

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelo conceitual de circulação de água subterrânea e a sua relação com a
urbanização da cidade de Bauru (SP)**

VICTOR MAFRA CASQUEIRO

Trabalho de Formatura apresentado como
requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Ricardo Hirata

Co-orientadora: Daniela Barbati Osório

SÃO PAULO
2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP. Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP
Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação: Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Casqueiro, Victor Mafra

Modelo conceitual de circulação de água subterrânea e a sua relação com a urbanização da cidade de Bauru (SP) / Victor Mafra Casqueiro - São Paulo, 2020.
37 p.: il.

Trabalho de formatura: IGc/USP

Orient.: Hirata, Ricardo

Co-orient: Osório, Daniela Barbat

1. Sistema Aquífero Bauru (SAB) 2. Sub-bacia hidrográfica do Rio Bauru 3. Hidrogeologia urbana 4. Modelo conceitual tridimensional I. Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Modelo conceitual de circulação de água subterrânea e a sua relação com a urbanização da cidade de Bauru (SP)

VICTOR MAFRA CASQUEIRO

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Hirata

Co-orientadora: Daniela Barbatí Osório

Trabalho de Formatura

Nº 2020/24

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Carlos José Archanjo

Dr. Ricardo César Aoki Hirata

Dr^a. Cláudia Luciana Varnier

SÃO PAULO

2020

Dedico esta monografia a Deus, que esteve sempre cuidando dos meus sonhos, meu caminhar e minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e minha família, que por anos batalharam e deram suporte para que hoje pudesse concluir essa importante etapa de minha vida.

Ao Prof. Ricardo Hirata, por compartilhar sua experiência em hidrogeologia e permitir que me aprofundasse nessa vasta área dentro da Geologia.

À Daniela Barbatl Osório, que esteve disponível para sanar minhas dúvidas e me impulsionar a concluir os objetivos do trabalho.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, que proporcionou um ambiente de estudo, trabalho e relacionamento que guardarei na memória.

RESUMO

O município de Bauru conta com uma população de 376.818 habitantes, 60% abastecida por água subterrânea oriunda de 34 poços tubulares públicos do DAE-Bauru que captam água do Sistema Aquífero Guarani (SAG) (29,9 Mm³/ano) e outro que capta água do Sistema Aquífero Bauru (SAB), e 40% pela captação superficial no Rio Batalha (15,8 Mm³/ano). A falta de água recorrente observada tem obrigado usuários privados a perfurarem poços para suprir sua demanda, assim, contabiliza-se também 832 poços tubulares privados que extraem 18,3 Mm³/ano do SAB. O conhecimento sobre o aquífero e sua disponibilidade hídrica favorecem a segurança do abastecimento da cidade e são ferramentas fundamentais para a tomada de decisões. Esse projeto estuda o SAB na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru, e sua relação com a ocupação urbana, compreendendo suas características hidráulicas, geológicas e geométricas. O estudo se baseou no cadastro e interpretação de dados litológicos, construtivos e hidráulicos dos poços existentes, estruturados em um Sistema Geográfico de Informações, desenvolvendo um modelo conceitual hidrogeológico, fundamentado em mapas topográficos, potenciométricos, geológicos, de uso e ocupação do solo e de produtividade aquífera, bem como na construção de seções litoestratigráficas e um bloco diagrama. O SAB adelgaça a nordeste da área de estudo, coincidentemente onde o SAG, abaixo, apresenta expressivo espessamento. Em Bauru tais sistemas são diretamente sobrepostos em virtude a “janela” da Formação Serra Geral, mas não há conectividade hidráulica entre os sistemas, uma vez que são separados pela Formação Araçatuba. O balanço hídrico, levando em conta a recarga total para o aquífero 57,4 Mm³/ano e descargas na ordem de 56,9 Mm³/ano, resulta num volume estimado que fica conservado no sistema de 0,5 Mm³/ano. As captações do SAB, concentradas no perímetro urbano, não configuram ameaças de superexploração, apesar dos indícios de diminuição de produtividade causado por interferência entre os poços.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Bauru (SAB), Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru, hidrogeologia urbana, modelo conceitual tridimensional.

ABSTRACT

The municipality of Bauru has a population of 376,818 inhabitants, 60% supplied by groundwater extractions from 34 public tubular wells from DAE-Bauru, which capture water from the Guarani Aquifer System (SAG) (29,9 Mm³/year) and another one that captures water from the Bauru Aquifer System (SAB), and 40% by surface catchment from the Batalha River (15,8 Mm³/ano). The recurrent lack of water observed has forced private users to drill wells to supply their demand, also taking into account the 832 private tubular wells that extract 18,3 Mm³/year from the SAB. Knowledge about the aquifer and its water availability favor the security of the city's supply and are fundamental tools for decision-making. This project studies the SAB in the municipality, specifically in the Bauru River Sub-basin, and its relationship with the urban occupation, including its hydraulic, geological and geometric characteristics. The study was based on the registration and interpretation of lithological, constructive and hydraulic data from the existing wells, structured in a Geographic Information System, aiming at the development of a hydrogeological conceptual model based on topographic, potentiometric, geological, land use and occupation and aquifer productivity maps, as well as on the construction of lithostratigraphic sections and a diagram block. SAB's thickness greatest thinning in the study area is observed in the northeast, coincidentally where the SAG, below, presents significant thickening. In Bauru, such systems are directly overlapping due to the "window" of the Serra Geral Formation, but there is no hydraulic connectivity between the aquifer systems, since they are separated by the Araçatuba Formation. The water balance, taking into account a total recharge for the aquifer of 57,4 Mm³/year and water outputs in the order of 56,9 Mm³/year, results in an estimated volume of water that is conserved in the system of 0,5 Mm³/year. SAB's water catchment, concentrated in the urban perimeter, does not constitute threats of overexploitation, despite signs of productivity decrease caused by interference between the wells.

Keywords: Bauru Aquifer System (SAB), Bauru River Sub-basin, urban hydrogeology, three-dimensional conceptual model.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	1
3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	2
3.1. ÁREA DE ESTUDO.....	2
3.2. GEOLOGIA.....	4
3.3. HIDROLOGIA E HIDROGEOLOGIA	6
3.4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL	8
3.5. CLIMA.....	8
3.6. HIDRÁULICA.....	9
3.6.1. Recarga de aquíferos	9
3.6.1.1. Recarga de Aquíferos em Áreas Urbanas	9
3.6.2. Recarga em Bauru.....	10
3.7. REDE DE ÁGUA E ESGOTO DE BAURU.....	12
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	13
4.1. LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES.....	13
4.3. GEOPROCESSAMENTO DOS DADOS.....	14
4.3.1. Mapa topográfico do município de Bauru.....	14
4.3.2. Mapa potenciométrico do SAB.....	15
4.3.3. Mapa de uso e ocupação	15
4.3.4. Mapa de capacidade específica	15
4.4. CONSTRUÇÃO DE SEÇÕES E DO BLOCO DIAGRAMA DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
4.6. MODELO CONCEITUAL TRIDIMENSIONAL DO SAB	17
5. RESULTADOS	18
5.2. TOPOGRAFIA E POTENCIOMETRIA DO SAB.....	21
5.3. SEÇÕES.....	23
5.4. MAPA DE CAPACIDADE ESPECÍFICA.....	27
5.5. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	29
5.7. BLOCO DIAGRAMA.....	31
5.8. ALTERAÇÕES NO PROJETO	32
6. CONCLUSÕES	33
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

FIGURAS

Figura 1. Área de estudo, com seus acessos principais e municípios vizinhos.....	3
Figura 2. Bacias e sub-bacias hidrográficas, com identificação da área de estudo.	3
Figura 3. Geologia no município de Bauru e indicação da área de estudos.....	5
Figura 4. Hidroestratigrafia do município de Bauru.....	7
Figura 5. Fluxograma das etapas para a obtenção do Modelo Conceitual.....	18
Figura 6. Localização dos poços cadastrados na área de estudo, e utilizados para obtenção dos produtos deste projeto.	19
Figura 7. Topografia do município de Bauru.....	22
Figura 8. Potenciometria do Sistema Aquífero Bauru na área urbana de Bauru.....	23
Figura 9. Traço e numeração das seções construídas.	24
Figura 10. Seção litoestratigráfica 1, com dados de cota e geometria do substrato geológico..	24
Figura 11. Seção litoestratigráfica 2, com dados de cota e geometria do substrato geológico..	25
Figura 12. Seção litoestratigráfica 3, com dados de cota e geometria do substrato geológico..	25
Figura 13. Seção litoestratigráfica 4, com dados de cota e geometria do substrato geológico..	26
Figura 14. Seção litoestratigráfica 5, com dados de cota e geometria do substrato geológico..	26
Figura 15. Seção litoestratigráfica 6, com dados de cota e geometria do substrato geológico..	27
Figura 16. Distribuição dos valores de capacidade específica na área de estudo.	28
Figura 17. Uso e ocupação do solo na área de estudo.	29
Figura 18. Bloco diagrama representativo da área de estudo, com dados topográficos, evidenciando os principais fluxos de água subterrânea e a geometria do substrato geológico.....	32

TABELAS

Tabela 1. Dados climatológicos de Bauru.....	8
Tabela 2. Localização e dados litoconstrutivos dos poços cadastrados no DAEE na área de estudo.	20
Tabela 3. Dados hidráulicos do SAB (Sistema Aquífero Bauru) obtidos dos poços cadastrados no DAEE na área de estudo.	21

1. INTRODUÇÃO

Situado na porção central do estado de São Paulo, a aproximadamente 330 km da capital, Bauru é um município com uma população de 376.818 habitantes (IBGE, 2019), da qual 60% é abastecida por água subterrânea, proveniente de 34 poços tubulares públicos do DAE-Bauru que extraem águas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) (29,9 Mm³/ano) e um do Sistema Aquífero Bauru (SAB), e 40% por uma captação no Rio Batalha (15,8 Mm³/ano) (DAE, 2018).

A falta de água recorrente enfrentada pelo município em virtude do alto consumo por parte da população combinado com as altas temperaturas e períodos de estiagem prolongados, entretanto, tem motivado a população a também perfurar poços para suprir sua demanda. Assim, em Bauru há também 832 poços de produção privados cadastrados no Departamento de Água e Esgoto e que extraem 18,3 Mm³/ano do Sistema Aquífero Bauru (SAB) (DAE, 2015).

Essa extração não planejada poderia estar criando impactos ao aquífero e à sua descarga no Rio Bauru, dessa forma se vê necessária a aplicação de estudos hidrogeológicos e a proposição de modelos hidrogeológicos conceituais que levem a um conhecimento mais aprofundado do contexto hídrico e geológico da área.

Esse projeto, portanto, busca entender como a cidade altera a hidrogeologia, particularmente estabelecendo uma relação entre o padrão da ocupação urbana, recarga, e o fenômeno da exploração das águas subterrâneas nas áreas de descarga.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

Com uma população crescente, o município de Bauru tem uma alta demanda privada de água oriunda de extrações nos Sistema Aquífero Bauru (SAB). O conhecimento sobre o aquífero e sua disponibilidade hídrica permitem estabelecer um aproveitamento que favoreça a segurança do abastecimento da cidade frente a períodos de estiagem, sendo ferramentas fundamentais para a tomada de decisões.

Portanto o objetivo geral é a análise das características hidráulicas, geológicas e geométricas do aquífero, e suas relações com a dinâmica urbana da região, melhorando o conhecimento do SAB na cidade de Bauru, particularmente nos seguintes aspectos:

- Analisar a recarga e descarga no SAB, e suas relações com a ocupação urbana com base no mapa potenciométrico, de produtividade, e de uso e ocupação do solo; e
- Elaborar seções litoestratigráficas e um bloco diagrama a partir da interpretação dos perfis litológicos e construtivos dos poços tubulares.

3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1. Área de Estudo

Inicialmente um forte produtor agrícola, o município de Bauru (Figura 1) tem nos últimos anos exercido um papel importante no setor secundário, tornando-se um atrativo centro de comércio, serviços e indústrias, fatores que têm conferido uma crescente densidade demográfica para a região (Tavano, 2009). Localizado no centro-oeste do Estado de São Paulo, sua área urbana representa em torno de 17% da área total do município (Prefeitura Municipal de Bauru, 2008), cujo regime climático é marcado por duas estações bem definidas (verão úmido e inverno seco) (DAEE, 2015).

A Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru (Figura 2), área de estudo deste projeto que engloba toda a região urbana do município, é vizinha a nordeste do município de Pederneiras e está na Bacia Hidrográfica do Rio Tietê (Prefeitura Municipal de Bauru, 2008). A sub-bacia faz parte da UGRHI 13 (Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré) e engloba o Rio Bauru e seus afluentes dentro do município: Córrego do Matadouro, Córrego do Sobrado, Ribeirão da Grama e outras drenagens menores (CETESB, 2016); ao seu redor são observadas outras sub-bacias: do Rio Batalha, a sudoeste; do Ribeirão Grande, a sudeste; e do Ribeirão Água Parada, a noroeste (Almeida, 2000).

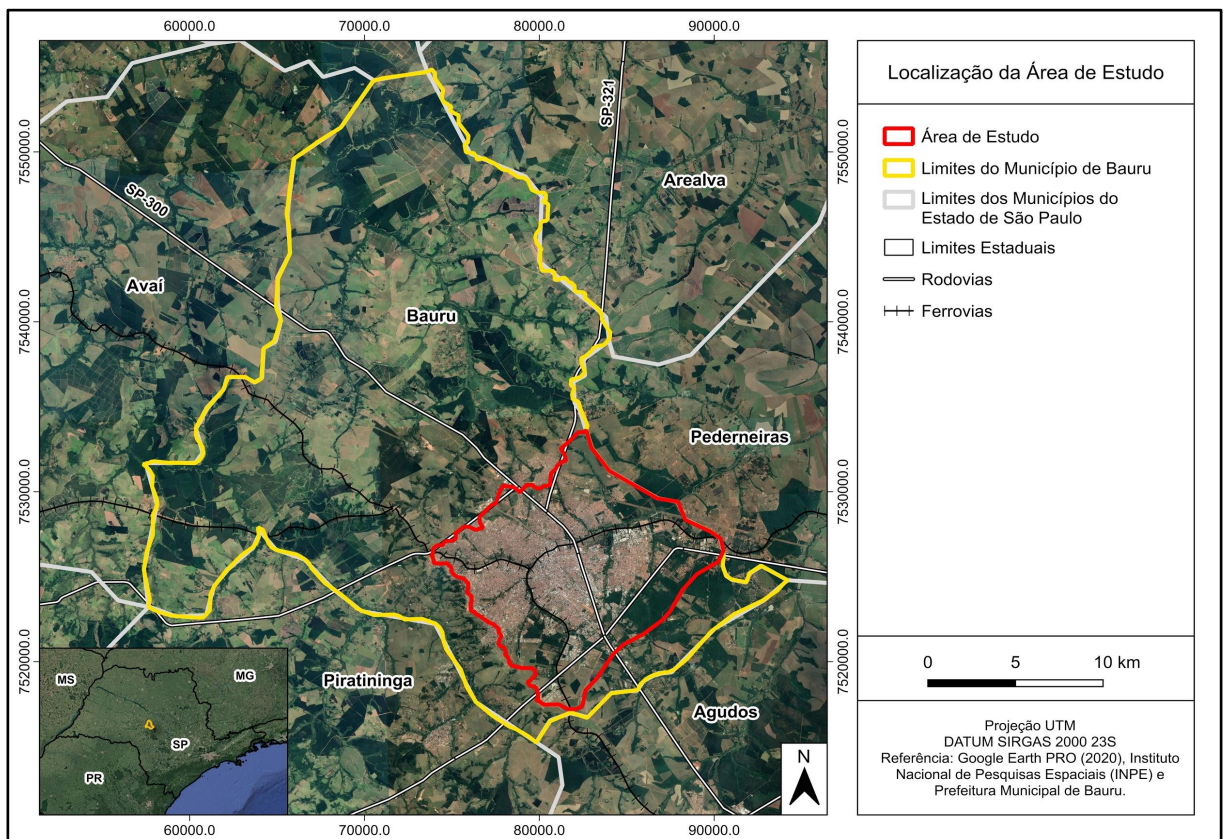


Figura 1. Área de estudo, com seus acessos principais e municípios vizinhos.

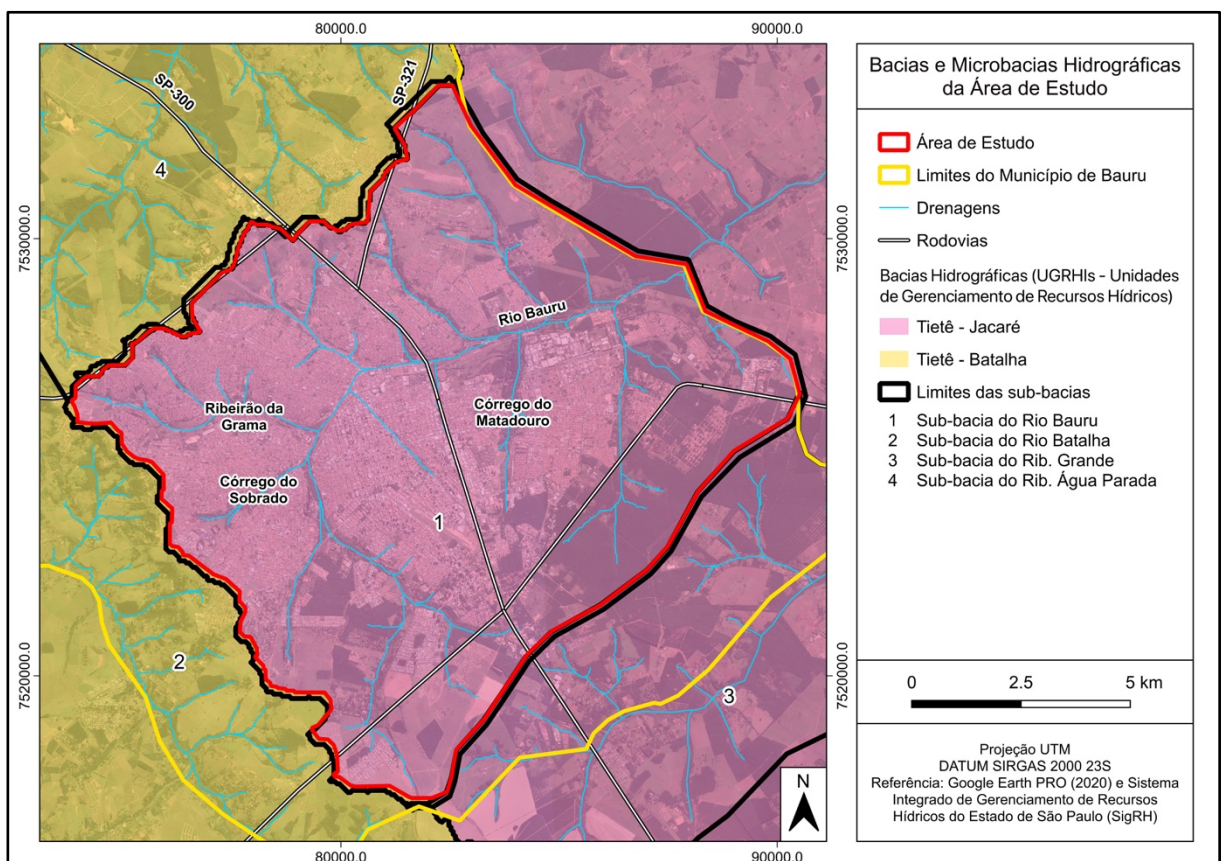


Figura 2. Bacias e sub-bacias hidrográficas, com identificação da área de estudo.

3.2. Geologia

A área de estudo está inserida no contexto geológico da Bacia do Paraná no estado de São Paulo, no Planalto Arenítico-Basáltico, onde afloram as rochas do Grupo Bauru (Cretáceo Superior), representado predominantemente pelas Formações Marília e Adamantina (Figura 3), sotopostos aos derrames basálticos da Formação Serra Geral pertencentes ao Grupo São Bento (Rosenberg et al., 2013).

A Formação Marília ocorre em áreas topograficamente mais elevadas, acima da Formação Adamantina (Almeida, 2000), e é formada por arenitos mal selecionados finos a grossos, por vezes conglomeráticos, e de grãos subangulosos, com espessuras chegando até os 160 m (Varnier et al., 2010). Tais estratos arenosos friáveis (baixa compactação e cimentação) de alta porosidade, combinados com as ações das águas superficiais e subterrâneas, favorecem a formação de feições erosivas características na região, marcadas por feições laminares e até por boçorocas (Almeida, 2000). Além disso, geomorfologicamente, o autor apresenta que tais formações dominantes na região do município de Bauru são marcadas por um relevo de colinas amplas ocupando as porções mais elevadas do platô de Bauru, transicionando nas bordas do platô para relevos mais escarpados, com morrotes alongados e colinas médias.

A Formação Adamantina, por sua vez, constituída de arenitos argilosos avermelhados de granulometria fina a média, intercalados com níveis com seixos esparsos, encontra-se ocupando os vales do Rio Batalha e seus afluentes, nas regiões de cotas topográficas mais baixas, e aflora também a leste da cidade, associada aos vales do Rio Bauru (Almeida, 2000). É observada tanto com estrutura maciça como com estratificações cruzadas, microestratos cruzados e marcas de ondas (Soares et al., 1980), além de intercalações de lamitos e siltitos avermelhados.

Ainda em relação ao Grupo Bauru, Paula e Silva (2005) descreve sua base formada pela Formação Araçatuba, uma unidade estratigráfica de cerca de 20 m de espessura composta por argilitos e lamitos. As análises de perfis geofísicos, com respostas de alta radioatividade e baixa resistividade para a formação, evidenciam sucessão de sedimentos com amplo predomínio pelítico, indicativa de um ambiente deposicional lacustre. A fase deposicional do Grupo Bauru que permitiu a formação desta unidade teve início com a instalação de um sistema lacustre raso, associado a

um sistema fluvial meandrante, respectivamente correspondentes às formações Araçatuba e Adamantina (Paula e Silva, 2005). O processo de sedimentação se dá através do sistema fluvial gradativamente progradando sobre o sistema lacustre, gerando uma sequência de sedimentos de granulometria crescente em direção ao topo. Tais processos de progradação e regressão teriam sido controlados pela retração e expansão do sistema lacustre, em virtude de variações climáticas e/ou tectônicas (Paula e Silva, 2005).

Os basaltos da Formação Serra Geral, devido a uma "janela" estratigráfica ocorrida em consequência do tectonismo associado a estrutura do Alto (Domo) de Piratininga (Campos et al., 2008), que expôs os basaltos ao intemperismo, não são observados na base do Grupo Bauru na cidade de Bauru, como normalmente ocorre nas sequências litoestratigráficas da Bacia do Paraná.

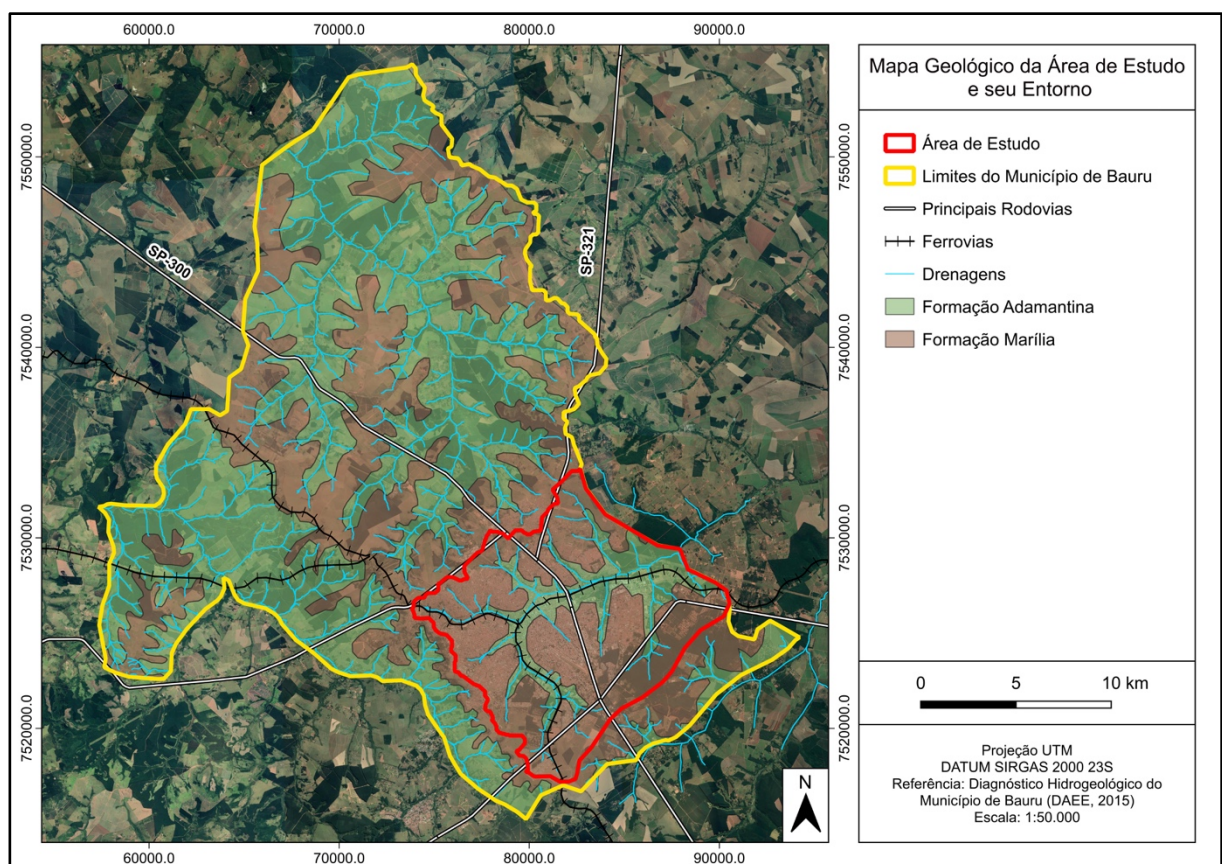


Figura 3. Geologia no município de Bauru e indicação da área de estudos.

3.3. Hidrologia e Hidrogeologia

Com aproximadamente 40 km de extensão, o Rio Bauru é um afluente do Rio Tietê que nasce no perímetro urbano a sudeste do município de Bauru e que juntamente com seus afluentes (Córrego do Matadouro, Córrego do Sobrado, Ribeirão da Grama e drenagens menores) define a Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru (CETESB, 2016).

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) ocorre na área de estudo e é utilizado pelo setor privado para o abastecimento hídrico da cidade, e conta com um poço profundo de captação de água do Departamento de Água e Esgoto (DAE). O SAB, em estudo, apresenta espessuras que variam de 100 a 200 m (Rosenberg et al., 2013) e é formado do topo para a base pelas unidades sedimentares Marília e Adamantina (Figura 4), com porosidades efetivas variando de 5 a 15%, que conferem ao sistema condutividades hidráulicas médias de 0,6 m/dia (DAEE, 2015). Tal sistema aquífero tem 832 poços privados instalados e se estende por toda a área, apresentando valores de capacidade específica média de 0,33 m³/h/m, de produção média dos poços inferior a 20 m³/h e de transmissividade média inferior a 45 m²/dia, que são baixos, se comparados ao SAG, cujos valores médios estão na ordem de 270 m²/dia (DAEE, 2015).

O Aquífero Marília apresenta permeabilidade relativamente menor, sendo classificado como livre a semiconfinado de comportamento anisotrópico, (Almeida, 2000) e abaixo dele é desenvolvido o aquífero livre a semilivre Adamantina, de permeabilidade moderada e porosidade granular primária, sendo a unidade mais explorada na região por exibir melhor produtividade (Almeida, 2000).

Além disso, a unidade basal do SAB na área de estudo compreende o aquífero representado pela Formação Araçatuba, que constitui uma formação geológica de natureza pouco permeável, de baixíssimos valores de transmissividade, que age como uma barreira isolante entre as unidades hidroestratigráficas subjacentes e sobrejacentes a ela (Paula e Silva, 2005). Análises laboratoriais confirmam a separação, pois revelam que as características hidrogeoquímicas e isotópicas são claramente distintas entre as águas subterrâneas do SAB (superior) e o SAG (inferior) (DAEE, 2015).

O SAG, no qual os poços públicos da cidade estão majoritariamente alocados, ocorre em maiores profundidades, sendo formado pelos arenitos avermelhados da Formação Botucatu (superior) e pelos arenitos característicos de sistemas eólicos úmidos da Formação Pirambóia (inferior). O sistema ocorre em todo o município de Bauru, com porosidade total entre 16 e 24%, condutividade hidráulica de 3,5 m/dia, vazão específica média de 3,62 m³/h/m, e poços com uma produção média de 154 m³/h (DAEE, 2015). Na área urbana de Bauru, devido à ausência dos basaltos da Formação Serra Geral, o SAG aparece diretamente subposto ao SAB na área, apesar de não haver conectividade hidráulica entre eles em virtude do aquitarde Araçatuba.

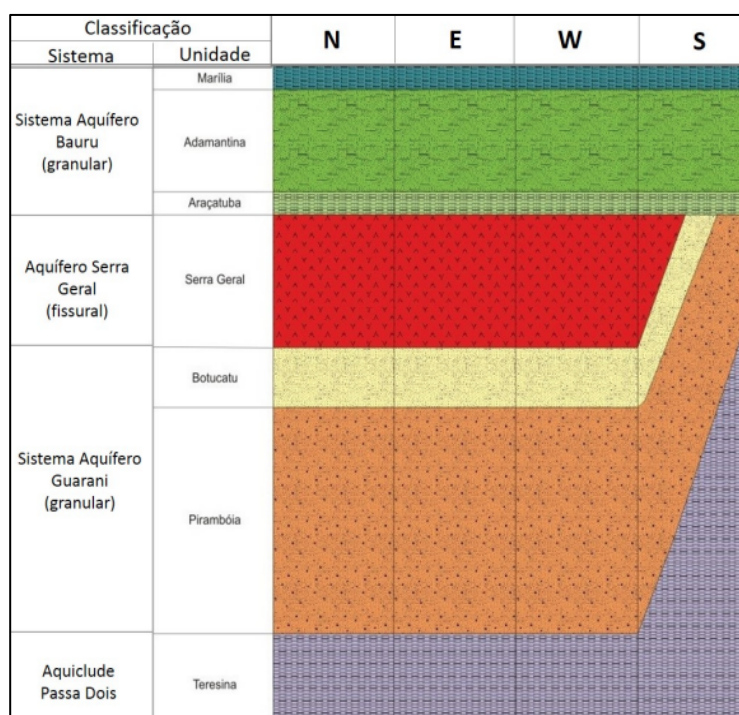


Figura 4. Hidroestratigrafia do município de Bauru (DAEE, 2015).

3.4. Modelo Hidrogeológico Conceitual

O recurso hídrico subterrâneo, por estar menos suscetível às contaminações e variações climáticas, constitui um armazenamento estratégico e seguro, e vem sendo amplamente utilizado frente ao acelerado ritmo de crescimento populacional no mundo (Fetter, 1994). Entretanto, Lousada & Campos (2005) apresenta que uma prática comum é a superexploração desses corpos d'água, que ocasiona em redução da disponibilidade hídrica superficial e subterrânea à população, e dessa forma o conhecimento aprofundado das características hidrogeológicas dos meios aquíferos e sua caracterização sob a forma de modelos conceituais, poderiam fornecer uma maior segurança à exploração dessas reservas (Lousada & Campos, 2005).

Os modelos conceituais hidrogeológicos buscam, de forma simplificada, representar as condições (naturais ou não) de circulação da água em um meio aquífero específico (condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento etc.) em esquemas tridimensionais, podendo fornecer base para a elaboração de modelos matemáticos e computacionais mais robustos e complexos, sendo usados para uma melhor gestão e conhecimento de tais meios (Rosen & LeGran, 2000).

3.5. Clima

O clima de Bauru é classificado, segundo o sistema de classificação climática de Köppen, como CWA ou tropical de altitude, predominante no centro-oeste do estado de São Paulo, com temperaturas médias máxima de 24,1°C no verão e mínima de 17,3°C no inverno (Tabela 1) (CEPAGRI).

Em relação ao regime de chuvas, o índice pluviométrico anual é de aproximadamente 1330 mm (milímetros), sendo no verão o período de maior precipitação total, com 226,6 mm/mês, e o menor no inverno, com 25,5 mm/mês.

Tabela 1. Dados climatológicos de Bauru.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura Média (°C)	25	25	25	23	20	20	19	21	22	23	24	24
Precipitação Média (mm)	226	196	143	76	62	52	35	25	62	122	129	199

Fonte: CEPAGRI e INMET.

3.6. Hidráulica

3.6.1. Recarga de aquíferos

A recarga de aquíferos, definida como fluxo de água que infiltra no solo e capaz de adicionar volume extra à zona saturada, pode ser proveniente de fontes naturais, como rios e lagos, da precipitação, e dos fluxos subterrâneos adjacentes, e de fontes não-naturais, como a irrigação e recarga urbana (vazamento da rede de distribuição de água, esgotos e fossas) (Lerner et al., 1990).

Segundo o autor, a recarga natural ocorre de três principais formas:

- Recarga direta: a água da chuva infiltra e parte sua fica retida na zona vadosa na forma de umidade, parte passa por evapotranspiração e é retirada do meio, e uma outra parte efetivamente atinge o nível d'água do aquífero.
- Recarga indireta: a água que, através do armazenamento em rios e lagos, infiltra no solo e recarrega o aquífero.
- Recarga localizada: a água de precipitação que fica acumulada em poças e outros pequenos corpos superficiais, que posteriormente infiltra e recarrega o aquífero.

Por se tratar de uma região de clima úmido, em Bauru o meio de recarga direta é predominante, uma vez que os corpos de água superficiais representam locais onde o nível d'água intercepta a topografia, e assim há a descarga do aquífero (De Vries e Simmers, 2002).

3.6.1.1. Recarga de Aquíferos em Áreas Urbanas

Em áreas urbanas, tem-se fontes que controlam a recarga dos aquíferos semelhantes às de zonas rurais, como a precipitação, os fluxos provenientes da irrigação, e os corpos d'água superficiais (Lerner et al., 1990), mas tem-se também diversos outros fatores modificadores que aparecem como consequência do processo de urbanização. Durante a expansão das cidades, o desenvolvimento de uma malha de distribuição de água e de coleta de esgotos se faz necessário, e tais instalações, somadas à impermeabilização do solo na construção civil, influenciam nos mecanismos de recarga e fluxos subterrâneos.

Em áreas urbanas, ao mesmo tempo que o solo impermeabilizado reduz a infiltração das águas provenientes da precipitação e a menor quantidade de vegetação implica numa menor evapotranspiração total, os vazamentos da rede de esgoto e de distribuição/coleta de água agem como fontes de recarga (Yang et al., 1999). De acordo com estudo desenvolvido por Lerner (2002), tais vazamentos das tubulações podem chegar de 20 a 25% do volume total distribuído, sendo que na rede de distribuição as perdas geralmente são maiores em virtude da pressão, a menos que a rede de coleta de esgoto esteja estruturalmente danificada, ocasionando assim perdas mais expressivas.

Tais vazamentos, juntamente com a drenagem das águas de telhados, ruas e pavimentos, e seu direcionamento para bacias de infiltração, apesar de minimizarem o rebaixamento do nível d'água ocasionado pela extração de água subterrânea (Foster et al., 1998), aumentam o risco de contaminação dos aquíferos e podem ser mecanismos danosos à qualidade das águas, que por vezes são exploradas para uso da população.

Os resultados dos cálculos de recarga na cidade de Leipzig (Alemanha), por exemplo, mostraram que a evapotranspiração foi reduzida em 25%, enquanto que o escoamento superficial resultante da impermeabilização do solo aumentou mais de 180% e sua recarga diminuiu somente 4% (Haase, 2009). No século XX, outra cidade europeia, Nottingham, foi alvo de estudos de recarga de aquíferos em áreas urbanas. Neste caso, calculou-se a recarga na ordem de 230 mm/ano (diminuição de 8%), dos quais aproximadamente 50% é proveniente de vazamentos da rede de abastecimento de água e 5% da rede de coleta de esgoto (Yang et al., 1999).

3.6.2. Recarga em Bauru

O cálculo de recarga é controlado por diversos fatores distintos que dificultam a precisão das estimativas numéricas (Hornero et al., 2016), tal como a hidrografia, os mecanismos de fluxo na zona não-saturada, o tipo e espessura do solo, e fatores do ambiente externo, como a declividade, o uso e ocupação do solo, os sistemas de irrigação etc. (Lerner et al., 1990). Na definição da metodologia de cálculo, portanto, leva-se em consideração as fontes e os mecanismos que controlam a recarga da zona saturada, permitindo uma melhor quantificação do volume de água no sistema e os resultados finais que desejam ser obtidos.

O Balanço Hídrico do Solo (SWB), uma metodologia rápida, simples e menos custosa baseada nas equações de Thornthwaite (1948) e Thornthwaite & Mather (1955), apesar de conter pequenos erros acumulados nas etapas dos cálculos e dificuldades na estimativa da evapotranspiração (que podem ser contornadas a partir da utilização de simplificações e valores médios), mostrou-se um método promissor para o cálculo de recarga da Sub-Bacia do Rio Batalha no município de Bauru por Carolina Santos et al. (no prelo).

O método é baseado no princípio básico de conservação de massa, em que a quantidade de água que entra no sistema subtraída da quantidade de água que sai dele é igual ao armazenamento hídrico no solo (Wahnfried & Hirata, 2005). Desta forma, o balanço hídrico proposto por Thornthwaite & Mather (1955) é representado pela seguinte equação:

$$P = ESC + ETP + ARM + R$$

onde **P** equivale à precipitação mensal, **ESC** ao escoamento superficial para fora da área de estudo (em função da declividade e tipo de solo), **ETP** a evapotranspiração potencial mensal (em função da temperatura, precipitação e período de insolação), **ARM** a variação no armazenamento de água na zona não-saturada (em função do tipo e espessura do solo), e **R** a recarga, com todos os parâmetros aplicados na unidade mm.

Próxima a área de estudo em foco neste projeto, a Sub-bacia do Rio Batalha está inserida no mesmo contexto geológico e climático, contando com boa disponibilidade para a coleta de dados e estudo dos parâmetros necessários à determinação dos valores. Carolina Santos et al. (no prelo) calcula a recarga nesta área considerando intervalos temporais longos, com dados climáticos e pluviométricos históricos que permitem uma melhor caracterização dos processos, além de avaliar fatores como impermeabilização do solo e tipos de plantio em áreas verdes.

Os valores obtidos de recarga na área pelo método de SWB são da ordem de 286,2 mm/ano, e pelo fato de incorporar em sua equação taxas de evapotranspiração, permite avaliar a interferência da mudança de ocupação do solo, com uma diminuição de 73% na recarga natural em áreas urbanizadas (impermeabilizadas e com pouca vegetação), com valores em torno de 72 mm/ano.

Por outro lado, DAEE (2015) mostra que no município as maiores recargas ainda são observadas na zona urbana, pois nesta a recarga natural é complementada pela recarga urbana (perdas do sistema de abastecimento hídrico e rede de esgoto), com valores totais na ordem de 300 a 410 mm/ano (DAEE, 2015).

A exploração das águas do aquífero e o balanço entre recarga e descarga do SAB encontram um cenário confortável e seguro (DAEE, 2015), onde a exploração representa um valor inferior a 2,5% do total da disponibilidade hídrica do aquífero. As captações de água subterrânea, mesmo ocorrendo concentradas no perímetro urbano, ainda assim não apresentam riscos à segurança hídrica, uma vez que, por si só a recarga urbana já ultrapassa com ampla margem o volume total captado pelos poços (DAEE, 2015).

3.7. Rede de Água e Esgoto de Bauru

Bauru, localizada numa zona divisora de sub-bacias hidrográficas, é uma cidade onde 99% da população já é atendida pelo sistema público de abastecimento hídrico (DAE-Bauru), mas conta com um sistema de tratamento de esgoto ainda em desenvolvimento.

A rede de esgoto, cuja extensão é da ordem de 2600 km, atende 95% da população (SNIS, 2014) de Bauru, e coleta um volume aproximado de 21,2 Mm³/ano, dos quais apenas 4% passa por tratamento. Segundo SNIS (2013), 90% dessa coleta é lançada na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru (mais próxima das zonas de maior consumo de água) e 10% na Bacia do Rio Batalha.

O sistema de abastecimento público, operado pelo DAE-Bauru, produziu em 2013 em torno de 43,7 Mm³ de água (DAEE, 2015), dos quais 37% provém de captações profundas do SAG na zona urbana e de um poço no SAB do distrito de Tibiriçá, e outros 63% provém de captações superficiais do Rio Batalha. Tal valor, somado ao volume produzido pelas alternativas privadas de abastecimento (832 poços tubulares) totaliza uma produção média de 61,1 Mm³/ano no município.

O sistema de abastecimento público, por precariedades infraestruturais, conta com perdas de água entre os locais de captação e o consumidor final. A diferença entre o volume total produzido e o volume consumido (na faixa de 33 Mm³/ano) pode ser interpretada como perdas desse sistema de abastecimento, representando assim 28,1 Mm³/ano, ou seja, 46% (SNIS, 2014).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este Trabalho de Formatura (TF) foi conduzido em conjunto com outros pesquisadores do Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS|USP) que estudam a hidrogeologia e hidrologia do município de Bauru. Este TF se baseou em dados secundários, que exigiram organização, interpretação e consistência. Os trabalhos foram somente de escritório, sendo restringidas as atividades de campo em virtude da pandemia

4.1. Levantamento de Informações

Uma etapa preliminar do trabalho, de levantamento bibliográfico de estudos relacionados à área e de estudos voltados à hidrogeologia urbana levou a um maior aprofundamento sobre o contexto em que a área de estudos está inserida e sobre as etapas a serem desenvolvidas, bem como as complexidades a serem enfrentadas na construção de um modelo conceitual. As informações coletadas das fontes, incluindo órgãos públicos, permitiram o entendimento do contexto social, hídrico e geológico no qual a Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru se insere, e foi essencial para traçar os rumos do trabalho, definindo os materiais e métodos necessários para chegar aos resultados e objetivos propostos.

A partir disso, seguiu-se com a obtenção de dados acerca do sistema de distribuição e água e coleta de esgoto e dos poços tubulares da área, em consultas de relatórios do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e do Departamento de Águas e Esgoto de Bauru (DAE), bem como de projetos relacionados à Prefeitura Municipal de Bauru. O projeto do DAEE, desenvolvido em conjunto com a empresa C3 Consultoria “Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP” (2015), que teve por objetivo o diagnóstico hidrogeológico do município de Bauru, foi de suma importância para a obtenção da base de dados dos poços tubulares utilizada nos trabalhos.

Para que houvesse avanço nas etapas de geoprocessamento, foi feito o levantamento de mapas geológicos, hidrográficos, viários e imagens de satélite que

tratam da área de estudo, junto aos órgãos públicos como IBGE, CPRM e prefeituras municipais.

4.2. Tratamento de Dados

A avaliação dos dados levantados foi fundamental para a determinação e aplicação das técnicas e *softwares* que levariam aos objetivos finais do trabalho.

Nesta etapa, os dados coletados do Projeto C3 de 810 poços tubulares instalados na área foram organizados em uma base digital única, integrando seus dados de localização, litológicos, construtivos e hidráulicos. Posteriormente, tais dados foram avaliados e tratados para deletar erros de caracteres e digitação, tornando-os assim úteis para a confecção de mapas que facilitaram a visualização dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero. Ao final do tratamento ficaram disponíveis dados de somente 92 poços.

Complementarmente, foram avaliados e tratados dados públicos de hidrografia e geologia do município de Bauru, disponibilizados pela prefeitura do município e obtidos virtualmente.

4.3. Geoprocessamento dos Dados

A partir da base de dados e mapas adquiridos, o levantamento passou a ser trabalhado no *software* livre e gratuito QGIS (versão 3.4 Madeira, 2018) para obtenção das feições topográficas, hidrogeológicas, hidrográficas e de uso e ocupação do solo, importantes para a construção do modelo final.

Nestes trabalhos, os mapas foram gerados a partir da sobreposição dos dados levantados com imagens de satélite da área, criando digitalmente camadas de diversas geometrias em arquivos tipo *shapefile* representativas dos itens em estudo. Os mapas produzidos dão suporte para a confecção final do modelo tridimensional da geometria do SAB.

4.3.1. Mapa topográfico do município de Bauru

Primeiramente, os dados de localização dos poços tubulares distribuídos pelo município de Bauru permitiram plotar em uma base de imagem de satélite os poços

alocados no SAB, SAG e no SASG. Para o trabalho, foram extraídos somente os poços localizados na área de estudo.

A partir dessa mesma base de dados, foram interpoladas as cotas topográficas das bocas dos poços cadastrados no município de Bauru e atribuído um gradiente de cores a cada um dos valores, obtendo-se a topografia do terreno.

4.3.2. Mapa potenciométrico do SAB

O mapa potenciométrico do SAB foi obtido da base de dados do Projeto C3 supracitado. Os dados de nível d'água medidos em cada um dos poços no SAB subtraídos de suas respectivas cotas topográficas, levam à determinação de suas cargas hidráulicas, cujos valores são interpolados e manualmente ajustados para a construção das linhas equipotenciais no mapa final.

4.3.3. Mapa de uso e ocupação

O mapa de uso e ocupação do solo foi traçado manualmente a partir da análise de imagens de satélite (*Google Earth Pro*, 2020), permitindo distinguir e calcular a proporção das áreas edificadas em relação às não edificadas na área de estudo. Os polígonos traçados foram organizados no *software* QGIS (versão 3.4 Madeira), o qual conta com ferramentas de geoprocessamento que auxiliaram nos cálculos de área e extensão.

4.3.4. Mapa de capacidade específica

O mapa de capacidade específica foi obtido através da interpolação por krigagem no *software* QGIS (versão 3.4 Madeira) de valores hidráulicos dos poços cadastrados. A capacidade específica para cada um dos poços do SAB é resultante de uma operação de divisão entre suas vazões (em m³/h) e o rebaixamento do nível d'água, calculado, por sua vez, pela subtração do nível estático do nível dinâmico (profundidade do nível d'água dentro do poço quando está em bombeamento) medidos nos respectivos poços.

4.4. Construção de Seções e do Bloco Diagrama da Área de Estudo

Combinando os resultados dos trabalhos da etapa de geoprocessamento e de tratamento dos dados dos poços, seis seções hidrogeológicas e um bloco diagrama foram construídos para auxiliar no entendimento das relações entre as diferentes unidades na área de estudo, bem como suas relações com as feições de superfície. A obtenção dos produtos se baseia na descrição litológica dos poços tubulares e no mapa geológico de superfície, que tornou possível a interpolação por krigagem dos dados de cotas dos diferentes substratos no *software Surfer 19*, gerando superfícies digitais tridimensionais representantes da área.

Para melhorar a visualização das diversas litologias e estruturas de superfície, foi sobreposto o mapa de drenagens ao bloco diagrama e foram atribuídas cores a cada uma das litologias representadas no bloco e nas seções. Posteriormente, foi utilizado o *software* gratuito *Inkscape* (versão 1.0.1) para fazer as correções necessárias nos modelos gerados, assim como para a aplicação dos detalhes finais.

4.5. Balanço Hídrico

A recarga natural pode ser calculada a partir dos valores propostos por Carolina Santos et al. (no prelo) para zonas rurais e zonas urbanas. Com base no mapa de uso e ocupação gerado, multiplica-se o volume da recarga pela área de cada uma dessas zonas dentro da área de estudo e obtém-se o volume aproximado recarregado no aquífero por meios naturais na área urbana e não-urbana. Já a recarga induzida pelas perdas pela rede de abastecimento pública e pelas perdas da rede de esgoto é obtida bibliograficamente do DAEE (2015).

Para o cálculo da recarga total estimada para a área de estudo, portanto, foram somados os valores de recarga natural nas áreas urbanas e não-urbanas aos valores de recarga induzida pelas perdas do sistema de abastecimento e coleta de esgoto.

A partir do mapa potenciométrico e dos parâmetros hidráulicos do SAB na área de estudo, há a possibilidade de se estimar a quantidade de água que é descarregada pelo aquífero no Rio Bauru através da Lei de Darcy:

$$Q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A$$

onde, Q é a vazão a se obter, k a condutividade hidráulica, h a carga hidráulica dissipada na percolação, L a distância a ser percorrida pela água subterrânea e A a área da seção transversal infiltrada.

As saídas de água do sistema incluem o volume de descarga de água no Rio Bauru e o volume explorado do SAB a partir dos poços na área de estudo. Tais valores, subtraídos das entradas de água no sistema (recarga), resultam num cálculo de balanço hídrico e uma estimativa da quantidade de água que fica armazenada no sistema.

4.6. Modelo Conceitual Tridimensional do SAB

Por fim, na última etapa do trabalho o objetivo foi criar um modelo conceitual do aquífero na área urbana da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru, relacionando suas características de recarga, descarga e dos caminhos percorridos pela água (Figura 5). Para isso, foram levadas em consideração suas características hidrogeológicas geométricas tridimensionais, as interferências antrópicas, relações hidráulicas (condutividade hidráulica, capacidade específica etc.) e seu balanço hídrico. O modelo conceitual permite aperfeiçoar o conhecimento sobre a disponibilidade hídrica do aquífero, a visualização dos fluxos e das recargas/descargas, bem como seus locais de maior espessura e produtividade (e a relação disto com a geologia), compreendendo os principais impactos causados pela cidade de Bauru e pela exploração de água.

O tratamento estatístico e confecção de mapas baseados nos dados cadastrados dos poços também configura uma etapa importante para a determinação dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero e, juntamente com construção do bloco diagrama representando graficamente os resultados obtidos, favorece a visualização da recarga, descarga e dos caminhos da água subterrânea do modelo conceitual.

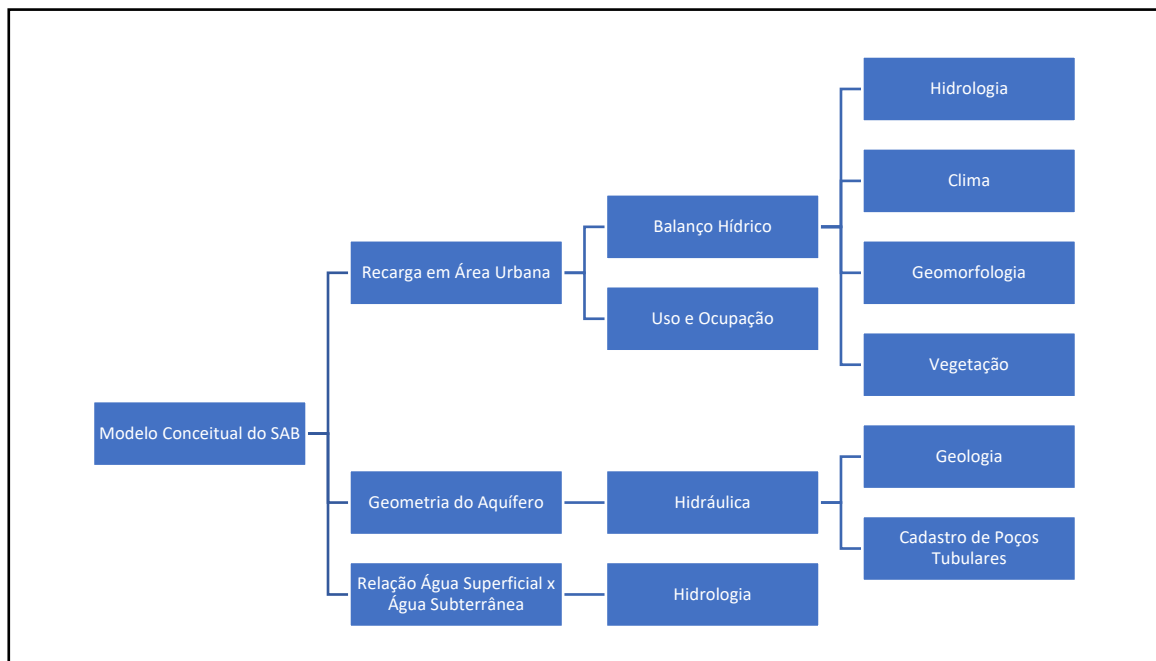


Figura 5. Fluxograma das etapas para a obtenção do Modelo Conceitual.

5. RESULTADOS

5.1. Base de Dados

Os dados coletados dos poços tubulares cadastrados na área de estudo (Figura 6) foram tratados e organizados dando-se ênfase as informações de localização, litologia, perfil construtivo e dados hidráulicos. As Tabelas 2 e 3 permitiram construir as seções geológicas, o bloco diagrama e o mapa de capacidade específica.

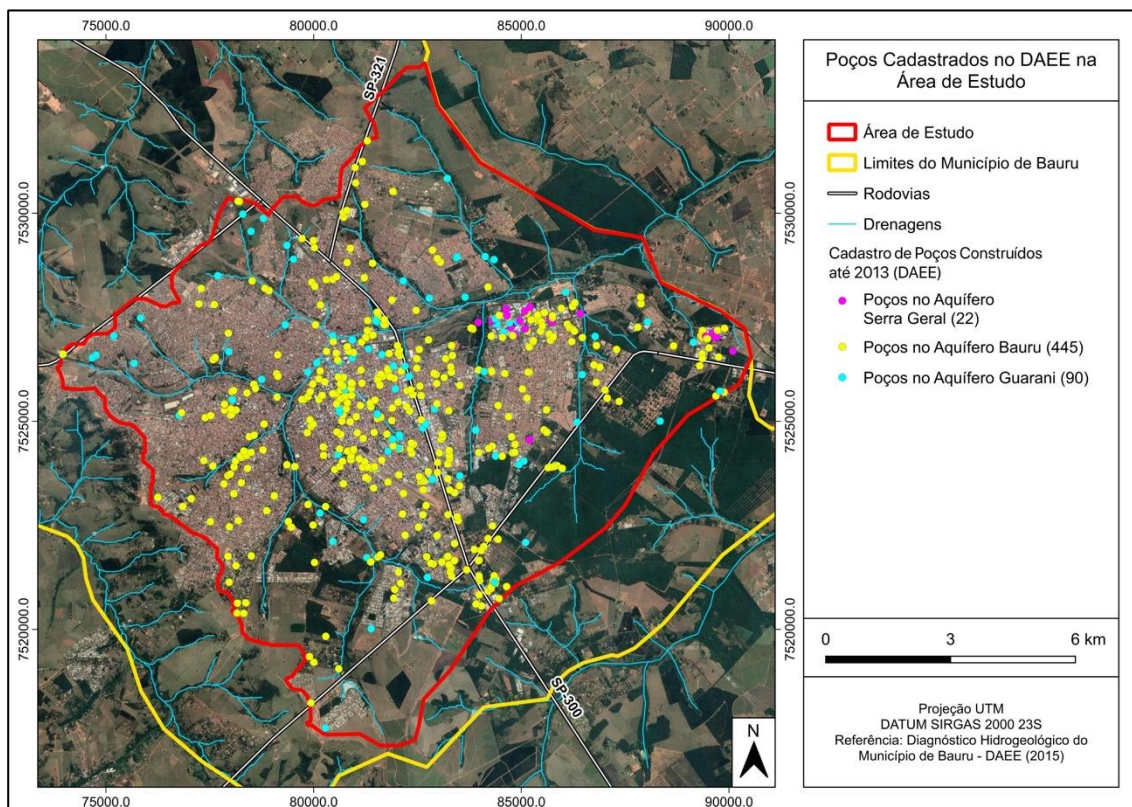


Figura 6. Localização dos poços cadastrados na área de estudo, e utilizados para obtenção dos produtos deste projeto.

Tabela 2. Localização e dados litoconstrutivos dos poços cadastrados no DAEE na área de estudo.

ID	Coord N (m)	Coord E (m)	Cota Topográfica (m)	Prof. do poço (m)	Cota da Base				
					Grupo Bauru (m)	Form. Serra Geral (m)	Form. Botucatu (m)	Form. Pirambóia (m)	Form. Teresina (m)
1	7530400	700500	530	234	460	-	-	270	265
2	7527950	701800	560	315	460	-	-	266	245
3	7529050	704450	520	300	459	449	397	157	150
4	7539850	683130	585	142	444	443	-	-	-
5	7530590	697320	560	122	459	-	-	438	-
6	7535200	701650	533	-	449	337	266	25	3
7	7530417	696966	517	215	451	337	-	-	302
8	7533357	697806	538	371	440	-	388	169	167
9	7532276	701237	501	351	450	-	380	158	150
10	7531174	696183	538	209	445	-	-	338	329
11	7526954	699298	538	160	459	-	-	296	286
12	7536125	697577	555	406	457	408	335	105	95
13	7530771	698338	510	206	456	-	-	225	224
14	7531218	693009	575	286	442	-	-	292	289
15	7528959	700226	560	307	460	-	-	250	240
16	7532038	694148	575	322	446	-	-	260	253
17	7533192	702542	511	474	451	292	270	41	37
18	7529520	692990	539	189	447	-	-	361	350
19	7533759	694095	530	471	430	256	160	-44	-45
20	7525550	700780	535	287	456	-	-	250	248
21	7530940	707280	540	392	480	309	250	68	67
22	7532965	695937	560	328	444	-	-	240	232
23	7522050	698150	580	248	454	-	-	346	332
24	7529274	690048	560	170	452	-	-	390	-
25	7528630	699920	570	220	451	-	-	260	250
26	7533900	695350	600	477	442	-	298	65	55
27	7530950	699875	530	203	456	-	412	220	210
28	7530010	696230	550	160	450	-	-	390	-
29	7530800	694000	560	245	445	-	-	318	315
30	7531050	692850	570	277	440	-	-	300	293
31	7528500	694600	580	276	454	-	-	393	304
32	7530300	704640	520	415	472	409	329	100	99
33	7531731	699695	520	330	465	-	421	219	190
34	7524739	699340	551	233	462	-	-	296	291
35	7525340	702310	582	350	458	-	-	235	232
36	7531665	704816	500	459	451	273	202	-25	-35
37	7536360	699910	640	599	464	388	242	30	20
38	7532789	692095	567	340	447	-	370	119	109
39	7522655	700079	587	283	435	-	-	231	221
40	7529089	706485	606	432	471	454	404	150	146
41	7529005	700208	-	320	-	-	-	-	-
42	7530073	700143	550	340	-	-	-	-	-
43	7531659	693446	607	320	447	-	-	277	267
44	7523526	703654	585	101	490	-	462	-	-
45	7522050	698150	580	248	455	-	-	345	332
46	7531149	692909	570	277	438	-	-	287	284
47	7531767	699750	500	327	445	-	403	200	173
48	7531183	705006	505	458	378	277	151	47	-
49	7531659	693446	507	320	345	-	-	187	-
50	7530114	700154	565	319	458	-	-	236	220
52	7529005	700208	560	320	460	-	-	255	244
53	7530979	693908	560	245	445	-	-	318	-
54	7533900	695350	-	470	436	-	285	120	-
55	7536360	699910	-	590	410	335	185	-5	-
56	7532780	692270	-	300	430	-	353	210	-
57	7522655	700079	-	-	468	-	-	345	340
58	7529089	706485	606	432	471	455	388	176	-
59	7531757	697573	540	220	420	320	-	326	-
60	7532061	694106	560	322	431	-	-	247	-
61	7531783	704788	491	344	450	265	193	147	-
62	7533202	702440	510	474	445	291	270	40	36
63	7532998	696001	560	328	448	-	-	240	236
64	7532257	701060	500	351	430	-	379	-	149
65	7533690	694280	530	471	441	255	210	60	-
66	7533320	697834	539	371	460	-	389	169	168
67	7530590	697320	560	122	456	-	-	437	-
68	7530443	702307	516	310	464	-	-	-	206
69	7530473	696955	530	214	460	-	-	-	371
70	7530400	700500	530	234	481	-	-	299	-
71	7530947	707359	541	392	446	311	281	158	-
72	7530950	699870	520	202	449	-	403	322	-
73	7530814	698295	504	206	457	-	-	299	-
74	7531166	696193	550	209	449	-	-	350	341
75	7531210	693000	575	286	460	-	-	355	351
76	7527013	699267	537	160	460	-	-	377	-
77	7527970	701623	560	315	445	-	-	266	245
78	7539691	683617	585	101	427	443	-	-	-
79	7536078	697493	525	406	448	379	305	-	-
80	7535111	701605	533	530	486	338	267	26	24
81	7524390	699346	575	230	456	348	-	369	-
82	7525565	700750	535	287	450	-	-	250	249
83	7530010	696230	550	160	401	-	-	393	-
84	7530278	704661	520	415	460	-	-	305	-
85	7519500	692050	-	142	487	-	-	427	423
86	7528500	694600	-	183	459	-	-	403	397
87	7529140	704487	520	300	456	449	396	271	-
88	7528960	700220	556	307	463	-	-	253	-
89	7528630	699920	581	220	434	-	-	365	-
90	7529517	692689	520	187	438	-	-	-	333
91	7529496	692986	530	188	442	-	-	352	345
92	7529270	690040	550	170	-	-	-	382	-

Tabela 3. Dados hidráulicos do SAB (Sistema Aquífero Bauru) obtidos dos poços cadastrados no DAEE na área de estudo.

ID	Coordenada N (m)	Coordenada E (m)	Aquífero	Nível Dinâmico ND (m)	Nível Estático NE (m)	Rebaixamento ND - NE (m)	Vazão (m³/h)	Capacidade Específica (Vazão/Rebaixamento)
1	7530390	703360	SAB	44,56	28,44	16,12	1,20	0,074
2	7530820	700700	SAB	0,00	20,00	-	2,00	-
3	7530880	706880	SAB	48,15	11,30	36,85	6,00	0,163
4	7531030	698770	SAB	31,00	18,30	12,70	2,00	0,157
5	7531610	696200	SAB	48,32	23,68	24,64	4,00	0,162
6	7531780	702720	SAB	0,00	58,36	-	-	-
7	7531920	706140	SAB	0,00	26,00	-	-	-
8	7531985	693394	SAB	32,68	17,42	15,26	3,10	0,203
9	7532010	704550	SAB	26,00	18,00	8,00	4,23	0,529
10	7532709	695590	SAB	28,00	22,00	6,00	3,60	0,600
11	7532800	698600	SAB	37,00	31,00	6,00	5,00	0,833
12	7533110	701360	SAB	77,20	31,08	46,12	4,50	0,098
13	7533200	684770	SAB	97,00	48,00	49,00	7,25	0,148
14	7533580	698350	SAB	55,10	45,60	9,50	2,50	0,263
15	7533930	695800	SAB	85,00	42,11	42,89	5,40	0,126
16	7534758	696590	SAB	90,00	36,50	54,00	46,60	0,863
17	7536090	699720	SAB	63,08	45,50	17,58	11,00	0,626
18	7539840	683110	SAB	0,00	27,00	-	2,50	-
19	7540870	689540	SAB	71,00	48,60	22,40	4,70	0,210
20	7541560	693620	SAB	32,00	25,00	7,00	1,00	0,143
21	7541600	696800	SAB	76,00	22,00	54,00	25,50	0,472
22	7542060	693070	SAB	36,00	23,00	13,00	4,00	0,308
23	7542330	689340	SAB	44,00	25,00	19,00	7,50	0,395
24	7544900	684600	SAB	96,00	40,00	-	16,00	-
25	7545540	684350	SAB	82,05	43,20	38,85	8,00	0,206
26	7549350	685210	SAB	78,07	32,25	45,82	6,00	0,131
27	7522880	702850	SAB	87,30	35,40	51,90	12,00	0,231
28	7523640	697616	SAB	43,00	36,00	7,00	2,40	0,343
29	7524070	702720	SAB	58,00	33,00	25,00	7,20	0,288
30	7524420	706380	SAB	42,00	23,00	19,00	7,00	0,368
31	7524990	702450	SAB	86,59	44,18	42,41	2,80	0,066
32	7526160	702060	SAB	57,45	32,00	25,45	2,50	0,098
33	7526260	695970	SAB	88,48	62,27	16,22	10,00	0,617
34	7526550	703650	SAB	171,47	161,49	9,98	17,01	-
35	7527350	688250	SAB	25,00	15,00	10,00	0,00	-
36	7527600	700250	SAB	46,00	40,00	6,00	0,80	0,133
37	7527600	694020	SAB	64,00	48,50	15,50	0,50	0,032
38	7528010	696370	SAB	81,50	37,33	44,17	4,50	0,102
39	7528260	699310	SAB	89,00	54,00	35,00	4,40	0,126
40	7528600	702340	SAB	51,00	21,00	30,00	4,90	0,163
41	7529350	700750	SAB	76,00	34,00	42,00	15,00	0,357
42	7529468	703768	SAB	44,50	20,10	24,40	2,00	0,082
43	7529720	708050	SAB	110,00	40,00	70,00	20,00	0,286
44	7529770	696030	SAB	30,50	18,12	12,30	1,00	0,081
45	7529780	691860	SAB	0,00	27,30	-	0,00	-
46	7529890	705190	SAB	30,00	16,00	14,00	1,50	0,107
47	7529950	697950	SAB	46,00	23,50	22,50	0,50	0,022
48	7529990	698950	SAB	0,00	28,00	-	0,00	-
49	7530320	686840	SAB	72,00	58,00	14,00	4,80	0,343

5.2. Topografia e Potenciometria do SAB

O mapa topográfico (Figura 7) obtido a partir da base de dados do Projeto C3 fornecida, em conjunto com o mapa de drenagens, permite identificar a geomorfologia da área marcada por colinas e vales. Na área, as cotas variam de 515 a 615 metros

de altitude, sendo as altitudes mais baixas relacionadas aos vales das drenagens e rios principais.

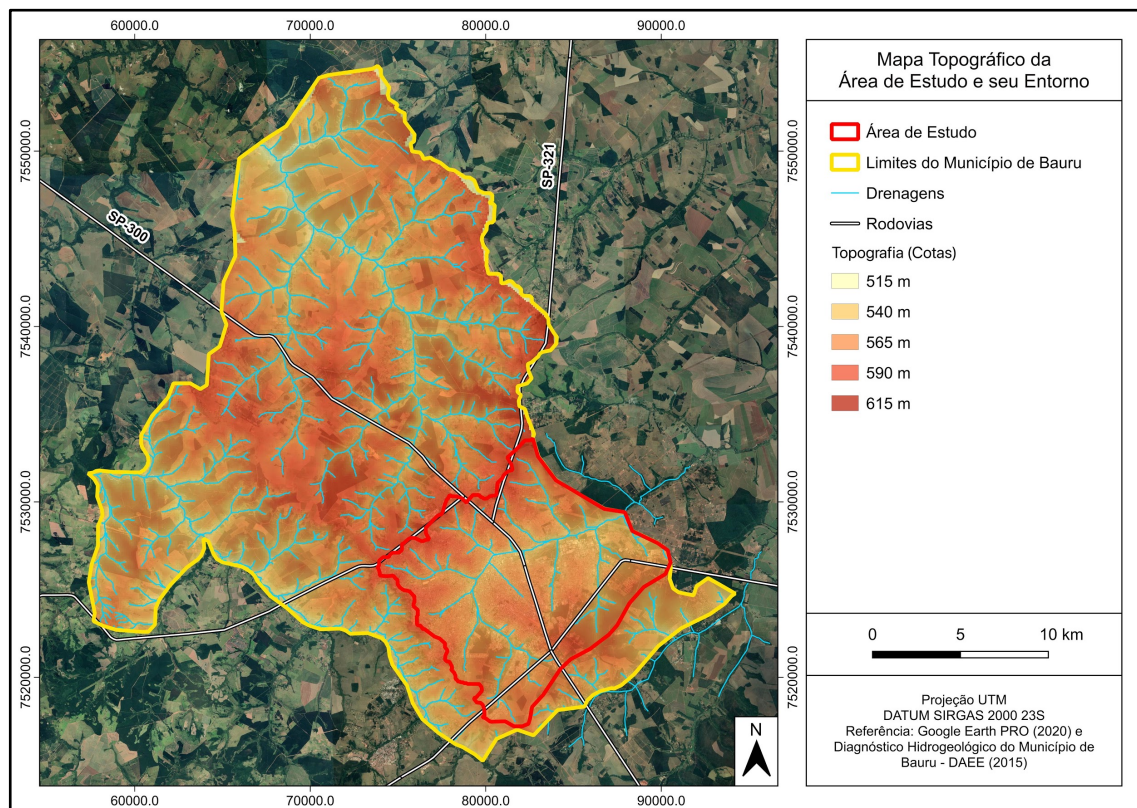


Figura 7. Topografia do município de Bauru.

O ajuste das linhas equipotenciais do SAB obtidas pelos dados do Projeto C3, baseado no mapa topográfico e no padrão hidrográfico, contribui para o entendimento do comportamento das descargas do aquífero e permite visualizar os fluxos da água subterrânea na área de estudo (Figura 8).

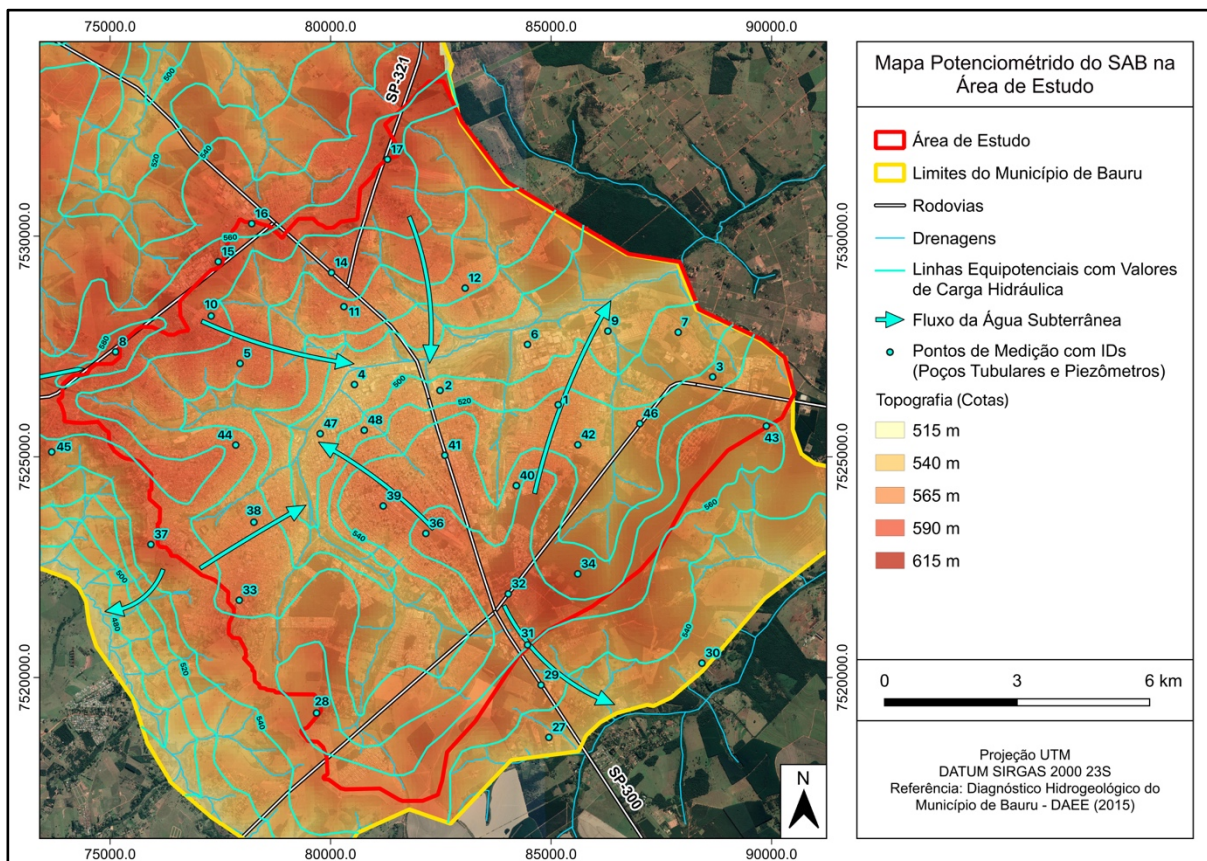


Figura 8. Potenciometria do Sistema Aquífero Bauru na área urbana de Bauru.

De forma geral, os fluxos de água subterrânea vão das cotas topográficas mais altas, coincidentes com os divisores de drenagem de água superficial, para o centro, junto ao Rio Bauru e seus afluentes, onde predominam as descargas do aquífero na área. Nota-se que os locais topograficamente mais elevados, como nas cristas de colinas, foram interpretados também como divisores de água subterrânea.

5.3. Seções

A partir dos resultados combinados das etapas de geoprocessamento e tratamento dos dados litológicos dos poços tubulares, seis seções hidrogeológicas foram construídas (Figura 9) permitindo ver a distribuição das seguintes unidades: o SAB, SAG e o Aquífero Serra Geral (Figura 10 a 15). Na base do SAB ocorre a Formação Araçatuba, mas que devido a sua pouca espessura (ou não atenção na descrição litológica durante a perfuração), não foi representada nas seções. Esta unidade funciona como um aquitarde que separa o SAB e o SAG.

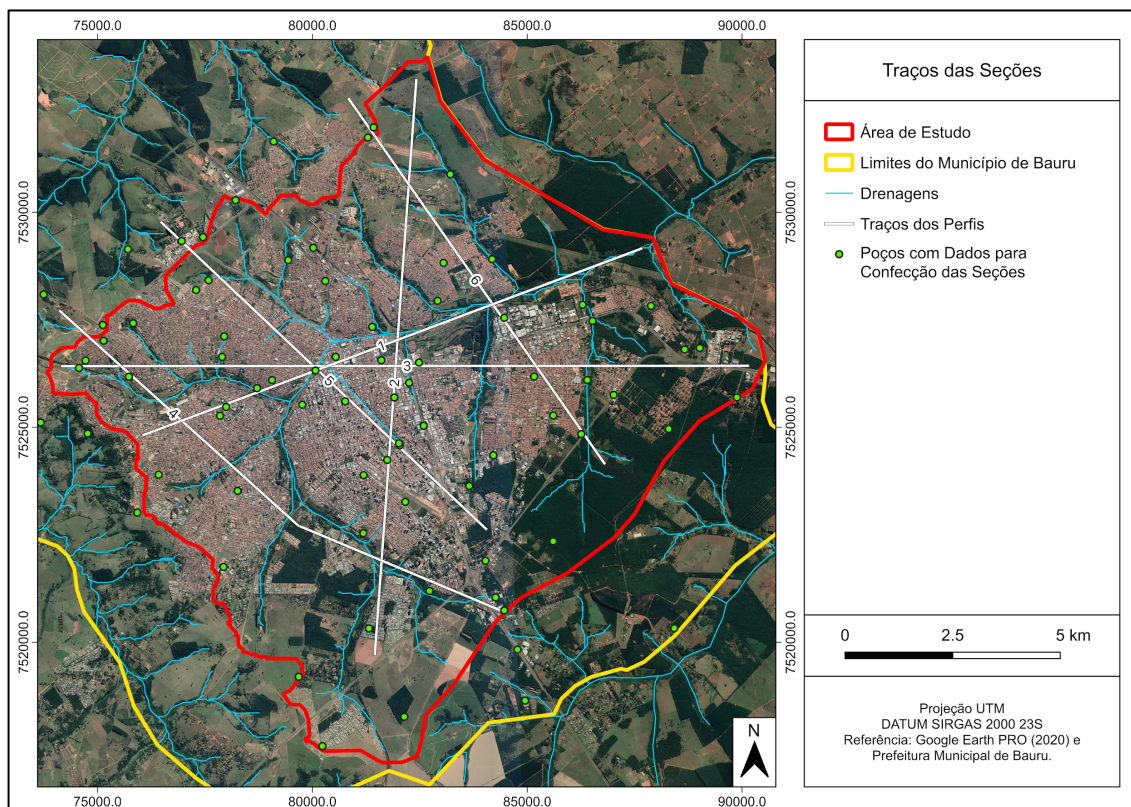


Figura 9. Traço e numeração das seções construídas.

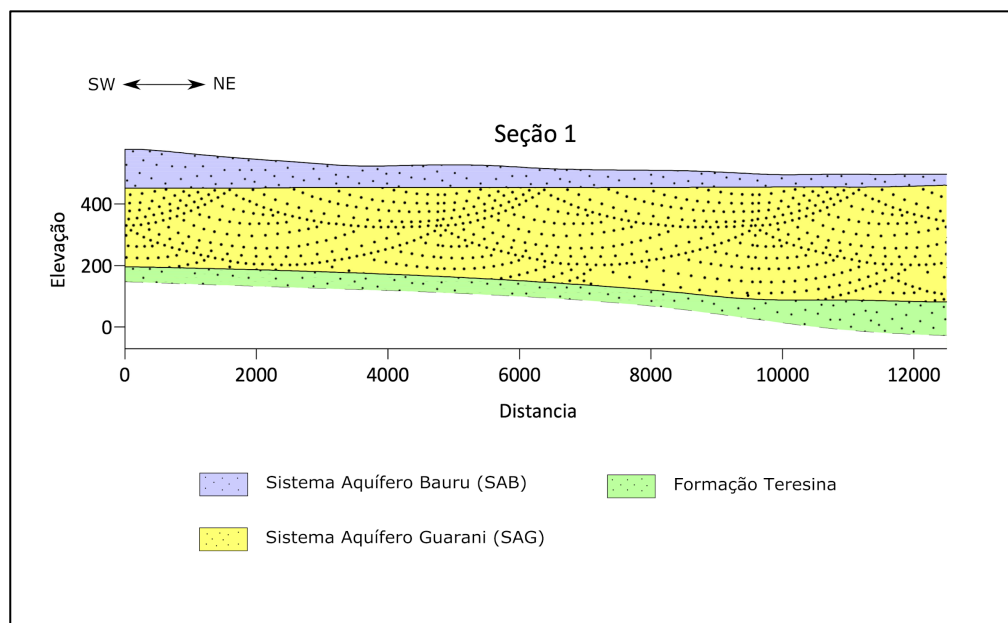


Figura 10. Seção litoestratigráfica 1, com dados de cota e geometria do substrato geológico.

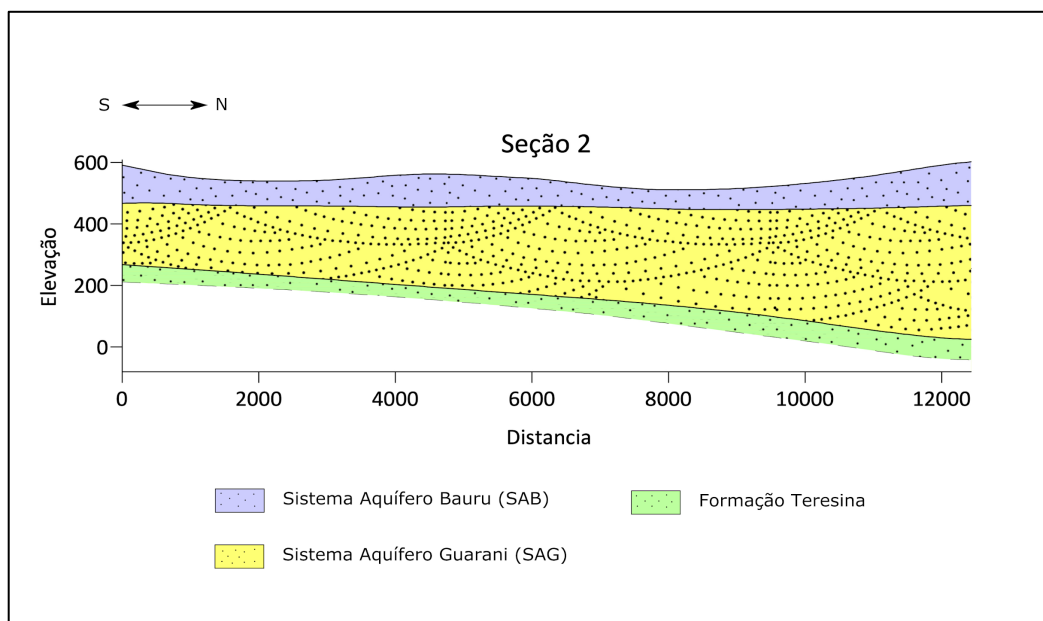


Figura 11. Seção litoestratigráfica 2, com dados de cota e geometria do substrato geológico.

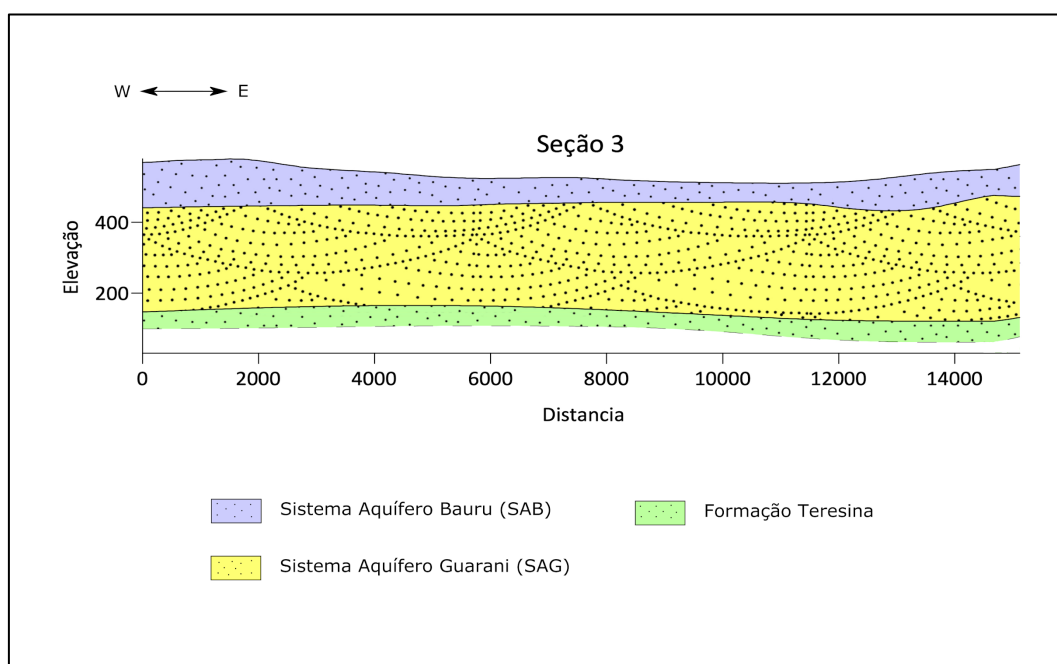


Figura 12. Seção litoestratigráfica 3, com dados de cota e geometria do substrato geológico.

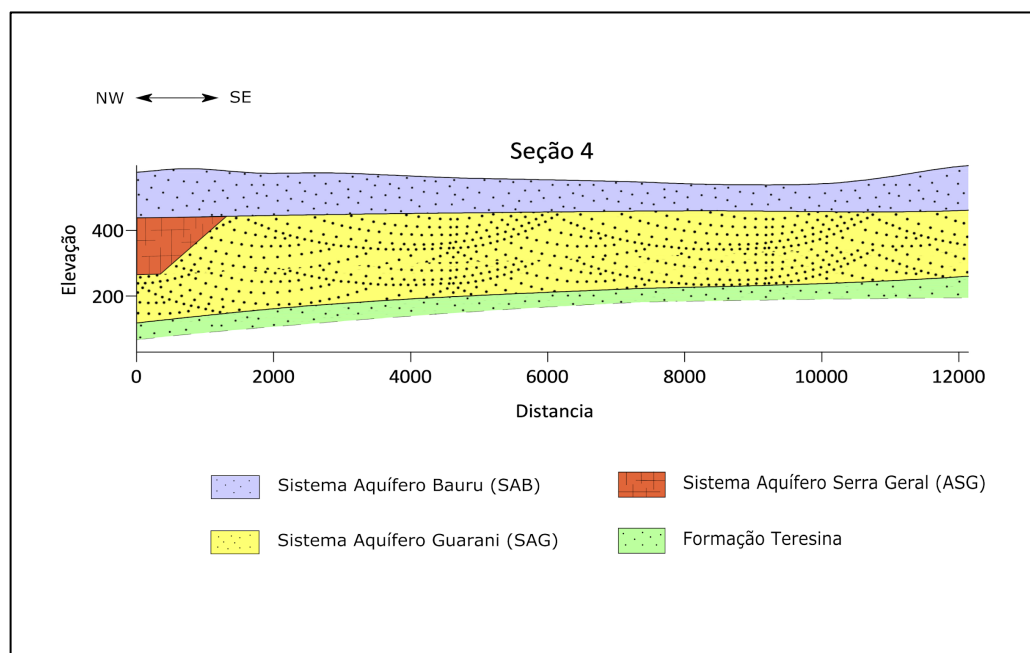


Figura 13. Seção litoestratigráfica 4, com dados de cota e geometria do substrato geológico.

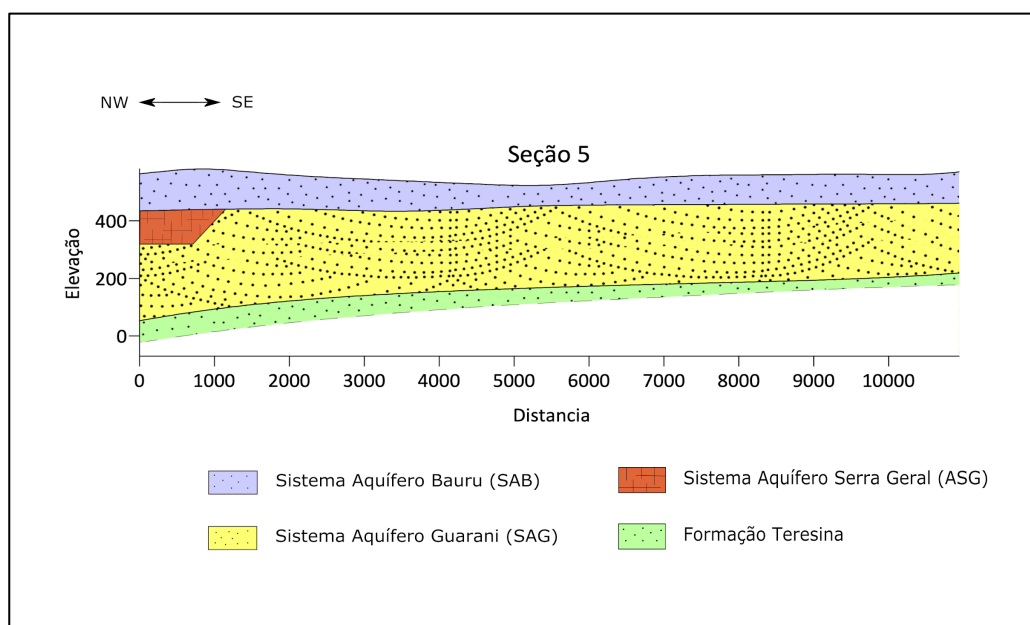


Figura 14. Seção litoestratigráfica 5, com dados de cota e geometria do substrato geológico.

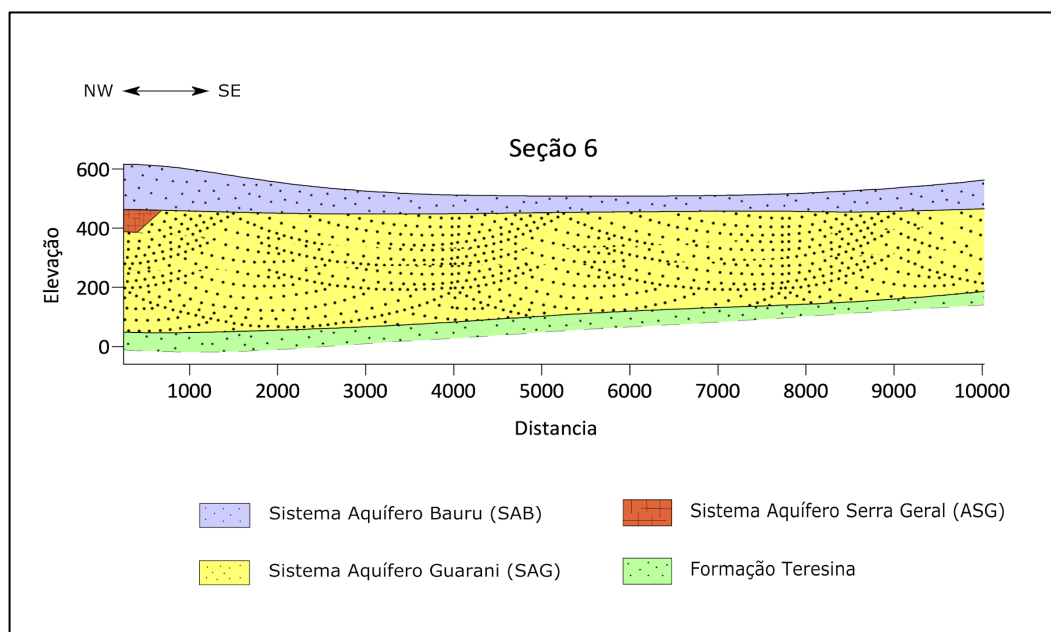


Figura 15. Seção litoestratigráfica 6, com dados de cota e geometria do substrato geológico.

As seções hidrogeológicas permitem entender a geometria das unidades e estabelecer a base do Sistema Aquífero Bauru na Formação Araçatuba. O método de interpolação por krigagem utilizado para a modelagem das superfícies foi escolhido por sua facilidade e rapidez na execução, além de ao final ter gerado produtos, que por similaridade visual, se assemelham ao observado em seções construídas através de outros métodos e foram consideradas suficientes para a finalidade do projeto.

Conforme análises, o SAB apresenta espessuras variando de 100 a 200 m, com seu ponto de maior adelgaçamento a nordeste junto ao Rio Bauru. A nordeste da área de estudo também um espessamento do SAG, que por sua vez apresenta espessuras variando de 300 a 400 m. O Sistema Aquífero Serra Geral é observado somente nas extremidades a noroeste das seções 4, 5 e 6. Dessa forma, o SAB está diretamente sobreposto ao SAG, quase que na totalidade da área da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Bauru.

5.4. Mapa de Capacidade Específica

As isolinhas de capacidade específica (Q/s), obtidas pela interpolação dos dados hidráulicos dos poços do SAB e ajustadas no *software* QGIS está representada na Figura 16, permite identificar melhores produções dos poços nos extremos da área de estudos

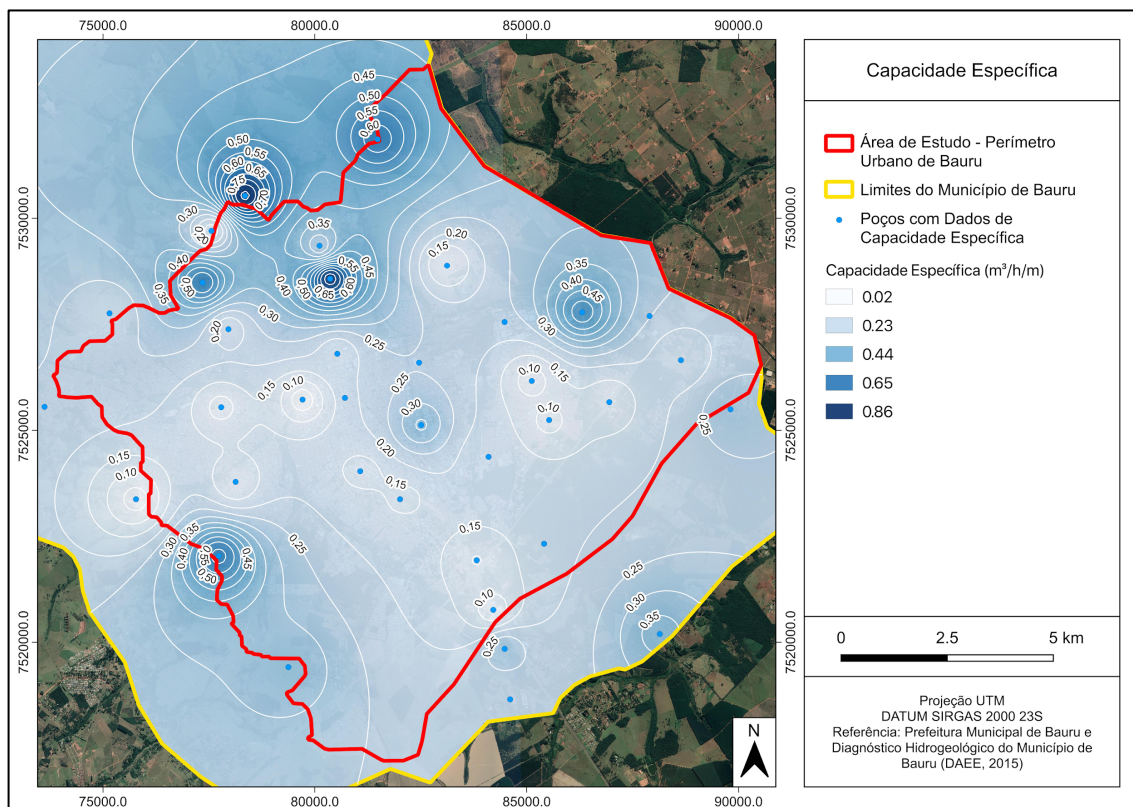


Figura 16. Distribuição dos valores de capacidade específica na área de estudo.

A Formação Marília na área de estudo é formada por sequências sedimentares com cimentação carbonática, apresenta uma permeabilidade relativamente baixa, e está alocada acima do nível d'água. Apesar da possibilidade de haver aquíferos suspensos na formação, os poços avaliados extraem água majoritariamente da Formação Adamantina, de melhor permeabilidade e disponibilidade hídrica.

No entorno da zona urbana de Bauru, a noroeste e a sudoeste da área de estudo, nota-se locais com maiores valores de capacidade específica, geralmente coincidentes com os locais topograficamente mais elevados. Nas porções centrais e topograficamente menos elevadas da área de estudo, onde há a maior concentração urbana populacional e os poços de captação estão majoritariamente alocados, há diminuição dos valores de capacidade específica.

Apesar de toda a extração da água ser feita da mesma unidade geológica, a Formação Adamantina, o comportamento observado da distribuição das zonas de maior capacidade específica poderia ser explicado por um rebaixamento do nível d'água causado por interferência entre os poços concentrados na zona urbana.

A avaliação e medição dos valores de vazão e nível d'água dos poços, bem como suas perfurações e instalações, foram feitas por empresas distintas, com diferentes métodos de trabalho e equipamentos utilizados. Tais fatores, podem interferir na precisão dos dados cadastrados, mas não prejudicam o andamento deste trabalho.

5.5. Uso e Ocupação do Solo

A avaliação das recargas do SAB é função do uso e ocupação do terreno. Assim, tal mapa (Figura 17) norteou a estimativa de recarga deste aquífero.

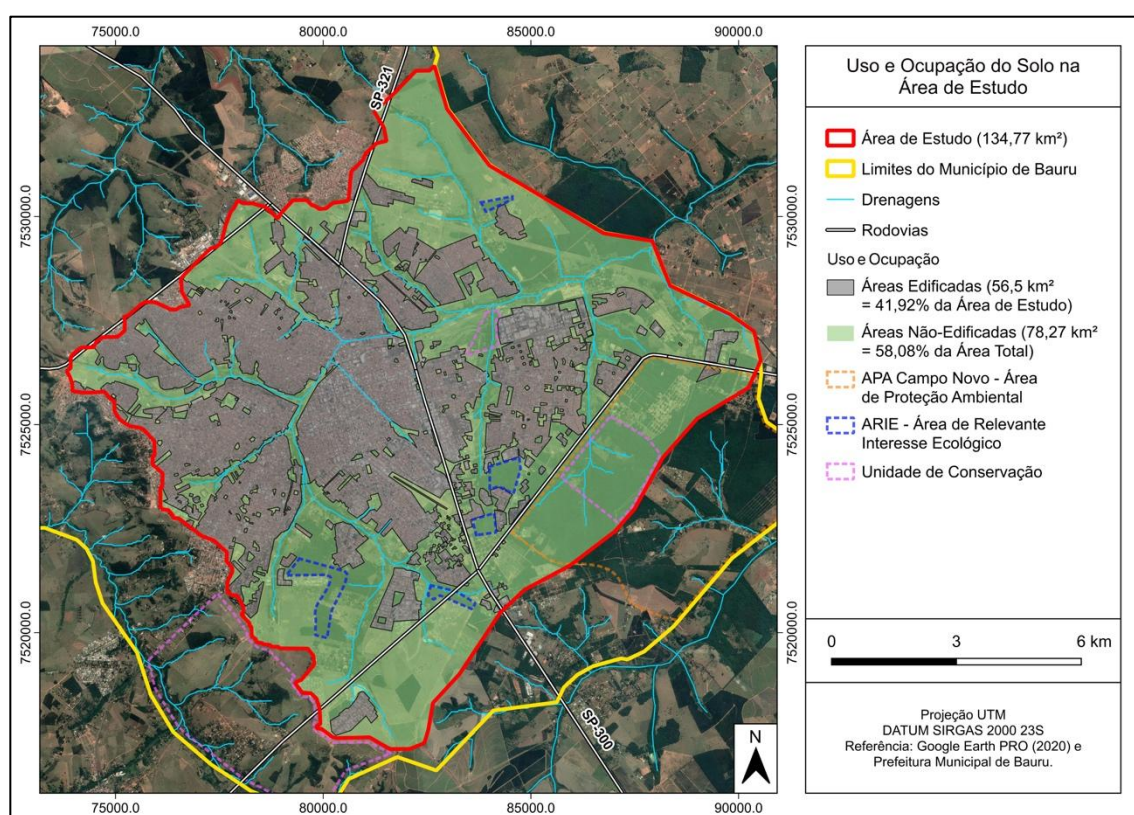


Figura 17. Uso e ocupação do solo na área de estudo.

A estimativa das áreas construídas (não permeáveis) e as não-construídas (permeáveis) foram determinadas com o *software* QGIS. As áreas não-edificadas estão concentradas na periferia da cidade e junto ao Rio Bauru, seus afluentes e junto às zonas de preservação ambiental, totalizando 58,08% da área total de estudo.

A norte e a sudeste da área urbana, conforme verificado na Figura 17, há duas maiores regiões não-edificadas, com solo permeável onde predomina a recarga direta

pela infiltração no solo. No restante da área de estudo, entretanto, apesar da porcentagem de áreas edificadas ser relativamente menor que a das áreas não-edificadas, a recarga do SAB será consideravelmente afetada pela parcela de água que não poderá infiltrar e terminará por escoar superficialmente.

5.6. Balanço Hídrico

Considerando-se uma recarga natural média de 286,2 mm/ano (Carolina Santos et al., no prelo) para áreas não-urbanizadas (78,27 km²), tem-se que a vazão total infiltrada seja de 22,4 Mm³/ano (1). Nas porções urbanizadas, correspondentes a 56,50 km² da área de estudo, a recarga natural calculada em torno de 72 mm/ano levou a estimar um volume médio de recarga de 4,1 Mm³/ano (2) na área urbana. A recarga natural total estimada para o aquífero, portanto, é de 26,5 Mm³/ano (1+2).

Além disso, nas proximidades do centro urbano de Bauru o volume perdido pela rede de abastecimento pública contribui para a recarga do aquífero com 28,1 Mm³/ano (3), enquanto as perdas da rede de esgoto são 90% menores, com valores em torno de 2,8 Mm³/ano (4). A recarga antrópica total estimada para o aquífero, portanto, é de 30,9 M m³/ano (3+4).

Somando-se tais valores enumerados acima de 1 a 4, tem-se uma recarga estimada total para a área de estudo, por meio naturais e não-naturais, de aproximadamente 57,4 Mm³/ano (5).

A partir dos parâmetros hidráulicos analisados bibliograficamente e dos dados obtidos pelos mapas gerados, para o cálculo de descarga a partir da Lei de Darcy foram utilizadas as duas linhas equipotenciais mais próximas do Rio Bauru (chegar Figura 8), cuja diferença de carga hidráulica é de 20 m (**h**) e média de distância entre si de 425 m (**L**). A condutividade hidráulica da Formação Adamantina, por onde ocorrerá majoritariamente a descarga, possui valores médios de 0,6 m/dia (**K**). Contornando a zona de descargas principal, foi traçada uma seção paralela à linha equipotencial mais próxima do Rio Bauru, com uma extensão total de 25,5 km e espessura correspondente à do aquífero saturado a montante, em torno de 150 m. Assim, com base nesses dois valores calculou-se a área da seção **A**, por onde o fluxo de água passa.

Dessa forma, estimou-se para a área de estudo uma descarga do aquífero no Rio Bauru em torno de 108.000 m³/dia, o equivalente a 39,4 Mm³/ano (6). Sabe-se também que o volume total de água explotada do SAB é de 17,5 Mm³/ano (7).

As saídas de água do sistema, 56,9 Mm³/ano (6+7), subtraídas da entrada de água no sistema (5), resultam num volume de 0,5 Mm³/ano. O resultado do balanço hídrico calculado é uma estimativa da quantidade de água que é acrescentada ao sistema.

Em análises anuais do balanço hídrico poderiam ser observadas oscilações entre ocasiões onde há sobra (como neste projeto) ou falta de água no sistema. Entretanto, à longo prazo, o resultante culminará em um dos dois casos, acarretando em déficit (superexplotação) ou excesso (elevação do nível d'água e nível de base dos rios) hídrico no aquífero.

5.7. Bloco Diagrama

A última etapa do projeto configurou a construção do bloco diagrama (Figura 18) para a representação gráfica das interpretações dos resultados obtidos. O produto favorece a visualização das características geométricas, geológicas, locais de recarga, descarga e caminhos da água subterrânea na área da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru.

Uma avaliação do modelo tridimensional em conjunto com os mapas e seções gerados é ideal para o conhecimento dos locais de maior espessura e produtividade, bem como para uma correta interpretação final.

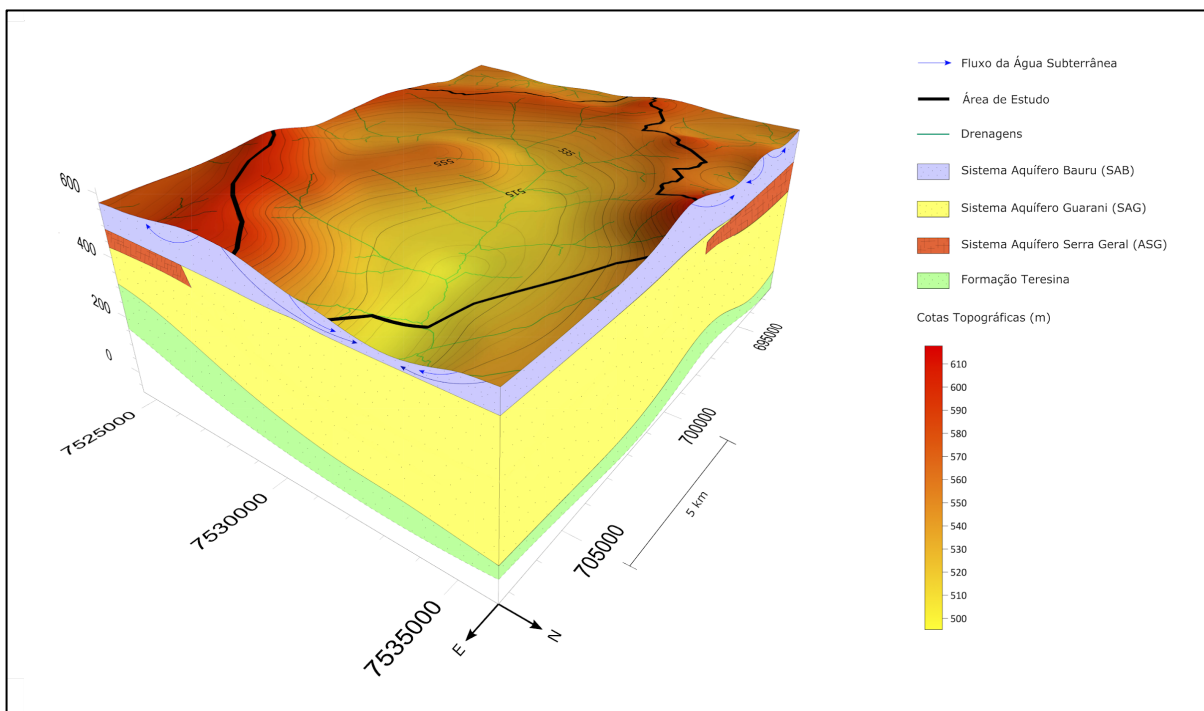


Figura 18. Bloco diagrama representativo da área de estudo, com dados topográficos, evidenciando os principais fluxos de água subterrânea e a geometria do substrato geológico.

5.8. Alterações no Projeto

O trabalho inicialmente proposto contava com etapas de campo para a aquisição de dados dos poços públicos e privados junto à Prefeitura Municipal de Bauru. Entretanto, devido à pandemia, tais atividades foram canceladas, e os dados foram obtidos através de acesso ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Da mesma forma, em contato com o coordenador do Projeto C3, este disponibilizou a base de dados do projeto.

Além disso, inicialmente esperava-se a execução própria dos cálculos de recarga para a área de estudo, entretanto por questões de tempo, foi necessário simplificar tal etapa, e adotaram-se os valores de recarga disponíveis e pré-calculados no Projeto C3. A pandemia causou o atraso da confecção das seções, modelo tridimensional e dos cálculos de recarga; mas tais problemas foram contornados sem que houvesse comprometimento à consecução final do projeto.

6. CONCLUSÕES

O modelo conceitual tridimensional engloba as informações obtidas ao longo dos trabalhos que caracterizaram a recarga, descarga e os caminhos percorridos pela água na Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru. Abaixo são apresentadas as conclusões obtidas nos trabalhos descritos:

- O Sistema Aquífero Bauru se comporta como uma camada sub-horizontal com variação de espessura de 100 a 200 m acompanhando a topografia em superfície. Suas menores espessuras são observadas nos locais de maior intemperismo em superfície, nesse caso relacionados aos cursos hidrográficos. O ponto maior adelgaçamento do SAB na área de estudo está a nordeste da área de estudo, junto ao Rio Bauru. A espessura do Sistema Aquífero Guarani, alocado em subsuperfície, varia de 300 a 400 m, com aumento expressivo a nordeste da área de estudo. Esse sistema aquífero está diretamente subposto ao SAB em grande parte da Sub-bacia Hidrográfica do Rio Bauru, em virtude da “janela” dos basaltos da Formação Serra Geral conferida nas seções e no modelo tridimensional. Apesar de estarem diretamente sobrepostos na área de estudo, não há conectividade hidráulica entre o SAB e o SAG, uma vez que são separados pelos sedimentos pelíticos da Formação Araçatuba, de 20 m de espessura e baixíssima permeabilidade. Seu funcionamento como uma barreira hidráulica é atestado por análises laboratoriais de amostras de água subterrânea dos dois sistemas aquíferos, que revelam traços hidrogeoquímicos e isotópicos claramente distintos.
- A Sub-bacia do Rio Bauru é delimitada por altos topográficos, os quais se comportam como divisores de drenagens e dos fluxos de água subterrânea. O mapa potenciométrico do SAB revela que a água subterrânea flui dessas regiões topograficamente mais elevadas (onde infiltra como recarga) em direção ao Rio Bauru e seus afluentes, em cujas margens predomina a descarga do aquífero. Vale ressaltar que parte da água que infiltra nos altos topográficos também pode fluir para as outras sub-bacias vizinhas. As áreas não-edificadas, onde o solo é permeável, concentradas a norte e a sudeste da área mais urbanizada junto às cabeceiras dos afluentes do Rio Bauru e às zonas de preservação ambiental, representam 58,08% da área total de estudo.

As áreas edificadas, onde não há infiltração, representam 41,92%. Tal fator influencia diretamente nos valores de recarga, pois afeta o escoamento superficial e a evapotranspiração na equação proposta. Apesar da alta taxa de impermeabilização do solo, os maiores valores de recarga na área de estudo ainda estão associados à porção mais urbanizada e edificada, uma vez que recebem fortes contribuições das perdas do sistema de abastecimento público de água e da rede de esgoto operados pelo DAEE-Bauru. Os melhores valores de produtividade e capacidade específica dos poços (reflexos de melhores permeabilidades do substrato) foram observados a noroeste e sudoeste, podendo tal ocorrência estar relacionada a um rebaixamento no nível d'água causado pela interferência entre os poços em sua porção central mais urbanizada.

- A recarga natural total estimada para o aquífero é da ordem de 26,5 Mm³/ano, que somam 57,4 Mm³/ano com as recargas advindas das fugas da rede de água e esgoto. As saídas de água do aquífero englobam suas explorações e descargas no Rio Bauru, totalizando 56,9 Mm³/ano, que subtraídos da entrada de água no sistema resultam num volume estimado de água que fica conservada no sistema de 0,5 Mm³/ano. O balanço hídrico do SAB encontra um cenário confortável e seguro, onde a exploração representa um valor inferior à disponibilidade hídrica do aquífero e, apesar de uma possível interferência entre seus poços levar a uma menor produtividade na porção mais central da área de estudo, não configura ameaça de superexploração e comprometimento do abastecimento hídrico neste cenário, uma vez que por si só a recarga urbana já ultrapassa com ampla margem o volume total captado pelos poços. Reforçando a segurança, grande parte do abastecimento da cidade também provém também de captações do SAG, de captações superficiais, e das captações do SAB em porções marginais da área de estudo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida F., Salviano G. **Diagnóstico de processos erosivos lineares associados a eventos pluviosos no município de Bauru, SP**. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000.
- Camargo, A.P. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Bragantia, Campinas, v.21, p.163-203, 1962.
- Campos, A.F. de; Rostirolla, S.P.; Bartoszeck, M.K.; Romeiro, M.A.T.; Ferreira, F.J. F.; Chang, H.K. **Correlação de dados sísmicos multiescala e integração com arcabouço tectônico regional: exemplo da área do Domo de Piratininga, SP**. Revista Brasileira de Geologia, 38 (2), 18-28. 2008.
- Canato, H.M. **Hidrogeoquímica do Aquífero Adamantina na área urbana do município de Bauru/SP**. Tese (Mestrado). Bauru: Engenharia Civil e Ambiental, UNESP. 2014.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Mapa da Hidrografia Conforme Decreto 10.755/77 – UGRHI 13**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP**. Relatório Final C3 – Planejamento Consultoria e Projeto Ltda. Volume 1 – Texto. Tomo I e Tomo II. São Paulo, 2015.
- Departamento de Água e Esgoto de Bauru – DAE. **Abastecimento**. Disponível em: <http://www.daebauru.sp.gov.br/>.
- De Vries, J.J. & Simmers, I. **Groundwater recharge: an overview of processes and challenges**. Hydrogeology Journal, 10(1), 5-17. 2002.
- Fetter, C.W. **Applied Hydrogeology**. 3rd Edition, Macmillan College Publishing Company, New York. 1994.

- Foster, S., Lawrence, A., Morris, B. **Groundwater in urban development – Assessing management needs and formulating policy strategies**. World Bank Technical Paper. 74 p. 1998.
- Haase, D. **Effects of urbanisation on the water balance - A long-term trajectory**. Environmental Impact Assessment Review. 29:211-219. 2009.
- Hornero, J.; Manzano, M.; Ortega, L.; Custodio, E. **Integrating soil water and tracer balances, numerical modelling and GIS tools to estimate regional groundwater recharge: Application to the Alcadozo Aquifer System (SE Spain)**. Science of The Total Environment, 568, 415-432. 2016.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Panorama dos Municípios Brasileiros**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/bauru>.
- Lerner, D.N. (2002). **Identifying and quantifying urban recharge: a review**. Hydrogeology Journal 10:143-152.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. & Simmers, I. **Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge (International Contributions to Hydrogeology)**. Hannover: Verlag Heinz Heise. 1990.
- Lousada, E.O.; Campos, J. E. **Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal**. Revista Brasileira de Geociências, 35(3):407-414, setembro de 2005.
- Paula e Silva, F.; Chang, H.; Caetano, M. R. **Estratigrafia de Subsuperfície do Grupo Bauru no Estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Geociências, 35(1):77-88, março de 2005.
- Prefeitura Municipal de Bauru – **Diagnóstico Ambiental e dos Recursos Hídricos do município de Bauru – SP**. 2008.
- Prefeitura Municipal de Bauru – **Plano Municipal de Saneamento Básico – Produto 3 - Diagnóstico Técnico-Participativo dos Serviços de Saneamento Básico**. Tomo I – Caracterização Municipal. Bauru, agosto de 2016.
- Prefeitura Municipal de Bauru – **Plano Municipal de Saneamento Básico - Volume 1**. Bauru, abril de 2017.

Prefeitura Municipal de Bauru – **Plano Municipal de Saneamento Básico - Volume 2**. Bauru, abril de 2017.

Rosen L. & Legran H.E. **Systematic makings of early stage hydrogeologic conceptual models**. Groundwater; 38:887-893. 2000.

Rosenberg, M.; Varnier, C.; Viotti, M.; Oda, G.V.; Iritani, M.A. **Vulnerabilidade Natural à Contaminação do Sistema Aquífero Bauru na Área Urbana do Município de Bauru (SP)**. Revista do Instituto Geológico, 34(2), 51-67. São Paulo, 2013.

Santos, C.F.; Hirata, R.; Marcellini, S.S.; Barbat, D. **Surface and groundwater relationship on an anthropically modified area**. Anais da Academia Brasileira de Ciências. São Paulo, 2020.

Soares, P.C.; Landim, P.M.B.; Fulfaro, V.J.; Sobreiro Neto, A.F. **Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru**. Revista Brasileira de Geociências, 10(3), 177-185. 1980.

Tavano, T.; Fernando, E. **Industrialização de Bauru - A atividade industrial e o espaço geográfico, das origens à situação atual**. Dissertação de mestrado - Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2009.

Thornthwaite, C.W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geographical review, 38(1), 55-94. 1948.

Thornthwaite, C.W.; Mather, Jr. **The Water Balance**. Nova Jersey: Drexel Institute of Technology. 1955.

Varnier, C.; Iritani, M.A.; Viotti, M.; Oda, G.H.; Ferreira, L.M.R. **Nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP)**. Revista do Instituto Geológico, 31(1/2), 1-21. 2010.

Wahnfried, I.; Hirata, R. **Comparação dos métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na bacia hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo)**. Revista Brasileira dos Recursos Hídricos, 10 (1), 15-25. 2005.

Yang Y., Lerner D.N., Barrett M.H., Tellam J.M. **Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK**. Environmental Geology 38(3): 183-198. 1999.