water table.

Keywords: Freewat. MODFLOW. Groundwater flow. Bauru Aquifer System.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Unidades de conservação de proteção integral no MP	27
Figura 2 - Modelo Hidrogeológico Conceitual do Aquífero Bauru	29
Figura 3 - Principais unidades aquíferas aflorantes na UGRHI – 17.....	30
Figura 4 - Piezômetro medindo carga total (h), carga de elevação (z) e carga de pressão (hp)	33
Figura 5 - Volume Elementar Representativo (VER)	35
Figura 6 - Ilustração gráfica da distribuição espacial de parâmetros	38
Figura 7 - Representação por diferenças finitas e elementos finitos de um aquífero.....	40
Figura 8 - Fluxograma de aplicação de Modelos Matemáticos.....	41
Figura 9 - Condição de contorno de carga especificada	44
Figura 10 - Condições de contorno mistas.....	45
Figura 11 - Condição de contorno de fluxo especificado.....	45
Figura 12 - Condição de contorno de fluxo dependente da carga	46
Figura 13 - a. Grid de diferenças finitas com nó centrado em bloco. b. Grid de diferenças finitas com nó centrado em malha	47
Figura 14 - a. Grid de diferenças finitas. b. Notação computacional para o grid de diferenças finitas	48
Figura 15 - Localização da Estação Ecológica de Santa Barbara	51
Figura 16 - Geologia da região da Estação Ecológica de Santa Barbara	52
Figura 17 - Mapa Pedológico da região da Estação Ecológica de Santa Barbara.....	53
Figura 18 - Mapa Hipsométrico da Estação Ecológica de Santa Barbara	55
Figura 19 - Modelo Tridimensional de Elevação da EEcSB.	55
Figura 20 - Rede de drenagem da Estação Ecológica de Santa Barbara.....	57
Figura 21 - Localização dos poços de monitoramento na Estação Ecológica de Santa Barbara	59
Figura 22 - Medidor automático de nível Solinst modelo 102.....	60
Figura 23 - Mapa Potenciométrico da Estação Ecológica de Santa Barbara em 31/12/201561	
Figura 24 - Modelo hidrogeológico conceitual inicial	63
Figura 25 - Localização da área simulada na Estação Ecológica de Santa Barbara	65
Figura 26 - Distribuição inicial dos valores de condutividade hidráulica na Estação Ecológica de Santa Barbara.....	66
Figura 27 - Localização das condições de contorno utilizadas na Estação Ecológica de Santa Barbara.....	67
Figura 28 - Comportamento da ET em função da carga no aquífero.....	69
Figura 29 - Opções para aplicação do módulo RCH	70
Figura 30 - Distribuição espacial da recarga no domínio simulado.....	71
Figura 31 - Comportamento do módulo dreno em função da carga no aquífero.....	72
Figura 32 - Representações do módulo dreno	73
Figura 33 - Mapa Potenciométrico simulado pelo modelo de fluxo em regime permanente na EEcSB	81
Figura 34 - Localização dos seções verticais N-S e L-O na EEcSB.....	82
Figura 35 – Seção vertical com direção Norte-Sul na EEcSB	83
Figura 36 - Seção vertical com direção Leste-Oeste na EEcSB.....	83
Figura 37 - Distribuição espacial da recarga no primeiro cenário	86
Figura 38 - Mapa potenciométrico gerado pelo modelo no primeiro cenário	89
Figura 39 – Diferença entre as cargas hidráulicas calculadas pela simulação	90

Figura 40 - Distribuição espacial da recarga no segundo cenário	91
Figura 41 - Mapa potenciométrico gerado pelo modelo no segundo cenário.....	94
Figura 42 - Diferença entre as cargas hidráulicas calculadas pela simulação com e sem a EEcSB.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades de Conservação no MP.....	25
Tabela 2 - Resultados da comparação entre os valores observados e simulados pelo modelo	76
Tabela 3 - Resultados do processo de calibração do modelo de fluxo subterrâneo	78
Tabela 4 - Balanço hídrico simulado pelo modelo em regime permanente	85
Tabela 5 - Balanço hídrico simulado pelo modelo no primeiro cenário.....	87
Tabela 6 - Balanço hídrico simulado pelo modelo no segundo cenário.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Variação da precipitação média mensal (1987-2017).....	56
Gráfico 2 - Variação da precipitação e temperatura média mensal no ano de 2016.....	57
Gráfico 3 - Precipitação acumulada e valor da carga hidráulica no poço B08 da Estação Ecológica de Santa Barbara	60
Gráfico 4 - Correlação entre os valores simulados e observados para simulação do fluxo em regime permanente.....	77
Gráfico 5 - Resultados da análise de sensibilidade (DSS) dos parâmetros de entrada do modelo.....	79
Gráfico 6 - Resultados da análise de sensibilidade (CSS) dos parâmetros de entrada do modelo.....	79
Gráfico 7 -Balaço volumétrico obtido na simulação em regime permanente	84
Gráfico 8 - Balaço volumétrico obtido pelo modelo no primeiro cenário	87
Gráfico 9 - Balaço volumétrico obtido na simulação do segundo cenário.....	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APA	Áreas de Preservação Ambiental
MP	Médio Paranapanema
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
UC	Unidade de Conservação
IF	Instituto Florestal
FF	Fundação Florestal
SAB	Sistema Aquífero Bauru
MDF	Método das Diferenças Finitas
MEF	Método dos Elementos Finitos
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
EEcSB	Estação Ecológica de Santa Barbara
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
K	Condutividade Hidráulica
T	Transmissividade
S	Coeficiente de Armazenamento
Sy	Rendimento Específico
Ss	Armazenamento Específico
VER	Volume Elementar Representativo
SIG	Sistema de Informações Geográficas
ET0	Evapotranspiração Potencial
HOB	<i>Head Observation</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
SIAGAS	Sistema de Informação de Águas Subterrâneas
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DO MÉDIO PARANAPANEMA	24
2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO MÉDIO PARANAPANEMA	28
2.3 FÍSICA DO ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS	31
2.4 MODELAGEM DO FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	38
2.4.1 Modelo conceitual	42
2.4.2 Condições Iniciais	43
2.4.3 Condições de contorno	43
2.4.4 Método das diferenças finitas	47
2.4.5 Modelagem no Sistema Aquífero Bauru	49
2.4.6 FREEWAT	50
2.5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	50
2.5.1 GEOLOGIA	52
2.5.2 PEDOLOGIA	53
2.5.3 GEOMORFOLOGIA	54
2.5.4 CLIMA	56
2.5.5 HIDROGRAFIA	57
3 MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1 MONITORAMENTO DO NÍVEL FREÁTICO	59
3.2 GEOPROCESSAMENTO DOS DADOS	61
3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA	62
3.3.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual	62
3.3.2 Discretização do Modelo	64
3.3.3 Propriedades Hidráulicas	65
3.3.4 Condições de Contorno e Condições Iniciais	66
3.3.5 Análise de Sensibilidade (UCODE_2014)	73
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE FLUXO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	76
4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	79
4.3 SIMULAÇÃO DE SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA E DE FLUXO	80
4.4 PRIMEIRO CENÁRIO: REMOÇÃO DE 50% DA ÁREA DA EECSB	86
4.5 SEGUNDO CENÁRIO: REMOÇÃO TOTAL DA EECSB	91
5 CONCLUSÕES	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
ANEXO A – PARÂMETROS MORFOLÓGICOS E DE VAZÃO CALCULADOS POR HONDA E EZAKI (2008).	103
ANEXO B – DADOS LITOLÓGICOS DO POÇO 3500029772 DO SIAGAS	104

1 INTRODUÇÃO

O gerenciamento das águas subterrâneas é essencial para o desenvolvimento econômico e social, devido à crescente demanda dos múltiplos usos d'água presentes em uma bacia hidrográfica. Para que os rios mantenham seu fluxo perene é necessário o equilíbrio entre exploração e recarga dos aquíferos. Caso contrário, as reservas subterrâneas poderão sofrer um rebaixamento do nível freático, ao ponto de comprometer os usos que dependem desse recurso para seu desenvolvimento, como irrigação, abastecimento urbano e geração de energia.

O monitoramento das variáveis hidrológicas e hidrogeológicas é uma importante ferramenta para análises e estimativas do impacto de estresses aplicados aos sistemas aquíferos. Essas análises fornecem informações para gerenciar o uso e a proteção dos recursos hídricos subterrâneos, embasando normas e legislações.

Na Bacia do Médio Paranapanema (MP), Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 17 (UGRHI-17), existem algumas Unidades de Conservação (UC's) geridas pelo Instituto Florestal (IF) e a Fundação Florestal (FF) do Estado de São Paulo. Essas áreas foram criadas, por decretos Federais e Estaduais, com o objetivo de garantir a preservação da fauna e flora nativa. Do ponto de vista hidrogeológico, elas contribuem para a garantia da recarga e consequente contribuição do fluxo subterrâneo para abastecimento dos recursos hídricos superficiais da região. Entretanto, essa visão e abordagem que consideram as funções hidrológicas das UC's não constam dos documentos de criação das reservas e, muitas vezes, não são contemplados pelos seus planos de manejo.

A existência dessas UC's pode contribuir de forma positiva para o amortecimento do gradiente hidráulico causado pelo aumento da exploração dos aquíferos. Pois, devido à grande demanda de água pelos empreendimentos agroindustriais e demais usos como abastecimento urbano, as áreas de maior recarga podem ser essenciais para manutenção do escoamento de base de importantes corpos d'água do MP como o Rio Pardo, garantindo o suprimento de água para o desenvolvimento dessas atividades.

Esse estudo buscou o entendimento das propriedades hidráulicas, as características hidrodinâmicas, bem como a rede de fluxos do Sistema Aquífero Bauru (SAB) na região da Estação Ecológica de Santa Barbara (EEcSB). Os resultados podem servir de referência para análises de exploração em áreas com características litológicas similares.

Atualmente, para analisar o movimento das águas subterrâneas, são elaborados modelos numéricos computacionais. Através da modelagem matemática podemos fazer uma representação simplificada da realidade e buscar a melhor correlação dos dados simulados com os dados observados através do processo de calibração.

O processo de modelagem pode ser estruturado da seguinte maneira:

(i) definição dos objetivos; (ii) análise do processo natural estudado; (iii) elaboração de um modelo conceitual reunindo todas as informações do meio físico e hidrogeológico; (iv) escolha de um código computacional; (v) descrição dos fenômenos físicos de acordo com as equações matemáticas do código (condições de contorno e condições iniciais); (vi) calibração do modelo; (vii) simulação do fluxo da água subterrânea através da aproximação numérica das equações; e (viii) geração de resultados e prognósticos.

Os dados são organizados utilizando os sistemas de informações geográficas, os quais permitem a manipulação para entrada no modelo. Recentemente, foi desenvolvido o FREEWAT, um *plugin* para o Sistema de Informações Geográficas QGIS, que permite a manipulação de informações espaciais e a criação dos dados de entrada para o renomado código MODFLOW, criado pelo *United States Geological Survey* (USGS).

Por meio da simulação do fluxo das águas subterrâneas, questões complexas podem ser entendidas na EEcSB, entre elas:

- Como se dá o fluxo das águas subterrâneas nessas áreas?
- Qual a importância da recarga?
- É viável manter essas áreas imaginando-as como reservatórios naturais das águas subterrâneas?

Desse modo, o objetivo desse trabalho foi realizar uma simulação numérica do fluxo em regime permanente, descrevendo as condições naturais de escoamento do SAB na EEcSB, para entender a importância dessa área de preservação na garantia de recarga da região.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Unidades de conservação do Médio Paranapanema

As unidades de conservação foram criadas por decretos federais e estaduais, com o objetivo de preservação da fauna e flora nativa remanescente em diversos municípios brasileiros. No estado de São Paulo, elas são administradas em conjunto pela Fundação Florestal e pelo Instituto Florestal, órgãos da Secretária Estadual do Meio Ambiente.

A Lei Federal nº 9.985, de 18 de julho de 2000, instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), que segundo o art. 1º, estabelece critérios e normas para a criação, implantação e gestão das unidades de conservação, que até então não existiam, exigindo a elaboração de um plano de manejo para gestão dessas áreas. Segundo os fins previstos nesta Lei, entende-se por unidade de conservação: o espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituídos pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos.

De acordo com o SNUC, as unidades de conservação se dividem em dois grandes grupos com características específicas e diferentes graus de restrição:

- I- **Unidades de Proteção Integral** – destinadas à preservação da natureza, em que somente o uso indireto dos recursos naturais é admitido. Estão incluídas as Estações Ecológicas, Reserva Biológica, Parque Nacional, Monumento Natural e Refúgio da Vida Silvestre.

- II- **Unidades de Uso Sustentável** – tem por objetivo equilibrar a conservação da natureza com o uso sustentável de uma parcela dos seus recursos naturais. Compreende as categorias Área de Proteção Ambiental, Área de Relevante Interesse Ecológico, Floresta Nacional, Reserva Extrativista, Reserva de Fauna, Reserva de Desenvolvimento Sustentável e Reserva Particular do Patrimônio Natural.

De acordo com o relatório de situações dos recursos hídricos do MP (2014), nesta bacia hidrográfica existem 9 unidades de conservação, das seguintes classes:

2 Áreas de Preservação Ambiental (APA), 4 Estações Ecológicas (EE) e 3 Florestas Estaduais (FE) (Tabela 1). Estações Ecológicas são consideradas Unidades de Conservação de Proteção Integral dos recursos naturais, isto é, têm por objetivo básico a preservação da natureza, sendo permitido apenas o uso indireto dos seus recursos, com algumas exceções previstas em lei, ex.: pesquisas científicas e educação ambiental (Figura 1).

Tabela 1 - Unidades de Conservação no MP

UC's	Órgão responsável	Municípios abrangidos	Área
APA da Bacia Hidrográfica do Rio Batalha	FF	Duartina, Gália	252.635 ha
APA Corumbataí-Botucatu-Tejupá - Perímetro Botucatu	FF	Avaré, Itatinga, Pardinho	215.615 ha
EE de Assis	IF	Assis	1760,64 ha
EE de Avaré	IF	Avaré	720,4 ha
EE de Caetetus	FF	Gália, Alvinlândia	2.178,84 ha
EE de Santa Bárbara	IF	Águas de Sta. Bárbara	2.712 ha
FE de Assis	IF	Assis	2.816,42
FE de Avaré	IF	Avaré	760,14
FE de Águas Santa Bárbara	IF	Águas de Sta. Bárbara	1,659,97

Fonte: Relatório de situações dos recursos hídricos na UGRHI-17 (2014).

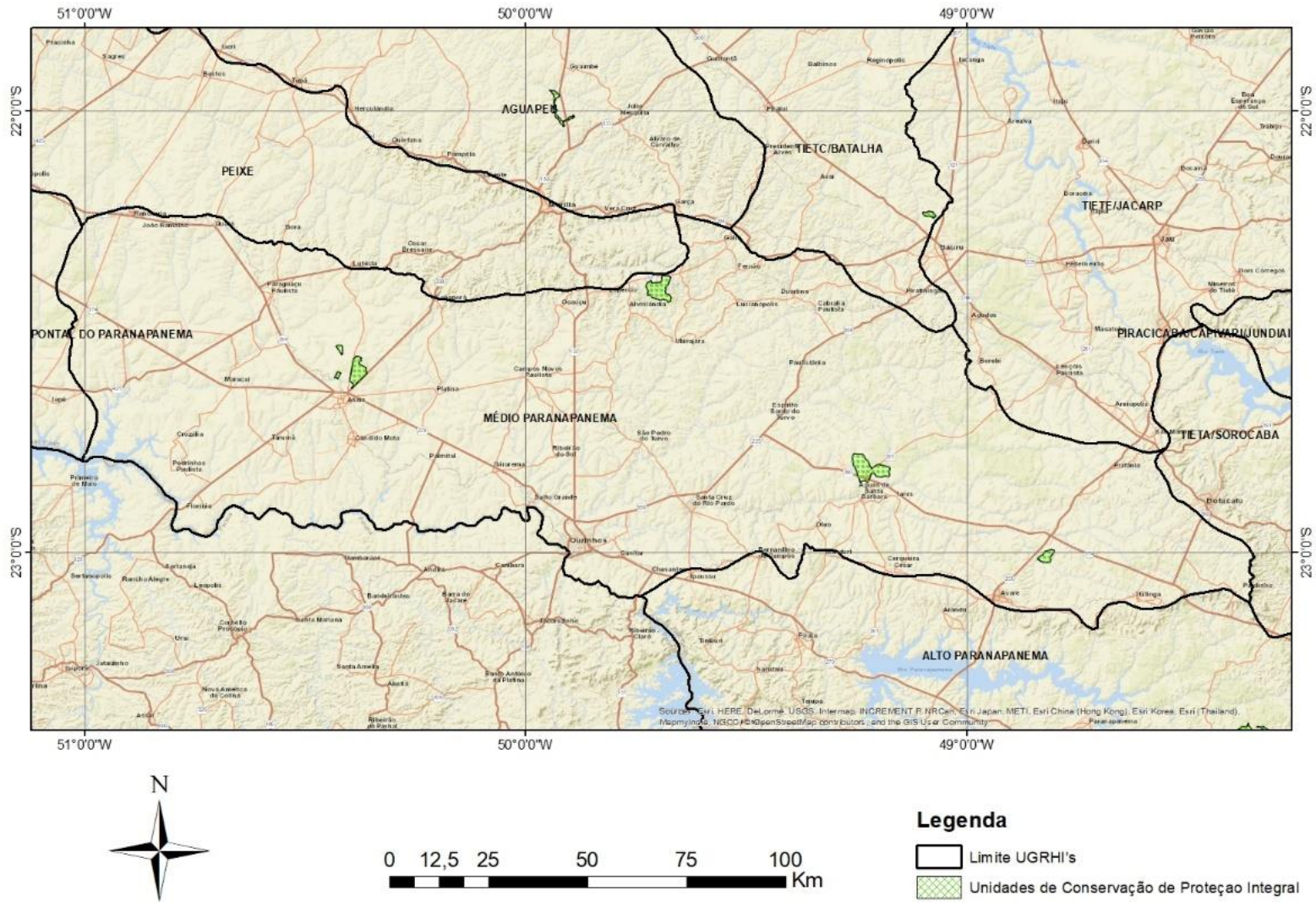
A Floresta Estadual de Águas de Santa Bárbara foi criada pelo Decreto 44.305 de 30 de dezembro de 1964, no município de mesmo nome, com o objetivo de uso múltiplo e sustentável, além de apoiar a pesquisa científica, com uma área de 4.371,97 hectares. A princípio a área era ocupada pela vegetação de cerrado e contatos com a Floresta Estacional Semidecidual. Atualmente, o uso do solo é composto por plantações de pinus e eucalipto, com savanas e sub-bosques de gramíneas nativas.

Em 7 de junho de 1984 uma área de 2.712 foi desmembrada para a criação a Estação Ecológica de Santa Bárbara segundo o Decreto Estadual nº22.337, que descreve seus limites e define o IF como o responsável por sua instalação e administração. As áreas que fazem parte da EEcSB são as que mantêm a vegetação nativas, enquanto que na FE, as áreas são destinadas a produção florestal de pinus.

As unidades de conservação protegem os remanescentes do Cerrado (Savana) e da Floresta Estacional Semidecidual no Estado de São Paulo. O cerrado já ocupou 14% do território paulista e ocupa hoje cerca de 1%, sendo que apenas a metade da área remanescente encontra-se protegida em unidades de conservação (DURIGAN et al, 2006).

Além da preservação da fauna e flora nativas, essas áreas têm um papel muito importante no ciclo hidrológico local. Do ponto de vista estratégico, essas unidades de conservação mantêm a entrada de água através da recarga pela precipitação, pois o SAB um aquífero livre. Isso mantém o fluxo de base dos rios localizados próximos a essas áreas, além de realizar o controle do nível freático do SAB evitando o rebaixamento provocado pelo aumento de exploração do aquífero, garantindo uma reserva que poderá ser usada em momentos de crise. O entendimento do comportamento hidráulico do aquífero nessas unidades de conservação é importante para caracterizar os padrões locais de fluxo das águas subterrâneas, identificando áreas de descarga, e áreas prioritárias à infiltração ou sugerindo a criação de novas áreas.

Figura 1 - Unidades de conservação de proteção integral no MP



2.2 Águas Subterrâneas do Médio Paranapanema

De acordo com o relatório de situação dos recursos hídricos do MP (2014), ocorrem sobre toda a bacia duas classes principais de aquíferos:

- I- **Serra Geral:** de porosidade secundária, que aflora na porção sul, da região que vai de Santa Cruz do Rio Pardo a Assis e na calha dos principais rios, sendo em grande parte subjacente ao Aquífero Bauru.

- II- **Bauru:** de porosidade primária, dividido em duas unidades: Formação Marília e Formação Adamantina. O Aquífero Marília, quando ocorre, recobre o Aquífero Adamantina.

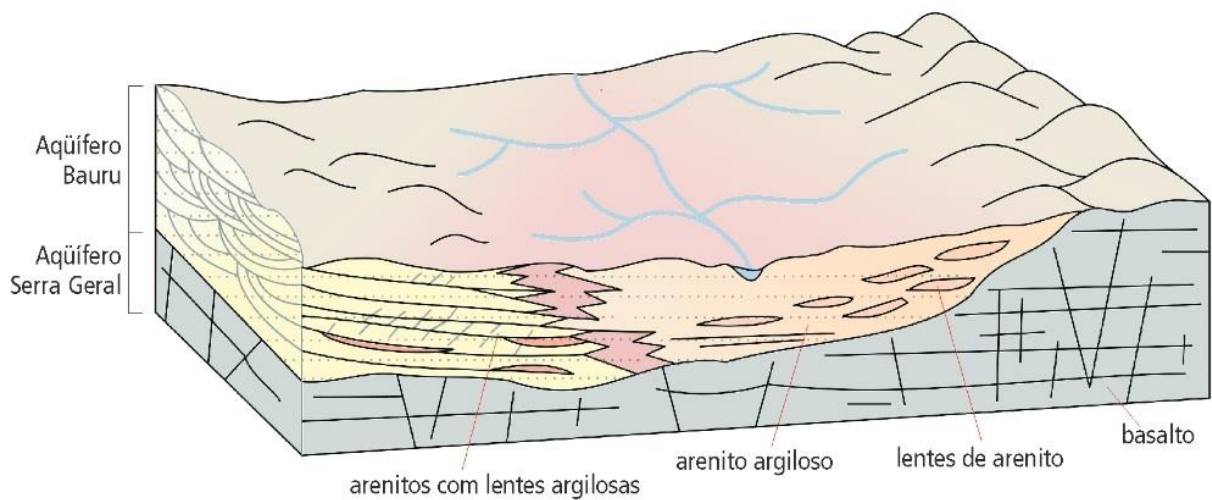
Nas rochas com porosidade granular, a água percola e permanece, temporariamente, armazenada nos vazios entre os grãos, sendo denominado também de aquífero sedimentar (IRITANI e EZAKI, 2008). Os aquíferos fraturados recebem esse nome pois se constituem de rochas maciças, onde o armazenamento e transporte de água ocorrem através de fraturas, criadas devido a pressões aplicadas após a formação dessas rochas.

Segundo o plano de bacia do MP (2007), mais de 60% da área é recoberta pelos arenitos do Grupo Bauru e o restante é ocupado pelas rochas ígneas da Formação Serra Geral (Figura 3). De acordo com informações do Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (2005), a espessura saturada média do Aquífero Bauru é de 75 m, e as menores espessuras são observadas nas proximidades dos afloramentos dos basaltos nos limites sul, leste e norte do aquífero. As cotas topográficas calculadas para a base do aquífero, são de aproximadamente 600 m de altitude nas áreas próximas as Cuestas Basálticas, com tendência de diminuir no sentido oeste, chegando próximo de 100 m na região de Presidente Epitácio.

A capacidade específica (Q/s) do Aquífero Bauru apresenta valores entre 0,002 m³/h/m a 4,9 m²/h/m, com predominância de valores abaixo de 0,5 m³/h/m; a transmissividade (T) possui valores inferiores a 50 m²/d; a condutividade hidráulica (K) varia de 0,002 m/d a 3,66 m/d; o Coeficiente de Armazenamento (S),

representado pela porosidade efetiva, situa-se entre 5% e 15% (DAEE 1979; DAEE, 2005). Os arenitos do Grupo Bauru são intercalados por camadas de sedimentos de granulometria fina, ou possuem uma cimentação de mineral carbonático entre os grãos de areia, o que diminui a sua capacidade de armazenar e transmitir água. (IRITANI e EZAKI, 2008).

Figura 2 - Modelo Hidrogeológico Conceitual do Aquífero Bauru

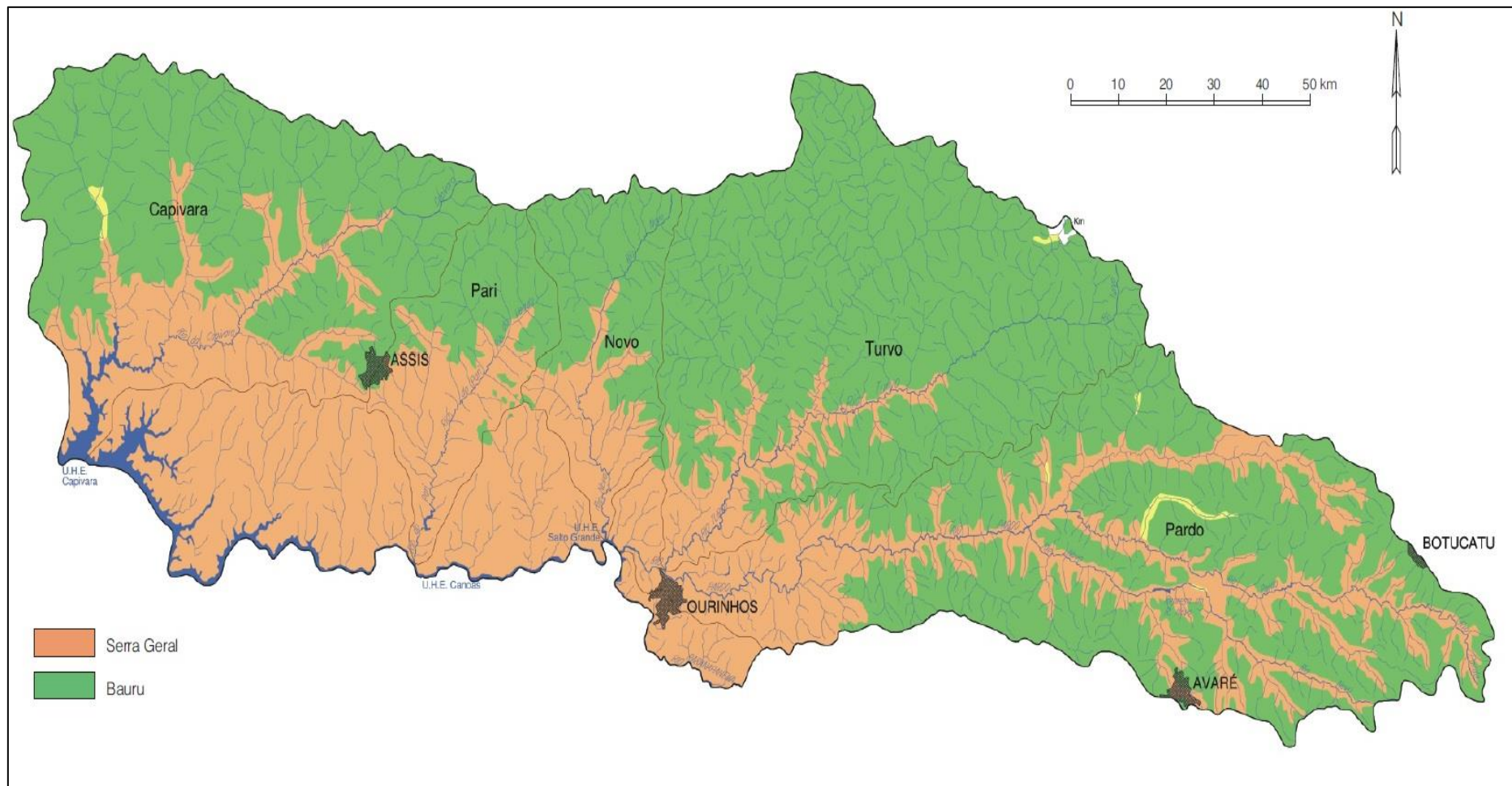


Fonte: IRITANI e EZAKI (2008, p.54)

As rochas sedimentares que compõem o Grupo Bauru na área são divididas nas duas unidades litoestratigráficas: Formação Marília e Formação Adamantina. A variação de permeabilidade dos sedimentos da Formação Adamantina (Vale do Rio do Peixe) é em função do grau de maior ou menor teor de argila da matriz, ou de camadas lamínicas que se intercalam aos corpos arenosos (PAULA e SILVA, et al., 2005).

Os arenitos da Formação Marília segundo Paula e Silva et al., (2005), podem ser classificados como de moderada permeabilidade aparente, pois a intensidade variável da cimentação do arcabouço litológico conduz a variações de permeabilidade.

Figura 3 - Principais unidades aquíferas aflorantes na UGRHI – 17



Fonte: Plano de Bacia do MP – Caderno Síntese (2007)

2.3 Física do escoamento em meios porosos

O princípio que rege o movimento da água subterrânea é o diferencial de pressão e elevação entre dois pontos no espaço. Esse conceito é básico para compreender como funciona a transformação de energia potencial em cinética, gerando as linhas de fluxo nos aquíferos.

Um aquífero é uma unidade de material poroso capaz de armazenar e transmitir quantidades consideráveis de água (ANDERSON e WOESSNER, 1992). A quantidade de água armazenada em um aquífero vai depender da sua porosidade, ou seja, do volume de espaço entre os sedimentos sólidos.

A *porosidade ou porosidade volumétrica* é uma propriedade macroscópica do meio poroso, e é definida como a proporção entre o volume de espaços vazios e o volume total da amostra (BEAR, 1972).

$$n = \frac{100 \cdot V_v}{V} \quad (1)$$

onde:

n é a porosidade (porcentagem)

V_v é o volume de vazios em volume unitário do material (L³)

V é o volume unitário do material, incluído os sólidos e vazios (L³)

Essa porosidade é referida como porosidade absoluta, pois não leva em consideração a interconexão dos poros. A *porosidade efetiva* é definida como a taxa do volume de poros interconectados, ou seja, a porosidade disponível para o escoamento. CRUCIANI (1989) define a porosidade drenável, como o volume de água que será drenada livremente por unidade de volume do solo saturado, pelo rebaixamento do lençol freático. A porosidade efetiva pode ser calculada utilizando a seguinte expressão (Taylor 1959):

$$f = \frac{V_a}{V_s} \quad (2)$$

Em que:

f é a porosidade efetiva ou drenável ($L^3.L^{-3}$)

V_a é o volume de água drenada (L^3)

V_s é o volume de total solo (L^3)

O engenheiro francês Henry Darcy (1856), demonstrou que um fluxo saturado pode ser gerado em um tubo vertical, preenchido com material de granulometria uniforme, aplicando diferentes pressões na entrada e saída do tubo. Essa lei física ficou conhecida como Lei de Darcy.

Derivando o conceito de carga hidráulica de Darcy, Hubbert (1940), conseguiu obter o potencial hidráulico das águas subterrâneas. Segundo esse autor, dois potenciais de força (pressão e elevação) agem separados em uma unidade de massa de água subterrânea.

Supondo que tenhamos um tubo cheio de areia, saturado com água, e a pressão seja P na altura z . P/P_w é a carga de pressão, onde P_w é a densidade da água. O trabalho por unidade de massa requerido para levar a água para a elevação z é $g(z - z_{ref})$, onde g é a aceleração da gravidade e z_{ref} uma elevação de referência (Wang e Anderson, 1982).

$$\phi = \frac{P}{P_w} + g(z - z_{ref}) \quad (3)$$

Segundo Fetter (1994), nos casos onde o fluido é incompressível, ou seja, a densidade não se altera com alterações de pressão, e a elevação de referência é igual a 0, a carga hidráulica total (h) pode ser expressa como a soma da carga de elevação (z) e da carga de pressão (h_p):

$$h = z + h_p \quad (4)$$

Em que:

z é a elevação do centro de gravidade do fluido acima da elevação de referência (datum).

h_p é a altura da coluna de água que fornece pressão.

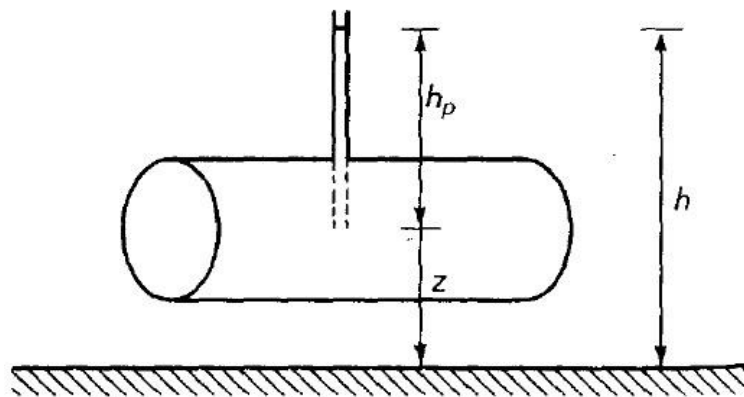
Para determinar a energia potencial em algum ponto do aquífero, é necessário a instalação de piezômetros (Figura 4), que medem a pressão estática da água em resposta às pressões externas. O piezômetro tem aberturas na parte superior e parte inferior e a água se eleva de acordo com a energia total do fluido no ponto em que a parte inferior do piezômetro está aberta.

A Lei de Darcy (Equação 5) demonstra que existe uma relação direta entre a vazão que atravessa a amostra e a diferença de carga hidráulica a qual a amostra está submetida.

$$Q = -K.A \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (5)$$

A diferença entre as cargas hidráulicas, Δh , dividida pela distância, L , é a perda de carga por unidade de extensão do trajeto do fluido, sendo denominada de gradiente hidráulico. A vazão (Q) é obtida multiplicando a condutividade hidráulica pela área total da seção transversal do escoamento e o gradiente hidráulico. O sinal negativo representa que o fluxo vai sempre do maior potencial para o menor.

Figura 4 - Piezômetro medindo carga total (h), carga de elevação (z) e carga de pressão (h_p)



Fonte: FETTER (1994, p.116)

A habilidade de um aquífero transmitir água é descrita por sua condutividade hidráulica (ANDERSON e WOESSNER, 1992). A condutividade hidráulica (K) leva

em consideração características do fluido que está escoando, como massa específica, ρ , e viscosidade dinâmica, μ , combinadas como viscosidade cinemática, $\nu = \mu/\rho$. Também leva em consideração as características do meio, como porosidade, tamanho e disposição dos grãos, integrados em um coeficiente chamado permeabilidade intrínseca k . Sendo g a aceleração da gravidade temos:

$$K = \frac{kg}{\nu} \quad (6)$$

A permeabilidade intrínseca (k) é uma constante representativa das características apenas do meio poroso, sendo função especialmente do tamanho dos seus poros (FETTER, 1996). Ela pode ser calculada através da seguinte equação:

$$k = C \cdot d^2 \quad (7)$$

onde:

C é uma constante que descreve os efeitos das formas dos poros
 d é o diâmetro médio das partículas.

A lei de Darcy em sua forma mais simples demonstra a relação entre fluxo, gradiente de pressão e um coeficiente chamado condutividade hidráulica (SPITZ e MORENO, 1996). O fluxo da água subterrânea é laminar, devido à baixa velocidade com que essa se move em meios porosos. Em fluxos laminares, as moléculas de água seguem linhas suaves, denominadas de linhas de fluxo. A lei de Darcy é uma poderosa Lei empírica, e seus componentes merecem nossa mais cuidadosa atenção (Frezze e Cherry, 1979). O experimento de Darcy foi realizado sob certas condições como: fluxo laminar em meio poroso, em condições de regime permanente, considerando o fluido homogêneo e incompressível.

A maior limitação da Lei de Darcy é considerar que o fluxo é laminar, dominado somente por forças viscosas. Essa situação só é encontrada quando os fluidos estão se movendo lentamente em linhas de fluxo paralelas. Quando a velocidade de fluxo aumenta, próximo a um poço de bombeamento por exemplo, as partículas se movem desordenadamente e as linhas de fluxo não são mais

paralelas. Esse fluxo é turbulento, e as forças inerciais são mais influentes que as forças viscosas (Fetter, 2001). De acordo com Bear (1972) o limite de aplicação da Lei Darcy para que um fluxo laminar possa ser válido, é para um número de Reynolds de até 10. A descarga específica ou Velocidade de Darcy é definida como a vazão por unidade de área, $q = Q/A$. Reescrevendo a Lei de Darcy:

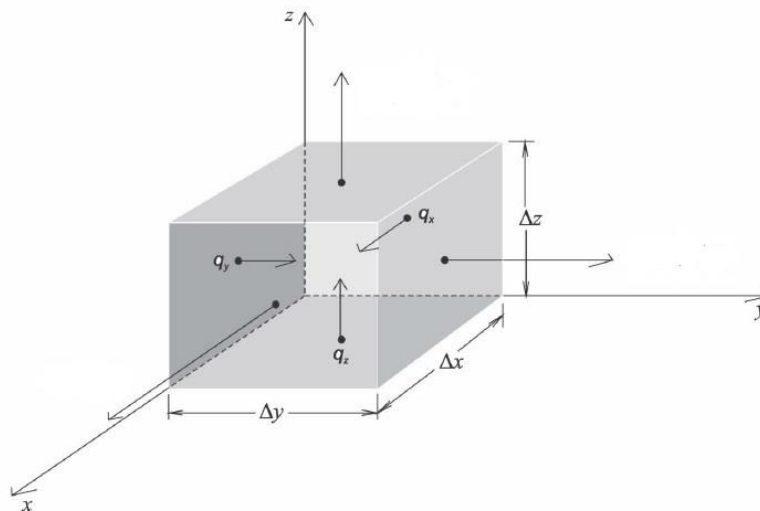
$$q = -K \frac{\partial h}{\partial L} \quad (8)$$

Segundo Wang e Anderson (1982), a generalização tridimensional da Lei de Darcy requer que sua forma unidimensional seja verdadeira para cada componente do fluxo (x, y, z):

$$q_x = -K \frac{\partial h}{\partial L} \quad q_y = -K \frac{\partial h}{\partial L} \quad q_z = -K \frac{\partial h}{\partial L} \quad (9)$$

Para derivar a Equação Geral do Fluxo da água subterrânea, um cubo de material poroso que seja de dimensões suficientes para representar as propriedades do meio é utilizado como referência. Esse cubo de material poroso é conhecido como Volume Elementar Representativo (VER); seu volume é igual a $\Delta x \Delta y \Delta z$ (ANDERSON e WOESSNER, 1992). O fluxo de água através do VER é representado pela descarga específica.

Figura 5 - Volume Elementar Representativo (VER)



Fonte: WANG e ANDERSON (1982, p.12)

A equação do balanço de massas estabelece que a diferença entre os fluxos de entrada em cada eixo, menos os fluxos de saída, representa a mudança no armazenamento. Deve se considerar também as fontes e/ou sumidouros de água (ex: recarga e poços) no sistema, representado por R^* $\Delta x \Delta y \Delta z$. Assumindo que esse termo é positivo onde exista uma fonte de água, e negativo quando há retirada:

$$\left(\frac{\partial qx}{\partial x} + \frac{\partial qy}{\partial y} + \frac{\partial qz}{\partial z} - R^* \right) (\Delta x \Delta y \Delta z) = \text{mudança no armazenamento} \quad (10)$$

A taxa de mudança no armazenamento do VER é representada pela seguinte expressão:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (11)$$

Combinando a equação 10 com a equação 11, e dividindo tudo por $\Delta x \Delta y \Delta z$, resulta na forma final da equação do balaço de água:

$$\frac{\partial qx}{\partial x} + \frac{\partial qy}{\partial y} + \frac{\partial qz}{\partial z} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} + R^* \quad (12)$$

Nos aquíferos freáticos, o coeficiente de armazenamento é chamado de rendimento específico, S_y . Nos aquíferos confinados, usa-se o coeficiente de armazenamento específico, S_s , quando a carga varia nas três dimensões (CLEARY, 1989). O rendimento específico (S_y) é a relação entre o volume de água que é drenado de uma rocha saturada devido a atração da gravidade, e o volume total da rocha (FETTER, 1994).

A modelagem do escoamento de fluidos em meios porosos é baseada na solução de equações diferenciais. A equação geral do fluxo é composta pela junção de duas equações: a Lei de Darcy, que descreve a relação do fluxo com o gradiente de pressão, e a equação da continuidade. Combinando a Equação 5 com a Equação 10, resulta na equação governante do fluxo da água subterrânea (ANDERSON e WOESSNER, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (13)$$

Em que x , y e z são as coordenadas cartesianas alinhadas ao longo dos eixos principais de condutividade hidráulica K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} ; h é a carga hidráulica; R^* é um fluxo volumétrico que representa as entradas e saídas de água; S_s é o armazenamento específico do material poroso; e t é o tempo.

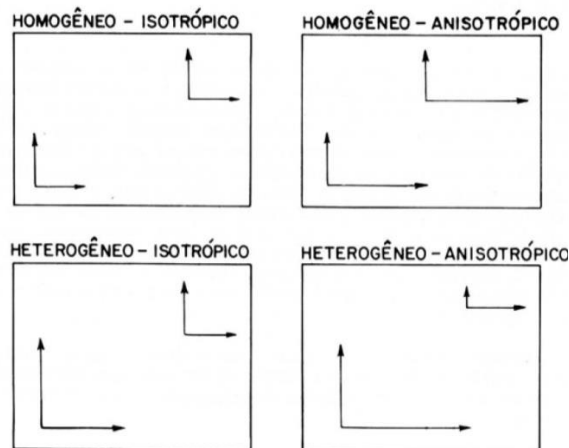
Há de se considerar que a condutividade hidráulica é um tensor. Um tensor é um vetor cuja magnitude muda ao longo de uma dada direção (CLEARY, 1989). A condutividade hidráulica é matematicamente descrita como um tensor simétrico de segunda ordem, com nove componentes:

$$K = \begin{matrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{matrix} \quad (14)$$

É necessário que os eixos de coordenadas retangulares coincidam com os eixos principais do tensor de condutividade hidráulica, para que permaneçam somente as três componentes diagonais do tensor de nove componentes. Segundo Cleary (1989), isso pode ser alcançado pela rotação dos eixos do sistema de coordenadas até que eles coincidam.

Se a condutividade hidráulica for a mesma em todas as direções de um determinado ponto, o meio é caracterizado como isotrópico. Um meio anisotrópico é aquele em que as propriedades serão diferentes conforme a direção. Um meio poroso também pode ser classificado como homogêneo, em que o meio é similar ou uniforme, em termos de determinadas características (textura, porosidade, condutividade hidráulica), ou heterogêneo em que suas características variam de acordo com a posição (Figura 6) (FREEZE e CHERRY, 1979).

Figura 6 - Ilustração gráfica da distribuição espacial de parâmetros



Fonte: FREEZE e CHERRY (1979, p.33).

2.4 Modelagem do fluxo das águas subterrâneas

Os modelos são ferramentas criadas para reproduzir, de maneira mais simplificada, os fenômenos que ocorrem no mundo real. Diversos tipos de modelos foram utilizados para estudar os sistemas de fluxo de água subterrânea. Eles podem ser divididos em três principais categorias: modelo físicos, modelos analógicos, e modelos matemáticos (WANG e ANDERSON, 1982).

Os modelos físicos utilizam reproduções em menor escala, como tanques de areia, preenchidos com material poroso, no qual a água é induzida a fluir pelo diferencial de pressão para simular o fluxo. Os modelos físicos foram seguidos pelos modelos analógicos em que similaridades matemáticas são utilizadas, para a representação de fenômenos através de outros.

Um exemplo é o método elétrico que é baseado na analogia entre a lei de Ohm, para o fluxo da eletricidade, e a lei de Darcy para o fluxo da água subterrânea. Por meio do uso de grandes placas instaladas eletricamente com resistores e capacitores, o fluxo de água subterrânea em sistemas aquíferos complicados podia ser simulado (CLEARY, 1989).

Um modelo matemático consiste de um conjunto de equações diferenciais, que são conhecidas por reger o fluxo da água subterrânea (WANG e ANDERSON, 1982). Nesses modelos, os processos físicos são representados utilizando

formulações matemáticas, em que o sistema natural é traduzido em equações que representam as condições iniciais e as condições de contorno.

De acordo com Anderson e Woessner (1992), um modelo matemático simula o fluxo da água subterrânea indiretamente por meio de uma equação governante que representa os processos físicos que ocorrem no sistema, juntamente com equações que descrevem cargas ou fluxos ao longo das fronteiras do modelo (condições de contorno).

Os modelos matemáticos podem ser divididos em analíticos e numéricos. Os modelos analíticos, apresentam uma solução exata do problema, ao contrário dos modelos numéricos em que a solução é aproximada. Entretanto, nem sempre é possível resolver condições complexas de fluxo com modelos analíticos. O modelo analítico mais simples de fluxo da água subterrânea é a Lei de Darcy (FETTER, 1996). Já um modelo numérico é utilizado para lidar com condições mais realísticas, e nestes casos, normalmente é necessário solucionar o modelo matemático utilizando técnicas de aproximação numérica.

Desde os anos 60, quando os computadores de alta velocidade se tornaram disponíveis, os modelos numéricos tem sido o método principal para estudos com água subterrânea (WANG e ANDERSON, 1982).

Uma característica dos modelos numéricos é que eles tratam do problema em intervalos discretos, ou seja, o domínio do modelo é segmentado em um número finito de componentes bem definidos. Essa discretização, permite que condições geológicas complexas de anisotropia e heterogeneidade sejam representadas no modelo.

Para superar a barreira de problemas realistas contínuos, vários métodos de discretização foram propostos por engenheiros e matemáticos.

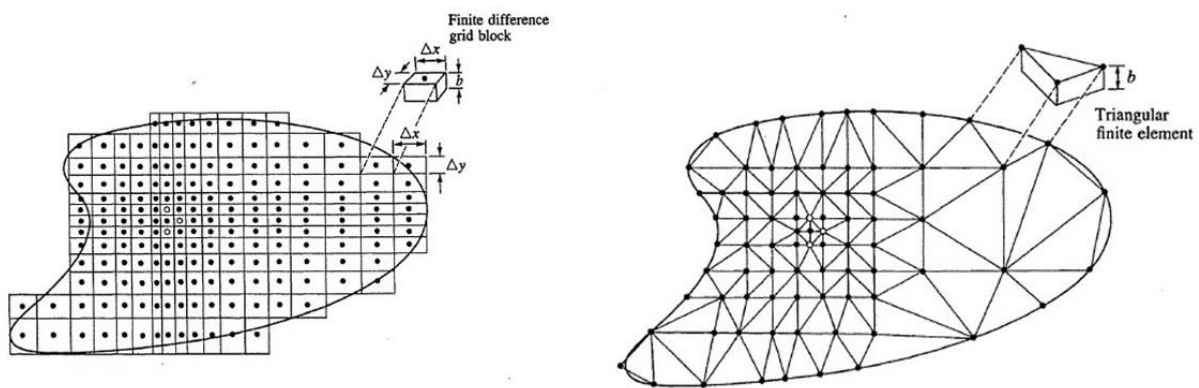
Os métodos numéricos mais comumente usados são o Método de Diferenças Finitas (MDF) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) (Figura 7). Em ambos os métodos a equação diferencial parcial original é discretizada nas variáveis de espaço X, Y e Z. O MDF é uma representação discretizada em um ponto, ao passo que o MEF é uma representação discretização sobre uma área (CLEARY, 1989).

A solução nos dois métodos é similar em relação a acurácia, entretanto a principal diferença é a versatilidade para representação de determinadas características no processo de discretização. Os MEF diferem dos MDF ao

aproximar as equações de fluxo por integração em subáreas, denominadas elementos. Normalmente, são escolhidos elementos triangulares.

No MDF a malha gerada para discretização do domínio é retangular, com as linhas ortogonais umas às outras, formando blocos de mesma dimensão, chamados de células. Cada célula possui um nó, que é um valor atribuído a este elemento, e extrapolado para toda célula, já no MEF o valor é calculado para uma área, a partir da interpolação dos valores dos nós que estão no contorno desse elemento.

Figura 7 - Representação por diferenças finitas e elementos finitos de um aquífero

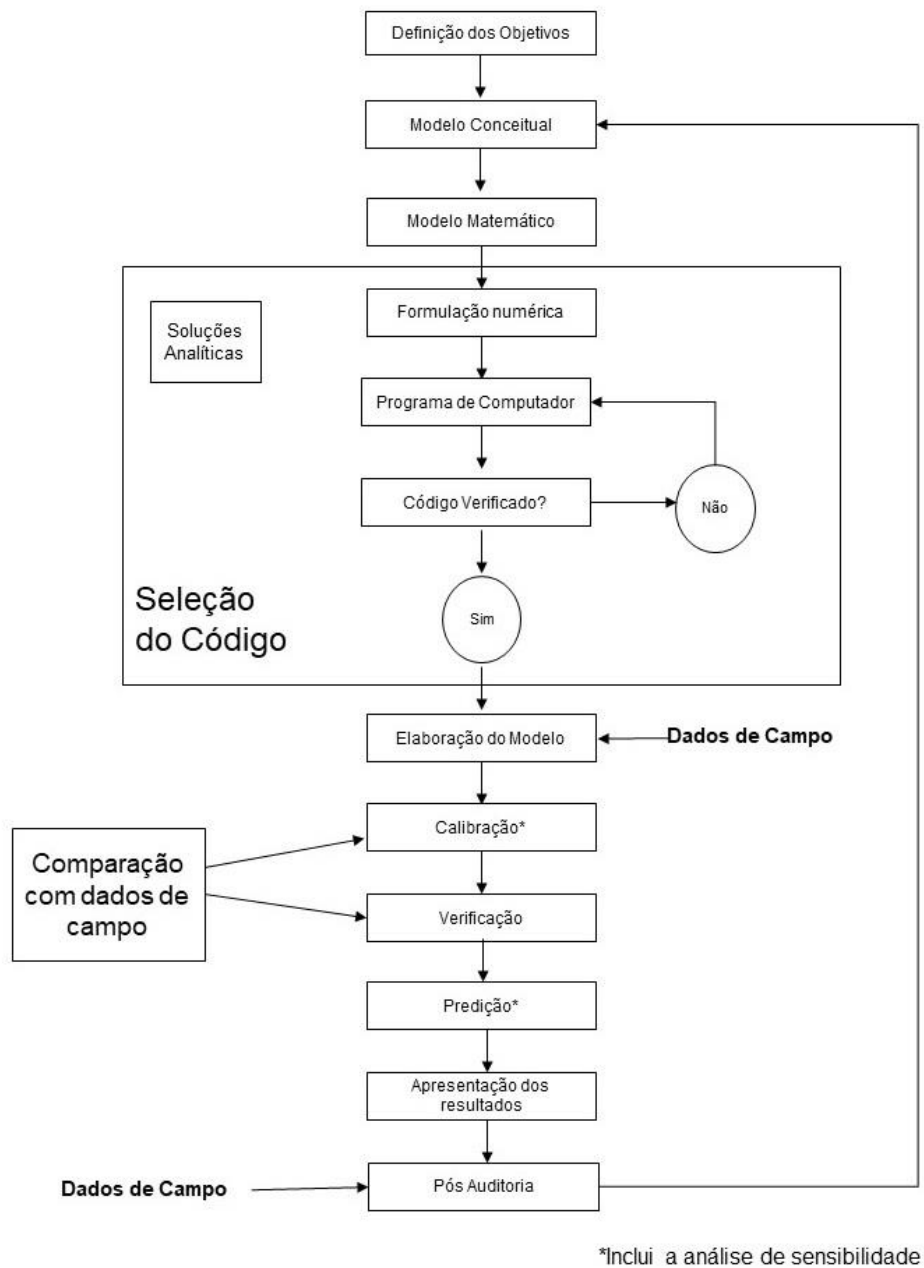


Fonte: WANG e ANDERSON (1982, p.4)

O processo de modelagem obedece a uma série de etapas (Figura 8) que antecedem as simulações. Alguns autores, como Bear (1972), Anderson e Woessner (1992), Spitz e Moreno (1996), Kresic (1997) definiram os procedimentos necessários para realizar a simulação numérica.

Segundo esses autores, o primeiro passo é a definição dos objetivos, que vai ajudar a escolher qual será o melhor código para solução do problema. A segunda etapa é o desenvolvimento de um modelo conceitual do sistema estudado. Nesse momento, são definidas as unidades hidroestratigráficas e as fronteiras do domínio. Os dados de campo são coletados para atribuir valores aos parâmetros hidráulicos do aquífero.

Figura 8 - Fluxograma de aplicação de Modelos Matemáticos



Fonte (Adaptado de): ANDERSON e WOESSNER (1982, p.7)

O próximo passo é a escolha do código computacional, ou seja, o software que possui o algoritmo para resolução do modelo matemático numericamente. A escolha do código vai depender das características levantadas no modelo conceitual. A quarta etapa é o desenvolvimento do modelo no software. Nesse momento é criado o grid, os intervalos de tempo, as condições iniciais e de contorno,

ou seja, a tradução das condições hidrodinâmicas da situação real em formulações matemáticas adequadas a sintaxe do código.

A quinta etapa é o processo de calibração, que consiste na adequação dos parâmetros do modelo hidrogeológico conceitual, para que esse represente os valores de carga ou fluxo medidos em campo. Nesse passo é avaliada a correlação entre os dados calculados e observados. A calibração pode ser feita por tentativa e erro no ajuste dos parâmetros, ou utilizar códigos automáticos para estimativa de parâmetros.

O próximo passo é a análise de sensibilidade, que define o grau de dependência das variáveis de saída, em relação aos parâmetros de entrada do modelo. Nessa etapa também é definido o grau de incertezas associadas aos parâmetros. Os parâmetros que mais influenciam o resultado do modelo são identificados, bem como o nível de confiança desses valores. A etapa final consiste na predição de situações, ou simulações para prever o comportamento do aquífero frente a estresses provocados por intervenções humanas ou mudanças climáticas.

2.4.1 Modelo conceitual

O modelo hidrogeológico conceitual é uma idealização das condições reais, a partir de uma formulação teórica sobre o domínio do modelo, que resume o atual entendimento das condições locais e de como o sistema de fluxo funciona.

O desenvolvimento de um modelo conceitual apropriado é a chave para um estudo de modelagem bem-sucedido (SPITZ e MORENO, 1996). Um modelo hidrogeológico conceitual é a descrição de vários fatores naturais e antrópicos que governam e contribuem para as dinâmicas do fluxo da água subterrânea. (KRESIC e MIKSZEWSKI, 2012).

Essa representação é feita utilizando um diagrama de blocos, ou uma seção transversal. O objetivo da construção do modelo conceitual é simplificar o problema do campo e organizar os dados de campo para que o sistema possa ser analisado com mais facilidade (ANDERSON e WOESSNER, 1992).

Unidades com propriedades hidrogeológicas semelhantes podem ser combinadas em uma única unidade hidroestratigráfica, ou uma formação geológica pode ser subdividida em aquíferos e unidades de confinamento. Um modelo conceitual deve subdividir as principais unidades hidroestratigráficas de um local em:

unidades aquíferas principais, aquíferos, e aquíferos. Se diferentes unidades forem agrupadas (por exemplo, devido à falta de dados e/ou conveniência do modelo), é necessária justificativa (WELS, 2012).

2.4.2 Condições Iniciais

As condições iniciais representam os valores das cargas no instante inicial do modelo, ou seja, a elevação do nível freático no momento $t=0$. Segundo Cleary (1989), esse parâmetro descreve a variação tridimensional da carga através do aquífero, quando o tempo for igual a zero na simulação. Como essa informação é frequentemente desconhecida, na prática muitos modeladores usam uma carga constante média como sugestão inicial.

Geralmente, as distribuições de carga hidráulica medidas servem como condições iniciais. Nas áreas em que faltam informações a respeito da carga, o usuário do modelo depende de estimativas (SPITZ e MORENO, 1996).

As condições iniciais são imprescindíveis para modelos de fluxo transiente. Embora seja necessário especificar as condições iniciais em modelos de fluxo permanente, diferentemente dos modelos transientes, as condições iniciais são requerimentos numéricos e não físicos.

2.4.3 Condições de contorno

Condições de contorno são expressões matemáticas especificando a variável dependente (carga hidráulica) ou a derivada da variável dependente (fluxo) nas fronteiras do domínio do problema (ANDERSON e WOESSNER, 1992)

As condições de contorno são utilizadas para limitar as soluções do modelo, que podem convergir para um número infinito de soluções. Elas determinam onde a água entra e sai do sistema. Se as condições de contorno forem inapropriadas, o modelo vai ter uma representação pobre do sistema de fluxo atual (WELS, 2012).

Geralmente, a seleção das condições de contorno para um modelo conceitual ou numérico envolve uma considerável simplificação de condições hidrogeológicas. Para evitar erros, os pressupostos subjacentes a tais simplificações devem ser claramente entendidos e seus efeitos na resposta do modelo criticamente

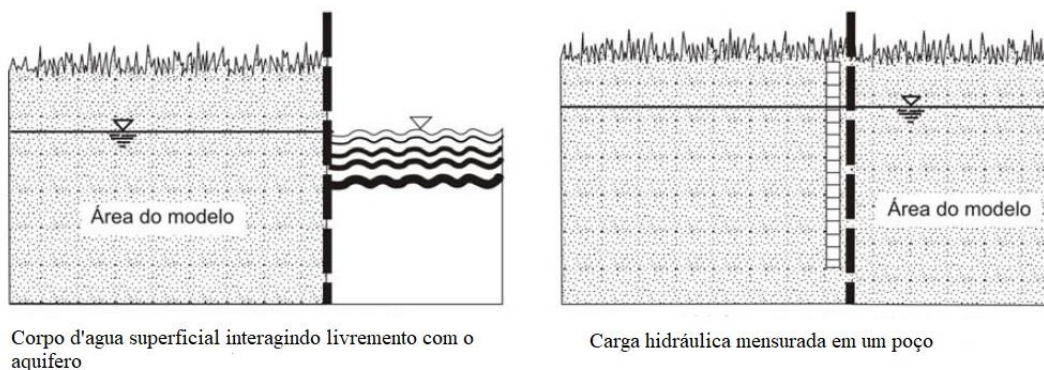
avaliados (FRANKE et. al, 1998). As três condições de contorno mais utilizadas nos problemas de fluxo de água subterrânea são:

- **Tipo I (Condição de Dirichlet):** Contorno de carga hidráulica especificada (Figura 9), por exemplo:

$$h = \text{constante} \quad (15)$$

Nessa condição de contorno a carga é especificada ou constante no limite do modelo, servindo de referência para a solução. Geralmente, são utilizados rios ou lagos, de carga conhecida, que possuam conectividade hidráulica com o aquífero.

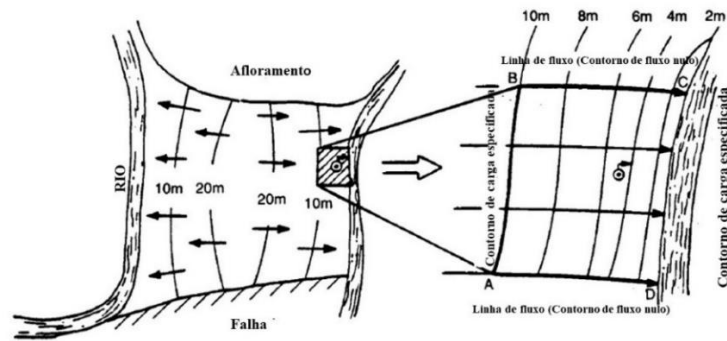
Figura 9 - Condição de contorno de carga especificada



Fonte: SPITZ e MORENO (1996, p. 35).

Corpos d'água superficiais que penetram completamente o aquífero formam condições de contorno ideais de carga especificada (ANDERSON e WOESSNER, 1992). Algumas características a respeito dessas condições de contorno devem ser analisadas com cuidado, por exemplo o fato desse contorno ser uma fonte interminável de água para o sistema.

Figura 10 - Condições de contorno mistas



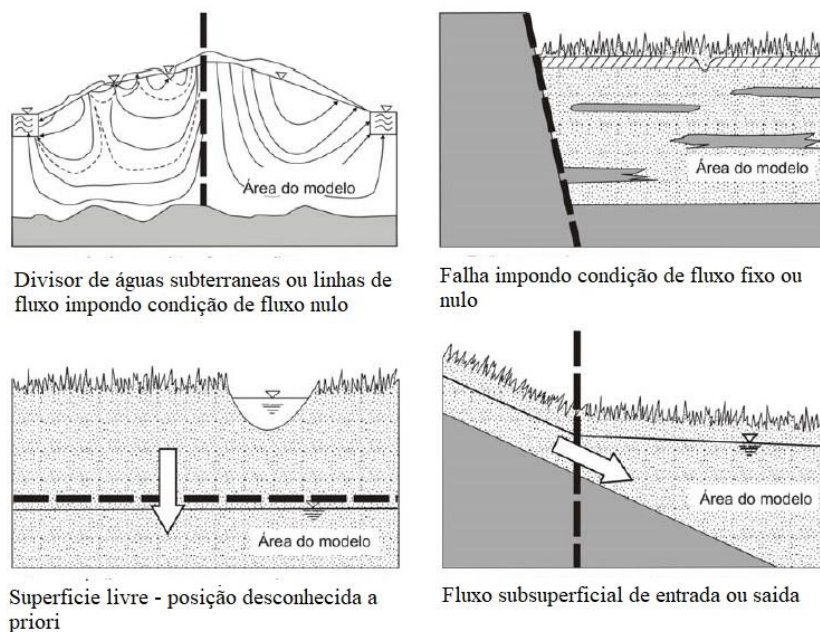
Fonte: ANDERSON e WOESSNER (1992, p.104).

Não importa quanta água seja bombeada do sistema, o contorno de carga especificada continuará a fornecer o volume requerido, mesmo que esse montante não seja fisicamente razoável no sistema (FRANKE et al., 1987).

- **Tipo II (Condição de Neumann):** Contorno de fluxo especificado (Figura 11):

$$\frac{dh}{dn} = \text{constante} \quad (16)$$

Figura 11 - Condição de contorno de fluxo especificado



Fonte: SPITZ e MORENO (1996, p.36).

Esse tipo de condição de contorno é útil, quando o fluxo entre a superfície e as águas subterrâneas é conhecido. O fluxo pode ser nulo ou não. O exemplo mais utilizado é a condição de contorno de fluxo nulo, em que é atribuído que o fluxo é igual a zero na fronteira do domínio. Esse tipo de contorno é comum em áreas de divisores de água subterrâneos.

O término de um aquífero em uma unidade de rocha impermeável constitui um conveniente limite físico de fluxo nulo (ANDERSON e WOESSNER, 1992). Quando se utiliza a condição de fluxo nulo em todo o contorno do modelo, deve ser apresentar, ao menos, uma carga conhecida para limitar as soluções do modelo.

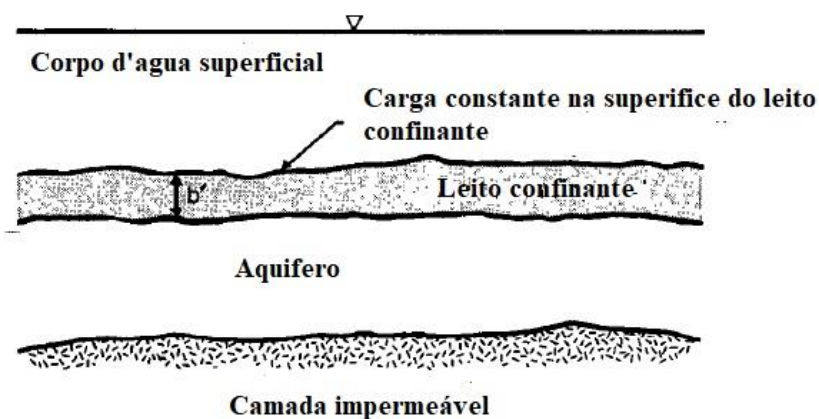
- **Tipo III (Condição de Cauchy):** Condição de fluxo dependente da carga hidráulica, expresso matematicamente por:

$$\frac{dh}{dn} + ch = \text{constante} \quad (17)$$

onde **c** também é uma constante.

Um exemplo desse tipo de contorno é a superfície de um aquífero coberto por um leito semiconfinante que, por sua vez, está coberta por um corpo d'água superficial (Figura 12). A carga, no corpo d'água superficial permanece constante, sendo o fluxo que passa através da camada semiconfinante expresso pela Lei de Darcy. Portanto, o fluxo é uma função linear da carga hidráulica no aquífero – à medida que a carga cai, o fluxo através da camada semiconfinante aumenta, e a medida que a carga aumenta, o fluxo diminui (FRANKE et. al, 1987).

Figura 12 - Condição de contorno de fluxo dependente da carga



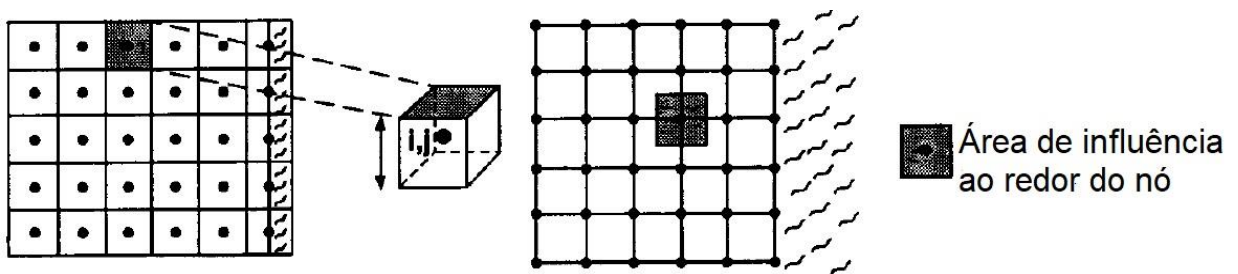
Esse é um tipo de limite onde um fluxo se ajusta em resposta a mudanças na carga hidráulica adjacente ao limite. O fluxo é uma função especificada da carga hidráulica e varia durante a solução do problema, assim como a carga (WELS, 2012).

2.4.4 Método das diferenças finitas

O método das diferenças finitas (MDF) baseia-se na aproximação das equações diferenciais parciais (equação governante, condições de contorno e condição inicial) por meio de equações algébricas, representadas em intervalos discretos na forma de matriz.

O MDF computa um valor para a carga hidráulica no nó, que também é a carga média na célula que rodeia o nó (ANDERSON e WOESSNER, 1992). Existem os grids em que os nós são centrados em malha e grids em que os nós são centrados em blocos (Figura 13). Onde uma reta vertical (de coluna) cruza uma reta horizontal (de linha), é estabelecido um nó centrado em malha. Uma alternativa são os nós centrados em blocos, em que eles são situados no centro de cada bloco (CLEARY, 1991).

Figura 13 - a. Grid de diferenças finitas com nó centrado em bloco. b. Grid de diferenças finitas com nó centrado em malha

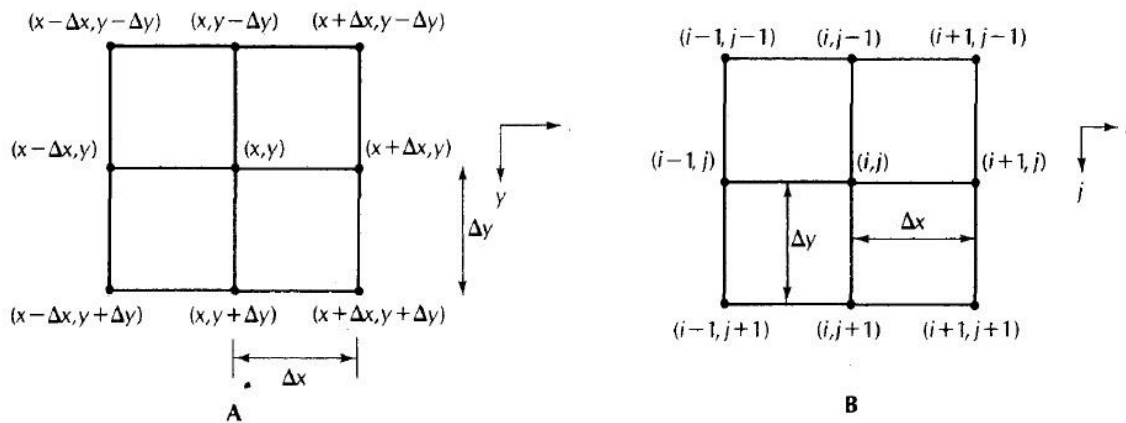


Fonte: ANDERSON e WOESSNER (1992, p.47).

Nos códigos computacionais, existe uma notação específica para os nós (i, j, k) , se referindo a posição dentro de uma coluna, linha e camada. O componente k só existe em modelos tridimensionais. A notação para i é positivo para direita e para j positivo é para baixo. Portanto, a linha abaixo da linha j é a linha $j - 1$ e a linha acima da linha j é $j + 1$. A coluna à esquerda da coluna i é a coluna $i - 1$ e a coluna a direita

da coluna i é $i + 1$ (FETTER, 1994). A Figura 14, exemplifica esse tipo de notação no grid de diferenças finitas.

Figura 14 - a. Grid de diferenças finitas. b. Notação computacional para o grid de diferenças finitas



Fonte: Fetter (1994, p.552).

Em Wang e Anderson (1982), foi apresentada uma aproximação da equação de Laplace para um fluxo permanente em meio homogêneo e isotrópico bidimensional, utilizando o método numérico das diferenças finitas

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (18)$$

A equação de diferenças finitas para um grid regular, onde Δx e Δy são constantes e iguais, pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{h_{i+1,j} + h_{i-1,j} + h_{i,j+1} + h_{i,j-1}}{4} = h_{i,j} \quad (19)$$

onde o valor da carga no ponto representado pelos índices (i, j) é representado por $h_{i,j}$.

Em problemas envolvendo um grande número de nós, soluções simultâneas não são práticas, pois cada nó requer a solução da equação 18. A equação de

diferenças finitas é, então, solucionada por *métodos iterativos*. Baseado em valores fixados de carga (Contorno Dirilecht) e uma sugestão inicial de carga hidráulica, a equação 18 é solucionada para cada nó baseado nos valores dos quatros nós do seu entorno. Assim que a carga em cada nó é recomputada, a diferença entre o chute inicial e a carga recomputada é determinada. O processo é repetido até que a máxima diferença nos valores de carga, de uma iteração para a próxima, é menor que um valor pré-estabelecido conhecido como *critério de convergência* (FETTER, 1994).

2.4.5 Modelagem no Sistema Aquífero Bauru

As aplicações de modelos no SAB são escassas, com poucos estudos detalhando as características de escoamento do aquífero. Entretanto alguns estudos são aqui apresentados com o objetivo demonstrar o panorama atual de investigações realizadas por pesquisadores para analisar o regime de escoamento e as oscilações do nível freático.

De acordo com Arid et al. (1970), estima-se que a reserva do SAB em São José do Rio Preto – SP seja de 40 bilhões de m³, com volume disponível de 25 a 30 bilhões de m³. Soldera (2012) aplicou o modelo PIRFICT em Assis-SP e identificou que os poços localizados em área de baixada são mais rasos e sensíveis as variações sazonais da precipitação e evapotranspiração, e que o relevo das áreas de estudo condiciona as dinâmicas distintas nos poços de monitoramento. Naiva (2015) também utilizando o PIRFICT demonstrou que os níveis freáticos do SAB na região da Estação Ecológica de Assis, são mais influenciados pelo escoamento de base do que pela sazonalidade climática.

Miranda (2012) usando a modelagem por diferenças finitas identificou que a superfície freática acompanha os gradientes do terreno, gerando campos de velocidades que direcionam o escoamento para as redes superficiais de drenagem. Oliveira (2002) elaborou um modelo numérico para o município de São José do Rio Preto e observou que uma diminuição em 10% na recarga provocaria reduções de 20 m da espessura saturada do aquífero na área urbana e 10 m na área rural. Carvalho (2013) realizou a simulação numérica através do método das diferenças finitas e identificou que 45% do recurso subterrâneo está sendo explorado, o que caracteriza a situação do município como crítica. Segundo Barison (2003) as águas

do Aquífero Bauru estão em grande parte próximas da superfície e, portanto, muito vulneráveis a agentes contaminantes, o que se agrava em locais com maior densidade demográfica.

2.4.6 FREEWAT

O FREEWAT é um ambiente de modelagem de código aberto e domínio público, para simulação da quantidade e qualidade da água em águas superficiais e subterrâneas com um módulo integrado de gerenciamento e planejamento de água (ROSSETO et al., 2015). O FREEWAT é uma plataforma baseada nos códigos da família MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1988) do USGS. A versão integrada na plataforma é o MODFLOW *One Water Hydrologic Model* (MODFLOW-OWHM; HANSON et. al., 2014).

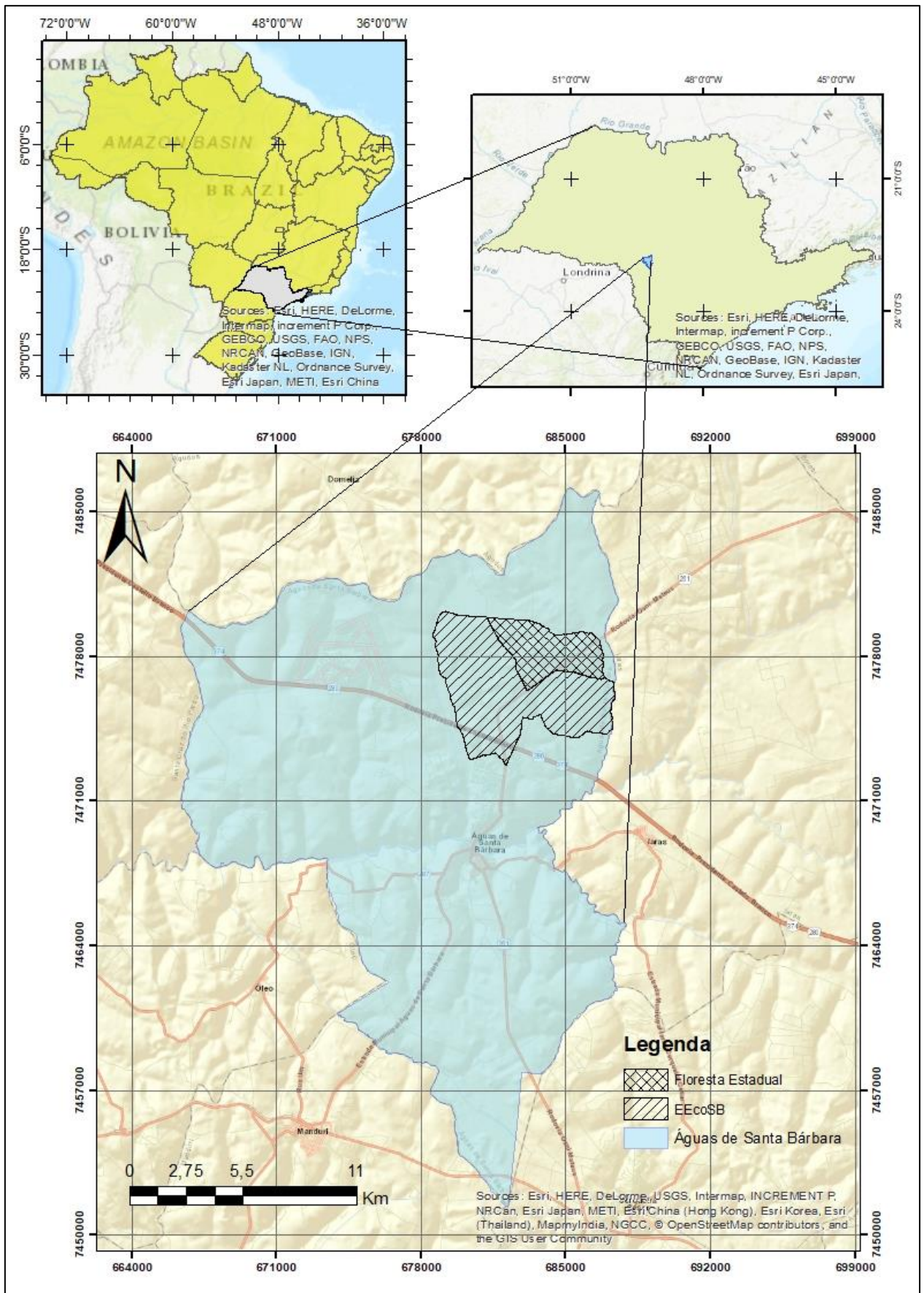
O FREEWAT foi concebido como um *plugin* integrado ao Sistema de Informações Geográficas (SIG) QGIS. Ele foi projetado como um conjunto modular, com ferramentas para simulação de diversos processos do ciclo hidrológico, processos hidrogeoquímicos e socioeconômicos. A plataforma é combinada às funcionalidades do geoprocessamento, permitindo a integração, manipulação e pós processamento de dados de entrada e saída do modelo. Para esse estudo, foi utilizado o QGIS 2.14 por ser a versão de longo prazo disponível no período.

A estrutura de modelagem inclui Interfaces Gráficas do Usuário para rodar códigos automatizados de análise de sensibilidade, calibração e avaliação de incertezas em modelos hidrológicos (FOGLIA et. al., 2007). O módulo UCODE_2014 (POETER et al., 2014) foi implementado para realizar a calibração, análise de sensibilidade e estimativa de parâmetros visando melhorar o ajuste do modelo.

2.5 Caracterização da área de estudo

A Estação Ecológica de Santa Bárbara fica localizada próxima a rodovia SP-280 (Castelo Branco), nas coordenadas 24°48' de latitude e 49°13' de longitude. Possui uma área de 2.712 hectares, no município de Águas de Santa Bárbara – SP (Figura 15). O uso da terra é composto por áreas de cerrado com fragmentos da floresta Estacional Semidecidual em conjunto com talhões de pinus e eucalipto.

Figura 15 - Localização da Estação Ecológica de Santa Barbara

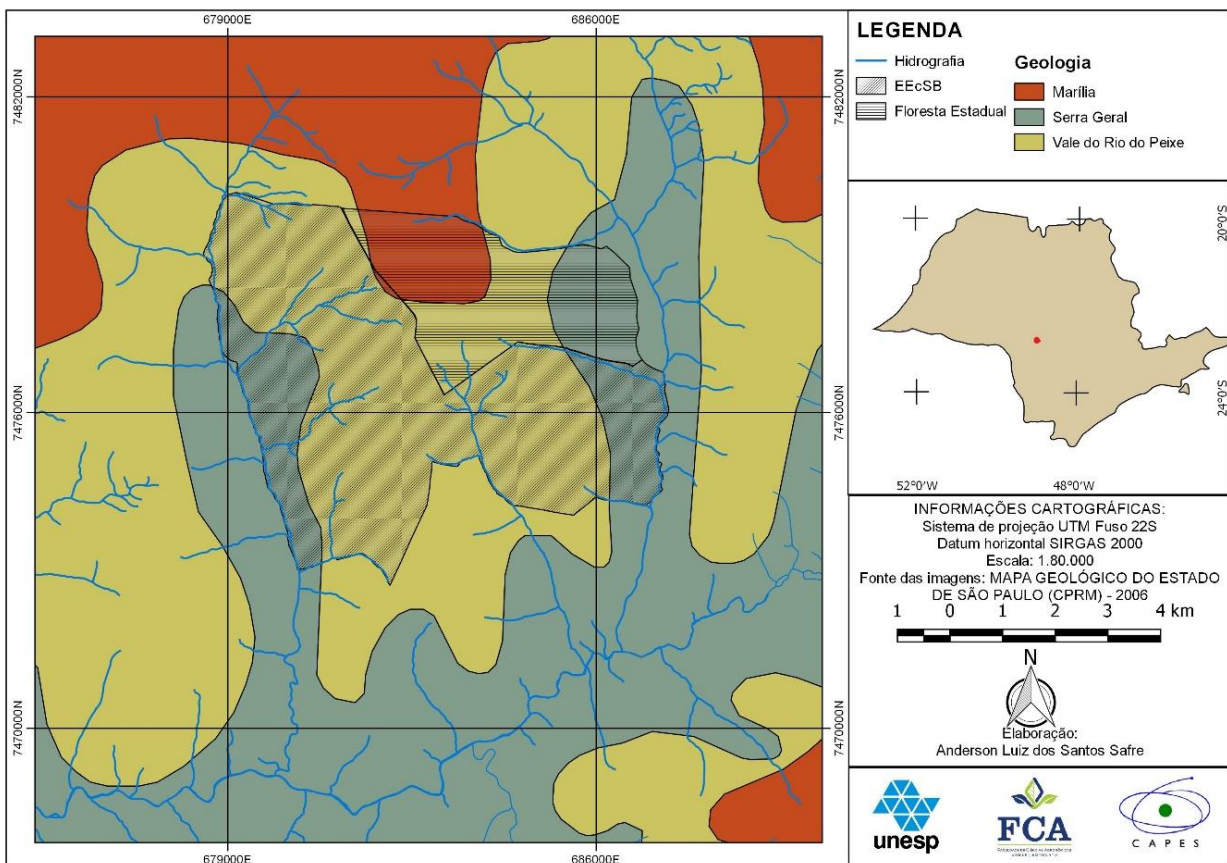


2.5.1 Geologia

Na área ocorrem três grandes unidades geológicas, constituídas por arenitos da Formação Marília ao Norte, e arenitos da Formação Adamantina, ao Sul, ambas rochas do Grupo Bauru. Essas formações repousam sobre as rochas basálticas da Formação Serra Geral, Grupo São Bento (Figura 16).

O contato inferior da Formação Adamantina é discordante com os basaltos da Formação Serra Geral; o contato superior é concordante interdigitado a abrupto com a Formação Marília (PAULA e SILVA et al., 2003). A Formação Vale do Rio do Peixe compreende grande parte da antiga Formação Adamantina, porém neste estudo, ela será representada utilizando a segunda terminologia.

Figura 16 - Geologia da região da Estação Ecológica de Santa Barbara



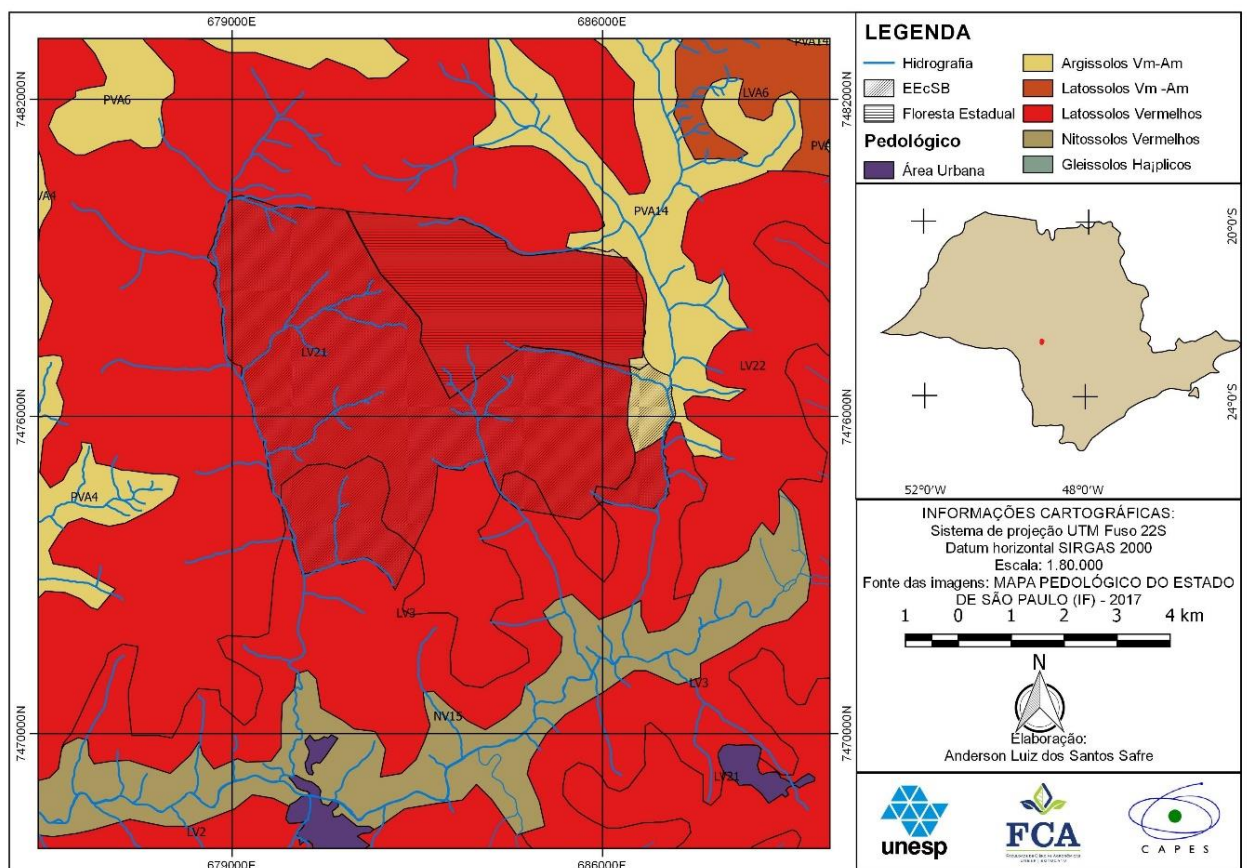
Segundo Melo e Durigan (2011), a Formação Adamantina tem origem fluvial, com predominância de arenitos finos a muito finos, em bancos maciços, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltitos e argilitos, estratificação plano-paralela e paralela de pequenas dimensões.

A Formação Marília é a que ocupa as maiores elevações topográficas. Segundo o IPT (1981), essa formação apresenta arenitos de granulação fina e grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte, ocorrendo, subordinadamente, lentes de siltitos, argilitos e arenitos muito finos. É comum a presença de nódulos carbonáticos.

2.5.2 Pedologia

As classes de solos que ocorrem na EEcoSB podem ser visualizadas no Mapa Pedológico (Figura 17), extraído da folha Bauru (SF-22-Z-B), do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo, (ROSSI, 2017). Dentro da área da EEcoSB, prevalecem os Latossolos Vermelhos (LV3 e LV21), e os Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA14).

Figura 17 - Mapa Pedológico da região da Estação Ecológica de Santa Barbara



Segue a descrição das classes de solo segundo Rossi (2017):

- LV3 – Associação de Latossolo Vermelho Eutroférico/Distroférico típico + Nitossolo vermelho Distroférico/Eutroférico, típico, ambos A moderado e chernozêmico, textura argilosa a muito argilosa
- LV21 – Latossolo Vermelho ou Vermelho-Amarelo, distrófico, típico A moderado ou fraco, textura média, álico ou não álico, fase de relevo suave ondulado.
- PVA14 – Argissolo Vermelho-Amarelo, distrófico típico, A moderado ou fraco, textura arenosa/média ou média, fase relevo ondulado e suave ondulado.

Os Latossolos granulares presentes na região da EEcoSB apresentam alta suscetibilidade a erosão. Além disso, são pouco filtrantes, o que se traduz num maior risco de contaminação do aquífero livre por agrotóxicos e efluentes diversos (MELO e DURIGAN, 2011).

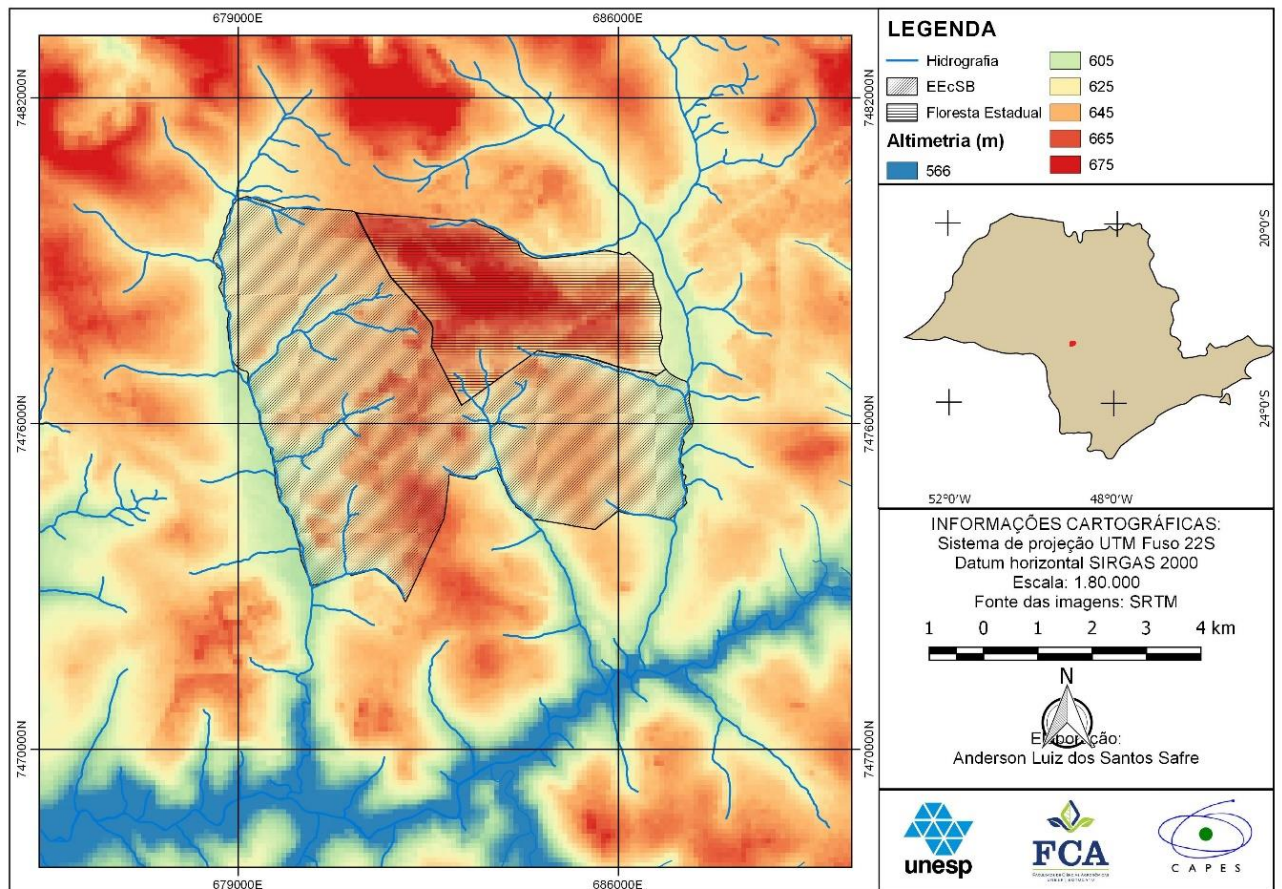
2.5.3 Geomorfologia

Segundo o mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS e MOROZ, 1996), a EEcoSB está localizada no Planalto Ocidental Paulista (Unidade Morfoescultural), sob a Bacia Sedimentar do Paraná (Unidade Morfoestrutural), onde predominam formas de relevo de colinas amplas e baixas (Figura 18).

Segundo o IPT (1981), o Planalto Ocidental Paulista situa-se essencialmente sobre rochas do Grupo Bauru, constituído por diversas formações areníticas. Basaltos expõem-se nos vales dos principais rios em ocorrências descontínuas, exceto ao longo do Rio Paranapanema e Rio Pardo, onde afloram extensivamente. O relevo predominante é do tipo colinoso, paisagisticamente monótono, com baixas declividades (<15%) (MELO e DURIGAN, 2011).

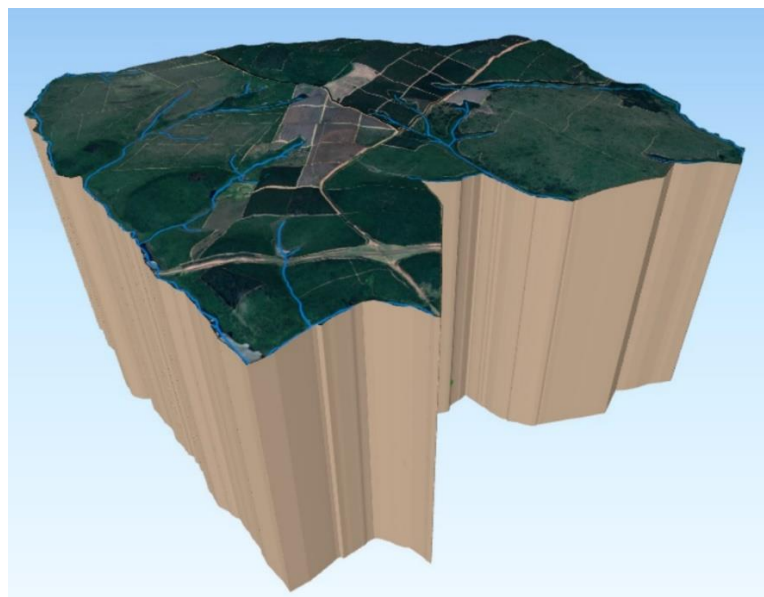
O relevo da região é suave-ondulado com os divisores de água de topos aplainados. No mapa hipsométrico, é possível visualizar que não há grandes variações de altitudes, predominando valores entre 640 m e 680 m. De acordo com Ross e Moroz (1996), os setores de vertentes pouco mais inclinados são extremamente susceptíveis a processos erosivos, principalmente quando desenvolvem escoamentos concentrados.

Figura 18 - Mapa Hipsométrico da Estação Ecológica de Santa Barbara



O modelo Tridimensional da EEcSB (Figura 19) foi elaborado utilizando o Modelo Numérico de Terreno do SRTM em conjunto com as imagens do Satélite Sentinel 2B utilizando o plugin Qgis2threejs do QGIS.

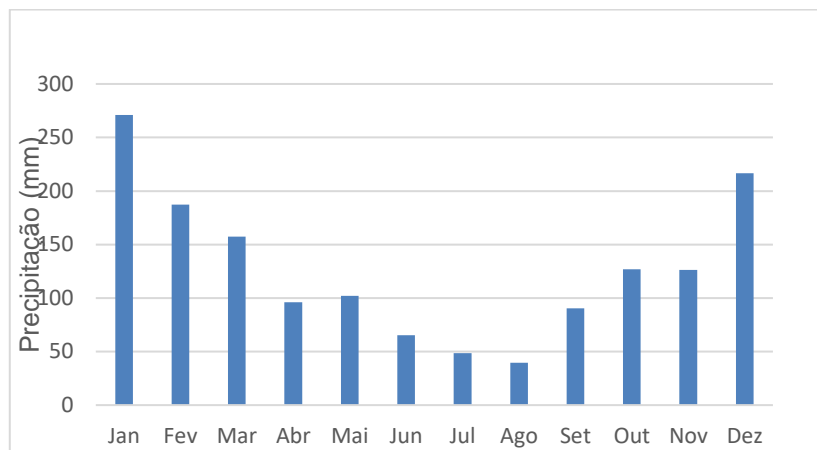
Figura 19 - Modelo Tridimensional de Elevação da EEcSB.



2.5.4 Clima

O clima característico, de acordo com a classificação de Koeppen, é quente de inverno seco, com temperatura média de 16°C no mês mais frio e 23°C no mês mais quente (Cwa) (CEPAGRI, 2016). A precipitação pluviométrica anual oscila entre 1000 e 1500 mm (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Variação da precipitação média mensal (1987-2017)

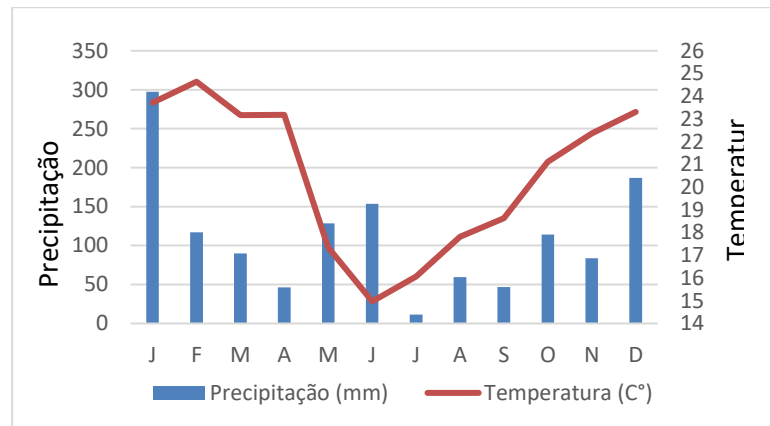


É notável a sazonalidade climática marcada por um período seco (de junho a setembro), e um período úmido (com chuvas concentradas de outubro a fevereiro). As baixas temperaturas no inverno fazem com que seja baixa a evapotranspiração potencial (ET₀), de modo que não exista um déficit hídrico significativo.

O Gráfico 2 foi elaborado com dados de temperatura média mensal e precipitação acumulada do ano de 2016, obtidos pela estação meteorológica automática da EEcSB, instalada em setembro de 2014. É possível verificar que embora não existam grandes variações de temperatura, o ano de 2016 foi um ano atípico, pois devido ao fenômeno atmosférico El Niño houve um aumento da precipitação nos meses de inverno.

De acordo com Melo e Durigan (2011), o fato dos solos da unidade possuírem baixa capacidade de retenção, resulta em restrição hídrica para as plantas na estação seca, sendo um condicionante para a existência da vegetação de Cerrado.

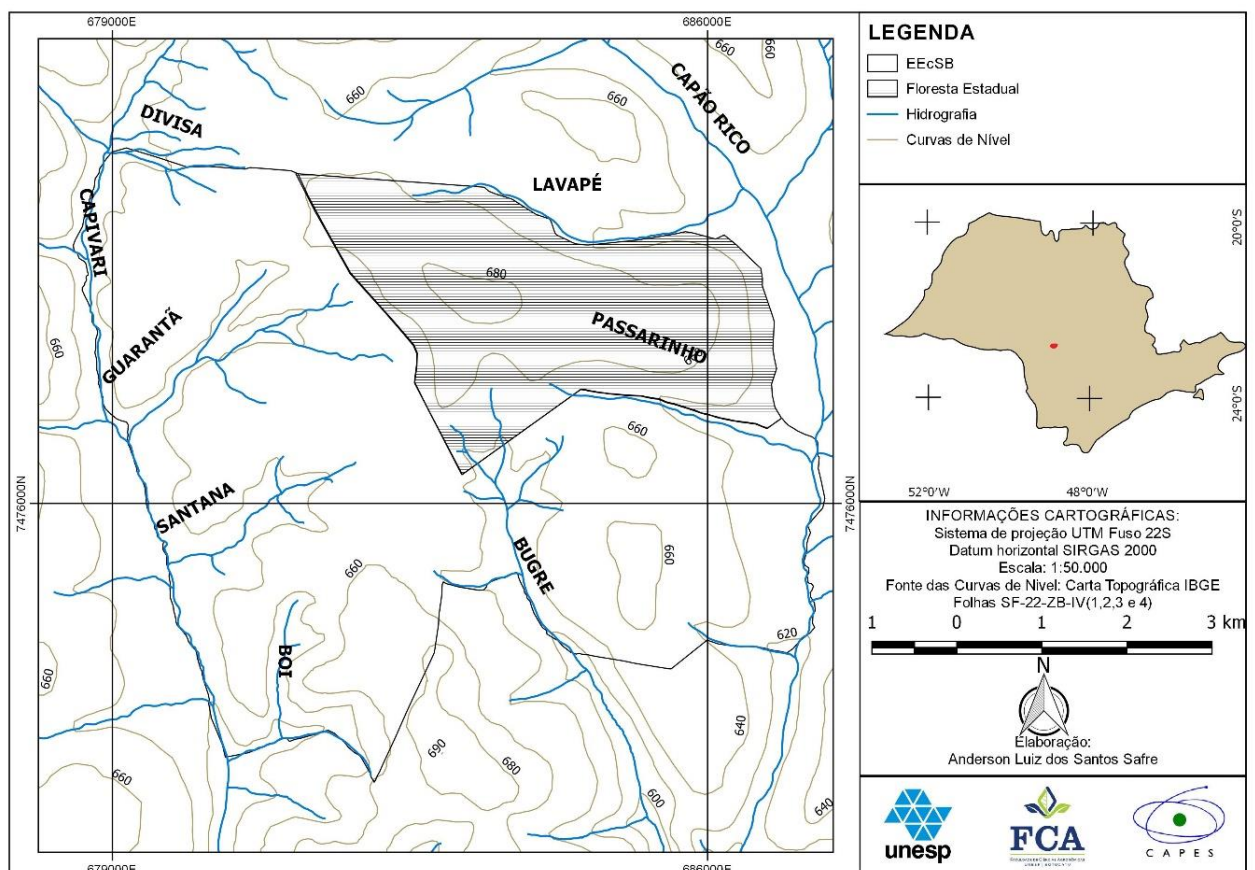
Gráfico 2 - Variação da precipitação e temperatura média mensal no ano de 2016



2.5.5 Hidrografia

Em âmbito hidrológico regional, a EEcSB está inserida na bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema, Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos -17 (UGRHI-17). A área é margeada a leste pelo Rio Capão Rico e a oeste pelo Rio Capivari.

Figura 20 - Rede de drenagem da Estação Ecológica de Santa Barbara



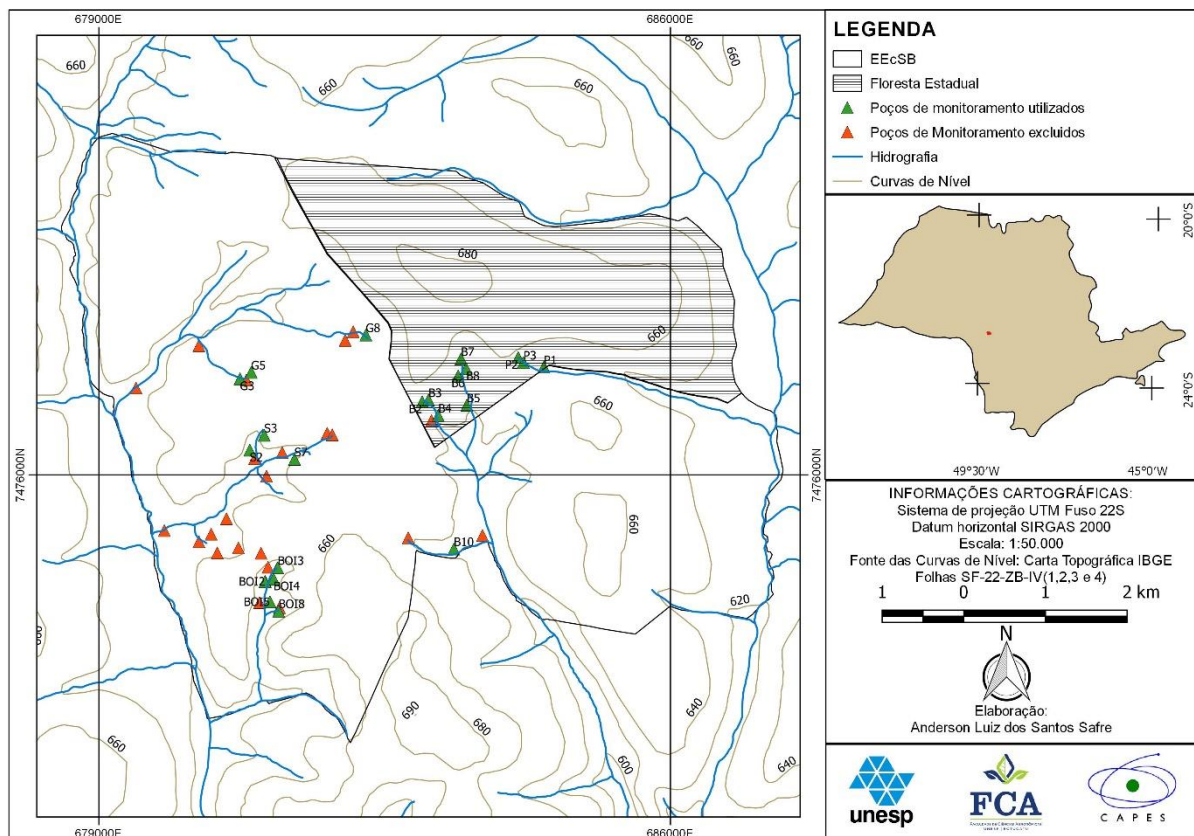
De modo geral, as cabeceiras de cursos d'água exibem maior ramificação da drenagem e, conseqüentemente, densidades desde médias a altas (MELO e DURIGAN, 2011). Os canais são descritos como pouco largos e poucos profundos, denunciando o assoreamento intensivo, comprovado pelo substrato arenoso que predomina no leito. Inúmeros corpos d'água nascem no interior dessa unidade de conservação, muitos dos quais secam durante o período de estiagem (HONDA e NIZOLI, 2008). São eles os córregos do Passarinho, Divisa, Garantã, Santana, Boi, Bugre e Lavapé (Figura 20). Os parâmetros morfológicos e de vazão coletados por Honda e Nizoli (2008), nos córregos que nascem na EEcoSB, e a localização dos pontos de coleta, encontram-se no Anexo A.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Monitoramento do Nível Freático

Para monitoramento da carga hidráulica e calibração do modelo, foram utilizados dados de 43 piezômetros (Figura 21) localizados nas bacias do Guarantã, Boi, Santana, Bugre e Passarinho. As campanhas de leitura do nível d'água foram realizadas do dia 05 de dezembro de 2014 a 05 de setembro de 2017. Os níveis da água foram obtidos utilizando um medidor de nível automático *Solinst* modelo 102, esse medidor possui marcações permanentes a laser a cada milímetro e possui um sensor na ponta que aciona um *buzzer* ao passo que fecha circuito.

Figura 21 - Localização dos poços de monitoramento na Estação Ecológica de Santa Barbara



Os dados foram coletados em intervalos de 15 dias, mais detalhes a respeito das campanhas de coleta ou os poços utilizados estão disponíveis em Manzione (2018). Esses poços de monitoramento fazem parte da infraestrutura de pesquisa instalada na EECoSB, em função do projeto de auxílio regular a pesquisa intitulado “Monitoramento de níveis freáticos no Sistema Aquífero Bauru em área de

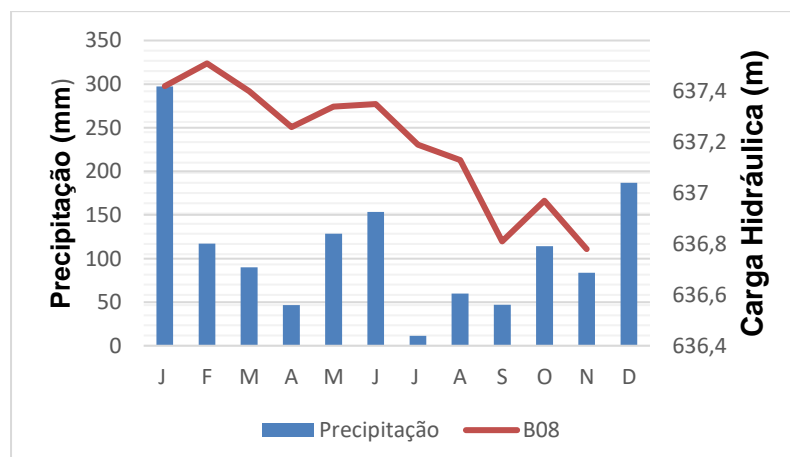
conservação em Águas de Santa Bárbara, SP” financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – Processo: 2014/04524-7).

Figura 22 - Medidor automático de nível Solinst modelo 102



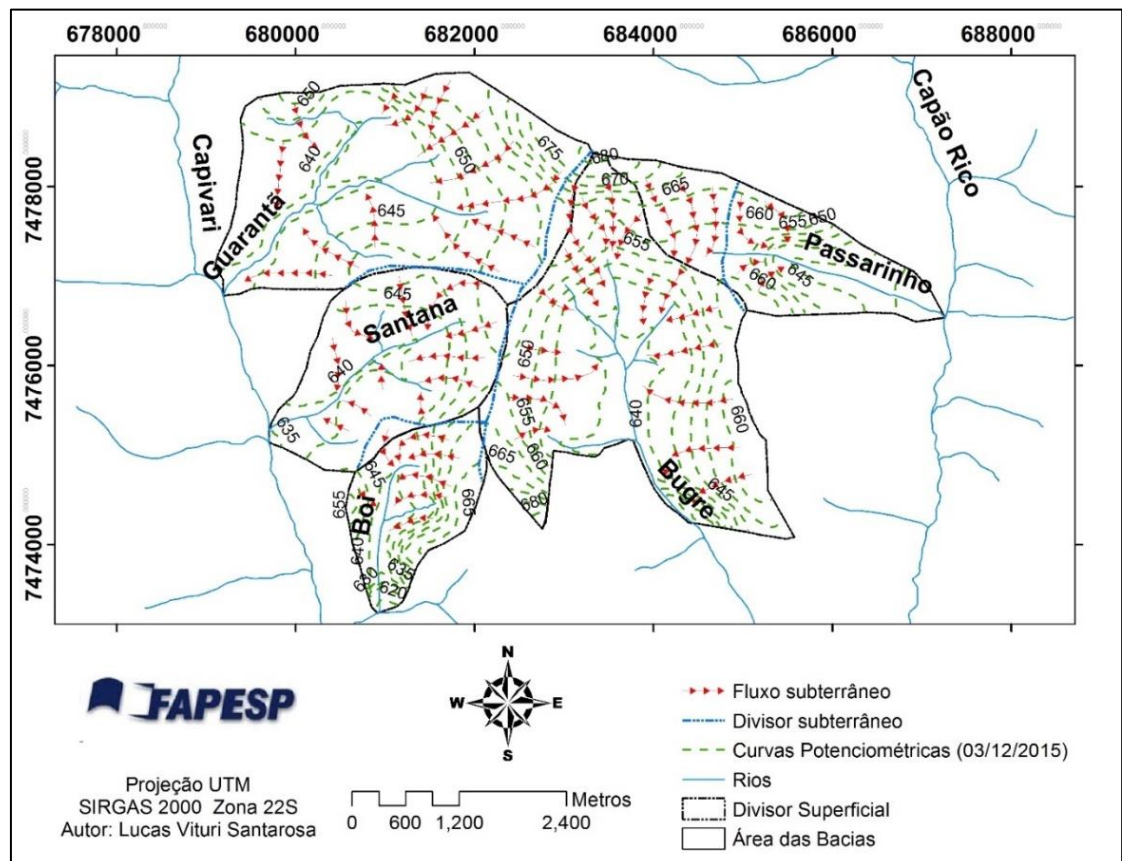
Devido a grande maioria dos poços apresentar o nível médio de água ≤ 1 m, e a erros de generalização topográfica do modelo digital de elevação do SRTM (resolução 90 m), a calibração do modelo inicialmente foi muito difícil. Desse modo, 20 poços que apresentaram grande discrepância foram excluídos da calibração e o processo seguiu com 23 poços, distribuídos de maneira a representar as bacias monitoradas. O Gráfico 3 apresenta a altura do nível freático do poço de monitoramento B8 em relação aos valores de precipitação acumulada mensal no ano de 2016. É possível notar que a resposta do nível é muito rápida, característica de aquíferos livres com moderada permeabilidade.

Gráfico 3 - Precipitação acumulada e valor da carga hidráulica no poço B08 da Estação Ecológica de Santa Barbara



Na figura 23 é possível visualizar o mapa de superfície potenciométrica calculado por Santarosa (2017) com dados do dia 03/12/2015. Nele é possível identificar que se trata de um aquífero raso com nível d'água superficial e que os caminhos preferenciais de fluxo configuram as zonas de descargas nos rios próximo aos limites da EEcSB.

Figura 23 - Mapa Potenciométrico da Estação Ecológica de Santa Barbara em 31/12/2015



Fonte: Santarosa (2017, p.409)

3.2 Geoprocessamento dos dados

A coleta, organização e processamento dos dados iniciais foi realizada no Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o software QGIS v. 2.14.8 (Essen). Todos os dados foram convertidos para o sistema de projeção de coordenadas planas (UTM), Fuso 22S, datum SIRGAS 2000. Para investigação inicial foi feito um mosaico com as cartas topográficas do IBGE SF-22-ZB-IV 1, 2, 3 e 4. Depois foi obtida a imagem do Projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM)

– 1 arc second, com preenchimentos de falhas e resolução de 30 m. disponibilizados pelo site *Earth Explorer* do *United States Geological Service* (USGS).

O banco de dados foi dividido em dados físico e dados do modelo. Os dados físicos coletados foram: (i) Mosaico com as cartas topográficas do IBGE georreferenciadas; (ii) *Shapefile* com os dados Potenciométrico dos poços da EEcSB; (iii) Modelo Digital de Elevação obtido utilizando as imagens SRTM; (iv) *Shapefile* contendo as drenagens extraídas das cartas topográficas. (v) *Shapefile* com as curvas de nível de acordo com as cartas topográficas; (vi) Mapa Geológico do Estado de São Paulo (CPRM, 2006) georreferenciado; (vii) mapas com interpolações dos valores do nível freático na EEcSB; (viii) Limites das UGRHI do Estado de São Paulo, limite do município de Águas de Santa Barbara e Limites da EEcSB; (ix) Mapa pedológico do estado de São Paulo (IF, 2017); (x) *Shapefile* com localização e descrição dos poços do SIAGAS; (xi) *Shapefile* com os Aquíferos do Estado de São Paulo; (xii) *Shapefile* com a Litologia do Estado de São Paulo.

Os dados do modelo correspondem aos *shapefiles* gerados após a criação do modelo como: (i) *shapefile* contendo a geometria e os parâmetros hidráulicos do aquífero bauru; (ii) *shapefiles* contendo os dados referentes as condições de contorno do tipo dreno atribuído a todas as drenagem representadas no modelo numérico; (iii) *shapefile* contendo informações a respeito da distribuição da recarga no domínio simulado; (iv) *shapefile* contendo informações a respeito da distribuição da evapotranspiração no domínio; (v) *Shapefile* contendo informações a respeito dos poços para entrada no processo de calibração e criação dos *Heads Observation Datas* (HOB's).

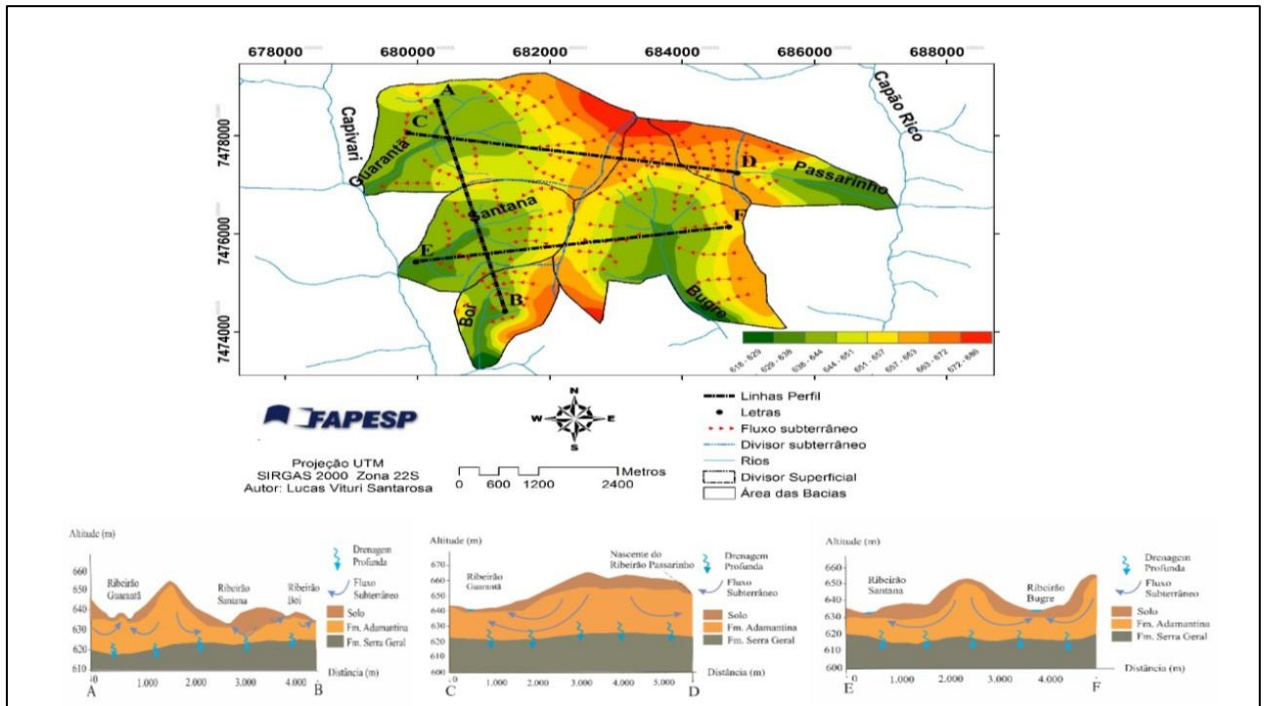
3.3 Simulação Numérica

3.3.1 Modelo Hidrogeológico Conceitual

O modelo conceitual foi criado a partir de algumas alterações do Modelo Hidrogeológico conceitual da EEcSB (Figura 24), descrito por Santarosa (2017).

Esse modelo foi gerado a partir de dados da profundidade do nível freático, espessura da camada saturada, valores de porosidade efetiva, condutividade hidráulica e o Modelo Digital de Terreno (MDT).

Figura 24 - Modelo hidrogeológico conceitual inicial



Fonte: Santarosa (2016, p.87)

As seguintes hipóteses foram admitidas no modelo conceitual adotado neste trabalho:

- 1) Heterogeneidade litológica. O domínio foi dividido em duas unidades litológicas com comportamentos isotrópico e homogêneo de condutividades hidráulicas (Fm. Marília e Fm. Adamantina).
- 2) Os afloramentos impermeáveis de basalto nas fronteiras laterais e na base do domínio caracterizam uma condição de conectividade hidráulica inexistente com o SAB, representando, dessa maneira, condições de contorno de fluxo nulo.
- 3) Para delimitação da fronteira norte do domínio, foi utilizado o divisor de águas da bacia hidrográfica do Rio Pardo, que é um divisor regional de água subterrânea e configura uma condição de contorno de fluxo nulo.

Outros divisores de água nas bacias do Capivari e Capão Rico foram utilizados para delimitar o modelo na região Nordeste e Noroeste.

- 4) A espessura do modelo varia de 0,1 m nas bordas indo até 60 m ao norte do modelo. A espessura média das unidades foi obtida pelos dados de profundidade dos poços do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIAGAS) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) na área juntamente com os dados do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM).
- 5) O aquífero foi representado como livre em toda sua extensão.
- 6) Os fluxos de entrada foram simulados pela recarga pela precipitação, e os fluxos de saídas foram representados pela evapotranspiração e os córregos presentes no domínio.
- 7) A descarga de água subterrânea ocorre através das drenagens presentes na área. Estas apresentam alto grau de dissecação, com espessuras menores do SAB próximo ao leito dos rios. Foi identificado na área que todos os córregos, no trecho inicial, estão sob o SAB, entretanto, após curtas distancias, os mesmos corpos d'água fluem sobre os afloramentos de basalto. Os trechos que fluem para além do domínio foram excluídos da simulação, devido o maior montante de água ser fornecido no trecho com conectividade hidráulica com o SAB.

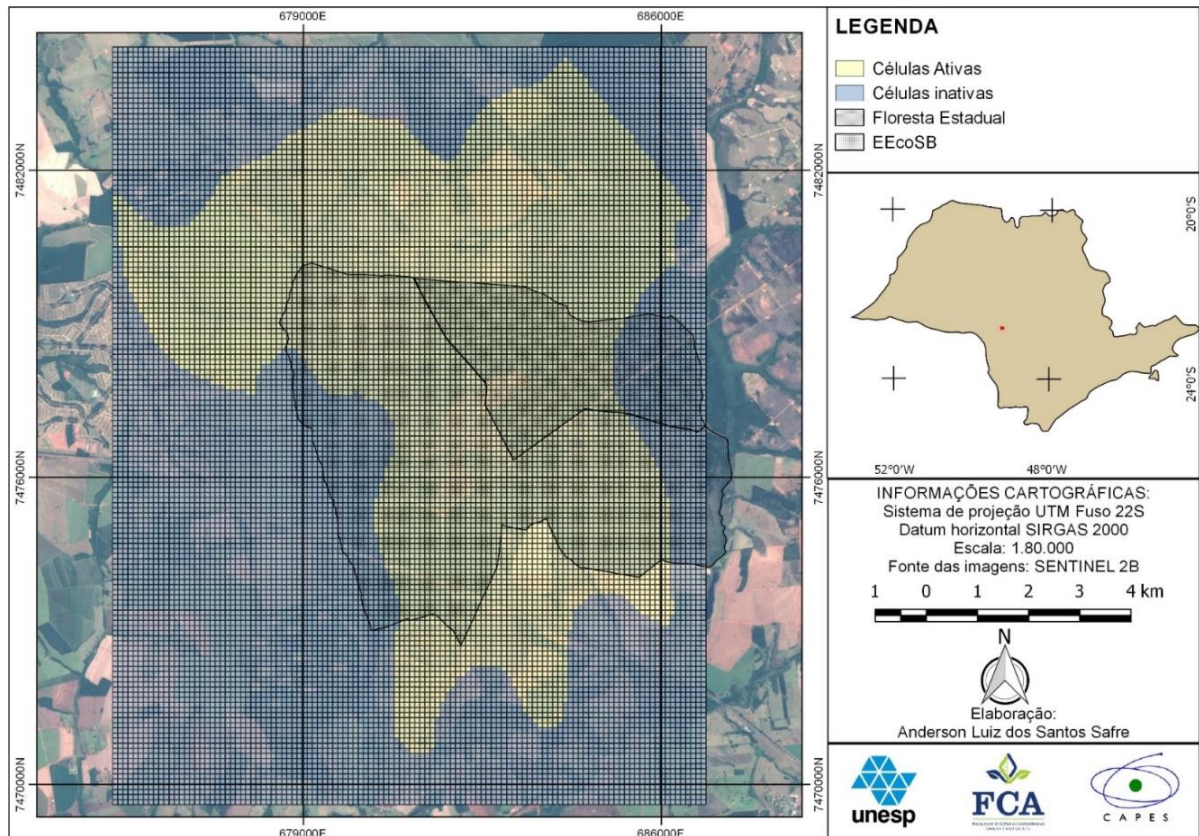
3.3.2 Discretização do Modelo

O domínio ativo possui uma área de 7.789,00 ha. Um *grid* de diferenças finitas foi criado, com células de 100 x 100 m, gerando um total de 17.168 células. Todas as células fora do domínio foram desativadas, restando 7.789 células ativas (Figura 25).

O domínio foi discretizado verticalmente através de uma única camada com espessura variada, representando o SAB. Essa camada foi então dividida em duas zonas com o intuito de simular a Formação Marília e a Formação Adamantina. A topografia foi obtida utilizando o modelo digital de elevação SRTM. Para estimar a espessura da camada de arenito foram utilizados dados de profundidade obtidos utilizando os perfis de poços do SIAGAS (Anexo B), juntamente com os dados do

mapa geológico do estado de São Paulo (2006), onde a cota zero foi estabelecida como os afloramentos de basalto, no entorno da área.

Figura 25 - Localização da área simulada na Estação Ecológica de Santa Barbara

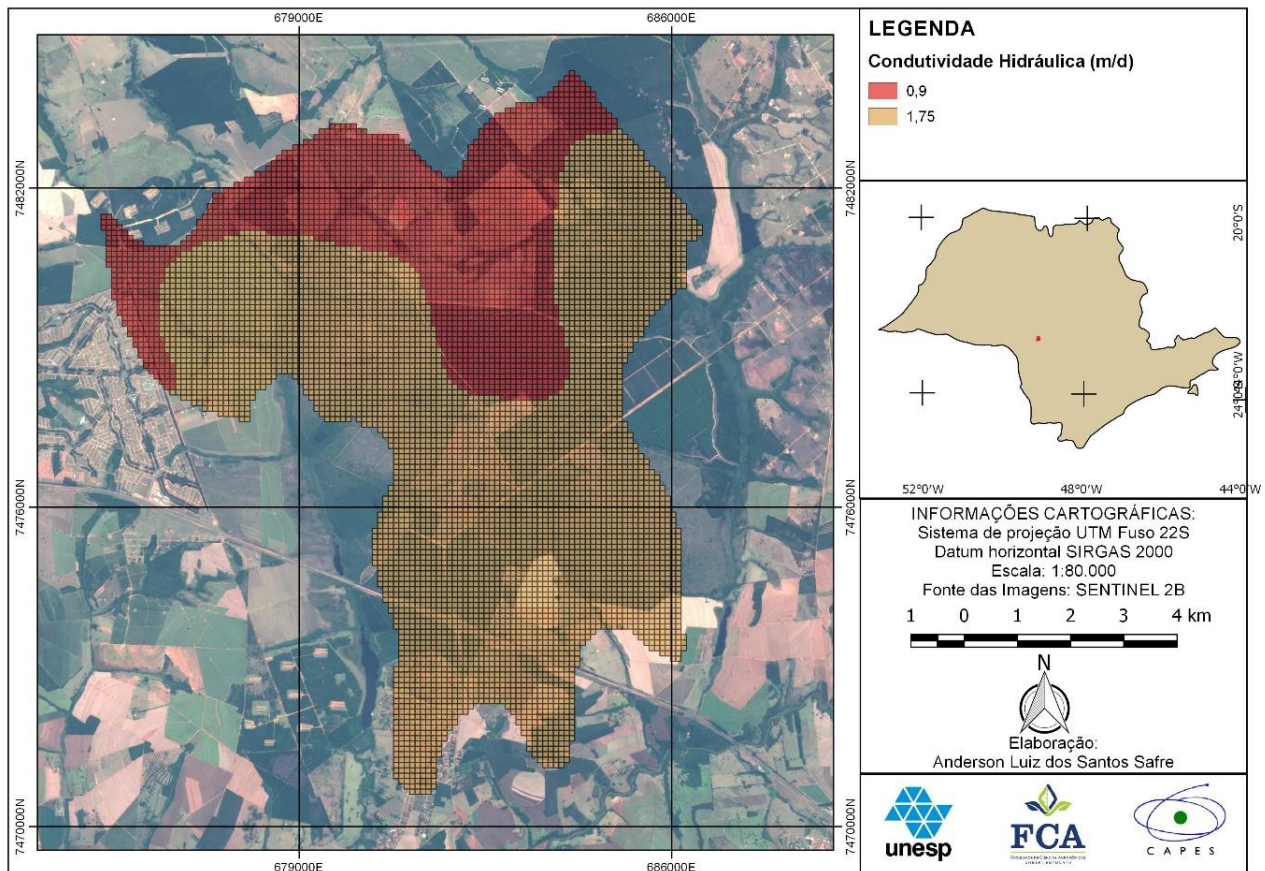


Uma camada *shapefile* de pontos foi criada para armazenar os dados dos poços e estimar o valor da espessura em locais não amostrados. Posteriormente, foi realizada a interpolação pelo inverso da distância ponderada (IDW), criando uma camada *raster*, com os valores de espessura do SAB que variou de 0,1 m nas bordas a 60 m no centro do domínio.

3.3.3 Propriedades Hidráulicas

A camada SAB foi dividida em duas zonas com diferentes condutividades hidráulicas (Figura 26), com o intuito de representar as Formações Marília e Adamantina. Para a Formação Adamantina, foi adotado um valor inicial de condutividade hidráulica de $2,02 \times 10^{-5}$ m/s (1,75 m/d).

Figura 26 - Distribuição inicial dos valores de condutividade hidráulica na Estação Ecológica de Santa Barbara



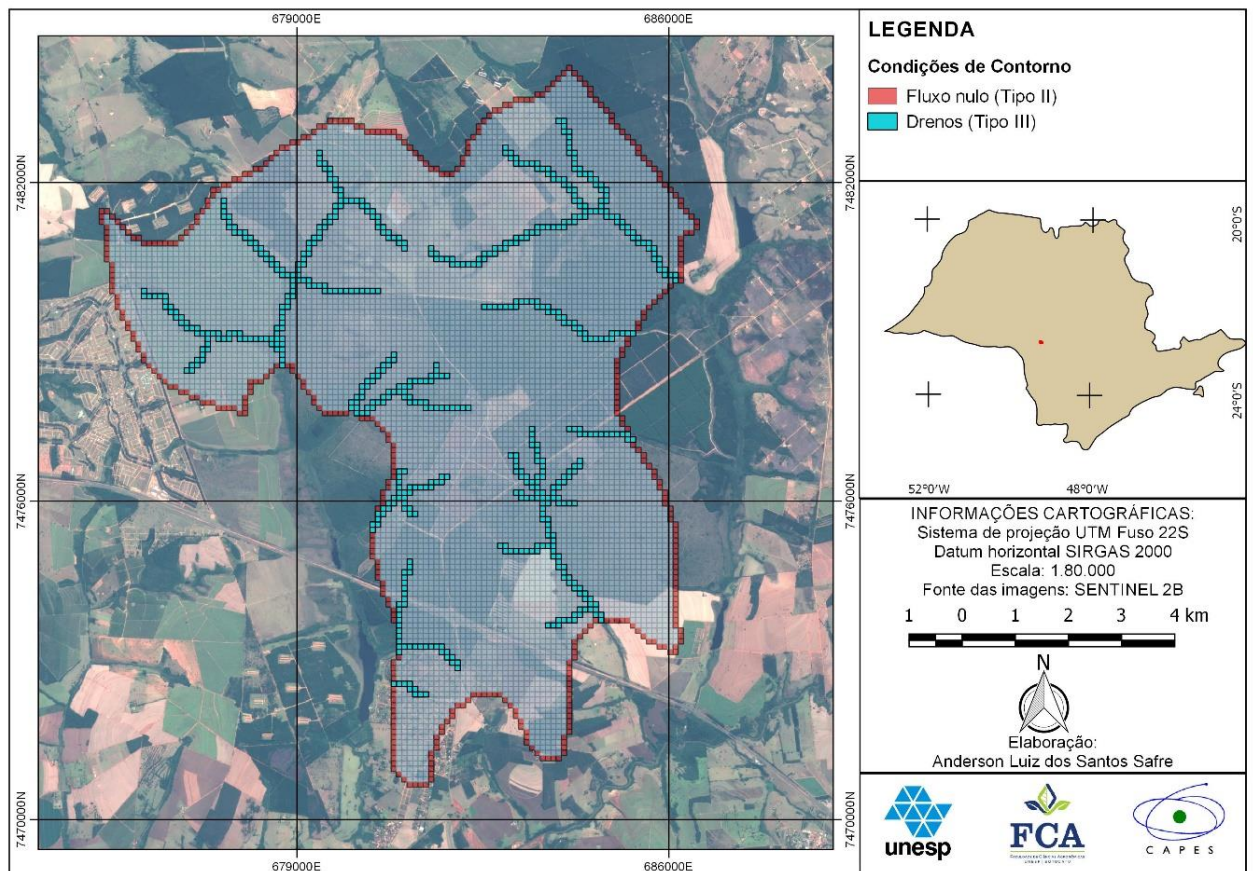
Para a Formação Marília, foi adotado o valor médio de $K = 1,04 \times 10^{-5}$ m/s (0,90 m/d), de acordo com Luiz et al. (2017), que obteve esse valor em 8 testes slugs realizados em uma área da Formação Marília no município de Itatinga – SP. Esse valor será adotado devido à proximidade com a área de estudo e às características litológicas semelhantes, em função da inexistência de dados na EEcoSB. Foi admitido um valor médio de rendimento específico de 0,1 para toda a camada 1.

3.3.4 Condições de Contorno e Condições Iniciais

Para simular as características hidrodinâmicas na área de estudo, foram selecionados os elementos hidrogeológicos naturais como os afloramentos de formações impermeáveis e divisores topográficos. Estas feições foram representadas como condições de contorno de fluxo nulo nas fronteiras norte, sul, leste e oeste do domínio (Figura 27). Os rios foram simulados como condições de

contorno de fluxo dependente da carga no interior do domínio. O contato inferior do SAB com o basalto também foi representado como fluxo vertical nulo. O divisor de águas do Rio Pardo, e os divisores de água de bacias menores do Capivari e Capão Rico foram representados como condição de fluxo nulo. Os afloramentos de basalto nas fronteiras do domínio, representam barreiras hidráulicas e foram simulados como condição de contorno de fluxo nulo.

Figura 27 - Localização das condições de contorno utilizadas na Estação Ecológica de Santa Barbara



3.3.4.1 Módulo Evapotranspiração (EVT)

A evapotranspiração é o mecanismo pelo qual a água da superfície, que está em estado líquido, é transferida à atmosfera, em estado gasoso, devido à ação conjunta da evaporação da água e transpiração das plantas. Isso é representado por meio de um fluxo de saída do aquífero, onde a fonte é a zona saturada.

O pacote MODFLOW EVT foi utilizado para simular a evapotranspiração no domínio. Segundo esse pacote, a taxa de evapotranspiração é calculada de acordo com a posição da carga hidráulica no aquífero em relação a duas elevações de referência (superfície de ET e elevação de extinção). A diferença entre essas duas elevações é chamada de profundidade de extinção. A descarga líquida por meio da evapotranspiração pode ser calculada pela equação:

$$Q = Q_{max} \left(\frac{h - d}{h_s - d} \right) \quad (20)$$

em que,

Q é a taxa de evapotranspiração (L^3/t),

Q_{max} é a taxa máxima de evapotranspiração (L^3/t),

h é a carga no aquífero (L), d é a elevação de extinção (L) e

h_s é o topo da célula (L).

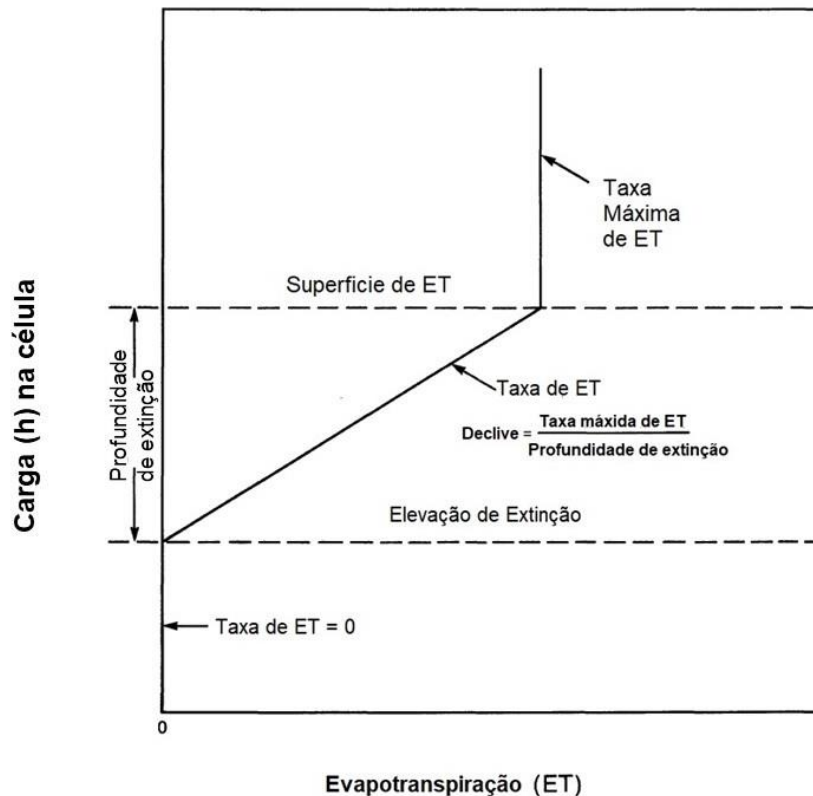
A elevação de extinção é calculada pela seguinte expressão:

$$d = h_s - p_{ext} \quad (21)$$

A taxa de ET decresce até zero à medida que a carga no aquífero declina até a elevação de extinção, e é definido como zero quando a carga no aquífero é rebaixada abaixo dessa elevação. A taxa de ET aumenta a um limite máximo definido pelo usuário a medida que a carga no aquífero passa acima da elevação de extinção para a elevação da superfície de ET (McDONALD e HARBAUGH, 1987).

Quando a carga é menor ou igual a h_s e maior ou igual a d ($h_s \geq h \geq d$), utiliza-se a Eq. 20, para representar a perda de água do aquífero pela evapotranspiração. Quando a carga é menor ou igual a elevação de extinção, a descarga é igual a zero.

Figura 28 - Comportamento da ET em função da carga no aquífero



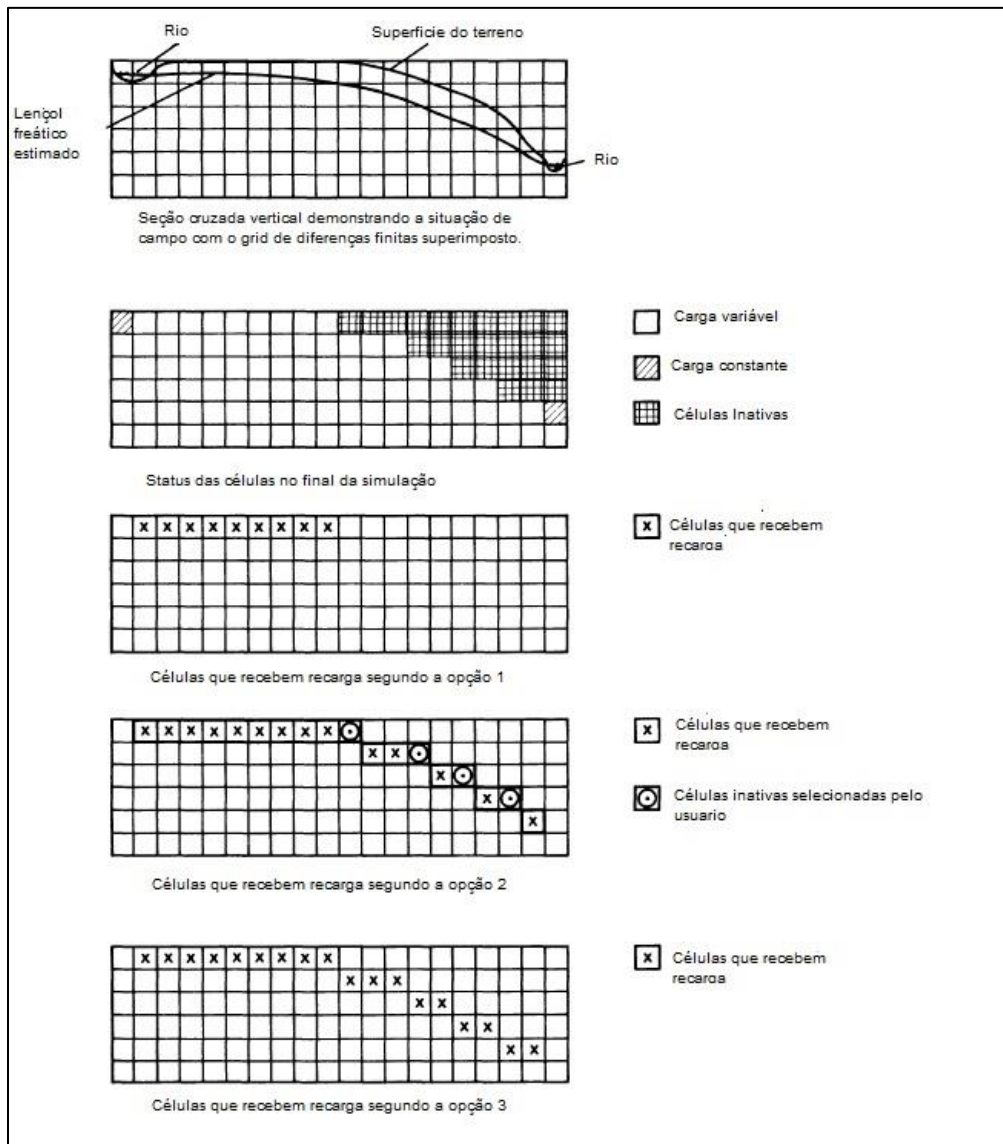
Adaptado de: McDonald e Harbaugh, (1987).

O valor inicial de evapotranspiração adotado para a simulação em regime permanente foi de 0,61 mm/d. Este foi o valor de Evapotranspiração de Referência (ET₀) calculado pela estação meteorológica automática, utilizando o método de Penman-Monteith (SMITH, 1991) instalada dentro da EECSB no dia 31/05/2016.

3.3.4.2 Módulo Recarga (RCH)

A recarga via precipitação foi simulada pelo pacote MODFLOW RCH. A recarga é expressa em termos de taxa de fluxo por unidade de área que se reduz a unidades de comprimento por unidade de tempo, como m/d. A taxa volumétrica de fluxo em uma célula é a taxa de infiltração vezes a área horizontal da célula (McDonald e Harbaugh, 1987).

Figura 29 - Opções para aplicação do módulo RCH



Adaptado de: McDonald e Harbaugh, (1987).

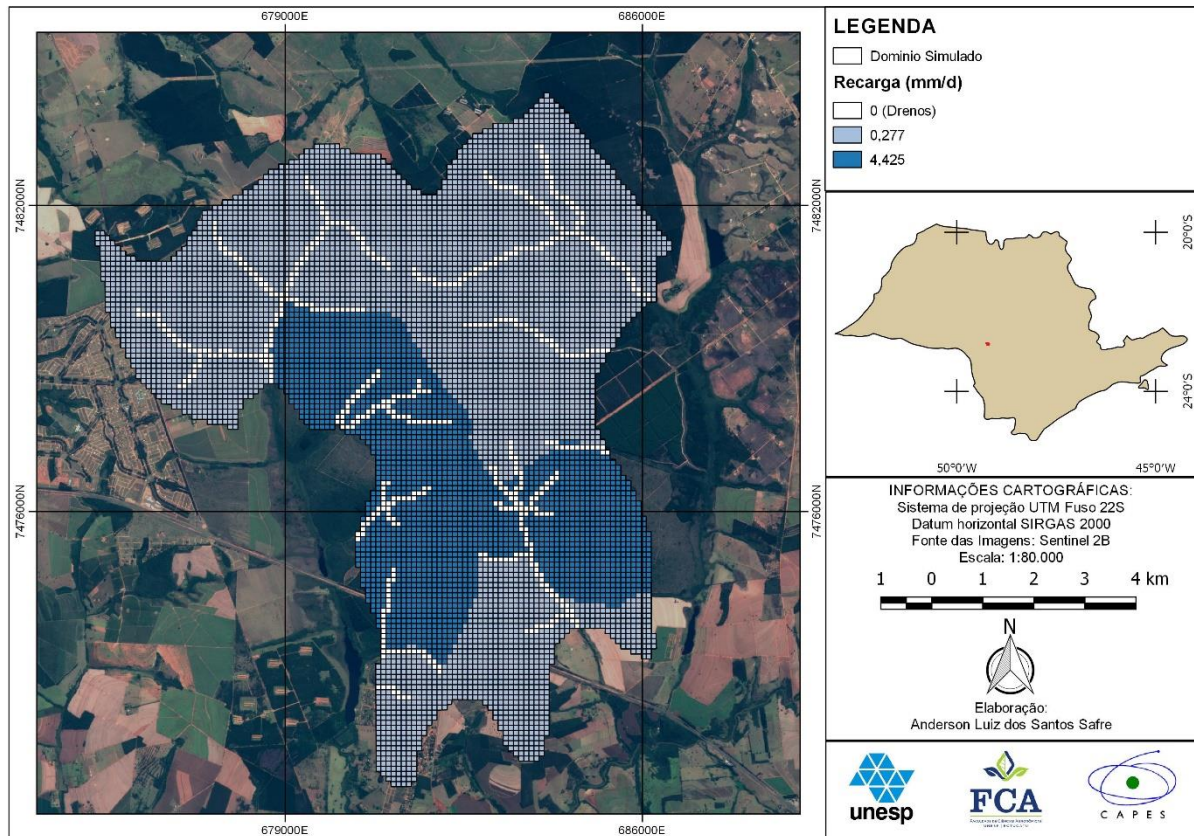
Existem três modos para a aplicação da recarga no modelo:

- 1) A recarga afeta apenas a camada superior;
- 2) A recarga em cada localização horizontal afeta a camada especificada por uma coluna indicadora especificada pelo usuário; e
- 3) A recarga afeta a célula ativa mais alta em cada coluna vertical.

A recarga foi dividida em duas zonas para simular a EEcoSB e as áreas de agricultura intensiva (Figura 30). A zona 1 representa a EEcoSB e as matas ciliares dos córregos simulados, onde foi atribuído um valor inicial médio de recarga de 15%

da precipitação de 29,5 mm registrada no dia 31/05/2016 (4,425 mm/d). Nas áreas de plantio de cana de açúcar, pinus e pastagem foi admitido um valor médio de 0,277 mm/d.

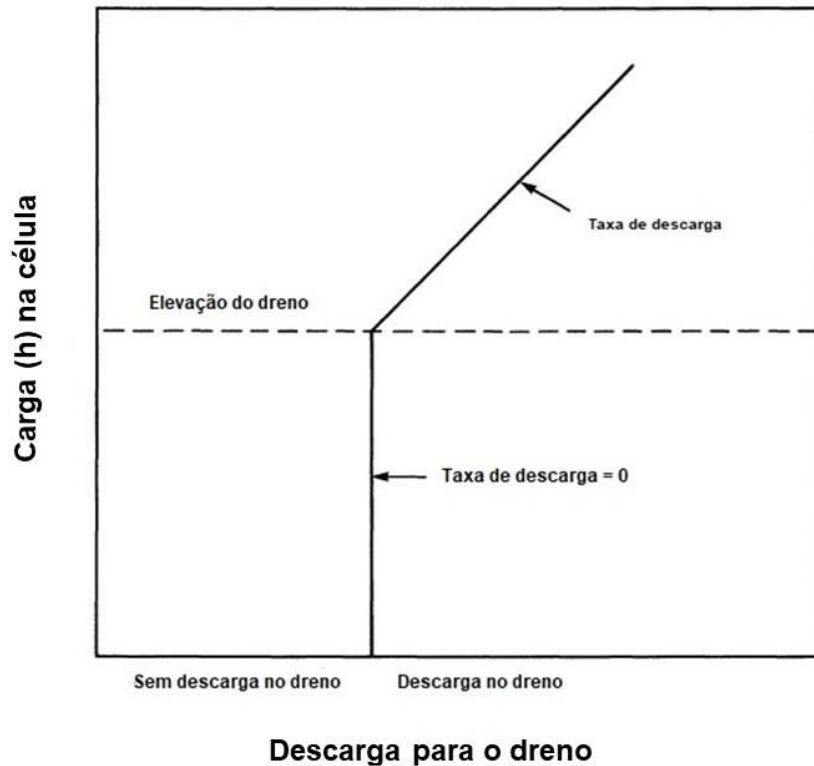
Figura 30 - Distribuição espacial da recarga no domínio simulado.



3.3.4.3 Módulo Dreno (DRN)

Os córregos foram simulados com o pacote dreno (MODFLOW DRN). Esse módulo se comportou da melhor maneira para representar essas feições devido as características dos leitos na área de estudo, visto que essa condição de contorno atua somente como um sumidouro de água (Figura 31). Uma abordagem semelhante foi adotada por Iritani (1999), onde as drenagens secundárias da bacia do Rio Paraíba foram simuladas como condições de contorno do tipo dreno, para facilitar a verificação da influência de poços de bombeamento, pois quando o nível d'água no aquífero está abaixo do dreno, a descarga é nula e o dreno torna-se seco.

Figura 31 - Comportamento do módulo dreno em função da carga no aquífero



Adaptado de: McDonald e Harbaugh (1987).

A equação utilizada para o cálculo de descarga de água entre o contorno e o aquífero é a seguinte:

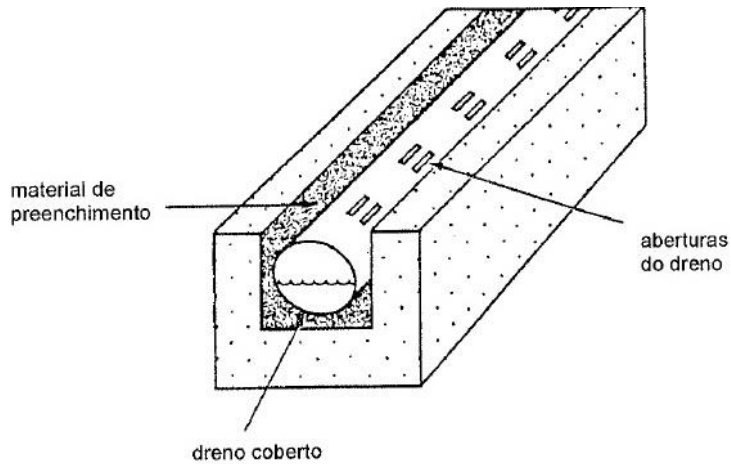
$$Q = \text{cond.} \cdot (d - h) \quad (22)$$

Em que Q é a taxa de água que flui para o dreno (L^3/t), h é a carga hidráulica (L) na célula onde foi atribuída a condição de contorno DRN, d é a elevação do dreno (L) e cond é a condutância (L^2/t). O valor de condutância atribuídos aos drenos foi calculado utilizando a condutividade hidráulica de areias siltosas (10^{-6} m/s), e os valores de espessura e profundidade do leito obtidos no Anexo A, sendo o valor final de $100 \text{ m}^2/\text{dia}$.

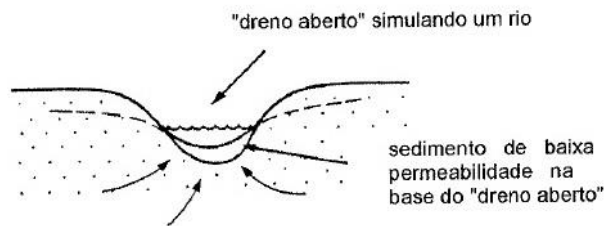
A carga hidráulica no dreno é definida como d (elevação do dreno), e o fluxo para o dreno é proporcional a carga acima desta elevação. Entretanto, essa equação só é utilizada quando a carga no aquífero é superior a carga no dreno.

Quando a elevação do dreno é maior que a carga no aquífero, o fluxo é igual a zero (Figura 32).

Figura 32 - Representações do módulo dreno



(a) condição de contorno "dreno" simulando um dreno coberto



(b) condição de contorno "dreno" simulando um rio

Adaptado de: McDonald e Harbaugh (1987).

A condutância é um parâmetro de proporcionalidade, que representa a interface entre o aquífero e o dreno. Ela é calculada para cada célula onde essa condição de contorno é atribuída a partir dos valores de comprimento, largura e condutividade hidráulica do dreno.

3.3.5 Análise de Sensibilidade (UCODE_2014)

O UCODE_2014 é um mecanismo de inteligência artificial acoplado ao FREEWAT para realizar a análise sensibilidade e estimativa de parâmetros, e consequente ajuste do modelo. A análise de sensibilidade avalia o grau de

dependência dos resultados em relação aos parâmetros do modelo, em função das incertezas presentes no modelo. Essas incertezas existem devido a impossibilidade de se obter os valores e distribuições exatas dos parâmetros hidrogeológicos no domínio do modelo. Identifica-se então, quais parâmetros provocam maior influência nos resultados simulados, e depois seus valores são alterados.

As sensibilidades são derivadas de variáveis dependentes em relação aos parâmetros do modelo. A sensibilidade de um valor simulado y'_i ao parâmetro b_j é calculada pela seguinte expressão:

$$\frac{\partial y'_i}{\partial b_j} \quad (23)$$

As sensibilidades devem ser escalonadas pois y'_i e b_j diferentes, podem ter diferentes unidades, então, valores diferentes de $\partial y'_i / \partial b_j$ nem sempre podem ser significativamente comparados.

As sensibilidades são, então, calculadas através das perturbações de diferença a frente e diferença central. No método de perturbação por diferença a frente o UCODE faz o cálculo e comparação das sensibilidades no valor inicial dos parâmetros e depois com um aumento dos valores.

$$\frac{y'_i(b_j + \Delta b_j) - y'_i(b_j)}{\Delta b_j} \quad (24)$$

Já para as sensibilidades de perturbação de diferença central, ele calcula as sensibilidades com os valores iniciais, com um aumento dos valores e com uma diminuição dos valores.

$$\frac{y'_i(b_j + \Delta b_j) - y'_i(b_j - \Delta b_j)}{2\Delta b_j} \quad (25)$$

A sensibilidade escalonada sem dimensões (*Dimensionless Scaled Sensitivity* - DSS) faz o escalonamento de $\partial y'_i / \partial b_j$ de modo a torna-lo sem dimensões.

Essa sensibilidade indica a quantidade que o valor simulado mudaria, dado uma alteração de um por cento no valor do parâmetro, expressa como uma porcentagem do erro padrão de observação (HILL e TIEDEMAN, 2007). Ela é utilizada para comparar a importância de uma observação para a estimativa de um parâmetro ou, por outro lado, a sensibilidade do equivalente simulado da observação em relação ao parâmetro. Quanto maior o valor absoluto da DSS maior a importância da observação em relação ao seu erro.

$$dss = \left(\frac{\partial y'_i}{\partial b_j} \right) \Big|_{\underline{b}} |b_j| \omega_{ii}^{1/2} \quad (26)$$

em que ω_i é o peso atribuído a observação e \underline{b} um vetor que contém os valores dos parâmetros onde cada sensibilidade é calculada.

A sensibilidade escalonada composta (*Composite Scaled Sensitivity – CSS*) é uma medida média de todas as DSS em relação um único parâmetro. Ela indica a importância das observações como um todo para um único parâmetro, comparada com a acurácia da observação e pode ser usada para ajudar a escolher quais parâmetros estimar pela regressão.

$$CSS = \sum_{i=1}^{ND} \left[\left(dss_{ij} \right)^2 \Big|_{\underline{b}} / ND \right]^{1/2} \quad (27)$$

em que ND é o número de observações que foram utilizadas na regressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Calibração do modelo de fluxo das águas subterrâneas

A tabela 2 apresenta os resultados obtidos após a calibração, que se baseou na análise da curva de correlação e nos resultados obtidos pela análise de sensibilidade.

Tabela 2 - Resultados da comparação entre os valores observados e simulados pelo modelo

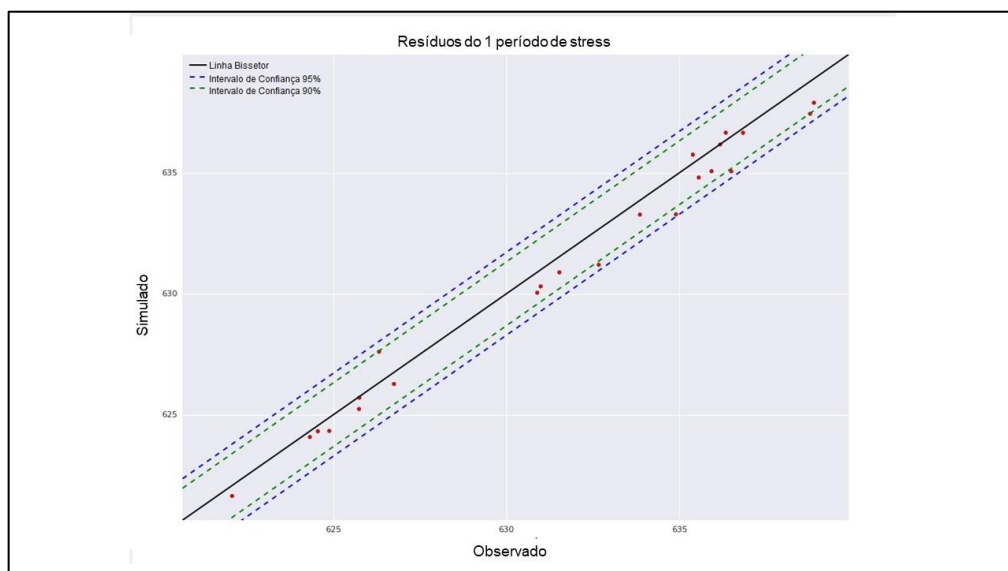
Nome da observação	Valor observado (m)	Valor Simulado (m)	Resíduo (m)
B2	635,9299	635,0664	0,8635
B3	636,5000	635,0639	1,4360
B4	633,8599	633,2721	0,5878
B5	634,9000	633,2826	1,6173
B6	636,8400	636,6532	0,1867
B7	638,7800	637,4411	1,3388
B8	636,3400	636,6584	-0,3184
B10	622,0700	621,6388	0,4311
P1	635,5599	634,8067	0,7532
P2	636,1799	636,1729	$7,080 \times 10^{-3}$
P3	635,3900	635,7519	-0,3619
BOI2	625,7399	625,2349	0,5050
BOI3	624,3200	624,0769	0,2430
BOI4	626,7500	626,2683	0,4816
BOI5	625,7500	625,7017	$4,82 \times 10^{-2}$
BOI6	624,8800	624,3279	0,5520
BOI8	624,5499	624,3136	0,2363
G3	631,5300	630,8838	0,6461
G5	632,6699	631,1987	1,4712
G8	638,8900	637,8969	0,9931
S2	626,3200	627,6015	-1,2814
S3	630,8900	630,0415	0,8484
S7	630,9899	630,3051	0,6848

A calibração do modelo foi realizada por meio da comparação entre os valores de carga hidráulica simulados e os valores obtidos em levantamentos de campo. A metodologia de calibração foi a de tentativa e erro. Nesse método, os parâmetros hidrogeológicos que compõem o modelo são alterados, e sucessivas simulações são geradas para analisar o balanço hídrico e a distribuição da carga hidráulica. A calibração do modelo é alcançada quando se atinge uma boa correlação entre os valores simulados e os valores mensurados em campo.

Os parâmetros utilizados na calibração foram a condutividade hidráulica horizontal e a recarga. A variação nos valores de condutância dos drenos não apresentou influência significativa nos valores de escoamento dos córregos presentes na área, o que levou a priorizar a condutividade hidráulica e recarga do modelo no momento da calibração. Os valores iniciais de condutividade hidráulica (5,28 m/d) e de recarga (0,00755 m/d), adotados de para a zona 1 (Fm. Adamantina) apresentavam valores discrepantes entre carga hidráulica simulada e observada. Então, esses parâmetros foram variados até atingir uma boa correlação. Esse processo obteve um valor final de condutividade hidráulica horizontal (KX, KY) de 1,75 m/d e 0,175 m/d para a condutividade hidráulica vertical (KZ).

O Gráfico 4 apresenta os resultados da calibração após os ajustes da condutividade hidráulica e recarga. A maioria dos resíduos está dentro do intervalo de confiança de 90%, apenas 4 observações ficaram no intervalo de confiança de 95%.

Gráfico 4 - Correlação entre os valores simulados e observados para simulação do fluxo em regime permanente



Na Tabela 3, é possível visualizar os resultados encontrados após a análise estatística dos resíduos. Algumas considerações são necessárias acerca dos poços de monitoramento com maior dispersão em relação aos valores observados e simulados. Em primeiro lugar, os poços localizados próximos ao pinus (B2, B5) apresentaram grande dispersão, muito provavelmente devido ao ruído causado pelo topo das árvores na imagem SRTM, o que fez com que houvesse um erro no valor da cota altimétrica obtida utilizando essas imagens. Outros poços que apresentaram um erro relativamente alto foram os poços G5 e S2, isso se deu em função destes estarem localizados próximos as fronteiras do modelo (condição de contorno).

Tabela 3 - Resultados do processo de calibração do modelo de fluxo subterrâneo

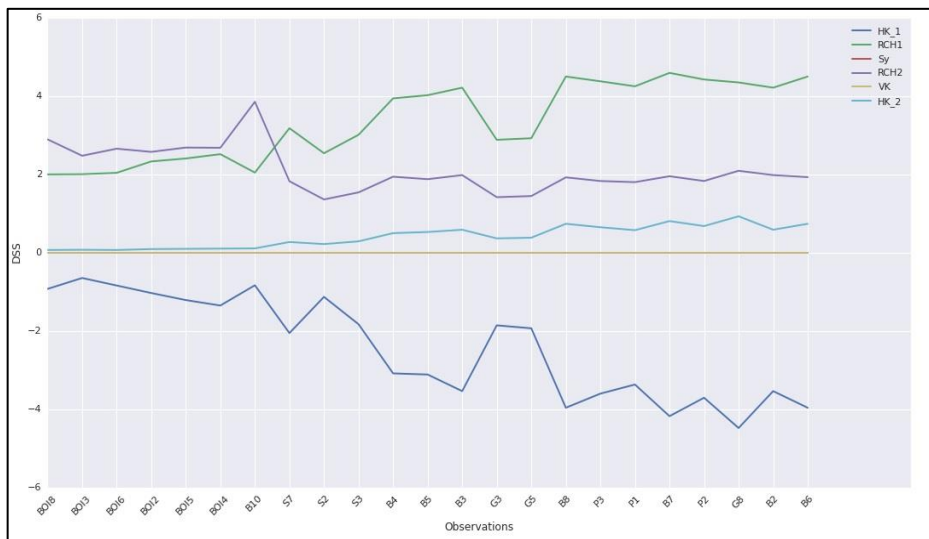
Estatística dos resíduos	Valor
Número de resíduos	23
Média	-0,5204
Desvio Padrão	0,6481
Mínimo	-1,6173
Máximo	1,2814
Erro padrão da estimativa	0,1381
Erro quadrático médio residual	0,5204
Erro quadrático médio normalizado	0,0300
Coefficiente de correlação de Pearson	0,9926

O coeficiente de correlação entre os valores observados e simulados de carga hidráulica foi de 0,9926 representando uma boa calibração do modelo, ao passo que o resíduo médio foi de -0,520 m e o erro quadrático médio normalizado foi de 3,00%. Os valores finais de recarga encontrados foram de aproximadamente 5% da precipitação registrada no dia 31/05/2016, ou seja, 0,00132 m/d (1,32 mm/d) na zona 1, onde fica localizada a EECSB. Na zona 2 que representa as áreas ocupadas por outros usos da terra foi atribuído um valor médio de 0,000277 m/d (0,277 mm/d).

4.2 Análise de Sensibilidade

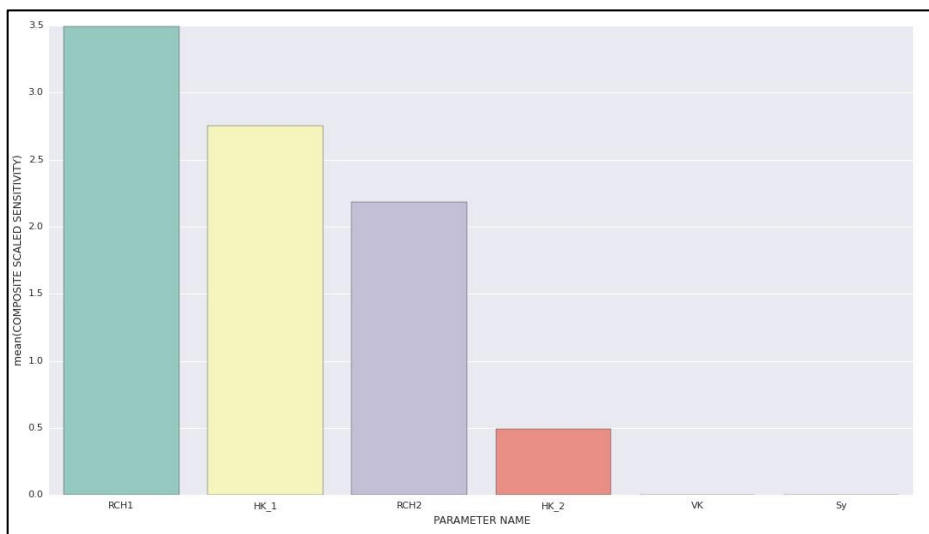
Os resultados da DSS são apresentados no Gráfico 5. É possível identificar que os parâmetros que apresentaram maior DSS foram a condutividade na zona 1 (HK_1), e a recarga na zona 1 (RCH_1) e na zona 2 (RCH_2). Isso demonstra a importância da determinação da condutividade hidráulica e recarga para o acurácia do modelo.

Gráfico 5 - Resultados da análise de sensibilidade (DSS) dos parâmetros de entrada do modelo



Observou-se que o rendimento específico e a condutividade hidráulica vertical não apresentaram influência significativa no modelo matemático, pois estes não apresentaram grandes valores de sensibilidade composta escalonada (Gráfico 6).

Gráfico 6 - Resultados da análise de sensibilidade (CSS) dos parâmetros de entrada do modelo



Valores de CSS abaixo de 1,0 indicam que a contribuição da sensibilidade é menor que o efeito do erro de observação. A taxa de recarga na zona 1 e 2 e a condutividade hidráulica na zona 1 foram os parâmetros que apresentaram a maior CSS. Desse modo, é necessário o levantamento mais preciso desses parâmetros para a representação efetiva das condições hidrodinâmicas observadas na área de estudo. Também é necessária a aquisição de dados confiáveis de subsuperfície para delimitar, em uma escala mais refinada, a distribuição espacial das unidades hidrogeológicas. Os dados de relevo obtidos pelo SRTM apresentaram erros significativos na cota altimétrica em áreas ocupadas por pinus, pois o produto obtido por este radar representou o topo dessas árvores como superfície do terreno, implicando em erros significativos no processo de calibração.

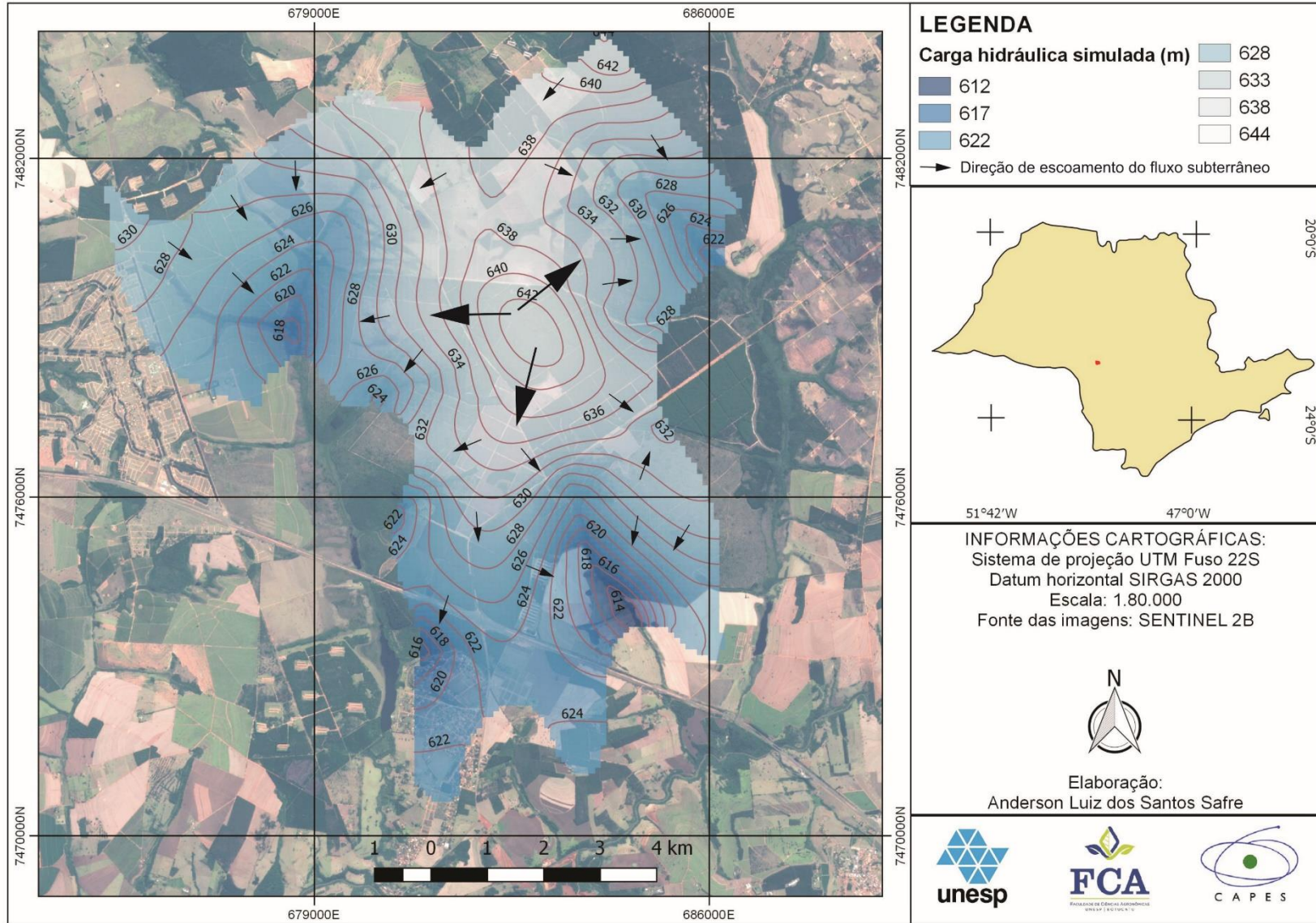
Os resultados obtidos pela análise de sensibilidade indicaram que a HK_1 e a recarga foram os parâmetros mais importantes para o sucesso do modelo. Desse modo, os levantamentos desses parâmetros em investigações futuras podem contribuir para o refinamento desse ou de outros modelos matemáticos elaborados na área.

4.3 Simulação de superfície potenciométrica e de fluxo

Na Figura 33 é apresentado o mapa de superfície potenciométrica simulado pelo modelo em regime permanente. É possível identificar que a drenagem de água do aquífero realizada pelos rios estabeleceu linhas de fluxo com forte influência local. As linhas de fluxo também foram condicionadas pelo relevo, fazendo com que na maioria dos locais, o fluxo subterrâneo apresentasse semelhança com as variações topográficas do terreno.

Foi constatado que os corpos d'água superficiais são os principais responsáveis pelo transporte de água na EEcSB, e que em razão da espessura do SAB próximo a essas drenagens, o tempo de permanência da água no meio poroso é relativamente curto, fazendo com que a filtragem não seja tão efetiva. Isso evidencia a suscetibilidade natural a contaminação do SAB, e levanta a hipótese de que, dependendo das características do soluto, este pode migrar rapidamente no meio poroso, e ser drenado do aquífero pelos rios, comprometendo a qualidade da água nos corpos hídricos superficiais.

Figura 33 - Mapa Potenciométrico simulado pelo modelo de fluxo em regime permanente na EEcSB

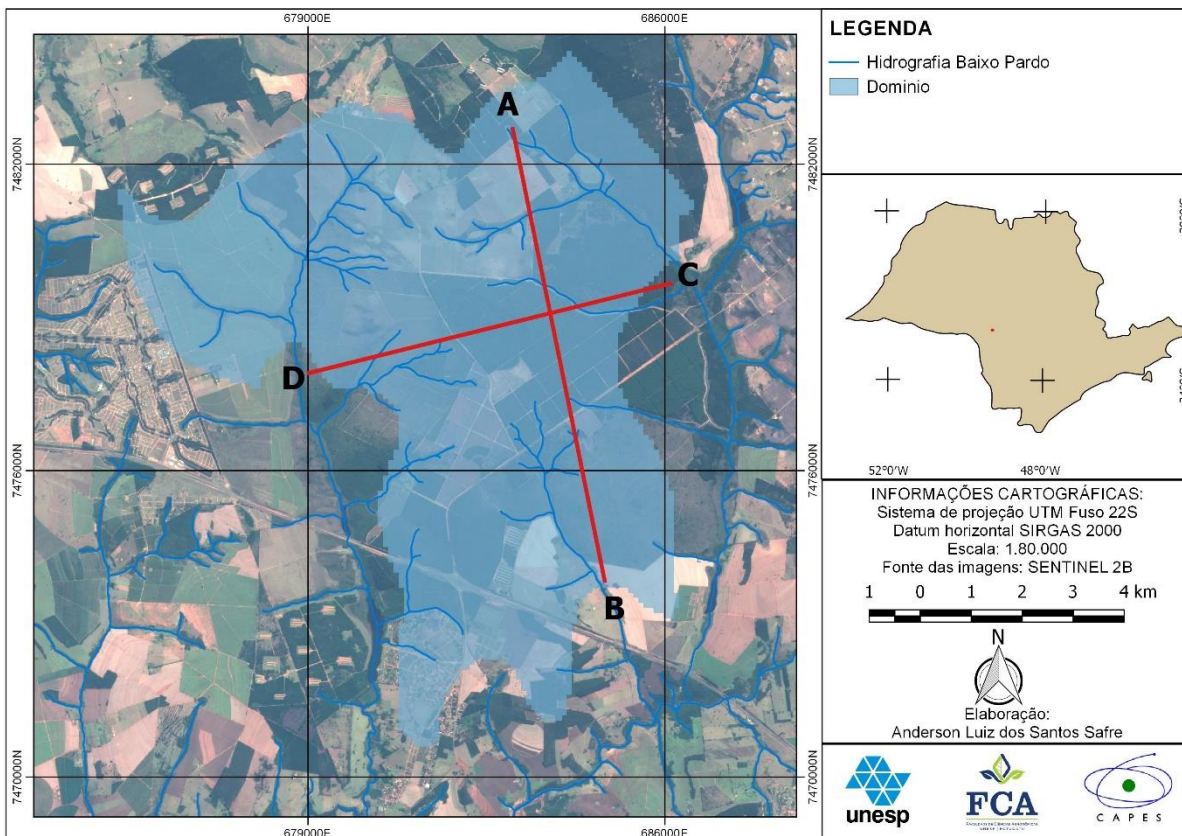


De acordo com Barison (2003) foram encontradas elevadas concentrações de nitrato nas águas do Aquífero Bauru nos municípios de Bauru, Lins, Garça Iacri e Regente Feijó, em locais onde o lençol freático está próximo da superfície, associados a contaminações por esgotos.

Como o Rio Pardo flui sobre os afloramentos de basalto e que as contribuições nas margens deste depende de fraturas, todo o volume de água gerado pelo SAB na EEcSB é drenado em direção ao Rio Pardo, contribuindo para o montante de vazão deste corpo d'água.

Com a ferramenta *Terrain Profile* do QGIS foram traçados os perfis A-B (Figura 35) e C-D (Figura 36) que representam a superfície potenciométrica simulada pelo modelo, cruzada com o modelo digital de elevação do SRTM, evidenciando os principais rios que drenam o aquífero.

Figura 34 - Localização dos seção verticais N-S e L-O na EEcSB

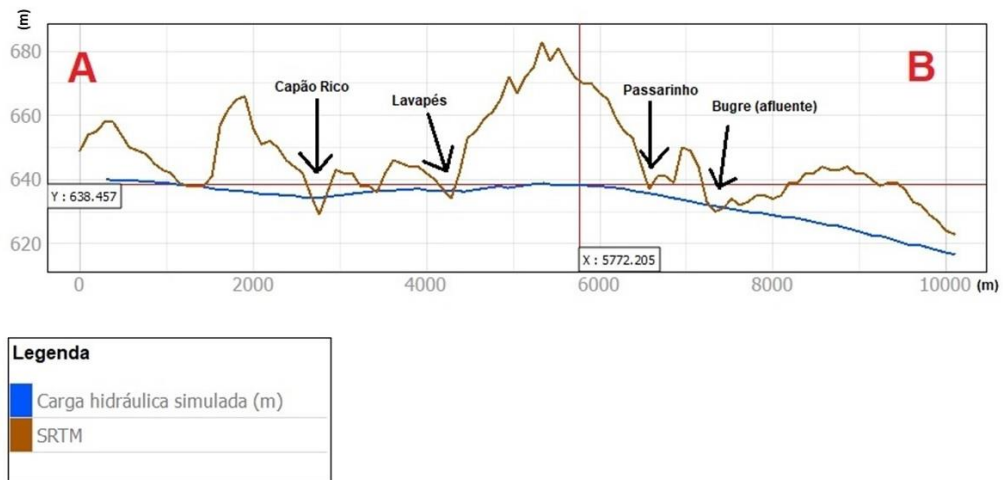


Os resultados encontrados aqui, em relação as direções de fluxo subterrâneo foram semelhantes aos encontrados por Santarosa (2017). Entretanto, o modelo hidrológico conceitual adotado aqui é diferente do modelo idealizado por esse autor,

principalmente em relação à condutividade hidráulica adotada, à espessura do pacote de arenito, e à localização dos afloramentos de basalto.

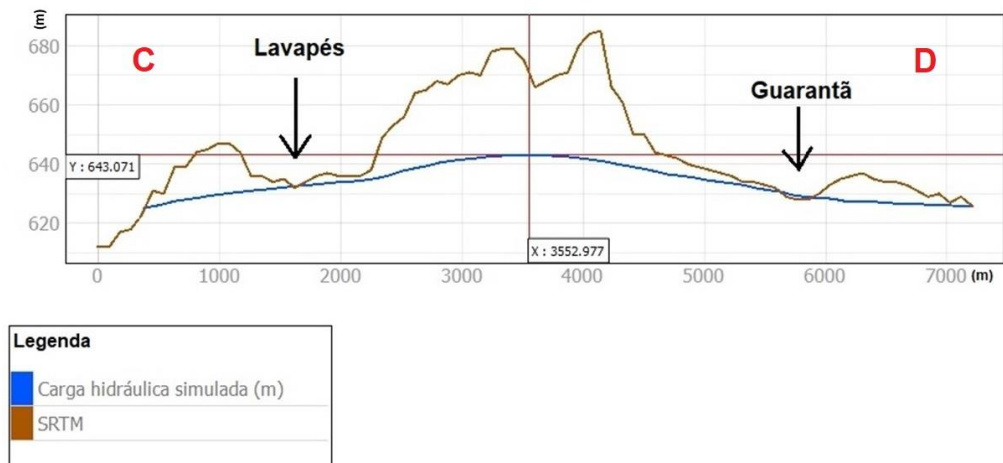
Foram observados três padrões principais de fluxo, com um divisor de águas subterrâneas no centro do domínio simulado. Um padrão de fluxo possui sentido Oeste em direção ao Rio Capivari, apresentando segmentações nas direções de fluxo próximas aos córregos afluentes Divisa, Santana, Guarantã e Boi (Seção B-C).

Figura 35 – Seção vertical com direção Norte-Sul na EEcSB



É possível identificar outro padrão de fluxo subterrâneo com sentido Nordeste, formando uma área de descarga no rio Capão Rico. Um terceiro padrão de fluxo com direção Sudoeste foi observado, representando o escoamento na direção da bacia do Bugre captando uma parcela dos fluxos gerados no divisor de águas subterrânea (Seção A-B).

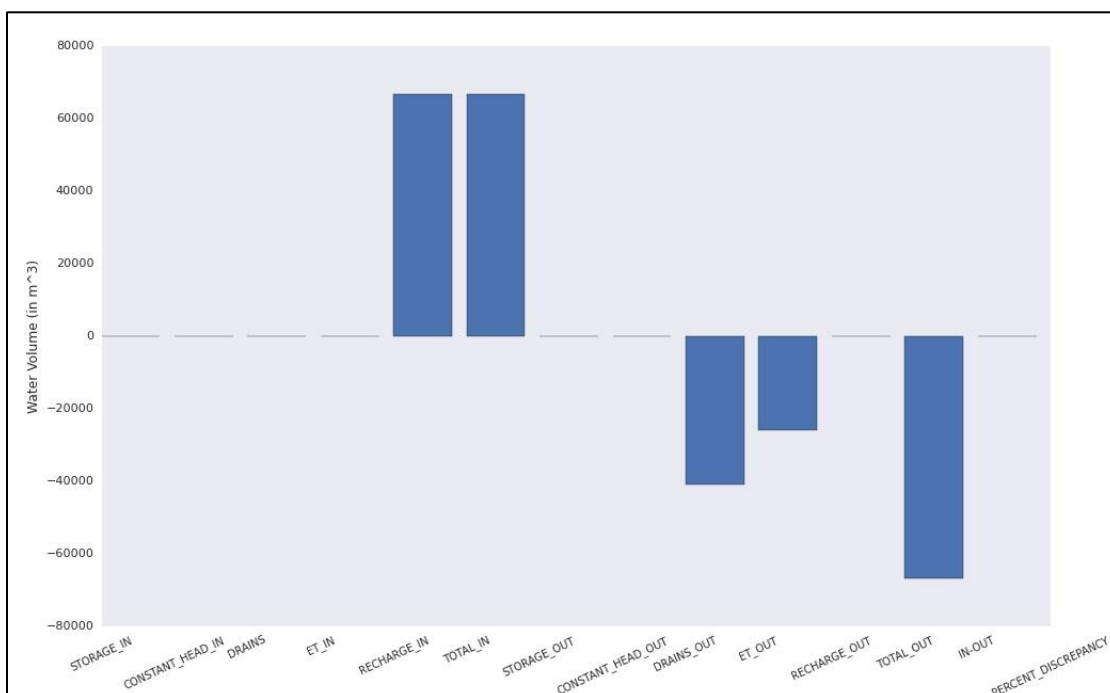
Figura 36 - Seção vertical com direção Leste-Oeste na EEcSB



O fluxo total de entrada foi de 66.893,882 m³/d representado pela recarga. Os fluxos de saída pelos sistemas de drenagem representados no modelo matemático com o módulo dreno, na data da simulação, totalizam uma vazão de 59.079,00 m³/d (Gráfico 7). Esse valor aproxima-se do valor de vazão obtido por Honda e Nizoli (2008), que foi de 56.540,00 m³/d no período seco, somando-se a vazão encontrada na saída dos Rios Capivari, Capão Rico e Bugre. A evapotranspiração total da área foi de 7.813,00 m³/d, e a discrepância percentual no balanço hídrico foi abaixo de 0,1%, em que a diferença entre entrada e saída totalizaram 0,2969 (Tabela 4) pois, segundo a lei de conservação de massa, o fluxo de entrada deve ser igual ao fluxo de saída.

Uma hipótese levantada foi a influência das plantações de pinus e eucalipto no controle do nível freático, devido à evapotranspiração dessas culturas e a profundidade do sistema radicular. A EECsB está com um projeto supressão vegetal nas áreas em que os pinus eram cultivados para a regeneração do cerrado. A partir do momento que as árvores foram sendo retiradas, diversas nascentes e áreas úmidas surgiram na área, muito provavelmente, devido a um aumento significativo no nível freático, inclusive na época de estiagem. Isso dificultou o acesso a alguns poços de monitoramento após o corte, pois algumas vias ficaram completamente alagadas.

Gráfico 7 - Balanço volumétrico obtido na simulação em regime permanente



Na área, existem diversos córregos que possuem leito seco que, geralmente, após grandes eventos de precipitação, existe fluxo de água devido uma elevação temporária do nível freático. Porém, atualmente, após a retirada dos pinus, alguns canais que antes eram efêmeros passaram a possuir um fluxo de base, tanto no período seco quanto no úmido, mudando seu padrão de escoamento.

Tabela 4 - Balanço hídrico simulado pelo modelo em regime permanente

Fonte	Entrada (m ³ /d)	Saída (m ³ /d)
Recarga	66.893,88	0,00
Drenos	0,00	59.079,80
Evapotranspiração	0,00	7.813,77
Total	66.893,88	66.893,58

Em função do leito do Rio Pardo estar próximo a uma zona de transição entre os sedimentos do Grupo Bauru e a rochas basálticas do Grupo São Bento, nessa situação, o volume mais significativo de água é gerado nas nascentes localizadas sob o aquífero granular. Isso faz com que a proteção dessas áreas seja de extrema importância para evitar o rebaixamento no nível d'água no Rio Pardo, visto que nos últimos anos esse rio foi alvo de interesse de diversos projetos de PCH's a serem instaladas em toda sua extensão.

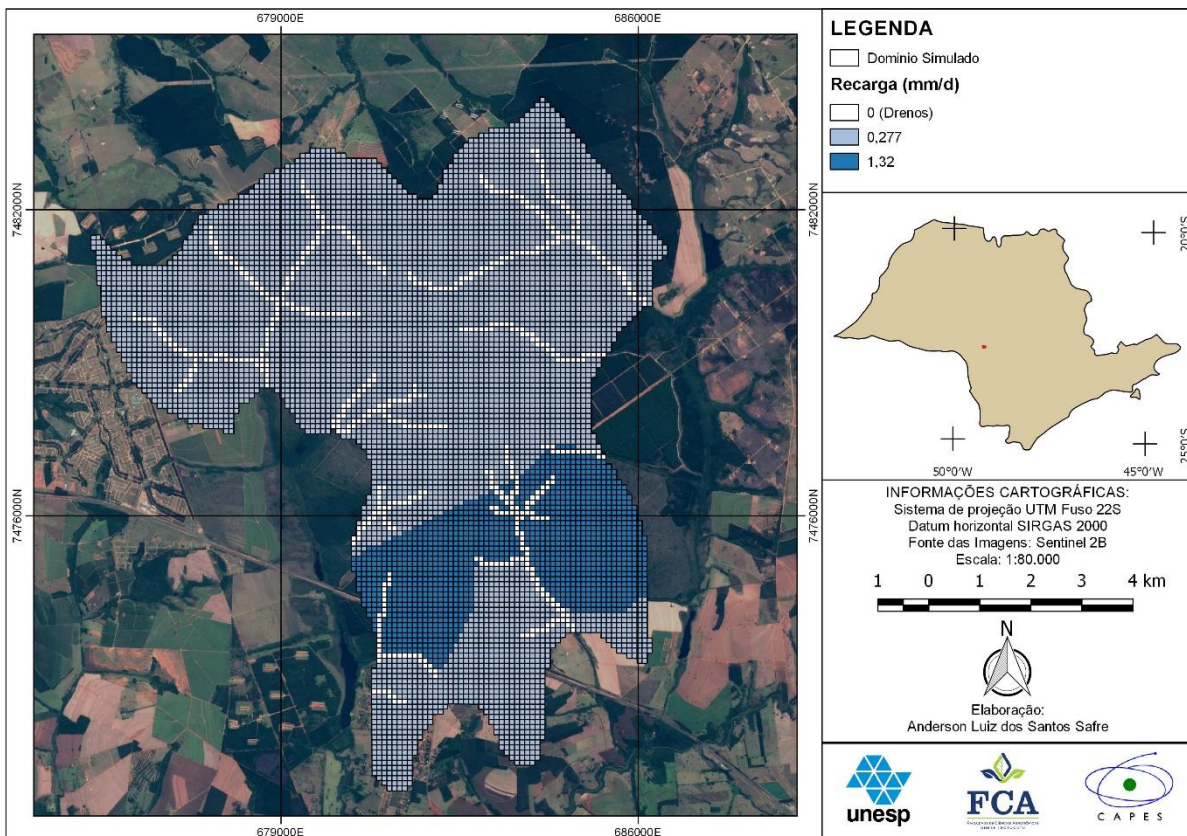
Um fato que chamou atenção foi a quantidade de sistemas de irrigação de pivô central na bacia do Rio Pardo. Em um trabalho publicado por Safre et al (2017), foram identificados 17 pivôs ativos e inativos com taxa máxima de evapotranspiração de 4,7 mm/d em apenas um trecho do Rio novo, importante afluente do Rio Pardo. Todos esses sistemas possuem área entre 20 ha e 100 h, e em sua grande maioria utilizam a captação superficial como fonte de água.

Nas áreas de transição do SAB, a menor espessura do meio poroso faz com que variações no armazenamento provoquem reduções significativas no volume de água escoado das drenagens. Nesse sentido é necessária uma ação dos órgãos gestores para preservação ou aumento das áreas protegidas no Médio Paranapanema, com o objetivo de garantir a reposição das reservas subterrâneas principalmente nos locais que possuem elevada exploração de água.

4.4 Primeiro cenário: remoção de 50% da área da EECSB

A área total da EECSB no domínio simulado é de 2.448,813 ha. Esse valor é inferior a área que consta no plano de manejo da EECSB, devido aos afloramentos de basalto que ocorrem no interior da reserva, o que fez com que algumas células que estavam localizadas dentro do limite da EECSB fossem excluídas em função de se configurarem como células de fluxo nulo. Foi realizada então uma simulação reduzindo em 50% a área da EECSB no modelo (Figura 37), diminuindo consequentemente a recarga no domínio.

Figura 37 - Distribuição espacial da recarga no primeiro cenário



Para a criação do *shapefile* contendo 50% da área foi utilizado o *plugin Polygon Divider* do QGIS. A área total da EECSB foi calculada pela calculadora de campo, e então foi inserida no *plugin* a área desejada para corte do polígono (1.224,41 ha), que realizou a divisão exata da área em duas camadas. Posteriormente o polígono recortado foi utilizado para selecionar as células na camada de recarga, onde um valor de recarga de 0,277 m/d foi atribuído para

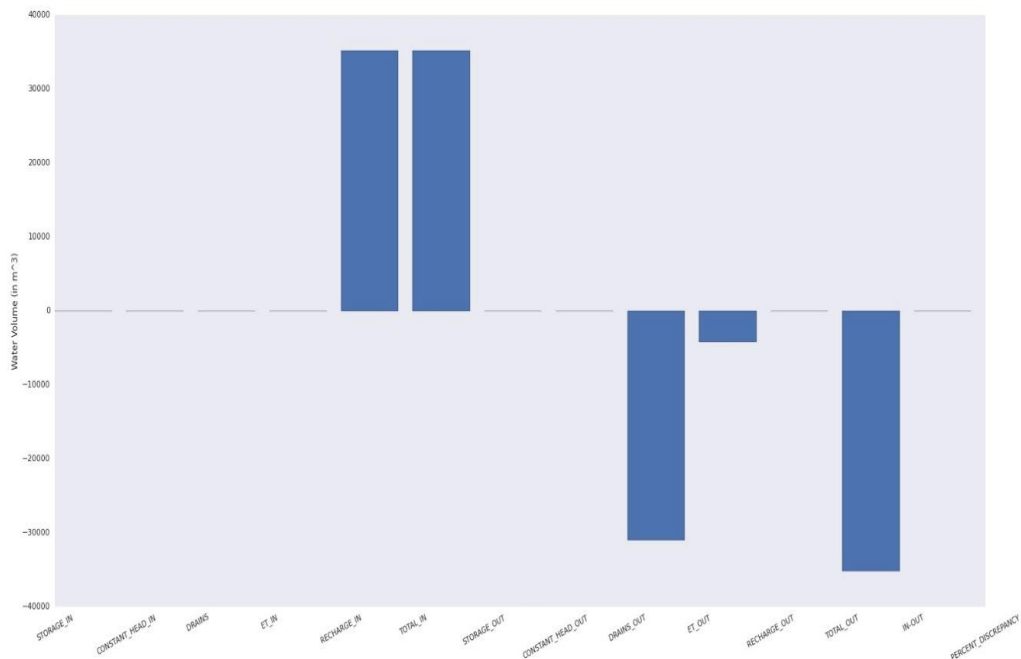
simular o avanço das áreas cultivo intensivo. Os resultados do balanço volumétrico podem ser visualizados na Tabela 5. O fluxo total de entrada representado pela recarga foi de 33.156,64 m³/d. A descarga de água subterrânea representada pelas drenagens corresponde uma vazão de 31.016,00 m³/d. A evapotranspiração total do domínio simulada no primeiro cenário foi de 4.140,38 m³/d.

Tabela 5 - Balanço hídrico simulado pelo modelo no primeiro cenário

Fonte	Entrada (m ³ /d)	Saída (m ³ /d)
Recarga	35.156,64	0,00
Drenos	0,00	31.016,16
Evapotranspiração	0,00	4.140,38
Total	35.156,64	35.156,64

Em relação aos resultados simulados pelo modelo em condições normais de escoamento e o primeiro cenário, caso houvesse uma redução de 1.244,41 ha na área ocupada pela EEcSB, indica uma redução de 35.877,72 m³/d na recarga pela precipitação.

Gráfico 8 - Balanço volumétrico obtido pelo modelo no primeiro cenário



Esse valor corresponde a uma diminuição de 53,6% na recarga do SAB no domínio simulado. Os componentes hidráulicos mais afetados são as drenagens que apresentaram uma redução de 28.063,64 m³/d (47,5%). A evapotranspiração diminuiu 3.673,39 m³/d (47,1%).

É possível visualizar no mapa potenciométrico simulado pelo modelo no primeiro cenário (Figura 38), que a retirada de 50% da EEcSB pode provocar uma mudança significativa nos padrões de fluxo locais, principalmente nas áreas próximas aos córregos do Guarantã e Passarinho. Nota-se também uma mudança nas principais direções de fluxo, em que além dos três padrões principais identificados no modelo em regime permanente, se estabeleceu uma nova direção principal de escoamento em direção ao córrego do Boi.

Utilizando a ferramenta *calculadora raster* do QGIS, foi calculada a diferença entre as cargas hidráulicas encontradas em situação normal de escoamento (com a EEcSB) e as cargas hidráulicas simuladas com a remoção de 50 % da EEcSB (Figura 39). Foi possível identificar que o comportamento do potencial hidráulico do aquífero sofreu significativas reduções. Houve uma diminuição na carga hidráulica de 11 m na região central do domínio. Também houveram diminuições expressivas próximas às drenagens, sendo o córrego mais afetado o Guarantã em que as cargas hidráulicas no seu entorno apresentaram uma redução de até 6m. Outro córrego significativamente afetado foi o Santana, em que houveram reduções de até 5m na espessura saturada do aquífero próximo a esta drenagem.

A mesma diminuição foi verificada no córrego Passarinho. Levando em consideração que o nível d'água nestes córregos é em média de 0,30 cm isso levaria a completa depleção desses cursos d'água. Todos esses córregos têm suas nascentes sob a área de proteção da EEcSB, isso demonstra a importância dessa área para garantia do fluxo de base dessas drenagens.

Figura 38 - Mapa potenciométrico gerado pelo modelo no primeiro cenário (Redução de 50%).

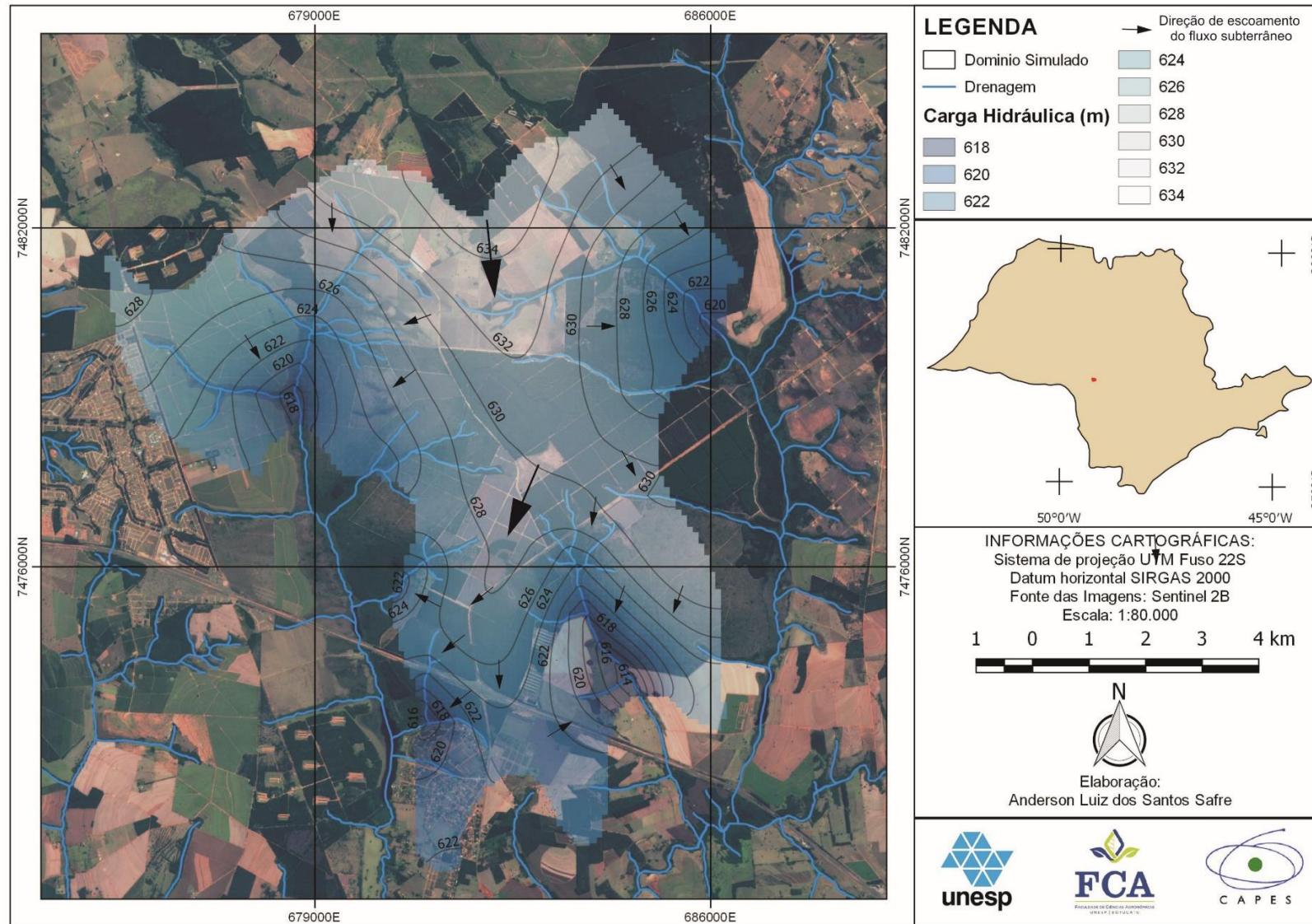
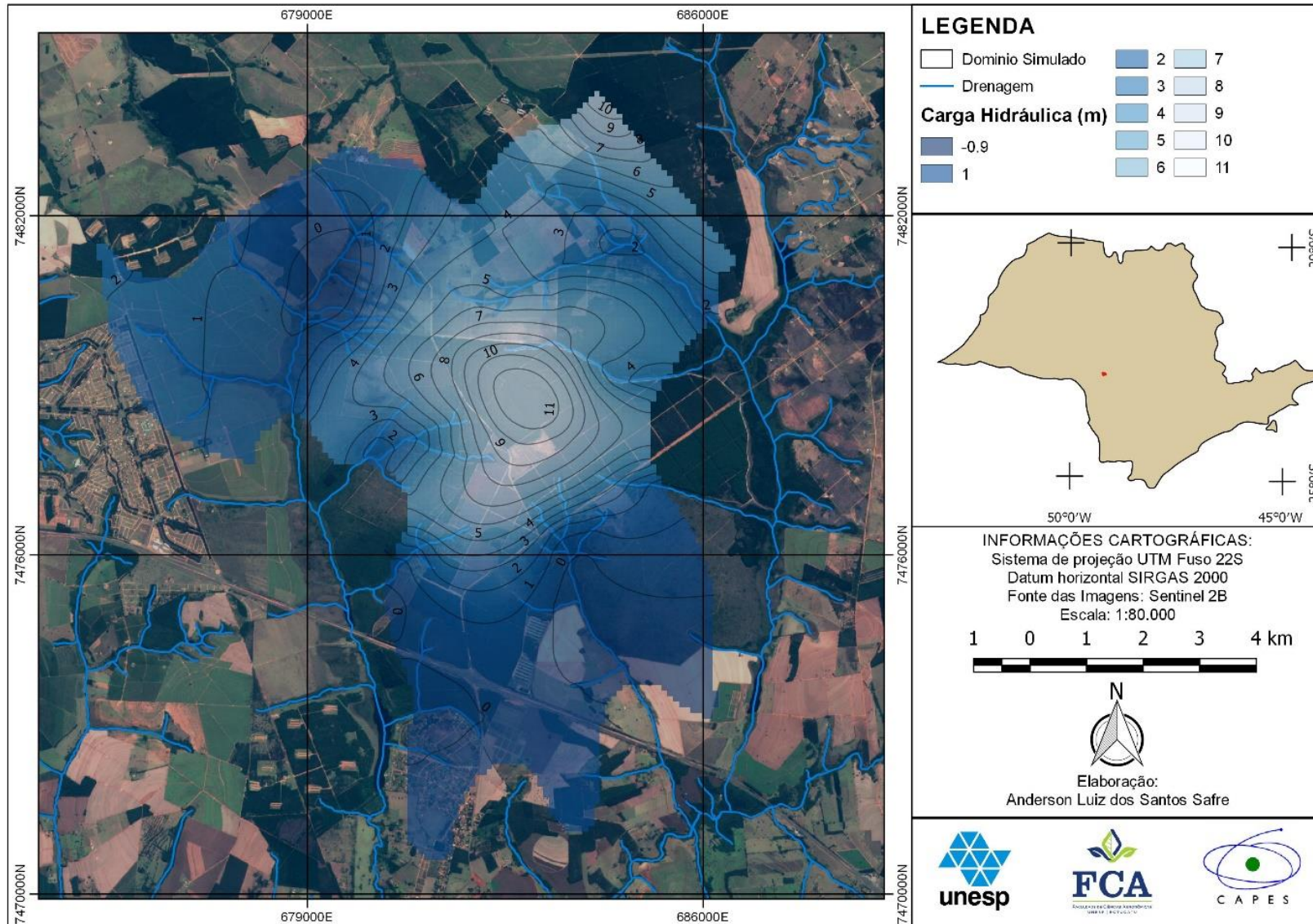


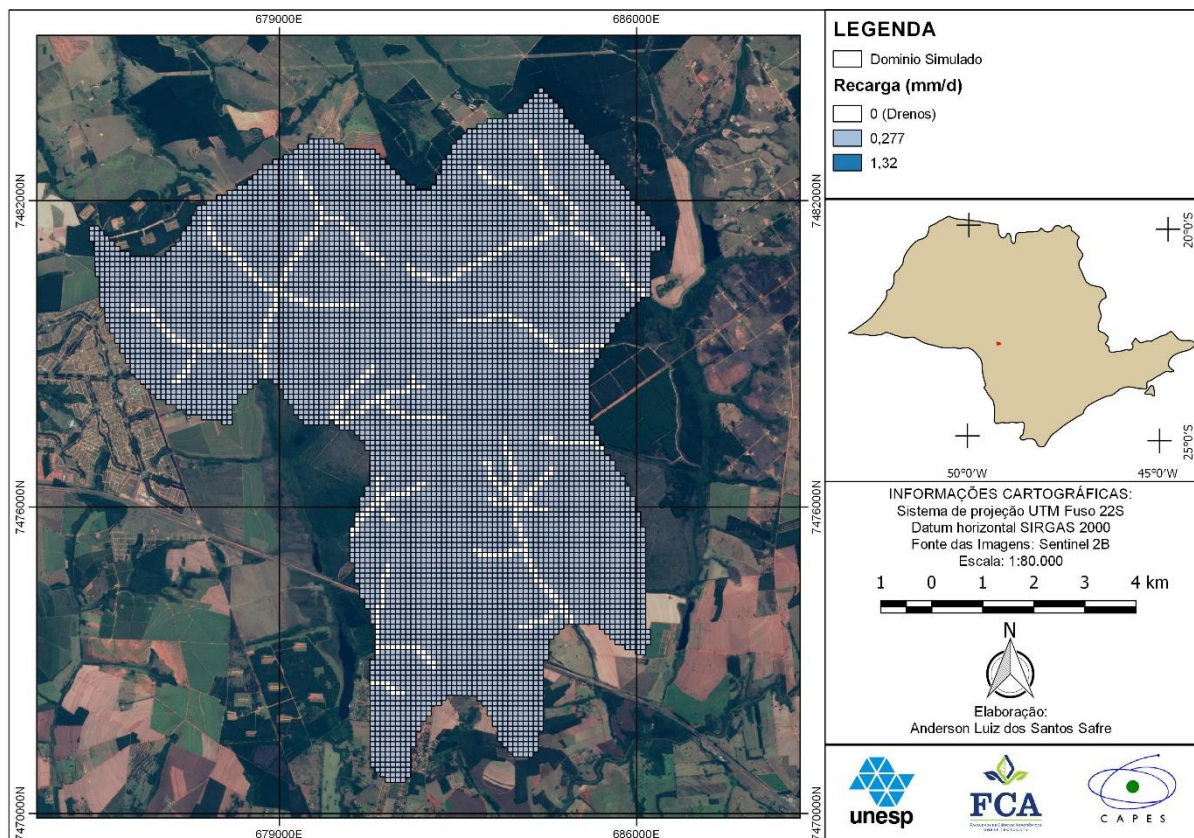
Figura 39 – Diferença entre as cargas hidráulicas calculadas pela simulação



4.5 Segundo cenário: Remoção total da EEcSB

No segundo cenário foi considerada a completa remoção da EEcSB, de modo a compreender o papel dessa reserva natural para garantia de recarga do SAB na região. Foi admitido uma recarga de 0,277 mm/d em todo o domínio simulado (Figura 40).

Figura 40 - Distribuição espacial da recarga no segundo cenário



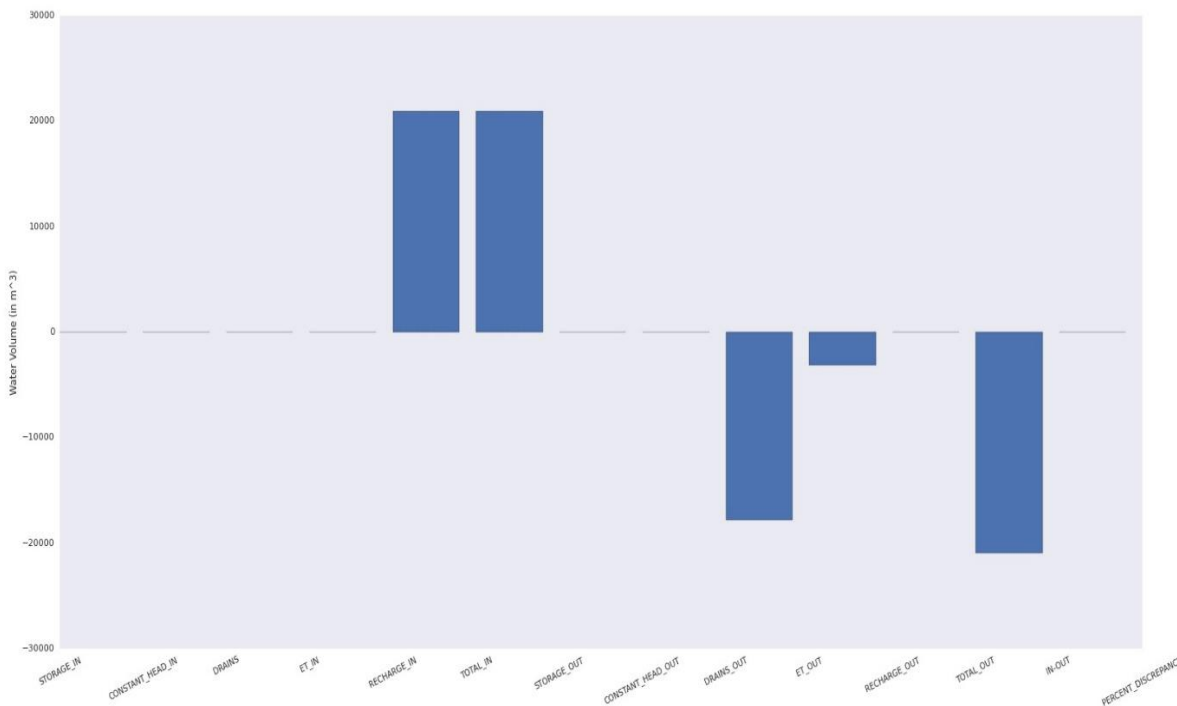
Na Tabela 6 estão os resultados encontrados pelo modelo na simulação do segundo cenário. A taxa total de entrada de água simulada pela recarga foi de 20.930,12 m³/d. A descarga pelos drenos foi calculada como 17.817,76 m³/d. A evapotranspiração total simulada no segundo cenário foi de 3.112,33 m³/d (Gráfico 9). Em relação as condições normais de fluxo, em que a EEcSB não foi suprimida atuando assim como área de maior recarga no domínio, a redução na recarga foi de 41.262,04 m³/d (61,68 %) na simulação do segundo cenário. O volume de água subterrânea escoado pelos drenos, representando os córregos que nascem na EEcSB, apresentou uma redução de 45.963,76 m³/d, ou seja, uma diminuição de 77,79 % na vazão de descarga das drenagens.

Tabela 6 - Balanço hídrico simulado pelo modelo no segundo cenário

Fonte	Entrada (m ³ /d)	Saída (m ³ /d)
Recarga	20.930,12	0,00
Drenos	0,00	17.817,76
Evapotranspiração	0,00	3.112,33
Total	20.930,12	20.930,12

Esse dado reforça a importância da EEcSB para manutenção da vazão de escoamento dos córregos que possuem a nascente dentro dos limites da reserva. Também ressalta a importância do manejo do uso do solo nas Estações Ecológicas, onde plantas com alta demanda evaporativa podem prejudicar o volume de água subterrânea escoada para os córregos, pela influência no nível do lençol freático. A evapotranspiração apresentou uma redução de 4.701,44 m³/d.

Gráfico 9 - Balanço volumétrico obtido na simulação do segundo cenário



No mapa potenciométrico, pode-se verificar que a retirada da EEcSB provocaria uma mudança no sentido principal de fluxo da água subterrânea em direção ao Ribeirão do Bugre. Também é possível notar na região Nordeste e

Noroeste do domínio, que os escoamentos em direção aos Rios Capivari e Capão Rico mantiveram o seu padrão não sofrendo alterações com a supressão da estação ecológica. Uma área de descarga se formou na região abaixo do córrego do Boi, abaixo da rodovia Castelo Branco. Em ambas as simulações é possível afirmar que a topografia influenciou significativamente os padrões de escoamento.

Houve uma redução de 14 m na carga hidráulica no centro do domínio como pode ser visto na Figura 42. No córrego Guarantã o nível freático reduziu de 2 m no exutório a 10 m na cabeceira de drenagem. Próximo ao córrego Passarinho a carga hidráulica reduziu em até 11 m. No ribeirão do Bugre houveram variações de 4m a 11 m na carga hidráulica. Nas proximidades do córrego Santana a retirada da EEcSB provocaria uma diminuição de 10 m na carga hidráulica.

A simulação com a remoção da EEcSB, demonstra que a redução na recarga provocaria situações críticas de rebaixamento do nível freático. Por se tratar de um aquífero livre, em que sua infiltração se faz em toda sua extensão com influência do uso do solo e propriedades do aquífero, e raso, em que os níveis freáticos são superficiais a supressão da EEcSB indica um rebaixamento de até 14 m do lençol freático. As drenagens foram os componentes mais afetados apresentando uma diminuição de 79,77 % do seu volume no domínio simulado. Os córregos localizados dentro da EEcSB foram os mais afetados, com rebaixamentos de até 11m das cargas hidráulicas nas proximidades das drenagens. Isso provocaria o desaparecimento das drenagens localizadas dentro da estação ecológica, ou em alguns casos, a alteração do padrão de fluxo das drenagens de efluente para influente. Nessa situação o rio perde água para o aquífero, principalmente em condições de escoamento após episódios de precipitação, levando em consideração a existência de drenagens intermitentes e efêmeras na reserva, identificadas por diversos leitos secos.

Figura 41 - Mapa potenciométrico gerado pelo modelo no segundo cenário (Remoção de 100%).

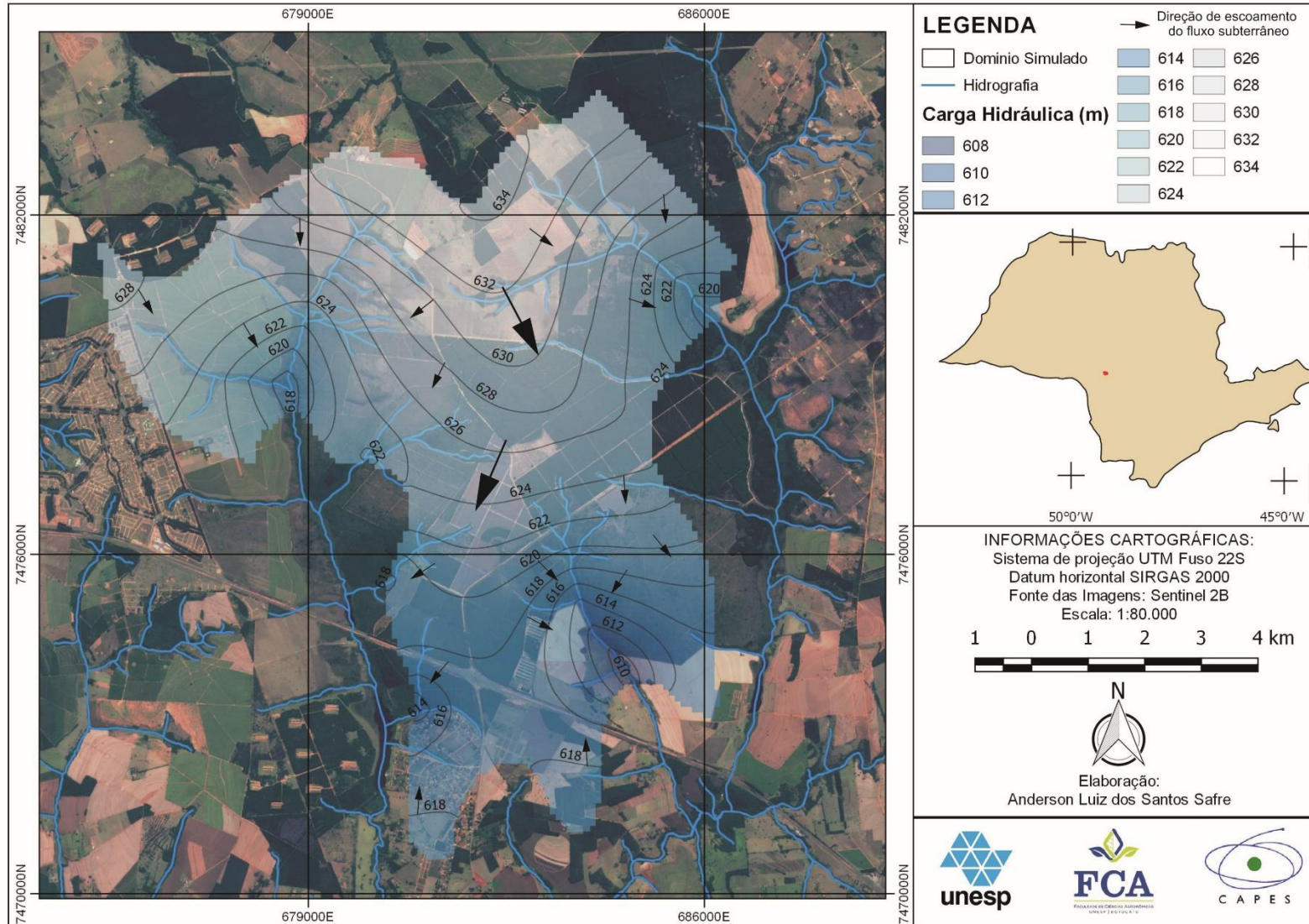
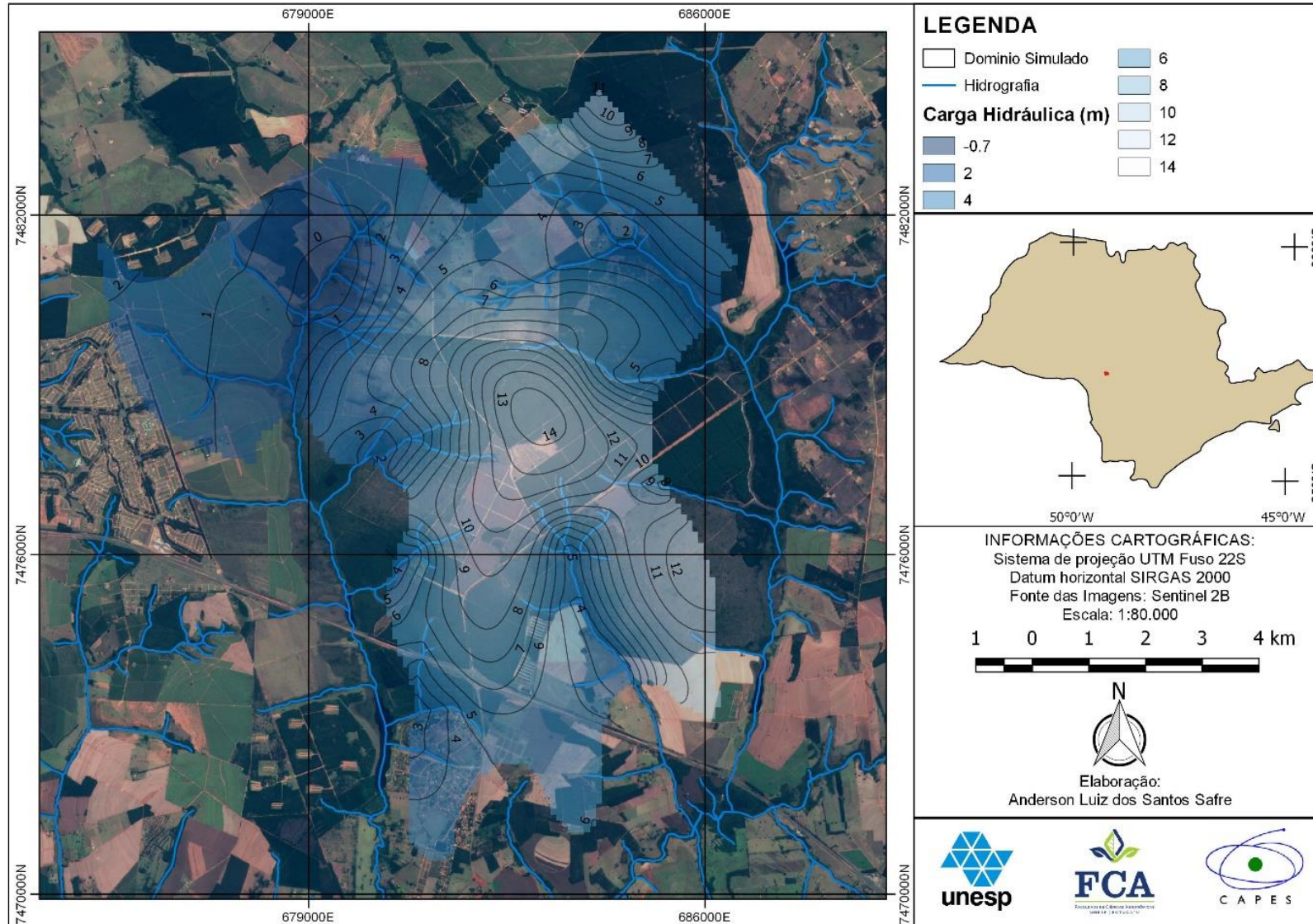


Figura 42 - Diferença entre as cargas hidráulicas calculadas pela simulação com e sem a EEcSB.



5 CONCLUSÕES

No processo de modelagem baseado nas etapas seguidas por este trabalho, deve se dar ênfase para a construção do modelo hidrogeológico conceitual que é de extrema importância para o sucesso do modelo matemático. A etapa mais extensa, porém, essencial foi a de calibração, pois é nessa fase foram identificadas as incertezas na área simulada, e quais dados são passíveis de novos levantamentos, ou ainda a necessidade de revisão do modelo conceitual.

A integração das informações cartográficas, dados de sensoriamento remoto e dados coletados em campo, em um mesmo ambiente digital, permitiram a análise inicial para interpretação e aprimoramento do modelo conceitual, processamento dos dados, configuração do modelo e apresentação dos resultados. Em relação ao desempenho do FREEWAT, este se mostrou uma ferramenta eficaz, pois o plugin é estruturado em módulos, o que faz com que a configuração do modelo seja mais intuitiva, além do que esse software reduziu significativamente os gastos do processo de modelagem, ao passo que não necessita de licença para utilização.

Conforme apresentado, o SAB possui característica granular e ocorre de maneira livre na área modelada, com permeabilidade moderada. Foram discretizadas duas unidades hidrogeoestratigráficas: a Formação Adamantina e a Formação Marília, sendo a última menos permeável. Foi assumido no modelo conceitual heterogeneidade litológica, o que fez com que a camada 1 fosse dividida em duas áreas com diferentes condutividades hidráulicas.

O processo de calibração permitiu estabelecer uma boa correspondência entre o modelo conceitual idealizado e o modelo obtido após os ajustes dos parâmetros de entrada. Os valores de condutividade hidráulica foram ajustados de modo a representar as diferentes estruturas litológicas presentes na área, obtendo os valores finais de condutividade hidráulica de 1,75 m/d, para a Fm. Adamantina e 0,9 m/d para Fm. Marília. Essa distribuição de condutividades hidráulicas representou da melhor maneira as variações litológicas observadas no mapa geológico.

O fluxo de recarga simulado em condições normais de escoamento foi de 66.893,882 m³/d. As descargas subterrâneas pelas drenagens, totalizaram uma

vazão de 59.079,00 m³/d. A evapotranspiração no domínio foi de 7.813,00 m³/d, e a discrepância percentual no balanço hídrico foi abaixo de 0,1%, e a diferença entre entrada e saída totalizaram 0,2969.

Foram identificados três padrões principais de fluxo. Constatou-se que a porção Oeste do domínio possui um declive topográfico e fluxo com direção principal para a bacia hidrográfica do rio Capivari. As linhas de fluxo apresentaram padrões locais por conta do papel dos córregos efluentes, Boi, Divisa, Garantã e Santana que atuaram como áreas de descarga, drenando as águas subterrâneas. A porção Leste possui declive topográfico com sentido principal do fluxo em direção ao rio Capão Rico, com contribuição dos afluentes Lavapés e Passarinho. O terceiro padrão de fluxo identificado foi um com sentido Norte-Sul em direção a bacia do Bugre, captando a água infiltrada a partir do divisor topográfico no centro do domínio.

Na simulação do primeiro cenário, a redução de 1.244,41 ha na área ocupada pela EECSB provocaria uma diminuição de 35.877,72 m³/d na recarga pela precipitação, correspondendo a uma redução de 53,6% na recarga do SAB. A evapotranspiração reduziu 3.673,39 m³/d (47,1%). As drenagens foram os componentes hidráulicos mais afetados apresentando uma redução de 28.063,64 m³/d (47,5%). No segundo cenário, em que a EECSB foi suprimida, a redução na recarga foi de 41.262,04 m³/d (61,68 %) e a evapotranspiração apresentou uma redução de 4.701,44 m³/d. Isso demonstra a importância da EECSB para garantia da recarga na região, pois a remoção dessa provocaria a redução significativa no volume infiltrado no SAB.

Como simulado no segundo cenário, a remoção da EECSB provocaria uma redução de 79,77% no volume escoado pelas drenagens, esse fato é alarmante devido a essas drenagens terem seus escoamentos direcionados ao Rio Pardo, contribuindo para a vazão total desse corpo d'água, que tem seu leito sob basaltos impermeáveis da Formação Serra Geral. Devido aos múltiplos usos que utilizam as águas superficiais do Rio Pardo, principalmente os diferentes sistemas de irrigação, é essencial a existência de áreas com florestas nativas como a EECSB, que apresentem maior taxa de infiltração em relação aos demais usos do solo, visto a necessidade da garantia de escoamento perene dos corpos d'água em uma bacia

hidrográfica de importância socioeconômica como a UGRHI – 17. Esse fato demonstra não somente a viabilidade dessas Estações Ecológicas como reservatórios naturais de água subterrânea, mas também sugere a criação de novas áreas de modo a garantir o desenvolvimento socioeconômico de maneira sustentável na bacia do Médio Paranapanema.

O trabalho foi realizado com o objetivo de se criar um modelo inicial de simulação de fluxo de baixo custo, utilizando os poucos dados disponíveis para representar as condições naturais de maneira simplificada. A coleta de dados foi, em grande parte, limitada pelo montante de recursos disponíveis, o que influenciou no refinamento do modelo hidrogeológico conceitual. Desse modo algumas incertezas não puderam ser resolvidas, isso fez com que a acurácia do modelo fosse menor nas áreas com baixa densidade de dados. Recomenda-se em novas investigações a avaliação da condutividade hidráulica e recarga de maneira mais precisa, de modo representar com clareza esses parâmetros que demonstraram importância no modelo simulado. Produtos de sensoriamento remoto com algoritmos de estimativa da evapotranspiração podem ser utilizados de modo a identificar a variação espacial da ET_0 na área. Foi possível afirmar que o modelo aqui desenvolvido, possui significativa representatividade para direcionar investigações futuras no domínio modelado. Espera-se desse modo que esse estudo contribuía para análises futuras realizadas na EEcSB, partindo da ideia inicial de como funciona o sistema de fluxo subterrâneo na área, bem como medidas tomadas por agentes públicos envolvendo a criação ou redução de áreas de reserva nativa, levando em consideração os resultados encontrados nos cenários simulados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. London: Academic Press, 1992. 381p.
- ASTM Designation: D 5611 – 94. **Standard Guide for Conducting a Sensitivity Analysis for a Ground-Water Flow Model Application**, 2002.
- BARISON, M. R. **Estudo hidrogeoquímico da porção meridional do sistema aquífero Bauru no Estado de São Paulo**. 2003. 158p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.
- BATISTA, J. A. N. **Modelagem do escoamento em aquíferos longos baseada no método de elementos analíticos**. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.
- BEAR, **Dynamics of Fluids In Porous Media**. New York, American Elsevier Publishing Company, 1972. 746p.
- BRASIL. **Lei Federal nº 9.985** de julho de 2000, Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) e dá outras providências. Brasil: Presidência da República, 2000.
- CARVALHO, A. M. **Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas em São José do Rio Preto, SP**. 2013. 172p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2013.
- CARVALHO FILHO, C. A.; COTA, S. D. S. Análise de sensibilidade para o parâmetro condutância na condição de contorno tipo três do modelo MODFLOW. In: XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002, Florianópolis. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2002.
- CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Tampa, Princeton Groundwater, 1989. 111p.
- COMITE DE BACIAS HIDROGRÁFRICAS DO MÉDIO PARANAPANEMA. **Plano de bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI – 17)**. São Paulo: CBH-MP, 2007.
- COMITE DE BACIAS HIDROGRÁFRICAS DO MÉDIO PARANAPANEMA. **Relatório de Situação dos Recursos Hídricos no Médio Paranapanema (UGRHI – 17)**. São Paulo: CBH-MP, 2007.
- COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS (CPRM). Domínio Geológico Litoestratigráfico do Estado de São Paulo. 1:750.000. São Paulo, 2006
- CRUCIANI, D. E. **A drenagem na agricultura**. 4 ed. São Paulo, Nobel, 1989. 337 p.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE **Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 10 e 11: Presidente Prudente e Marília**. São Paulo: v.1 e v.2, 1979

DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica); IG (Instituto Geológico); IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas); CPRM (Serviço Geológico do Brasil). **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo escala: 1:1.000.000**: nota explicativa. São Paulo: Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2005.

DARCY, H. **Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon**: experience and application. Príncipe to follow and formulas to be used in question of distribution of water. Appendix D. Victor Dalmont, Imperial Corps of Bridges, Highways and Mines, Paris. *Translation by Glenn Brown and Bruno Cateni, Oklahoma State University, Stillwater*, 1856

DURIGAN, G., SIQUEIRA, M. F., FRANCO, G. A. D. C., RATTER, J. M. Seleção de fragmentos prioritários para a conservação do cerrado no Estado de São Paulo. **Rev. Inst. Flor. v. 18**, n. único, p. 23-37. 2006.

FETTER, C.W. **Applied Hydrogeology**, 3rd ed. New York: Macmillan College Publishing, Inc., 1994, 616 p.

FOGLIA, L., MEHL, S.W., HILL, M.C., PERONA, P., BURLANDO, P. Testing alternative groundwater models using cross validation and other methods. **Ground Water**, Westerville, OH, v.45, n.5, p. 627-641. 2007.

FRANKE, O.R.; REILLY, T.E. & BENNET, G.D. Definition of Boundary and Initial Conditions in the Analysis of Saturated Ground-Water Flow Systems – An Introduction. **Techniques of Water-Resources Investigations of the U. S. Geological Survey**. Applications of Hydraulics, 1987.

FREEZE, A.; J. A. CHERRY. **Groundwater**. Prentice Hall, Inc., Eaglewood Cliffs, New Jersey, 604 p., 1979.

HAZEN, A. Discussion: Dams on sand foundations. **American Society of Civil Engineers**, n.73, p. 199, 1911

HANSON R.T., BOYCE S.E., SCHMID W., HUGHES J.D., MEHL S.M., LEAKE S.A., MADDOCK T., NISWONGER R.G. **One-water Hydrologic Flow Model (MODFLOW-OWHM)**. Techniques of Groundwater of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Book 6, Chapter A51. Washington: US Government Printing Office, 2014. 120p.

HILL, M. C.; TIEDEMAN, C. R. **Effective groundwater model calibration: with analysis of data, sensitivities, predictions and uncertainty**. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey, 2007. 384p.

HIRATA, R.; ZOBY, J. L.; OLIVEIRA, G. F. R. de. **Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial**. In: BICUDO, C.E.de M.; TUNDISI, J.G.; SCHEUENSTUHL, M.C.B. [orgs] *Águas do Brasil: análises estratégicas*. São Paulo, Instituto de Botânica, 2010. p.149-161.

HONDA, E. A.; NIZOLI, E. C. **Caracterização das águas da Estação Ecológica de Águas De Santa Bárbara**. Relatório Técnico. São Paulo: Instituto Florestal, 2005. 41 p.

HUBBERT, M.K. The theory of ground-water movement. **Journal. of Geology**, 48(8), p: 785-944. 1940.

INSTITUTO FLORESTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (IF). **Mapa pedológico do estado de São Paulo**. 1:250.000. São Paulo, 2017.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Estado do Meio Ambiente – SMA, 2008. 104p.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150cmx200cm, 1928.

KRESIC, N. **Quantative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. 445 p.

KRESIC, N.; MIKSZEWSKI, A. **Hydrogeological conceptual site models: data analysis and visualization**. Leiden: CRC Press, 2012. 600 p.

MANOEL FILHO, J. Água subterrânea: História e importância. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. (Eds.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, 2008. p. 3-12.

MANZIONE, R. L. **Águas subterrâneas: Conceitos e Aplicações sob uma Visão Multidisciplinar**. Jundiaí, Paco Editorial, vol. 1, 2015. 386p.

McDONALD, M.G., HARBAUGH, B.R. **A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model**. Techniques of Groundwater of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. Book 6, Chapter A1. Washington: US Government Printing Office, 1988. 539p.

MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. **Plano de manejo da Estação Ecológica de Santa Bárbara**. São Paulo: Instituto Florestal, 2011. 222p.

MIRANDA, M. C. **Modelagem e simulação do escoamento em aquíferos livres sotopostos a zonas urbanas**. 2012. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

MESTRINHO, S. S. P. **Monitoramento em água subterrânea**. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. CPRM/LABHID, Rio de Janeiro, 2008. p. 673-686.

NAVA, Aira. **Modelagem dos níveis freáticos do sistema aquífero Bauru (SAB) em diferentes usos da terra no município de Assis - SP**. 2015. viii, 71 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2015.

OLIVEIRA, J. F. **Ferramental de gestão de águas subterrâneas para a cidade de São José do Rio Preto, SP**. 2002. 127p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002

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

PAULA E SILVA, F. KIANG, C. H. CHANG. M, R. C. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v.19, n.2, p.19-36, 2005.

POETER, E.P., HILL, M.C., LU D., TIEDEMAN C.R., MEHL S. **UCODE_2014, with new capabilities to de ne parameters unique to predictions, calculate weights using simulated values, estimate parameters with SVD, evaluate uncertainty with MCMC, and More**: Integrated Groundwater Modeling Center Report Number: GWMI 2014-02. 2014.

ROSSETTO R., BORSI I., FOGLIA L. FREEWAT: FREE and open source software tools for WATER resource management. Roma, Rendiconti Online, **Società Geologica Italiana** v.35, p. 252-255, 2015.

SAFRE, A. L.S; AVILEZ, A. M. A.; ROMAGNOLI, I.; ARAUJO. L.M. Uso do algoritmo SAFER para estimativa da evapotranspiração nas sub-bacias do Rio Novo, município de Avaré-SP. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2017, Santos. **Anais...** São Paulo: INPE, 2017.

SANTAROSA, L.V. **Mapeamento dos níveis freáticos do sistema aquífero bauru (SAB) em área de proteção ambiental em Águas de Santa Bárbara/SP durante o ano hidrológico de 2014/15**. 2016. 116p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

SANTAROSA, L.V. Modelo hidrogeológico conceitual da Estação Ecológica de Santa Bárbara (EEcSB) em área do Sistema Aquífero Bauru (SAB). **Águas Subterrâneas**, v.31, n.4, p. 404-412, 2017.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO. 1991. 45p.

SOLDERA, B. C.; MANZIONE, R. L. Modelagem de níveis freáticos no sistema Aquífero Bauru como ferramenta na gestão de recursos hídricos subterrâneos. **Ciência Geográfica**, v. 16, n. 1, p. 54-61, 2012.

SPITZ, K. & MORENO, J. **A practical guide to groundwater and solute transport modeling**. New York: John Wiley and Sons, 1996. 461p.

TAYLOR, G. S. Drainable porosity evaluation from outflow measurements and its use in drawdown equations. **Soil Science**, Ohio, 90 (6): 338-43, 1959.

WANG, H. F. & ANDERSON, M. P. **Introduction to Groundwater Modelling: Finite Difference and Finite Element Methods**. San Diego, California, USA: Academic Press Limited, 1982. 237 p.

WELS, C. **Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities**. Report N.194001, Ministry of Environment, Water Protection & Sustainability Branch of British Columbia, 2012

ANEXO A – Parâmetros morfológicos e de vazão calculados por Honda e Ezaki (2008).

ponto		largura		profund. média		vazão	
		(m)				(L/s)	
				período			
		seco	úmido	seco	úmido	seco	úmido
C1a	Capivari ponte 1	2,75	3,50	0,11	0,29	328,0	1639,1
C1b	Capivari ponte 2	2,65	2,80	0,07	0,17	s.d.	s.d.
C2	Capivari	2,50	s.d.	0,32	s.d.	150,0	s.d.
G1	Guarantã saída	1,15	3,00	0,25	0,33	35,6	124,3
G4	Guarantã	0,75	0,95	0,17	0,28	7,6	17,3
G5	Guarantã	0,45	0,50	0,06	0,18	2,8	18,1
G6	Guarantã nasc.	s.d.	0,30	s.d.	0,30	s.d.	8,5
S1	Santana saída	0,60	2,10	0,13	0,22	18,0	63,0
S2	Santana nascente	0,30	0,90	0,06	0,26	4,4	28,8
U1	Urubu saída	s.d.	0,50	s.d.	0,16	s.d.	4,2
B1	Bugre saída	0,60	0,85	0,23	0,43	78,1	209,7
B2	Bugre junção	0,65	0,86	0,53	0,57	18,6	59,4
P1	Passarinho saída	0,80	1,10	0,09	0,14	23,6	90,6
CR1	Capão Rico saída	1,15	3,50	0,60	0,65	248,3	1043,5
CR2	Capão Rico ponte	1,25	s.d.	0,67	s.d.	195,2	s.d.
L1	Lavapé saída	0,30	s.d.	0,19	s.d.	8,9	s.d.
PL1	Parque dos Lagos 1	0,30	0,50	0,07	0,10	12,9	24,7
SCB	Sulco C. Branco	s.d.	0,70	s.d.	0,47	s.d.	59,0
BCB	Bueiro C. Branco	s.d.	0,30	s.d.	0,03	s.d.	5,7

s.d. – sem determinação

ANEXO B – Dados Litológicos do poço 3500029772 do SIAGAS

Profundidade Inicial (m):	Profundidade Final (m):	Tipo de Formação	Litologia	Descrição Litológica
0.00	54.00	Grupo Bauru		Arenito marrom-claro, textura fina, com grãos subarrendondados; exibe nódulos carbonáticos
54.00	60.	Formação Geral, Grupo Bento	Serra São	Basalto muito alterado
60.00	258	Formação Geral, Grupo Bento	Serra São	Basalto cinza-escuro a negro, não intemperizado

Fonte: CPRM, Serviço de informações de águas subterrâneas.

