

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Trabalho de Formatura 23/41

LITO-HIDROESTRATIGRAFIA DA ÁREA URBANA DE BAURU (SP)

LÍVIA DE ALMEIDA FREITAS

Monografia apresentada para a disciplina 0440500
- Trabalho de Formatura (2023) sob orientação de:

REGINALDO ANTONIO BERTOLO (orientador)

Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas
(CEPAS|USP) - Instituto de Geociências (IGc -
USP)

CLAUDIA LUCIANA VARNIER (coorientadora)

Instituto de Pesquisas Ambientais (IPA/SEMIL)

São Paulo

2024

AGRADECIMENTOS

Ao longo desses cinco anos de curso, gostaria de agradecer a todas as pessoas que estiveram comigo e que contribuíram de alguma forma para a realização deste Trabalho de Formatura.

Primeiramente, sou muito grata aos meus familiares. À minha mãe (Jouce Gabriela de Almeida) por todo amor e por sempre acreditar em mim, ao meu pai (Fernando Camargo Freitas) por todo amor e especialmente pela introdução ao mundo geológico. Sou grata também ao meu irmão (Gabriel), às minhas avós (Neuza e Nair), e ao meu avô (Edmur), que nos deixou em 2023. À Nininha por cuidar de mim da melhor forma.

Ao meu orientador, Reginaldo Bertolo, pela oportunidade, apoio, ensinamentos e conselhos durante toda essa jornada.

À minha coorientadora, Claudia Varnier, pela parceria, dedicação e assistência. Obrigada por acreditar em mim, serei eternamente grata a tudo realizado.

À Fernanda Souto, pelos momentos de coorientação, dando todo o apoio necessário para o desenvolvimento do projeto, especialmente no que se refere à modelagem geológica implícita.

Ao Carlos Gil, pela inestimável ajuda nos últimos quatro meses de desenvolvimento desta monografia. Mesmo do Canadá, me deu suporte durante todo o período, sempre respondendo minhas dúvidas (que não foram poucas), dando sugestões, ideias, resolvendo muitos problemas e me acalmando racionalmente, quando necessário.

Ao engenheiro Fernando Conte e ao geólogo Rafael Moraes, ambos da Hydrolog - Serviços de Perfilagem, por todos os valiosos ensinamentos sobre interpretação de perfilagens geofísicas.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento desta pesquisa, por meio dos processos nºs. 2020/15434-0 e 2023/00849-8.

A toda equipe do SACRE, especialmente aos que me acompanharam durante a etapa de campo: Mari Bernardino, Pinhatti, Paulinho e Samuca; assim como o funcionário do IPA/SEMIL, Gilberto Sanchez.

Aos funcionários do IGc-USP, Zé Carlos, Wagner e Bira, especialmente pela parceria, como também aos professores: Paulo César Boggiani, Valdecir Janasi, André Sawakuchi, André Negrão e Ricardo Hirata, pelos ensinamentos.

A todos os meus amigos que tornaram esses cinco anos de curso muito mais agradáveis, Léo (Sheila), Emili (Bongo), Caroline Rodrigues, Lara (Vampira), Lorena (Bauduco), Laila (Pistola), Maria (Laika), Fabrício (Biro), Suellen (Ligeirinho), Tamires, Catarina (Ypióca), Giorgio (Temtrauma) e Vanessa (Broder).

Aos meus amigos de longa data, da época do ensino fundamental, na Escola Vital Brazil: Teresa, Júlia, Marina, Bruna, Gustavo, Grazi, Giulia e Mafe.

Por fim, ao Thiago Ávila, imensamente, que, além de ser meu amor e completar meus dias com muita alegria e carinho, me ajudou durante todo o processo de redação desta monografia, com as revisões ortográficas e elaboração de figuras.

RESUMO

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) representa a principal fonte de abastecimento privado de água subterrânea no município homônimo, constituído pelas Formações Marília, Adamantina e Araçatuba. Uma das questões em aberto refere-se à distribuição e ao comportamento dos contaminantes na água subterrânea, condição que está diretamente ligada ao arcabouço litoestratigráfico, à composição química, granulometria e geometria desse sistema aquífero. Assim, é necessária uma melhor compreensão sobre a geologia local para a elaboração de um modelo conceitual representativo que auxilie na tomada de decisão em situações de áreas contaminadas. Nesse sentido, este Trabalho de Formatura (TF) teve como objetivo uma análise detalhada da litoestratigrafia do Grupo Bauru em subsuperfície, em uma porção da área urbana da cidade, avaliando a distribuição espacial e em profundidade dessa unidade geológica. Essa análise foi realizada por meio de (i) reinterpretação de perfilagens geofísicas de 42 poços cadastrados, (ii) elaboração de três seções geológicas, (iii) execução de furo de sondagem com coleta de testemunhos, e (iv) modelagem geológica tridimensional implícita com o auxílio do programa Leapfrog Works®. O Grupo Bauru na área de estudo é mais espesso em direção à região central de Bauru atingindo valores de até 228 m. A análise integrada dos dados de perfilagem geofísica, seções geológicas e do modelo geológico tridimensional permitiu a caracterização, identificação e mapeamento em subsuperfície das formações que constituem essa unidade, desde o topo até a base: Marília, Adamantina e Araçatuba. A Formação Marília tem espessura que varia de 22 a 150 m e está assentada, em contato gradacional, sobre a Formação Adamantina, em um ambiente deposicional do tipo leque aluvial. Já a Formação Adamantina possui espessura entre 14 e 102 m e, em algumas porções da cidade de Bauru, está assentada sobre os depósitos da Formação Araçatuba ou do Grupo São Bento, por meio de contato, desde abrupto a gradacional, provavelmente em paleoambientes caracterizados por sistemas fluviais meandrantes, com variações de energia. A ocorrência da Formação Araçatuba na cidade, mesmo que restrita e de menor espessura (entre 5 e 25 m) comparada às outras, é fundamental pois atua como uma barreira hidráulica entre o SAB e o Sistema Aquífero Guarani (SAG). Os resultados deste estudo revelaram que o uso combinado de diferentes ferramentas foi crucial para o avanço do conhecimento sobre a geometria do Grupo Bauru (e, por conseguinte, do SAB) em subsuperfície na área de estudo, podendo ser replicado em outras regiões e, futuramente, auxiliar na elaboração de modelos numéricos de fluxo e transporte reativo de contaminantes.

ABSTRACT

The Bauru Aquifer System (BAS) comprises the main source of private groundwater supply in the homonymous municipality, consisting of the Marília, Adamantina and Araçatuba formations. Another issue has arisen groundwater contamination, which is directly related to the lithostratigraphic framework, chemical composition, grain size, and geometry of this aquifer system. Therefore, a better understanding of local geology is needed to develop a representative conceptual model that will assist in decision-making in situations involving contaminated areas. The purpose of this Undergraduate Thesis (TF) was to conduct a detailed investigation of the Bauru Group lithostratigraphy in the subsurface in a portion of the urban area of Bauru to evaluate the spatial and in-depth distribution of this geological unit. The following procedures were employed for this investigation: (i) reinterpretation of geophysical logs from 42 registered wells; (ii) preparation of three geological sections; (iii) drilling of a borehole with core collection; and (iv) implicit three-dimensional geological modeling using the Leapfrog Works® software. The Bauru Group in the study area is thicker towards the central region of Bauru, reaching values of up to 228 m. The integrated analysis of geophysical profile data, geological sections, and the three-dimensional geological model allowed the characterization, identification, and subsurface mapping of the formations that comprise this unit, from the top to the bottom: Marília, Adamantina and Araçatuba. The Marília Formation varies in thickness from 22 to 150 m and is deposited, in gradational contact, on the Adamantina Formation in an alluvial fan-type depositional environment. The thickness of the Adamantina Formation is between 14 and 102 m deep and, in some portions of Bauru, overlies the Araçatuba Formation or the São Bento Group, whose contact varied from abrupt to gradational. The paleoenvironment encompasses a meandering fluvial system with energy variations. The presence of the Araçatuba Formation in the study area, despite its limited distribution and smaller thickness (between 5 and 25 m) than the others, is essential since it serves as a hydraulic barrier between the BAS and the Guarani Aquifer System (GAS). The results of this study revealed that the combined use of multiple tools was crucial for advancing the knowledge about the geometry of the Bauru Group (and, therefore, the BAS) in the subsurface in the study area. It could be replicated in other regions in the State of São Paulo, aiding in the elaboration of numerical models of flow and reactive transport of contaminants.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	5
2. OBJETIVOS	6
3. ÁREA DE ESTUDO	6
4. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	7
4.1. Geologia	7
4.1.1. Geologia Regional	7
4.1.2. Geologia Local	12
4.2. Hidrogeologia	13
4.3. Perfilagem geofísica de poços	15
4.3.1. Uso da perfilagem geofísica em estudos sobre a lito-hidroestratigrafia do Grupo Bauru no estado de São Paulo	19
4.4. Modelagem geológica tridimensional	20
5. MATERIAIS E MÉTODOS	22
5.1. Levantamento de informações preexistentes e elaboração de banco de dados	22
5.1.1 Aquisição de perfilagens geofísicas	22
5.2. Elaboração de seções lito-hidroestratigráficas	24
5.3. Seleção da área para realização do furo de sondagem	25
5.4. Furo de sondagem e coleta de testemunhos	27
5.5. Modelagem Geológica Tridimensional Implícita	30
5.5.1. Compilação, preparação e importação dos dados	30
5.5.3. Validação dos dados	31
5.5.4. Geração da superfície topográfica	31
5.5.5. Elaboração do modelo geológico	32
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
6.1. Interpretação das perfilagens geofísicas em poços	33
6.1.1 Caracterização das unidades lito-hidroestratigráficas	34
6.1.2 Caracterização dos ambientes deposicionais	38
6.2 Seções lito-hidrogeológicas da área urbana de Bauru	40
6.3 Estratigrafia do Grupo Bauru na USP - Campus Bauru	43
6.3.1 Descrição dos testemunhos do furo de sondagem	43
6.3.2 Modelo conceitual	45
6.4. Modelo geológico tridimensional implícito	46
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	50
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
9. ANEXOS	55

1. INTRODUÇÃO

Entre 2013 e 2017, uma seca intensa e persistente gerou uma crise no abastecimento de água em 48% dos municípios brasileiros (IBGE, 2018), impondo graves problemas à saúde e à economia do país. Tal situação despertou nos órgãos gestores um crescente interesse pelos recursos hídricos subterrâneos, considerando que eles apresentam, geralmente, água de melhor qualidade e menores custos, se comparados à captação e tratamento das águas superficiais (Montanheiro & Chang, 2016).

O município de Bauru, situado na região central do estado de São Paulo, ainda sofre com a falta de segurança hídrica. Embora exista diversidade de fontes de água, a falta de gerenciamento e investimento, bem como a inexistência de soluções técnicas baratas, têm criado sérias limitações no abastecimento deste importante recurso.

Atualmente, cerca de 35% da população bauruense é abastecida pela captação no rio Batalha (500 L/s) e mais da metade por poços tubulares que extraem água do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e do Sistema Aquífero Bauru (SAB), atendendo a demanda de residências, indústria e comércio (Hirata et al., 2022).

Segundo Silva (2009), o SAB estende-se por todo o município, ocupando uma área de 673 km² e alcança espessura máxima de 200 m nas regiões topograficamente mais elevadas. Esse sistema aquífero também regula a perenidade dos rios que drenam a região, e a sua super exploração pode causar o comprometimento de suas funções ecológicas, tanto na bacia do rio Bauru, onde situa-se a área urbana da cidade, como na do rio Batalha, este último com uma ocupação predominantemente rural e agrícola.

Apesar dos grandes esforços despendidos nas últimas décadas para compreender melhor a geologia do Grupo Bauru e, consequentemente, os aquíferos do SAB, restam ainda algumas incertezas sobre o tema em algumas porções do município. O grau de heterogeneidade do SAB, sobretudo nas porções mais rasas e contaminadas sob centros urbanos, como também a geometria desse sistema aquífero, são questões importantes a serem resolvidas.

Dessa forma, o presente Trabalho de Formatura (TF) busca um detalhamento do arcabouço do SAB, na área urbana de Bauru, sob uma perspectiva litológica, espacial e em profundidade, auxiliando, inclusive, na proposição de um modelo geológico tridimensional implícito. Diante da importância desse sistema aquífero no abastecimento da cidade e de seus inúmeros desafios, espera-se a partir deste estudo um progresso na segurança hídrica do estado de São Paulo, mais especificamente na área estudada.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste Trabalho de Formatura consiste na análise detalhada da lito-hidroestratigrafia do Grupo Bauru em subsuperfície, na área urbana do município homônimo, para melhor compreensão da distribuição espacial e em profundidade desta unidade geológica.

São objetivos específicos:

- Análise de padrões e interpretação das perfilagens geofísicas preexistentes em poços tubulares, visando correlacionar as curvas com a geologia local;
- Caracterização litológica a partir de sondagem executada em área estratégica na cidade; e
- Elaboração de seções geológicas e proposição do modelo geológico tridimensional da área de estudo.

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende o perímetro urbano de Bauru, localizado no centro do estado de São Paulo, a cerca de 330 km da capital. A principal via de acesso ao local é a Rodovia Marechal Rondon (SP-300), que corta todo o município, de norte a sul. Nos limites leste e oeste, por sua vez, o ingresso se dá pela Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros (SP-294), conforme ilustrado na Figura 1.

Bauru possui população total de 381.706 habitantes e uma taxa de urbanização de 98,3% (IBGE, 2022). O município apresenta dimensões de 673,5 km², sendo que 198,7 km² correspondem à área urbana (Bauru, 2017). A cidade está praticamente inserida na bacia do rio Bauru, na Unidade de Gerenciamento de Recurso Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI-13) e uma pequena parcela, na UGRHI-16 (Tietê-Batalha), na bacia do rio Batalha (Figura 1).

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) mostram que 100% da população urbana tem acesso ao abastecimento público de água (Barreto et al., 2023), operado pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE).

Cerca de 35% do abastecimento público de água no município é proveniente da captação no rio Batalha (500 L/s) e o restante é realizado por 40 poços tubulares, que extraem 947 L/s de águas do Sistema Aquífero Guarani (SAG), conforme citado por Hirata et al. (2022). Ainda segundo os autores, Bauru conta com cerca de 600 poços tubulares privados em operação, extraíndo 580 L/s do SAB, atendendo a 29% da demanda hídrica urbana total, especialmente em condomínios, indústrias e comércios.

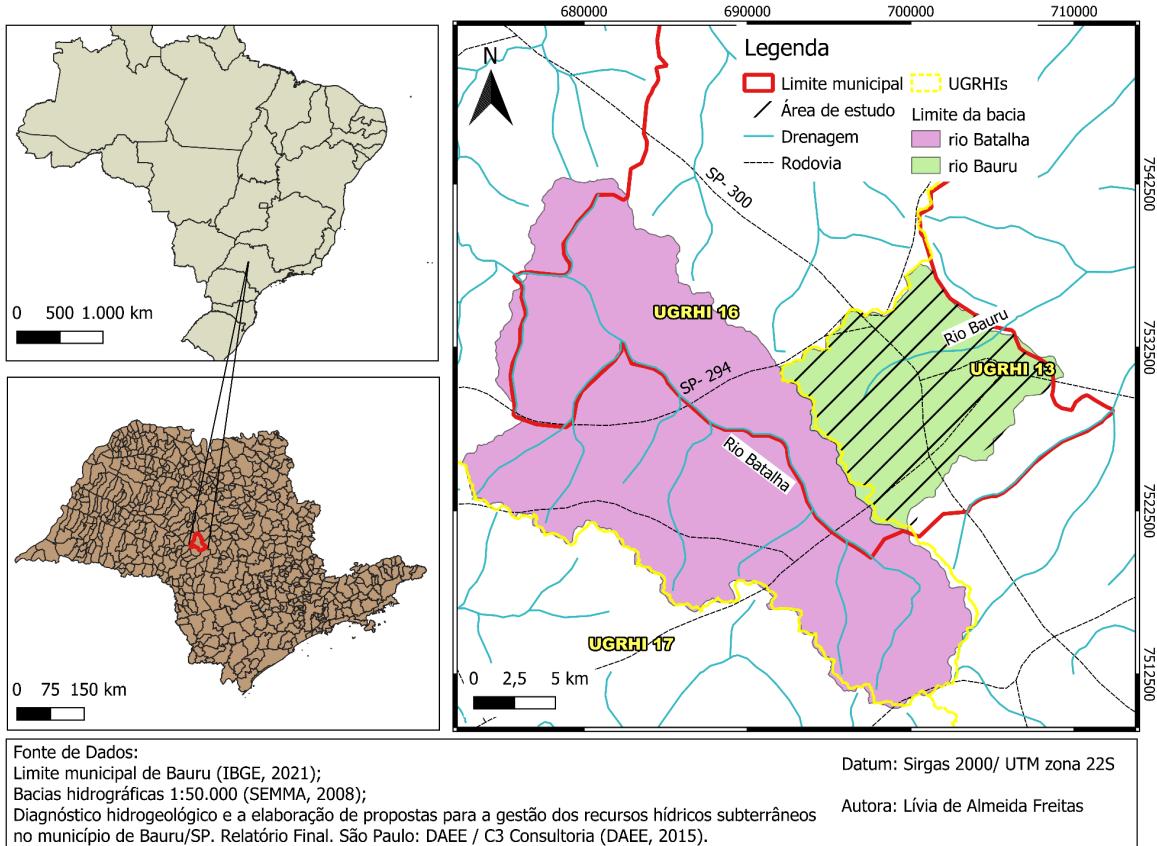


Figura 1: Localização da área de estudo.

4. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

4.1. Geologia

4.1.1. Geologia Regional

A área de estudo insere-se, regionalmente, no contexto geológico da Bacia do Paraná. Esta bacia, de origem cratônica, é caracterizada por sequências sedimentares que se depositaram a partir do Devoniano Superior/Siluriano, intercaladas por importante episódio vulcanogênico, no Cretáceo Inferior, responsável pela geração dos derrames basálticos da Formação Serra Geral (IPT, 1981). Os basaltos constituem o embasamento da sequência sedimentar do Grupo Bauru (Soares et al., 1980).

O Grupo Bauru abriga uma das sequências geológicas melhor documentadas do Cretáceo, conforme atestado por Langer et al. (2022). Segundo os autores, o termo “Bauru” foi inserido na literatura geológica brasileira por Gonzaga de Campos (1905) após a identificação e descrição de arenitos vermelhos próximo ao município homônimo, no estado de São Paulo. Tal litologia seria, mais tarde, denominada “arenito Bauru”.

Nas últimas décadas foram atribuídos diversos *status* estratigráficos à Bacia Bauru. No início da década de 1980, os depósitos do Bauru foram elevados à categoria de grupo a partir dos trabalhos de Soares et al. (1980).

Soares et al. (1980), mediante diversos levantamentos regionais, propuseram a divisão do Grupo Bauru, conforme ilustrado na Figura 2. Segundo os autores, a litoestratigrafia desse grupo foi definida, da base para o topo, pelas seguintes Formações geológicas: Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília. Cabe destacar que tal divisão foi adotada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) na publicação “Mapa Geológico do Estado de São Paulo, Escala 1:500.000” (IPT, 1981).

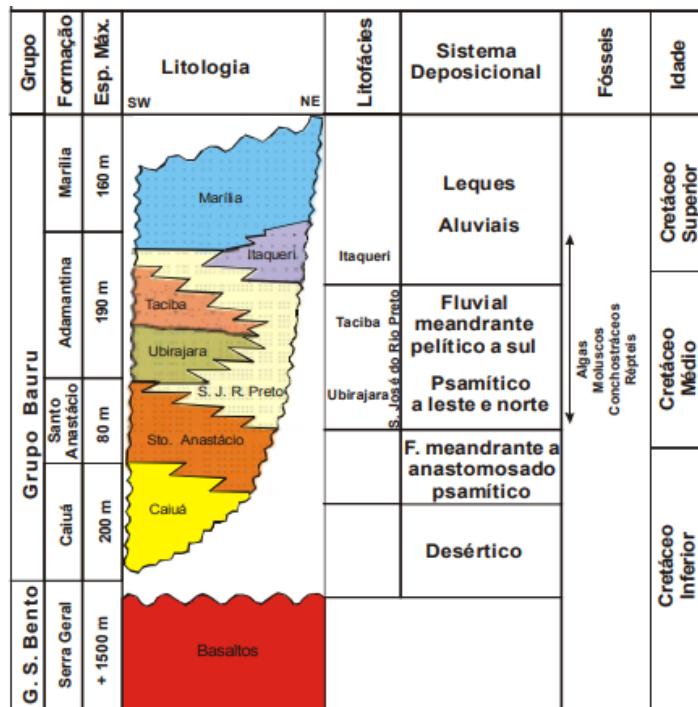


Figura 2: Divisão estratigráfica do Grupo Bauru, proposta por Soares et al. (1980). Fonte: Extraído de Paula e Silva (2003).

Posteriormente, novos mapeamentos geológicos foram efetuados nos estados de São Paulo e Minas Gerais. As classificações estratigráficas supracitadas foram revisadas e culminaram com a subdivisão de algumas unidades, segundo contextos paleogeográficos e/ou paleoclimáticos (Langer et al., 2022). Nesse período, destacam-se os trabalhos de Fernandes (1992, 1998) e Fernandes & Coimbra (1996).

Fernandes (1992) apresentou uma revisão estratigráfica do Grupo Bauru para o norte do Paraná e região do Pontal do Paranapanema (SP), com base nas características litológicas, relações estratigráficas e distribuição geográfica das associações faciológicas. O autor elevou a unidade Caiuá à categoria de grupo, representado por três Formações

geológicas: Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio. Ainda nesse trabalho, a cobertura cretácica suprabasáltica passou a ser composta pelos seguintes grupos cronocorrelatos: Caiuá e Bauru (Formações Santo Anastácio, Adamantina, Uberaba, Marília e Taiúva).

Por sua vez, Fernandes & Coimbra (1996) propuseram uma nova teoria onde a sequência sedimentar do Grupo Bauru havia sido depositada em uma bacia, cujo contexto de evolução geológica difere da Bacia do Paraná, denominada de Bacia Bauru. Segundo eles, ela é do tipo cratônica continental, neocretácica (Coniaciano ao Maastrichtiano), composta por sedimentos predominantemente arenosos, e gerada por subsidência simples, posterior aos derrames basálticos que originaram a Formação Serra Geral. A sedimentação desenvolveu-se em ambiente desértico, sob um clima semiárido a árido.

Deste modo, o termo Bacia Bauru surgiu na literatura geológica brasileira para designar a feição geotectônica do Cretáceo Superior em que as rochas sedimentares do grupo supracitado se acumularam. Ela ocupa uma área de aproximadamente 370.000 km², com espessura de cerca de 300 m, estendendo-se pelos estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Paraná, conforme citado por Riccomini (1997).

Assim como em outros trabalhos, o autor relaciona o tectonismo com as estruturas e a litologia da Bacia Bauru. A evolução ocorreu ao final da quebra do paleocontinente Gondwana, que após passar por um expressivo vulcanismo, sofreu subsidência termal. O acúmulo de quase 2 km de lavas basálticas, no Eocretáceo, ocasionou a compensação isostática na Plataforma Sul-Americana, palco de novos depósitos sedimentares.

Na década seguinte, a porção leste da Bacia Bauru, onde se insere o território paulista, foi alvo de uma nova revisão litoestratigráfica, desta vez realizada por Fernandes & Coimbra (2000). A alteração mais importante refere-se ao Grupo Bauru, sobretudo à Formação Adamantina, que passou a ser classificada como Formação Vale do Rio do Peixe. As demais unidades foram assim mantidas, como mostram as Figuras 3A e 3B.

Entre 2001 e 2022, foram obtidos avanços significativos na compreensão da estratigrafia da Bacia Bauru. Ernesto et al. (2003) e Batezelli (2003) identificaram a continuidade lateral da discordância entre os grupos Bauru e Caiuá a partir de interpretação de dados de afloramentos, paleomagnéticos e perfis dos poços. A sedimentação que deu origem ao Grupo Bauru seria posterior ao evento tectonossedimentar, responsável pelo Grupo Caiuá.

Por outro lado, trabalhos publicados por Batezelli (1998, 2003, 2017) e Albarelli et al. (2015) permitiram redefinir a área de ocorrência da Formação Araçatuba, mapeada ao longo dos vales dos rios do Peixe e Santo Anastácio, bem como descrita em localidades próximas às cidades de Jales, Votuporanga e Auriflama.

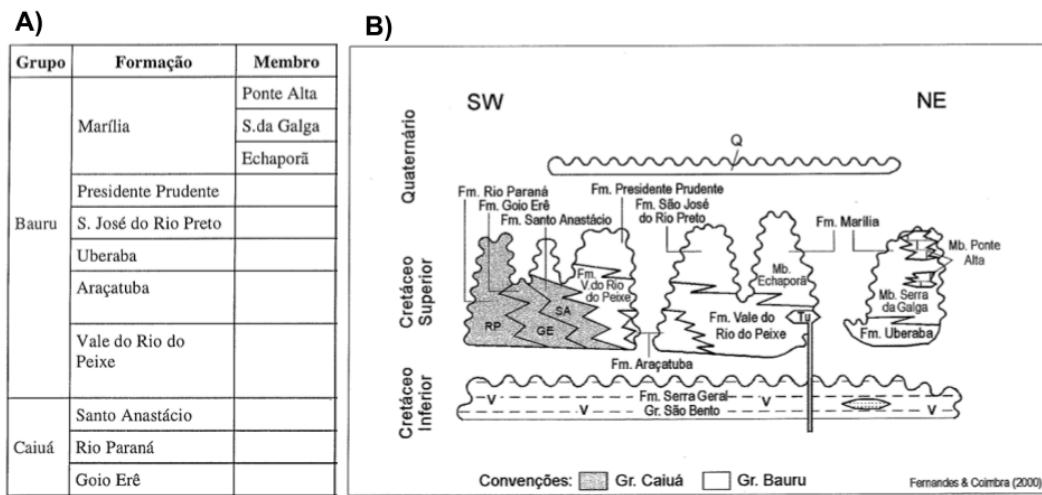


Figura 3: A) Classificação litoestratigráfica e B) Carta cronoestratigráfica da porção leste da Bacia Bauru.
Fonte: extraído de Fernandes & Coimbra (2000).

Paula e Silva (2003) e Paula e Silva et al. (2005) apresentaram uma nova proposta do arcabouço estratigráfico do Grupo Bauru no estado de São Paulo, baseada em dados de subsuperfície e que incluíram perfis geofísicos e geológicos de poços tubulares profundos instalados no território paulista para a captação de água subterrânea. Na ocasião, o trabalho seguiu parcialmente as terminologias adotadas por Soares et al. (1980) e Fernandes & Coimbra (2000), sendo identificadas, da base para o topo, as formações Caiuá, Santo Anastácio, Araçatuba, Adamantina e Marília e reconhecidas duas novas unidades litoestratigráficas, denominadas formações Pirapozinho e Birigui (Figura 4).

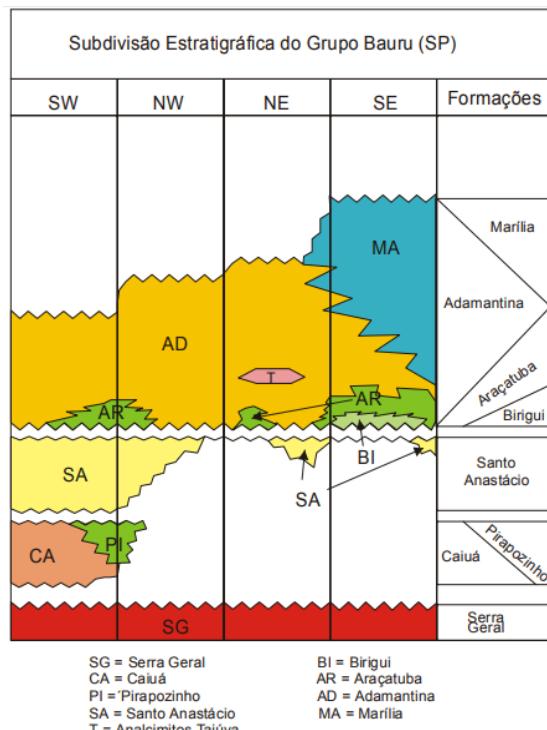


Figura 4: Subdivisão estratigráfica do Grupo Bauru e as relações entre as formações geológicas nos diferentes compartimentos no estado de São Paulo. Fonte: Extraído de Paula e Silva (2003).

De acordo com Langer et al. (2022), embora estimulante, a proposta apresentada por Paula e Silva (2003) contraria o Código de Nomenclatura Estratigráfica (Petri et al., 1986), ao ignorar completamente as informações obtidas em mapeamentos de superfície, dificultando a compreensão das relações de contato entre as unidades.

A Figura 5 ilustra as divisões crono e litoestratigráfica da Bacia Bauru no território paulista, conforme Langer et al. (2022). Os autores procuraram unificar as terminologias dos principais trabalhos publicados nas últimas décadas (Soares et al., 1980; Fernandes & Coimbra, 2000; Batezelli, 1998, 2017), com base em feições litológicas, potencial de mapeamento em escala de 1:25.000, relações de contato observadas em campo, e também empregando as seções de referência bem conhecidas.

O Grupo Bauru é composto por uma unidade basal, a Formação Araçatuba, seguida da Adamantina e Marília. Contudo, segundo Langer et al. (2022), um padrão regional semelhante de contatos não pode ser claramente verificado nas unidades que compõem a Formação Adamantina (Formações Vale do Rio do Peixe, Presidente Prudente e São José do Rio Preto). Os autores entenderam que segundo os critérios adotados pelo Código Brasileiro de Nomenclatura Estratigráfica (Petri et al., 1986), tais denominações seriam melhor agrupadas na Formação Adamantina, pois seus contatos interdigitados não puderam ser identificados nos afloramentos.

Em relação ao ambiente deposicional do Grupo Bauru, o estudo conduzido por Menegazzo (2016) mediante integração da análise faciológica dos testemunhos de sondagens e afloramentos, análise icnológica sistemática, além da utilização de dados paleontológicos e perfis geofísicos, permitiu concluir em quais condições as unidades litoestratigráficas que o compõem se depositaram. Segundo a autora, a Formação Araçatuba, por exemplo, procede de um sistema deposicional lacustre hidrologicamente aberto, cuja densidade e diversidade de traços fósseis indicam condições ambientais calmas.

Já a Formação Adamantina resulta de um sistema fluvial meandrante, com depósitos de planície de inundação. São abundantes os traços fósseis de planícies de inundação pedogeneizadas e traços de raízes, característicos de condições pobremente drenadas e com nível freático alto. Por fim, a Formação Marília é caracterizada por depósitos de leques aluviais. A abundância e os tipos de traços de raízes indicam origem pedogenética para os calcretes desta unidade, e as variações dos tipos de traços de raízes podem indicar possíveis variações climáticas (momentos de maior aridez associados a paleossolos bem drenados). Nas três unidades supracitadas, não foram observadas fácies eólicas.

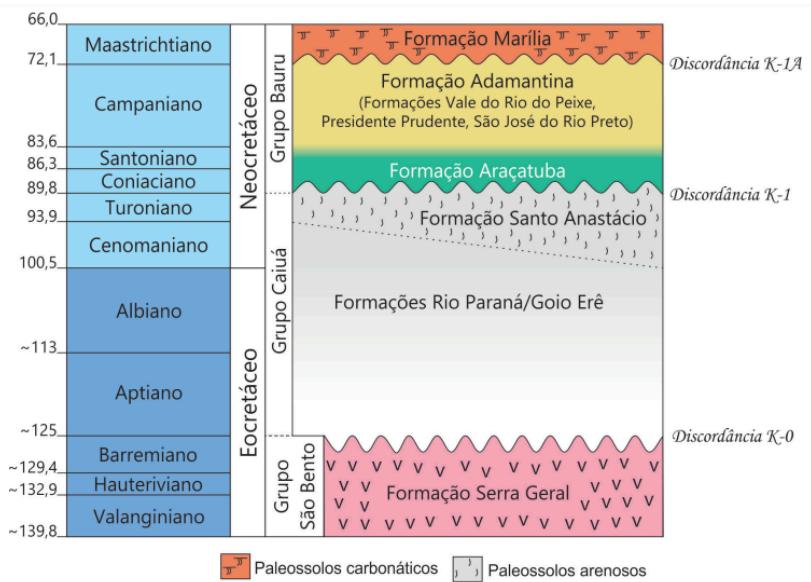


Figura 5: Divisão crono e litoestratigráfica da Bacia Bauru no estado de São Paulo, elaborada com base nos trabalhos publicados na literatura nas últimas décadas. Fonte: Extraído de Langer et al. (2022).

4.1.2. Geologia Local

Os primeiros trabalhos sobre a geologia no município de Bauru foram executados por Paula e Silva & Cavaguti (1994). Os autores relataram que as primeiras perfurações de poços haviam sido feitas pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) em 1975, visando à construção de poços tubulares para o abastecimento público de água. A análise estratigráfica baseada na descrição litológica desses poços revelou que o Grupo Bauru estava em contato direto com a Formação Botucatu, sem a presença dos basaltos da Formação Serra Geral.

Posteriormente, com novas perfurações no município vizinho, Piratininga, definiu-se um alto estrutural caracterizado pelo contato direto dos sedimentos do Grupo Bauru com os da Formação Teresina, denominado Alto de Piratininga (Paulipetro, 1980).

Na década de 1990, Paula e Silva & Cavaguti (1994) estabeleceram uma nova caracterização estratigráfica e tectônica na cidade, baseada na descrição de amostras de calha e geofísica de subsuperfície (raios gama, potencial espontâneo, resistividade) de 22 poços tubulares profundos distribuídos no local. Os resultados obtidos pelos autores mostraram que o Grupo Bauru é caracterizado na cidade pelas formações Adamantina (base) e Marília (topo), segundo a denominação atribuída por Soares et al. (1980). Contudo, as características litológicas e a análise dos padrões das curvas dos perfis geofísicos nos furos de sondagem não permitiram estabelecer o contato entre essas duas unidades.

Ademais, os dados de geofísica indicaram uma tendência de enriquecimento nos termos argilosos em direção às porções basais desta sequência, culminando com a

distinção de um pacote de 20 m de lamitos marrons e arenitos lamíticos vermelho-escuros. Mesmo estudos estratigráficos anteriores não caracterizarem a ocorrência da Formação Araçatuba no município (Paula e Silva, 2003). Tal pacote foi identificado como essa unidade por DAEE (2015) e Simonato et al. (2016). A caracterização dessa camada por DAEE (2015) foi possível com o auxílio dos perfis geofísicos de poços, como também, por meio das sondagens elétricas verticais (SEV).

Ainda segundo Paula e Silva & Cavaguti (1994), o Grupo Bauru aflora em toda a cidade, depositado sobre os basaltos da Formação Serra Geral (a nordeste), ou dos arenitos da Formação Botucatu, ambas do Grupo São Bento, por discordância erosiva e angular. Como consequência do tectonismo, os autores interpretaram que o soerguimento de rochas do Grupo São Bento culminou na exposição à erosão pré-Bauru, situação que gerou variações notáveis de espessura no pacote Botucatu/Piramboia, além da exclusão total dos basaltos da Formação Serra Geral em parte da cidade. Nos anos seguintes, Simonato et al. (2016) denominaram essa lacuna de “janela de basalto”.

Diante da contextualização geológica, a Tabela 1 apresenta uma síntese dos principais aspectos das formações Adamantina, Marília e Araçatuba em subsuperfície na área urbana de Bauru, conforme descrições apresentadas por Paula e Silva & Cavaguti (1994) e DAEE (2015), seguindo a mesma nomenclatura adotada por Soares et al. (1980).

Tabela 1: Síntese das características gerais em subsuperfície das unidades litoestratigráficas que compõem o Grupo Bauru na área urbana do município homônimo. Fonte: Paula e Silva & Cavaguti (1994) e DAEE (2015).

Formação Geológica	Aspectos Gerais
Formação Marília (topo)	Apresenta ocorrência localizada em regiões topograficamente mais elevadas do relevo, com espessura inferior a 30 m. É constituída por arenitos grossos a conglomeráticos, com grãos angulosos, teor de matriz variável, mal selecionados, intercalados por camadas descontínuas de lamitos vermelhos e calcários.
Formação Adamantina (intermediária)	Possui ocorrência generalizada, coberta localmente por porções remanescentes da Formação Marília e aflorante nas regiões de menores altitudes, associadas às drenagens existentes na área. As espessuras variam de 30 a 120 m. É composta por um conjunto de fácies cuja característica principal é a presença de bancos de arenitos de granulação fina a muito fina, róseos a castanhos, alternados com bancos de lamitos e siltitos castanho-avermelhados a cinza-acastanhados; além de seixos de argilito, cimento e nódulos carbonáticos.
Formação Araçatuba (base)	Representa a base do Grupo Bauru, com espessura variando de 10 a 20 m. É composta por siltitos arenosos, cinza-esverdeados, maciços ou com estratificação plano-paralela a cruzada e intercalações de siltitos argilosos.

4.2. Hidrogeologia

No município de Bauru, destacam-se três unidades hidroestratigráficas: Sistemas Aquíferos Bauru (SAB), Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG), tendo como limite basal dessa sequência o Aquiclude Passa Dois (Silva, 2009).

O SAB, unidade superior e foco deste Trabalho de Formatura (TF), possui limites definidos pelos rios Paraná (oeste e noroeste), Grande (norte), Paranapanema (sul) e áreas de afloramento da Formação Serra Geral (leste). O contato inferior do SAB é feito com o SASG ou com o SAG, dependendo do posicionamento geográfico no município (Figura 6).

Os estudos locais mais recentes sobre esse sistema aquífero são os apresentados por DAEE (2015) e Simonato et al. (2016). Conforme os autores, o SAB é caracterizado na área de estudo, do topo para a base, pelas unidades hidroestratigráficas Marília, Adamantina, além do Aquitarde Araçatuba. Aliás, os resultados obtidos nesses estudos constituem o principal avanço no conhecimento da hidroestratigrafia do município de Bauru, com influência no entendimento sobre a conexão hidráulica entre o SAB e o SAG na área da “janela de basalto” que se estende por grande parte da área urbana da cidade.

A Figura 6 mostra o modelo conceitual de circulação das águas subterrâneas em Bauru através de sua sequência hidroestratigráfica, elaborado por Barreto et al. (2023). Na área central da cidade, há a “janela de basalto” entre o SAG e o SAB, ou seja, as unidades do SAB estão depositadas diretamente sobre as do SAG. De acordo com os autores, a recarga do SAB é proveniente das infiltrações das águas de chuva em toda a sua área aflorante, enquanto as áreas de descarga correspondem aos corpos hídricos superficiais, que na área urbana de Bauru, são os córregos da Gramá, Água do Castelo e Água da Ressaca, todos afluentes do rio Bauru. A potociometria é condicionada principalmente pela topografia.

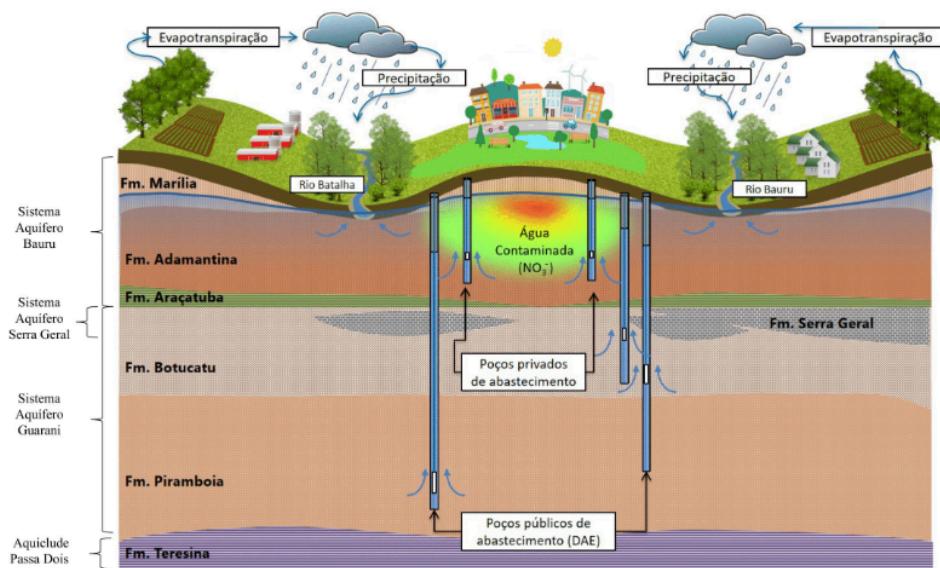


Figura 6: Modelo de circulação das águas subterrâneas na cidade de Bauru. Fonte: Extraído de Barreto et al. (2023).

Segundo DAEE (2015), a unidade hidroestratigráfica Marília apresenta distribuição restrita e aflora em áreas de cotas mais altas, distribuídas na região centro-sul da cidade, e

com espessura inferior a 30 m. Além disso, esse trabalho não considerou essa unidade como aquífero, pois ela se encontra não-saturada em água.

As características hidráulicas da unidade Marília são influenciadas pela variação na cimentação de seu arcabouço litológico, implicando em heterogeneidades e anisotropias. A forte cimentação carbonática, resulta na diminuição significativa da condutividade hidráulica, na ordem de 5 a 10 m³/h, em média (DAEE, 2015).

Embora não seja relevante para a produção de água, a unidade Marília exerce influência na recarga e na proteção da qualidade das águas da unidade hidroestratigráfica Adamantina. Esta unidade ocorre de forma mais abrangente na cidade Bauru, com espessura entre 30 e 120 m, localmente coberto pela unidade hidroestratigráfica Marília, e aflorando em regiões de menor altitude, associadas às drenagens existentes na área (DAEE, 2015; Simonato et al., 2016).

A presença das camadas de lamitos e variações de argilosidade nos arenitos da unidade supracitada tornam suas características hidráulicas heterogêneas, mesmo em áreas próximas (Paula e Silva, 2003). Assim, o Aquífero Adamantina varia de livre até parcialmente confinado, com a predominância de sedimentos com condutividade hidráulica aparente moderada.

Por fim, a base do SAB, segundo Simonato et al. (2016), compreende o Aquitarde Araçatuba, por correspondência à unidade litoestratigráfica homônima. Ele possui espessura de 10 a 20 m e baixíssima permeabilidade que o isola hidráulicamente das unidades hidroestratigráficas inferiores, no caso o SASG ou o SAG. O Aquitarde Araçatuba imprime características de confinamento do SAG na área da “janela de basalto” (DAEE, 2015; Simonato et al., 2016).

4.3. Perfilagem geofísica de poços

A perfilagem geofísica trata-se de uma técnica bastante conhecida na indústria do petróleo, utilizada inicialmente, em 1927, pelos irmãos Schlumberger, na França, e expandida nas décadas seguintes para a indústria de água subterrânea (Nery, 1997).

Segundo Souza e Gandolfo (2021), esse método requer um furo de sondagem ou poço, revestido ou não, onde um equipamento (sonda) é inserido portando sensores especiais, capazes de medir diversas propriedades petrofísicas (p.e. porosidade, permeabilidade, proporção argila/areia) do solo ou rocha. Essas medidas são registradas continuamente em relação à profundidade do furo de sondagem ou poço e representadas por meio dos perfis.

No Brasil, foi a partir da década de 1970 que a perfilagem geofísica passou a ser adotada como ferramenta importante na perfuração de poços tubulares, com o intuito de

identificar as litologias. Os primeiros perfis geofísicos utilizavam as propriedades elétricas das rochas, sendo gradativamente incorporados os radioativos, acústicos, entre outros (Nery, 1997).

Muitas vezes, as amostras de calha extraídas das perfurações não correspondem, exatamente, à profundidade indicada pelo sondador, por conta de desmoronamentos das paredes das sondagens. Além de perda de estrutura e textura, o material descrito (sedimento ou rocha) pode carecer de informações passíveis de identificação, tais como a granulometria. Outro fator a ser apontado refere-se à espessura das camadas, que podem, inclusive, ser subestimadas, levando a equívocos de interpretação, sendo necessária uma investigação mais detalhada sobre a geologia e hidrogeologia do local.

Dessa forma, ressalta-se a importância da perfilagem geofísica na identificação e posicionamento litológico das amostras e, por conseguinte, da caracterização lito-hidroestratigráfica em subsuperfície. Essa técnica permite indicar a profundidade do nível d'água, a espessura dos aquíferos, evitando o posicionamento inadequado de filtros, bem como reconhecer estruturas importantes como falhas e zonas de fraturas de uma determinada unidade geológica (Souza e Gandolfo, 2021).

Os principais tipos de perfilagem geofísica abordados neste Trabalho de Formatura (TF) incluíram: raios gama (RG), potencial espontâneo (SP), sônico ou acústico (DT) e resistividade (DIR ou SN). A Tabela 2 apresenta uma síntese desses métodos, incluindo as principais características, parâmetros medidos e aplicações.

Tabela 2: Aspectos gerais dos tipos de perfilagem geofísica adotados neste TF. Fonte: Paula e Silva (2003), Nery (1997) e Souza e Gandolfo (2021).

Método	Princípios e Características	Aplicações	Unidade de registro dos dados
Raios Gama (RG)	<ul style="list-style-type: none"> *Registro dos níveis de radiação gama natural acoplado a uma sonda inserida no poço; *A radiação emitida pelas rochas é resultado da presença de elementos radioativos ^{40}K, ^{232}Th e ^{238}U na matéria orgânica, sedimentos mais finos e em determinados minerais que apresentam esses elementos em sua composição; *Folhelhos e siltitos tendem a apresentar altos teores de radiação gama comparados aos arenitos e carbonatos. 	<ul style="list-style-type: none"> * Definição da litologia (principalmente folhelho); * Cálculo do teor de argila presente; *Identificação de minerais radioativos e evaporito (KCl). 	API (medida da radioatividade artificial em poço do Instituto Americano do Petróleo)
Potencial Espontâneo (SP)	<ul style="list-style-type: none"> *Registro da diferença de potencial elétrico entre um eletrodo na superfície e outro, móvel, no poço, gerado pela diferença de salinidade entre a água da formação e a salinidade do fluido de perfuração. 	<ul style="list-style-type: none"> *Detecção da linha de base dos folhelhos (LBF) *Delimitação de reservatórios de água. 	Millivolts (mV)
Sônico ou Acústico (DT)	<ul style="list-style-type: none"> *Registro do tempo de trânsito de ondas compressionais (P) ao longo da formação a partir de dois detectores posicionados a distâncias fixas entre si; *Em camadas com menor porosidade, a onda tende a percorrer mais rapidamente do que nas mais porosas. 	<ul style="list-style-type: none"> *Identificação de zonas de fraturas; *Cálculo da porosidade intergranular. 	$\mu\text{S/m}$

Resistividade (DIR ou SN)	<p>*Resistividade medida com a passagem de corrente elétrica gerando duas curvas no perfil:</p> <p>*DIR (Deep Induction Resistivity): uma curva profunda, da zona não invadida do poço que é gerada por meio da <u>indução</u>. Este processo consiste em um campo eletromagnético variável que penetra as rochas, assim sendo, por meio da taxa de decaimento do campo induzido mede-se uma resistividade.</p> <p>*SN (Short Normal): uma curva rasa, da zona invadida do poço gerada por meio da <u>perfilagem aparente</u>. Este processo consiste em uma corrente elétrica constante injetada no solo por meio de eletrodos dispostos na superfície; logo a resistividade aparente é obtida a partir da queda de tensão medida por esses eletrodos.</p>	<p>*Identificação qualitativa da litologia;</p> <p>*Determinação qualitativa da permeabilidade;</p> <p>*Mapeamento da distribuição de minerais condutivos.</p>	Ohm.m
---------------------------	---	--	-------

As perfilagens geofísicas podem também auxiliar na interpretação e proposição de ambientes deposicionais dos sedimentos, a exemplo do que foi feito por Franzini (2010) e Montanheiro (2014). Ambos os autores embasaram suas interpretações dos perfis geofísicos do Grupo Bauru no trabalho de Paula e Silva (2003) que propôs modelos de interpretações de ambientes deposicionais conforme os comportamento das curvas dos métodos de raio gama (RG) e potencial espontâneo (SP), conforme ilustrado na Figura 7.

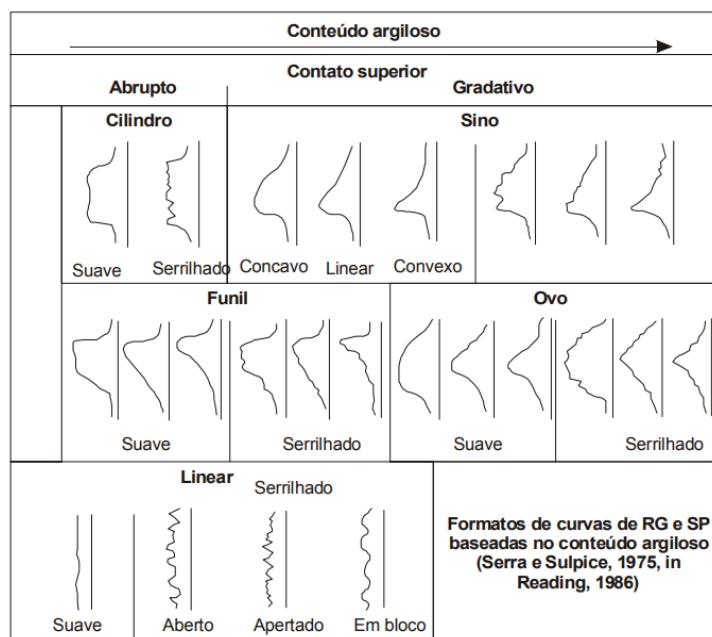


Figura 7: Padrões de comportamento das curvas de raio gama (RG) e potencial espontâneo (SP), conforme variação do teor de argila. Fonte: Extraído de Paula e Silva (2003).

De acordo com Paula e Silva (2003), os formatos das curvas podem inferir as seguintes condições, listadas na Tabela 3 a seguir. Segundo Nery (2013), caso as curvas de raios gama (RG) e de potencial espontâneo (SP) estejam certamente relacionadas ao conteúdo de argila, o formato delas pode ser utilizado na interpretação dos aspectos sedimentológicos das formações, possibilitando a constituição de paleoambientes.

Tabela 3: Relação entre os padrões de comportamento das curvas de raios gama (RG) e potencial espontâneo (SP) e os ambientes deposicionais. Fonte: Serra e Sulpice (1975) e Nery (2013).

Tipo de curvas	Características do sedimento/Ambiente deposicional
Cilindro	Sedimentos homogêneos delimitados por sedimentos mais argilosos, típico de preenchimento de canais com topo abrupto. Fácies sujeitas a transgressões e regressões, podem ser ambientes eólicos, canais fluviais, barras e plataformas carbonáticas, ambientes com bastante retrabalhamento que resultam em poucos sedimentos finos
Sino	Sedimentos de canais, granodecrescência ascendente (<i>fining upward</i>), ambientes progradantes
Funil	Sistemas como delta, lobos marinhos, ilhas barreira, recifes de corais progradando sobre folhelhos, <i>granocrescência ascendente (coarsening upward)</i>
Ovo	Preenchimento de canais com conglomerados, sequências progressivas/transgressivas, <i>granodecrescência ascendente (fining upward)</i>
Linear	Sequências de lamitos intercaladas com arenitos e siltitos, depósitos de planície de inundação, folhelhos, carvão, áreas pantanosas

Outro aspecto que se pode dizer sobre a curva de radiação gama (RG) é que quanto mais elementos radioativos presentes nas rochas, maior a fidelidade da informação. Os folhelhos, silvinita (evaporitos potássicos) e rochas cristalinas ricas em feldspatos potássicos e biotita (minerais que possuem bastante potássio) tendem a apresentar elevada radioatividade. De modo geral, inclusões de materiais vulcânicos aumentam a radioatividade das rochas, ao contrário dos arenitos limpos e calcários que possuem baixa radioatividade (Montanheiro, 2014). Ao analisar os ambientes deposicionais, os depósitos eólicos tendem a apresentar menor valor de radioatividade frente aos depósitos de ambientes fluviais.

Ademais, uma vantagem do perfil gama em relação aos outros métodos de perfilagem geofísica é que ele pode ser executado depois do revestimento do poço, ou seja, possui alcance maior e é pouco afetado por irregularidades. Por exemplo, o perfil de resistividade aparente é bastante afetado pelo fluido de perfuração e pela zona de invasão deste, uma vez que seu alcance é curto, nas proximidades da parede do furo. No entanto, o perfil de resistividade induzida minimiza os “efeitos do poço” e da lama, uma vez que seu alcance é maior. Os dois perfis são normalmente executados e analisados conjuntamente (Franzini, 2010; Montanheiro, 2014).

A quantidade de areia/ argila pode ser inferida a partir do sinal nos perfis de RG. Isso significa que quanto maior o sinal, mais argila estará presente (Nery, 2013; Hydrolog, *comunicação verbal*). Nos perfis de resistividade, valores entre 20-200 Ohm.m indicam litologias mais arenosas e quanto maior for esse sinal, mais limpa é essa areia. Em materiais silto-argilosos, os valores registrados encontram-se entre 6 e 8 Ohm.m e as curvas de DIR e SN são mais unidas. Segundo a empresa Hydrolog (*comunicação verbal*), para sedimentos

mais finos, como folhelhos, esse valor é menor ainda (~ 4 Ohm.m) e ocorre a inversão das curvas de resistividade: a curva de indução passa a ter valores menores que a normal curta. Além disso, diferentemente das argilas, as curvas de resistividade não sofrem influência ao atravessar materiais arcoseanos.

As curvas de potencial espontâneo (SP) indicam, basicamente, a presença de água. Embora este tipo de perfilagem geofísica não seja muito adotada na indústria de água subterrânea, segundo Nery (2013) ela auxilia na identificação de argilas, uma vez que o sinal para essa litologia é contínuo e reto (linha de base de folhelho).

4.3.1. Uso da perfilagem geofísica em estudos sobre a lito-hidroestratigrafia do Grupo Bauru no estado de São Paulo

Conforme Paula e Silva (2003), a partir do final da década de 1970 e início da década de 1980, os projetos de captação de água subterrânea desenvolvidos pelo DAEE para as prefeituras paulistas passaram a contar com o auxílio das perfilagens geofísicas, item que se tornou obrigatório na perfuração de poços em formações sedimentares.

O uso dessa ferramenta em estudos lito-hidroestratigráficos do Grupo Bauru e, por conseguinte, do SAB no estado de São Paulo, foi abordado em diversas publicações (Paula e Silva & Cavaguti, 1994; Paula e Silva et al. 2005; Franzini, 2010; DAEE, 2015; Montanheiro & Chang, 2016). Os trabalhos de Paula e Silva & Cavaguti (1994), Paula e Silva et al. (2005) e DAEE (2015) foram conduzidos no município Bauru e os resultados obtidos a partir da interpretação dessas perfilagens foram cruciais para o avanço no entendimento da geologia e hidrogeologia na área.

Por sua vez, Montanheiro & Chang (2016), em estudo sobre a contaminação das águas subterrâneas do SAB na área urbana de Monte Azul Paulista, utilizaram, dentre outras ferramentas, a perfilagem geofísica de um poço tubular profundo, instalado estrategicamente na zona central da cidade. Isso permitiu testar um modelo hidrogeológico conceitual a partir da interpretação e integração dos dados geofísicos com os hidroquímicos e hidrogeológicos, resultando na caracterização da Formação Adamantina no local. Os autores também identificaram duas litofácies distintas: a primeira, constituída por sedimentos argilo-arenosos nas profundidades entre 40 até 80 m, e a segunda, representada por sedimentos predominantemente arenos-argilosos (na forma de intercalações de camadas arenosas e argilosas) entre 80 e 150 m de profundidade. Ambas as camadas estariam separadas entre si por outra, composta por sedimentos argilo-arenosos de 40 m de espessura.

4.4. Modelagem geológica tridimensional

A representação dos dados geológicos, executada de forma simples e direta, é de suma importância em todas as áreas das geociências. Nos últimos anos, a modelagem geológica tridimensional (3D) tem sido utilizada como ferramenta valiosa para o suporte de decisão em diversos setores, tais como mineração (Basson et al., 2017), geologia do petróleo (Radwan et al., 2022; Roberto, 2022), hidrogeologia (Hassen et al., 2016; D’Affonseca et al., 2020; Hart et al., 2023).

Segundo D’Affonseca et al. (2020), os modelos geológicos 3D possibilitam inferir uma representação espacial realista das unidades geológicas do domínio estudado, geometria de aquíferos e aquitardes além de outras feições relevantes (p.e., falhas, etc.).

Tais modelos, sucessores dos tradicionais blocos diagramas, podem ser classificados, segundo Garcia & Gonçalves (2021), em dois tipos principais: modelagem explícita (manual) e implícita (automatizada). No primeiro tipo, as superfícies são geradas a partir da interpretação de seções geológicas, constituindo, assim, um conjunto de dados que, por interpolação matemática, dará origem ao modelo geológico.

Contudo, existem dificuldades em replicar o modelo, já que depende diretamente da interpretação de cada modelador. A atualização desse tipo de ferramenta também não é simples: a inserção de novas informações obtidas em campo gera a necessidade de um novo modelo, já que a sua elaboração não é automatizada, conforme apontado por Hart et al. (2023).

A modelagem implícita é capaz de criar as superfícies por meio de algoritmos diretamente a partir do banco de dados. Dessa forma, um mesmo conjunto de equações permite que o modelo seja reproduzido, facilitando também sua atualização mediante aquisição de novas informações (Cowan et al., 2003).

Atualmente, um dos mecanismos de modelagem tridimensional implícita mais usados no mercado é o *Leapfrog Works®*, desenvolvido pela empresa Sequent. O programa é capaz de criar modelos geológicos, numéricos e de blocos a partir da inserção de diversos tipos de elementos, como os estruturais, furos de sondagem, mapas e perfis geológicos, geofísicos, entre outros.

Vários algoritmos de modelagem implícita têm sido aplicados nas geociências, dos quais cita-se o *Fast Radial Base Function* (Fast RBF™), patenteado pela Sequent e que se assemelha à krigagem dupla (Cowan et al., 2003). O Fast RBF™ possui a capacidade de interpolar dados de maneira automatizada, ao contrário da abordagem de modelagem explícita, na qual as superfícies são tipicamente construídas a partir de linhas e polígonos, derivados das interpretações do modelador.

A aplicação desse algoritmo se dá pelo emprego de funções de interpolação que determinam a relevância de cada amostra com base em sua distância em relação ao ponto a ser interpolado, e representadas pela Equação 1 a seguir:

$$f(x) = \sum_{i=1}^L c_i p_i(x) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(|x - x_i|) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$p_i(x)$: funções polinomiais de base;

c_i : coeficientes de drift;

L : total de termos polinomiais;

N : número de pontos de dados;

$\phi(|x - x_i|)$: função de covariância entre um ponto dado (x_i) e um ponto desconhecido (x);

s de interpolação desconhecidos.

Os coeficientes de interpolação, por sua vez, são determinados pelo seguinte sistema linear (Equação 2):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Phi & P \\ P^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda \\ c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 2} \\ \Phi &= \begin{bmatrix} \phi(0) & \cdots & \phi(|x_1 - x_N|) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(|x_N - x_1|) & \cdots & \phi(0) \end{bmatrix} \\ P &= \begin{bmatrix} p_1(x_1) & \cdots & p_L(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_1(x_N) & \cdots & p_L(x_N) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Esse algoritmo possui ainda outras vantagens, conforme abordado por Cowan et al. (2003) e que incluem: i) modelagem de condições geológicas complexas e com diversas geometrias; ii) boa capacidade de processamento de dados em partes específicas do espaço e; iii) não requer necessidade de digitalização manual das superfícies.

Além disso, o *Leapfrog Works®* suporta muitos formatos de entrada e saída, como grades de elevação, modelos digitais de terreno, informações georreferenciadas (linhas, pontos e imagens), modelos de fluxos (*FEFLOW®*, *MODFLOW®*), modelo geológico 3D, seções geológicas, vídeos, *stereonets*, entre outros.

A utilização do *Leapfrog Works* e do *Fast RBF™* têm se mostrado muito útil em estudos lito-hidroestratigráficos, sendo ferramenta adotada em diversas publicações (MacCormack et al., 2019; García-Gil et al., 2023), auxiliando na avaliação da capacidade e

vulnerabilidade das águas subterrâneas, bem como definir a geometria dessas unidades, em escalas local, regional ou nacional.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. Levantamento de informações preexistentes e elaboração de banco de dados

Esta etapa abrangeu a elaboração de um banco de dados mediante informações dos relatórios técnicos de 59 poços tubulares profundos, operados pelo Departamento de Água e Esgoto do Município de Bauru (DAE), e disponibilizados em formato digital e em papel (Anexo I).

A opção por poços de abastecimento públicos em detrimento dos particulares se deu ao fato de que os primeiros apresentaram, em geral, relatórios mais completos, incluindo descrições litológicas mais detalhadas, perfilagens geofísicas, além das informações construtivas das captações.

Os dados foram organizados em planilhas no programa Excel 2016, contendo os seguintes elementos: nome do poço e identificação do DAE (UP), qualidade da descrição geológica, o ano de instalação, coordenadas de localização, cota, profundidade do poço e a existência de perfilagem geofísica (métodos utilizados e escala vertical disponível), conforme apresentado na Figura 8.

UP	Nome DAE	Há relatório de poço?/ Qualidade da descrição geológica	Ano de instalação	UTM N (m)	UTM E (m)	Cota (m)	Profundidade (m)	Existe perfilagem geofísica?/ Escala vertical	Métodos de perfilagem geofísica			
									Gama	Resistividade	Sônico	SP
UP24	Parque Real I	Sim, qualidade boa	1985	22°19'44,39"S	49°07'44,82"O	529	187	Não	-	-	-	-
UP33	Parque Real II	Sim, qualidade boa	1995	22°19'47,67"S	49°07'36,02"O	540	188,5	Sim, 1:500	✓	✓	✓	✓
UP68	Alto paraíso	sim, simplista	2021	22°19'46,04"S	49°06'11,43"O	592	253	Sim, 1:500	✓	✓	✓	✓
UP66	Praça Portugal	Sim, qualidade boa	2021	22°20'09,59"S	49°04'04,71"O	589,2	326	Sim, 1:200 e 1:500	✓	✓	✓	✓
UP53	Nações Unidas II	Sim, qualidade boa	2012	22°20'00,38"S	49°03'23,80"O	561	320	Sim, 1:200 e 1:500	✓	✓	✓	✓
UP64	Geisel III	Sim, qualidade boa	2019	22°20'10,03"S	49°02'20,00"O	547	300	Sim, 1:200 e 1:500	✓	✓	✓	✓
UP34	Bauru XXV	Sim, qualidade boa	1995	22°19'54,88"S	49°00'54,31"O	524	300,7	Sim, 1:500	✓	✓	✓	✓
UP54	Manchester	Sim, qualidade boa	2012	22°19'55,66"S	48°59'44,50"O	606	432	Sim, 1:200 e 1:500	✓	✓	✓	✓

Figura 8: Modelo da planilha de dados gerada a partir das informações dos poços tubulares profundos cadastrados, operados pelo DAE.

5.1.1 Aquisição de perfilagens geofísicas

Foram adquiridos 42 perfis geofísicos, abrangendo diferentes localidades da área urbana de Bauru, que compõem os relatórios de poços de abastecimento fornecidos pelo DAE. Dentre as perfilagens disponíveis e consideradas neste TF citam-se: raios gama (RG), potencial espontâneo (SP), resistividade (DIR e SN) e o sônico (DT). Após a aquisição desses materiais, procedeu-se à interpretação dos dados. Todas as imagens das perfilagens foram analisadas em extensão “.TIF”, de modo que pudessem ser correlacionadas às respectivas descrições geológicas. A Figura 9 mostra o exemplo de um dos poços cadastrados e os respectivos perfis geológicos e geofísicos.

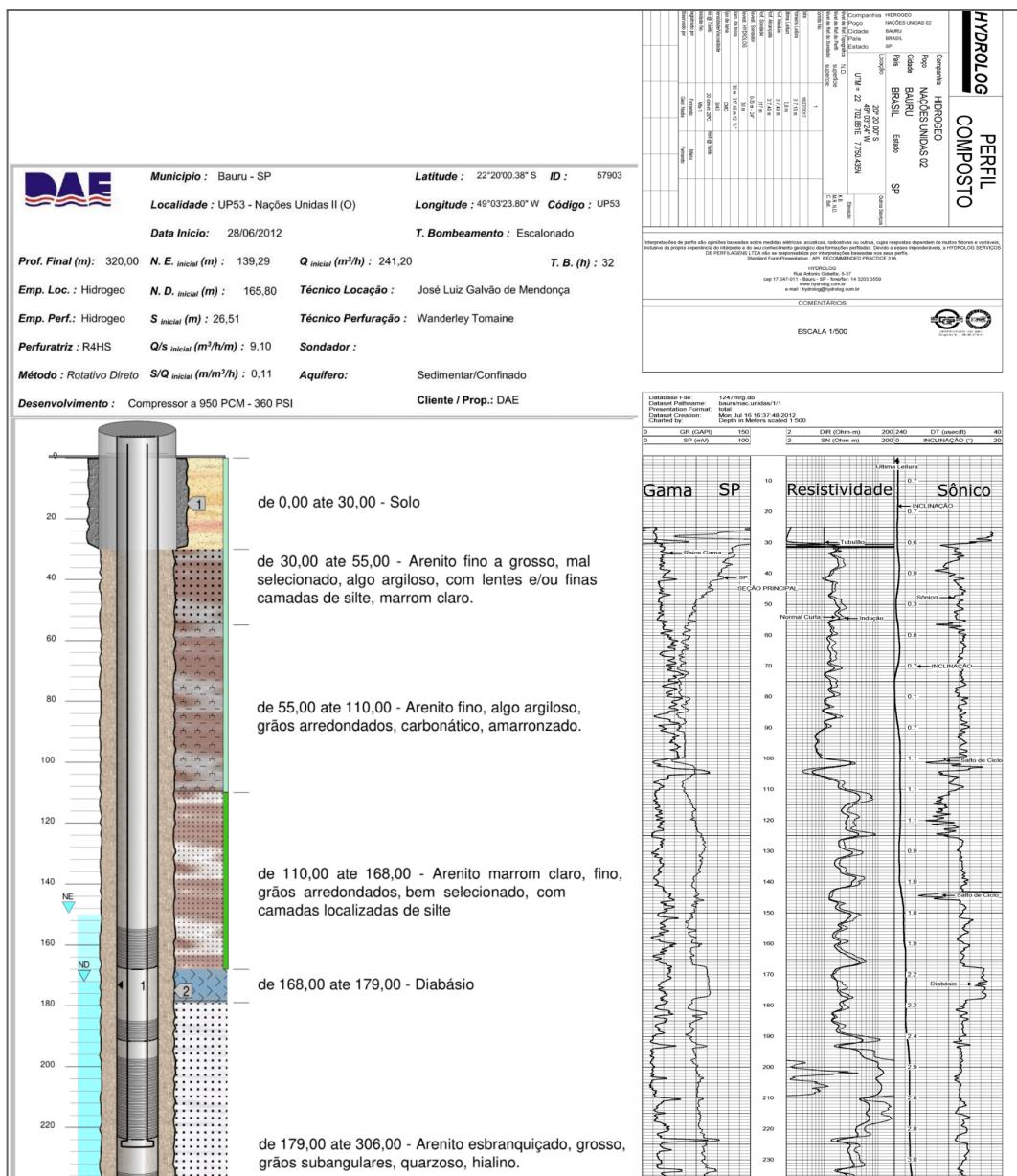


Figura 9: Exemplo dos perfis geológico (à esquerda) e geofísicos (à direita) de um dos poços cadastrados.

Fonte: Dados extraídos de DAE (2022).

Com o intuito de agrupar as perfilagens dos poços, os arquivos digitais foram transportados para o programa WellCAD, versão 5.7 (ALT, 2023) e convertidos em extensão ".LAS", possibilitando a análise integrada dessas informações. A Figura 10 ilustra um exemplo das perfilagens geofísicas de alguns poços cadastrados, agrupadas em uma única figura, e niveladas de acordo com a cota da boca de cada furo.

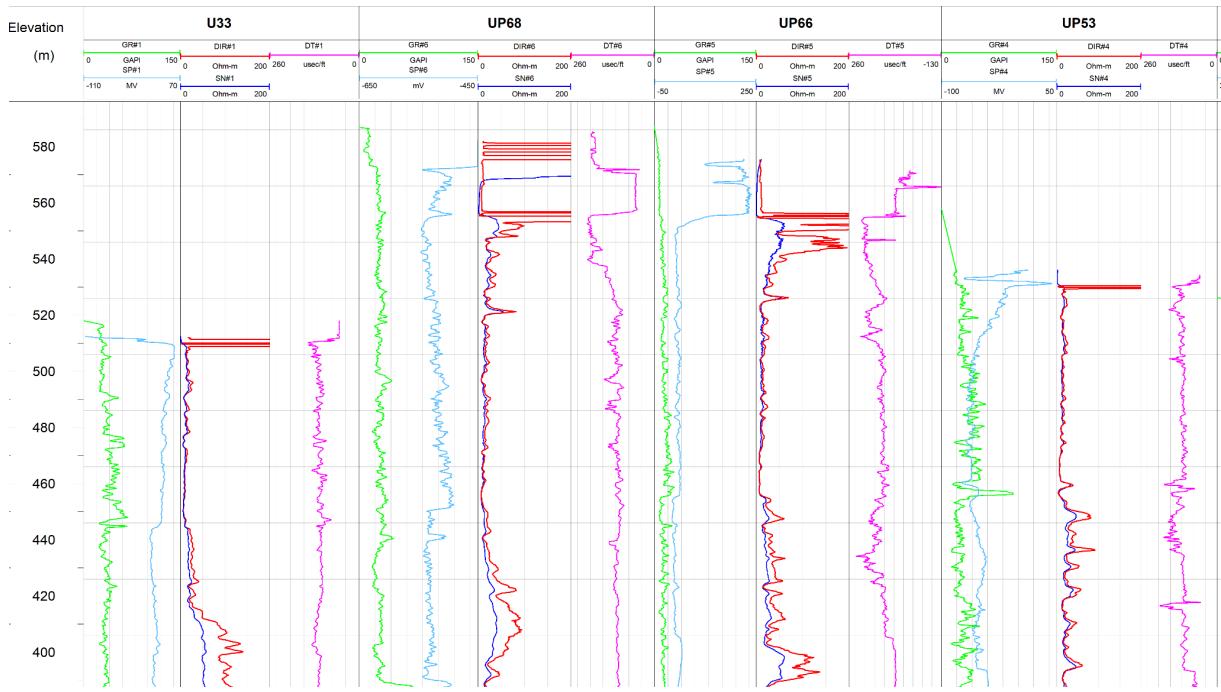


Figura 10: Exemplo de perfilagens geofísicas dos poços cadastrados, agrupadas no programa WellCAD, versão 5.7. As diferentes cores representam os seguintes métodos: verde (RG - raios gama), azul claro (SP - potencial espontâneo), azul-escuro (SN - resistividade), vermelho (DIR - resistividade) e rosa (DT - sônico).

5.2. Elaboração de seções geológicas

Uma análise de consistência dos dados foi realizada priorizando os poços que possuíam boa descrição geológica e perfilagens geofísicas, cujos dados fossem apresentados, preferencialmente, em escala vertical 1:200, considerada neste Trabalho de Formatura (TF) mais apropriada para análises em detalhe.

Ressalta-se que as descrições litológicas apresentadas nos relatórios técnicos desses poços foram executadas com base em amostras de calha que, como explicado no item 4.3, possuem muitas incertezas quanto ao seu posicionamento em subsuperfície. Logo, é de grande importância reinterpretar esses dados para tornar essa caracterização a mais fidedigna possível.

Foram selecionados 17 poços conforme os critérios mencionados, representados pelos pontos em rosa na Figura 11.

Para melhor compreensão da geologia de subsuperfície do Grupo Bauru, foram elaboradas três seções geológicas que cortam a área urbana de Bauru, assim denominadas: 1 (SW-NE), 2 (E-W) e 3 (SSW-NNE).

Essas seções foram definidas segundo a abrangência no local e em diferentes direções, visando conter o maior número possível de poços. Ademais, optou-se pelo cruzamento das seções 2 e 3 no centro da área de estudo, próximo ao furo de sondagem (S1), cujas características serão descritas no item 5.4.

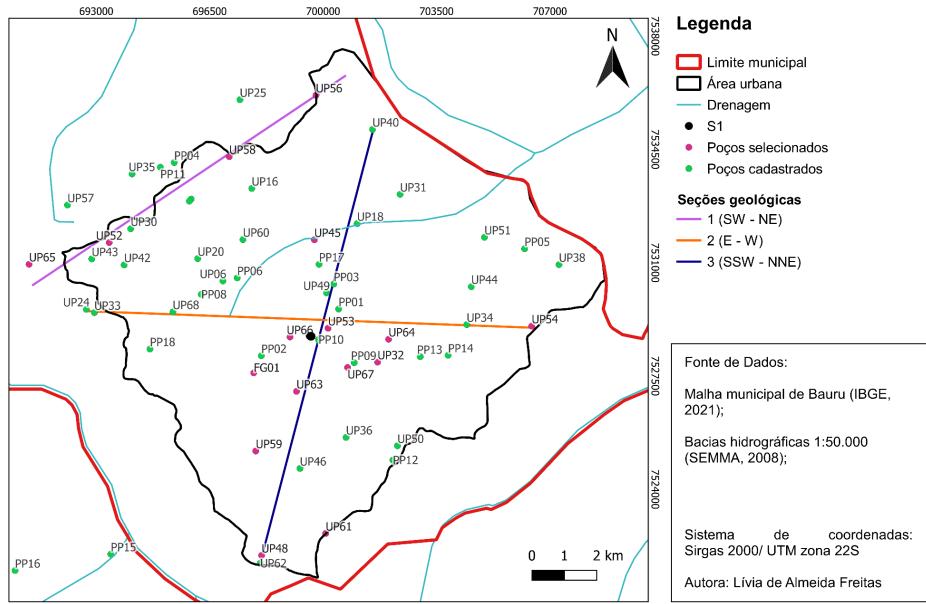


Figura 11: Localização dos poços de abastecimento operados pelo DAE e das seções geológicas na área urbana de Bauru. Os pontos assinalados em rosa e preto representam, respectivamente, os poços selecionados e o furo de sondagem (S1) executado neste Trabalho de Formatura.

5.3. Seleção da área para realização do furo de sondagem

Com o intuito de entender em detalhe a lito-hidroestratigrafia em subsuperfície procedeu-se à seleção de áreas potenciais para a execução de um furo de sondagem, descrição de testemunhos e instalação de poços do tipo multinível. Tais poços, previstos no âmbito do Projeto Temático FAPESP (Processo n.º 2020/15434-0), serão utilizados futuramente para avaliar a qualidade das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru (SAB), com enfoque na contaminação por nitrato. Este TF, tem como objeto de estudo apenas o furo-guia e a identificação das unidades que compõem o Grupo Bauru, e por conseguinte, do SAB.

A escolha do local em questão ocorreu em função dos seguintes aspectos:

- Histórico de contaminação por nitrato, inclusive com valores superiores ao padrão de potabilidade ($>10 \text{ mg/L N-NO}_3^-$), conforme preconizado na Portaria GM/MS n.º 888 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021);
- Vazios urbanos (p.e., terrenos, praças, parques, clubes, etc.) que possibilitem a passagem dos equipamentos de perfuração;
- Área de ocorrência, em subsuperfície, das Formações Marília e Adamantina;
- Segurança (durante e após a instalação de equipamentos).

A próxima etapa consistiu na identificação desses locais na área urbana de Bauru com o auxílio da imagem de satélite, referente ao ano de 2023. Foram identificadas 44 áreas,

divididas em quatro setores da cidade (norte, sul, centro, leste e oeste), conforme apresentado na Figura 12.

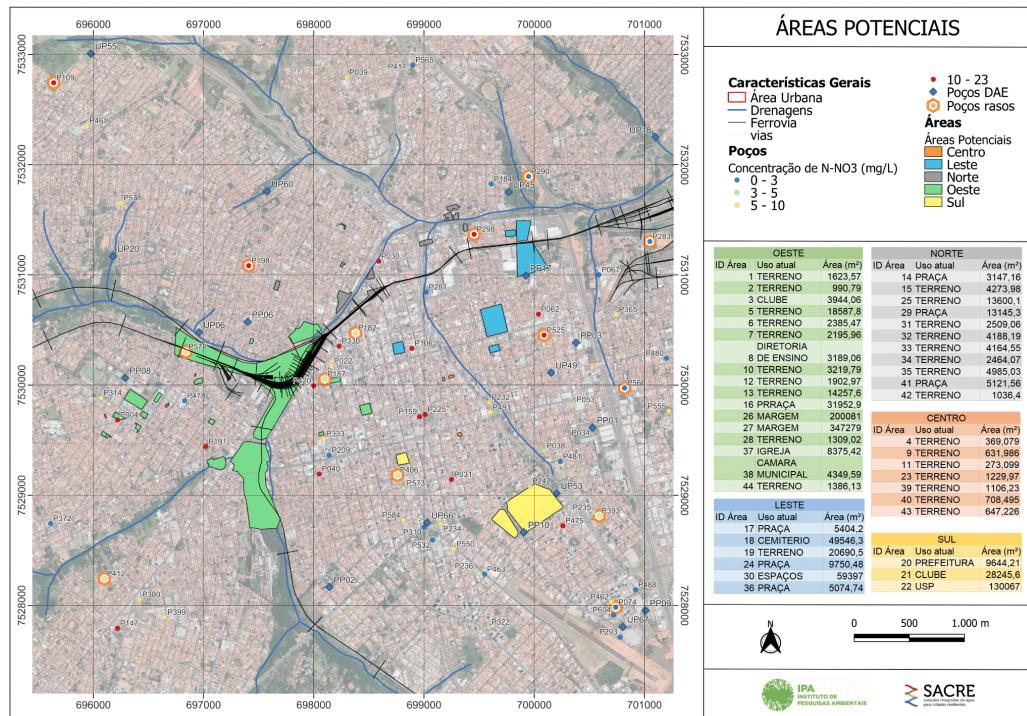


Figura 12: Imagem de satélite com os 44 locais previamente selecionados, divididos em setores (norte, sul, centro, leste e oeste) na área urbana de Bauru.

Durante as visitas às áreas, entre 14 e 18 de março de 2023, utilizaram-se fichas de campo contendo informações como coordenadas, endereço, facilidade de acesso dos equipamentos, disponibilidade de energia elétrica e água, segurança, entre outros (Anexo I).

A área escolhida para a perfuração e instalação dos poços foi o Centro Esportivo da Universidade de São Paulo - *Campus Bauru*. Esse local situa-se na região central da área de estudo, com urbanização a partir de 1940 e densidade de ocupação de média a alta (Figura 13).

O Centro Esportivo possui uma área de 802 m² e em seu interior há um edifício dedicado às atividades esportivas dos estudantes e funcionários, além de um campo de futebol. O portão permanece fechado fora do horário de funcionamento, garantindo segurança contra invasões. Outro aspecto relevante é o conhecimento minucioso da universidade sobre a distribuição das redes de água e esgoto, bem como outras estruturas em subsuperfície no local. Por fim, vale destacar a permissão da Prefeitura da USP-*Campus Bauru* para a realização das obras, bem como o fornecimento de infraestrutura necessária para acondicionamento dos equipamentos e dos testemunhos do furo de sondagem.

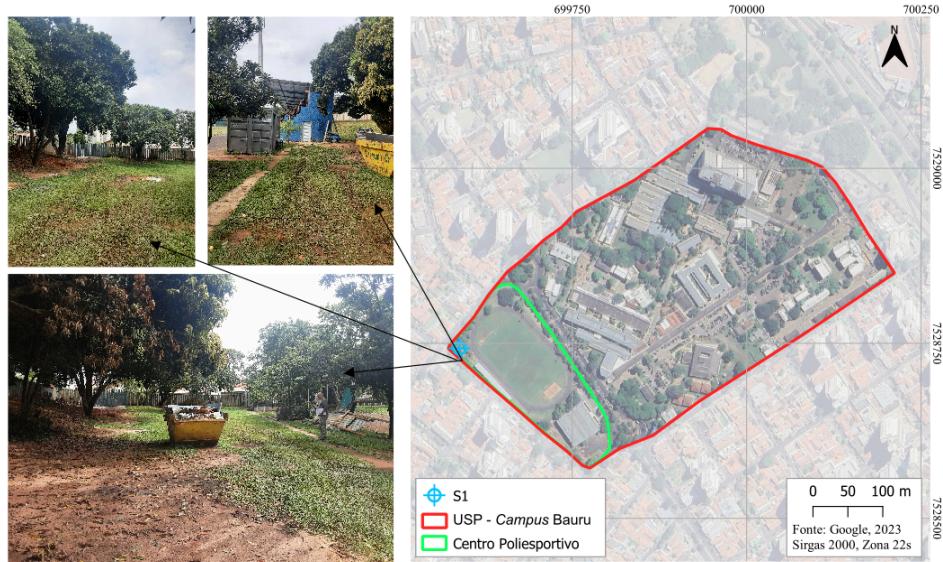


Figura 13: Localização da área (polígono verde) selecionada para realização do furo de sondagem.

5.4. Furo de sondagem e coleta de testemunhos

Os serviços de execução do furo de sondagem (S1) foram realizados entre os dias 22 de novembro e 15 de dezembro de 2023 pela empresa PROSEMI, em conformidade com a norma técnica ABNT 15492/2007 - Sondagem de reconhecimento para fins de qualidade ambiental. As etapas da perfuração de S1 são descritas na Tabela 4 e ilustradas na Figura 14.

Tabela 4: Sequência das etapas adotadas durante a perfuração da sondagem S1 na área do Centro Esportivo da USP- Campus Bauru.

Etapa	Sequência das atividades
I. Perfuração e instalação do tubo de boca	<ul style="list-style-type: none"> a) Perfuração segundo método rotativo, diâmetro 20", com circulação direta de fluido (base de bentonita), de 0 a 12 m de profundidade (Figura 14A); b) Instalação do tubo de boca de chapa de aço, diâmetro de 13", espessura de 3/16" (4,75 mm), 12 m de comprimento (Figura 14B); c) Cimentação do espaço anular com calda de cimento e água, entre 0 e 12 m de profundidade; d) Espera do tempo de cura do cimento por 24h antes de prosseguir com a perfuração; e) Coleta de amostras de calha, a cada metro, nos primeiros 12 m de profundidade.
II. Perfuração do furo-guia	<ul style="list-style-type: none"> a) Diâmetro nominal: 6", de 12 a 137 m de profundidade; b) Perfuração pelo método rotativo, com circulação direta de fluido, e recuperação de testemunhos; c) Fluido de perfuração à base de carboximetilcelulose de sódio (CMC), com controle de peso específico (8,5 - 9,0 lb/gl), pH 9,0 e viscosidade Marsh (32 - 36 s); d) Anotação, em planilha específica, da velocidade de avanço da perfuração e todas as intercorrências observadas em campo.

Com o intuito de garantir a circulação do fluido ou lama, escavou-se um tanque com dimensões 2 m X 2 m X 1 m (Figura 14C) e uma canaleta que possibilitou o percurso desse

material ao poço (Figura 14D). A seguir, procedeu-se ao preenchimento do espaço anelar com cimento e água.

Para preparo da calda, adotou-se a proporção de 33 L de água para 50 kg de cimento, adicionando 2% de bentonita à água, antes de batê-la. A aplicação da calda ocorreu por gravidade, a partir de tubos auxiliares instalados até a base do tubo de boca. Durante o processo, duas amostras foram coletadas, uma no início da cimentação e a outra, no final, possívelvê-las na Figura 14E.

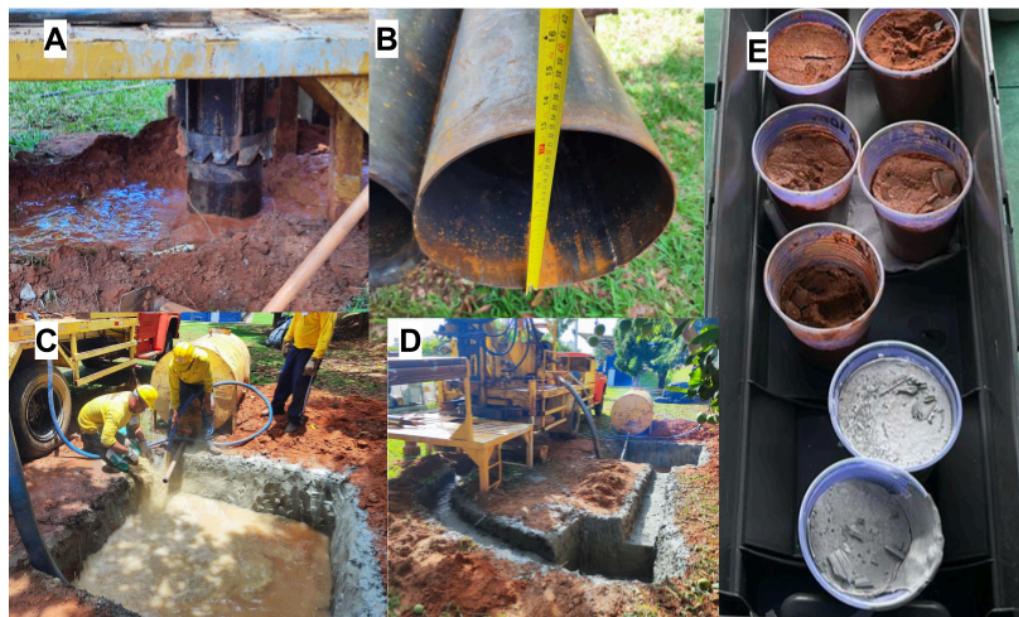


Figura 14: Etapas da execução da sondagem S1. A) Detalhe da perfuração, equipamento e circulação da lama; B) Tubo de boca; C) Tanque de lama; D) Detalhe da canaleta para circulação da lama; E) Amostras de calda coletadas no início e no final da cimentação do tubo de boca.

Durante a perfuração do furo-guia, a amostragem contínua de testemunhos deu-se a partir de 17 m de profundidade, com auxílio de barrilete, diâmetro nominal de 5" (Figuras 15A, 15C e 15E). Salienta-se que durante a execução e instalação do tubo de boca, de 0 a 12 m, esse tipo de coleta não foi executado, sendo extraídas amostras de calha, a cada metro (Figuras 16B e 16C).

Os testemunhos foram lavados com água corrente, dispostos em lonas de plástico para a secagem ao ar livre. A seguir os mesmos foram descritos para identificação e caracterização litológica (tipo de rocha, granulometria, cor, textura, grau de seleção e esfericidade, mineralogia, ocorrência de cimentação, entre outros - Figuras 16A a 16C).

As amostras de calha foram acondicionadas em sacos plásticos (Figura 16D) e os testemunhos em caixas plásticas e tampas, com dimensões de 1,03 m de comprimento x 0,18 m de altura x 0,19 m de largura. Tanto os sacos como as caixas foram devidamente

identificados, sendo registradas as seguintes informações: ID da sondagem, intervalo amostrado, indicação de topo e base, entre outros (Figuras 15B, 15D e 16D).



Figura 15: Etapas de coleta e armazenamento dos testemunhos da sondagem S1. A, C e E) Extração dos testemunhos do barrilete; B e D) Armazenamento dos testemunhos em caixas plásticas.



Figura 16: Descrição das amostras de calha. A) Detalhe da descrição em campo. B e C) Materiais utilizados: lupa, canivete, escala, ácido clorídrico (HCl). D) Detalhe do armazenamento das amostras de calha em sacos plásticos, devidamente identificadas.

5.5. Modelagem Geológica Tridimensional Implícita

A modelagem geológica implícita tridimensional do Grupo Bauru na área de estudo foi executada em quatro etapas principais listadas a seguir e ilustradas no fluxograma da Figura 17: 1) compilação e preparação e importação dos dados (topografia e litologia); 2) validação dos dados; 3) geração da superfície topográfica; 4) modelo geológico. Cada etapa será descrita nos itens a seguir.

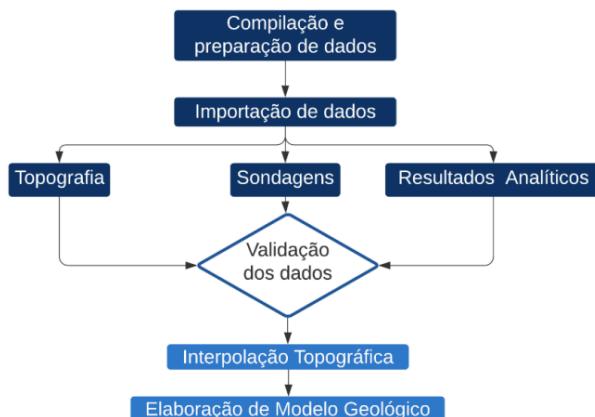


Figura 17: Fluxograma de atividades.

5.5.1. Compilação, preparação e importação dos dados

Antes de iniciar o manuseio do Leapfrog Works ®, foi necessária a compilação e preparação de dados topográficos e litológicos do projeto para entrada no programa.

Em relação a topografia, os dados altimétricos foram obtidos através das cotas do terreno de 59 poços fornecidos pelo DAE (42 poços de abastecimento público e 17 particulares), citados no item 5.1, além do furo de sondagem S1. A Tabela 5 mostra o modelo de entrada dos dados de topografia, denominado planilha “collar”, na interface do programa. Ela é composta pelos seguintes atributos: i) *Hole ID* (Nome do ponto); ii) coordenadas X (Leste, em m) e Y (Norte, em m); iii) $Z_{terreno}$ (cota do terreno, em m) e; iv) Profundidade (do poço, em m). As coordenadas desses poços e de S1 estão projetadas no Sistema Universal Transversa de Mercator (UTM) e o *datum* adotado foi o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000), Zona 22S.

Tabela 5: Modelo de entrada dos dados de topografia (Tabela “collar”).

Hole ID	X	Y	Zterreno	Profundidade
---------	---	---	----------	--------------

Já para a litologia, foram utilizadas as informações que foram adquiridas pela reinterpretarão dos perfis de 42 poços operados pelo DAE, além do furo de sondagem S1.

Os dados supracitados foram compilados em uma única planilha, cujos resultados serão discutidos no item 6.1

A Tabela 6 apresenta como a litologia foi inserida no programa:i) “*Hole ID*” (nome do ponto); ii) “*From*” (profundidade inicial da unidade, a partir do topo, em metros); iii)“*To*” (profundidade final da unidade, a partir do topo, em metros); iv) “*Lith*” (unidade litoestratigráfica). Destaca-se a adoção da terminologia proposta por Soares et al (1980).

Tabela 6: Modelo de entrada dos dados de litologia (Tabela “*lith*”).

Hole ID	From	To	Lith
---------	------	----	------

5.5.3. Validação dos dados

Após a importação das informações de topografia (planilha “*collar*”) e de litologia (planilha “*lith*”) a validação desses arquivos foi realizada, na interface do próprio programa, com o auxílio da ferramenta “*Fix Errors*”. Esta ferramenta identifica erros no banco de dados, como sobreposição de informações, discordâncias, ausência de valores ou valores inválidos. Caso os erros não sejam revisados, a execução de qualquer modelagem não é permitida.

5.5.4. Geração da superfície topográfica

Após corrigir todos erros, o próximo passo consiste na criação da superfície topográfica. A inserção dos dados topográficos no software gera uma nuvem de pontos que é interpolada, resultando em uma superfície com as cotas altimétricas, expressas em metros (Figura 18).

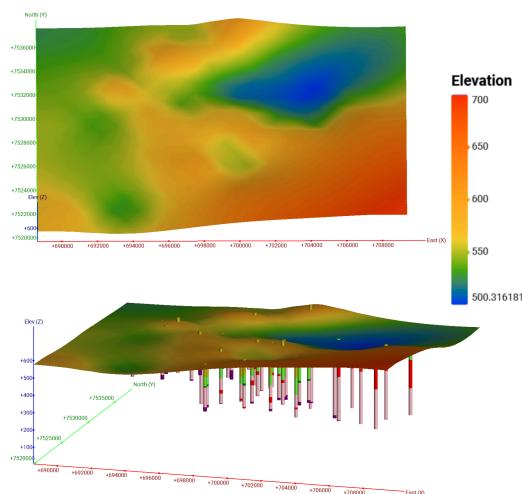


Figura 18: Superfície topográfica da área urbana de Bauru gerada a partir da interpolação dos pontos. A imagem superior é a vista na planta e a inferior mostra os poços utilizados.

Por fim adicionou-se a imagem de satélite da área de estudo, referente ao ano de 2023, conforme apresentado na Figura 19. As cotas topográficas dos poços variam entre 624 e 501 m, contudo são comuns valores fora deste intervalo, principalmente na porção sudeste do modelo (Figura 18), atribuídos ao efeito de borda. Nesse local há carência de poços cadastrados e a cota do terreno chega a atingir 700 m.

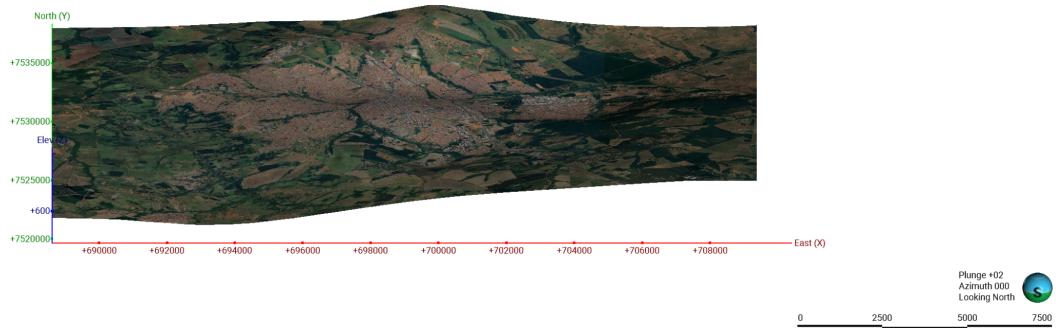


Figura 19: Superfície topográfica da área urbana de Bauru com a imagem de satélite.

5.5.5. Elaboração do modelo geológico

A partir do cumprimento das etapas descritas nos itens anteriores, procedeu-se à elaboração do modelo geológico tridimensional implícito propriamente dito. A localização e a profundidade das unidades litoestratigráficas identificadas neste Trabalho de Formatura (TF) foram interpoladas para definir as superfícies de contato, sendo, portanto, habilitados os dados que constam na tabela “*lith*” (Figura 20).

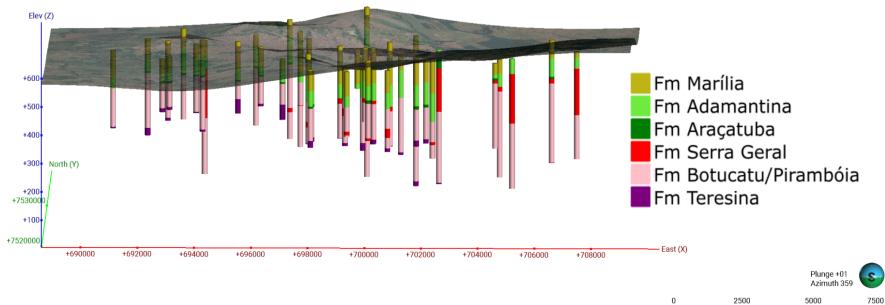


Figura 20: Sondagens com informações de litologia.

Para modelar a estratigrafia, utilizou-se o algoritmo do programa Leapfrog Works ® denominado Fast RBF™, que possui variações aplicadas ao contexto de “depósito”, “erosão”, “veio”, “intrusão” entre outros. Após inúmeros testes, o modelo geológico mais representativo foi aquele em que as superfícies das unidades foram criadas da mais jovem para a mais antiga. Além disso, foi aquele que possui a variação “depósito” para as Formações Marília, Adamantina, Botucatu, Piramboia e Teresina ; “erosão” para a Formação Araçatuba e “veio” para a Formação Serra Geral. As variações do Fast RBF™ depósito e

erosão são utilizadas para camadas sedimentares, sub-horizontais ou superfícies erosivas. Já a variação “veios” é mais apropriada para litologias discordantes com geometrias específicas como o próprio diabásio da unidade modelada. Tais escolhas se deram a partir do conhecimento prévio da disposição das camadas geológicas na área como também, por meio de muitas simulações para validação do modelo.

Uma vez criadas as superfícies de contato geológico, efetuou-se a validação das mesmas mediante a correspondência de tais superfícies com os intervalos descritos nos poços e na sondagem S1. Com a validação dos contatos, foram gerados os volumes finais, os quais são apresentados no item 6.4.

Vale destacar que como o foco é a modelagem do Grupo Bauru, o qual recobre sucessivamente toda a sequência de formações dos Grupos São Bento e Passa Dois sob discordância erosiva sem nenhum outro controle estrutural previamente conhecido, não foram considerados falhamentos na modelagem implícita.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Interpretação das perfilagens geofísicas em poços

A interpretação dos perfis geofísicos de 41 poços operados pelo DAE consistiu na análise das curvas de raios gama (RG), potencial espontâneo (SP), resistividade (DIR e SN) e o sônico (DT), sempre correlacionando-as com as suas respectivas descrições litológicas.

Na ocasião, dois focos foram considerados. O primeiro deles buscou definir as unidades lito-hidroestratigráficas do Grupo Bauru (e do Sistema Aquífero Bauru) em subsuperfície, enquanto o segundo teve como objetivo correlacionar os padrões das curvas dos perfis de raios gamas (RG) e potencial espontâneo (SP), de modo a inferir o ambiente deposicional dessas unidades.

6.1.1 Caracterização das unidades lito-hidroestratigráficas

Dos 17 poços selecionados, descritos no item 5.2, foi selecionado o UP53, situado na região central e pertencente às seções geológicas 2 (E - W) e 3 (SSW - NNE) (Figura 11), para demonstrar a reinterpretação da perfilagem geofísica e a análise lito-hidroestratigráfica. A Figura 21 ilustra a descrição litológica extraída do relatório técnico do poço e os perfis geofísicos, da esquerda para a direita: raios gama (RG), potencial espontâneo (SP), resistividade (DIR e SN) e o sônico (DT). De acordo com essa figura, a Formação Marília foi identificada, em subsuperfície, entre 0 e 110 m de profundidade. A análise dos perfis geofísicos da sucessão atribuída a essa unidade lito-hidroestratigráfica

indica a ocorrência de depósitos predominantemente arenosos, desde finos a grossos, com intercalações de material siltoso e lamítico.

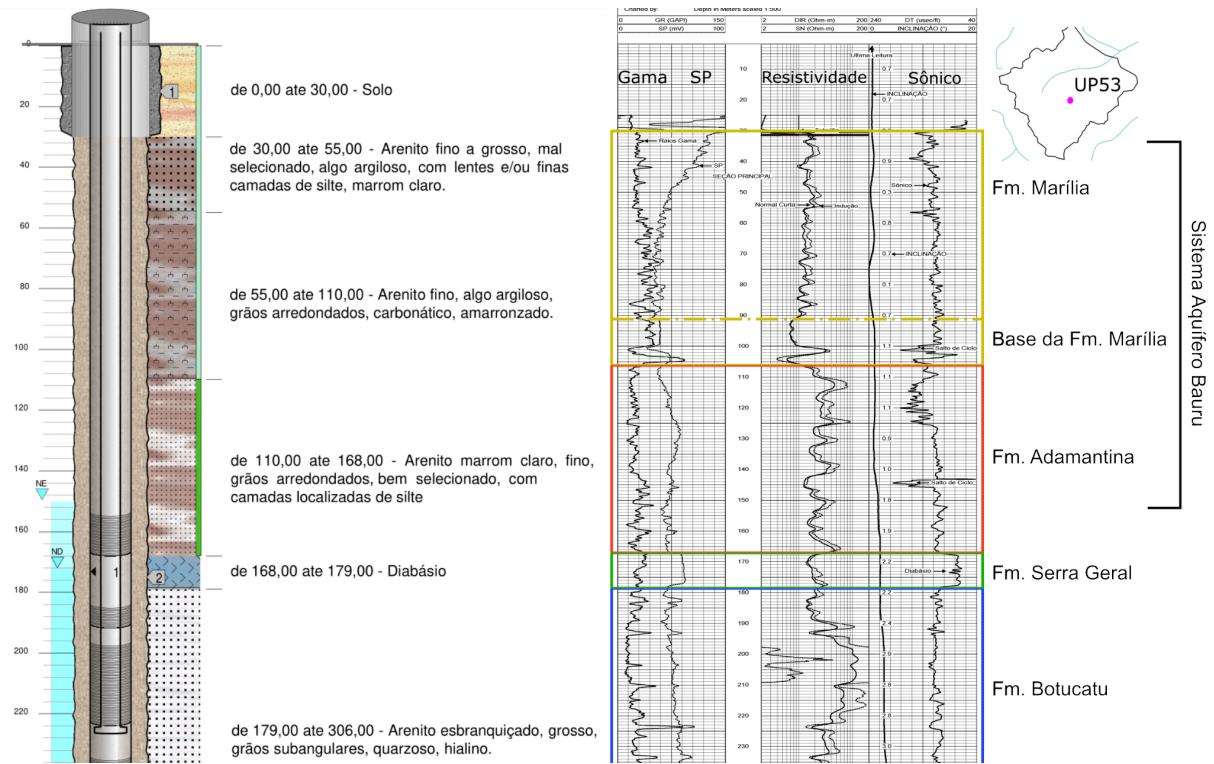


Figura 21: Reinterpretação das perfilagens geofísicas do poço UP53. Da esquerda para a direita: descrição litológica extraída do relatório técnico do poço, perfis de raios gama potencial espontâneo, resistividade e sônico. As linhas tracejadas em amarelo indicam a ocorrência da lente lamítica. Destaque para a linha de base de folhelho no perfil do potencial espontâneo abaixo da linha bege pontilhada. Fonte: DAE (2021).

A emissão de radiação gama varia desde ~20 a 90 API, aumentando em direção à base da Formação Marília. Por sua vez, o sinal de resistividade reflete o comportamento esperado para essa litologia, cujos valores oscilam entre ~4 e 37 Ohm.m. A partir de 91 m, há um aumento considerável no conteúdo de argila na unidade, com destaque para a linha de base de folhelho (Figura 21), observado pelo formato retilíneo e serrilhado das curvas do potencial espontâneo (SP) e aumento da radiação gama (pico em 90 API).

Entre 110 e 168 m, ocorrem as rochas da Formação Adamantina. Esta unidade apresenta valores mais baixos das curvas de raios gama (~13 a 50 API) e mais altos de resistividade (~13 a 90 Ohm.m), compatível com a descrição litológica, caracterizada por camadas de arenito e intercalações de siltitos. A Formação Araçatuba, unidade basal do Grupo Bauru na região, identificada por DAEE (2015), não foi observada no poço UP53.

O contato entre a Formação Adamantina e as rochas da Formação Serra Geral ocorre a 168 m, caracterizado pelo aumento nos valores de potencial espontâneo (~60 mV)

e de sônico ($\sim 70 \mu\text{S}/\text{m}$) e decréscimo nos de resistividade ($\sim 25 \text{ Ohm.m}$). Outra evidência que reforça a mudança de litologia é o formato dessas curvas, cilíndrico suave, com tendência retilínea.

Por sua vez, as rochas que compõem a Formação Botucatu surgem a partir de 179 m. Sua ocorrência pode ser explicada pelo aumento abrupto nos valores da resistividade, de 20 para 200 Ohm.m, bem como o decréscimo no sinal do sônico.

Além do UP53, o poço UP62 foi selecionado para ilustrar a reinterpretação da perfilagem geofísica e a análise conjunta dos dados lito-hidroestratigráficos, uma vez que alguns poços considerados neste TF também apresentam as mesmas características. Ao contrário de UP53, a Formação Serra Geral não foi identificada no UP62. Por outro lado, foi possível notar a ocorrência da Formação Araçatuba, que constitui a base do Grupo Bauru no local. A Figura 22 mostra a descrição litológica extraída e os perfis geofísicos, da esquerda para a direita: raios gama (RG), potencial espontâneo (SP), resistividade (DIR e SN) e o sônico (DT).

Os sinais geofísicos detectados entre 0 e 60 m de profundidade são bem característicos da Formação Marília, inclusive com valores de radiação gama desde 30 a 45 API. A partir de 60 m, verifica-se uma decréscimo na granulometria e aumento no conteúdo de argila em direção à base desta unidade, verificado pelo comportamento das curvas de RG (até 75 API) e de resistividade (9 Ohm.m) serrilhadas, indicando o contato transicional para a Formação Adamantina.

A partir dos 75 m, há queda no sinal de RG e um aumento tênuem nos valores de resistividade, o que indica que se trata da Formação Adamantina. Adicionalmente, nesta unidade ocorre um aumento gradual de sedimentos finos para a base.

Em 130 m, percebe-se uma camada de lamitos, com sinal gama igual a 75 API. As curvas de resistividades estão unidas e próximas a 8 Ohm.m, sendo possível notar a linha de base de folhelho (LBF) na curva de potencial espontâneo (SP). Isso leva à conclusão de que, possivelmente, se trata da Formação Araçatuba, base do Grupo Bauru no local.

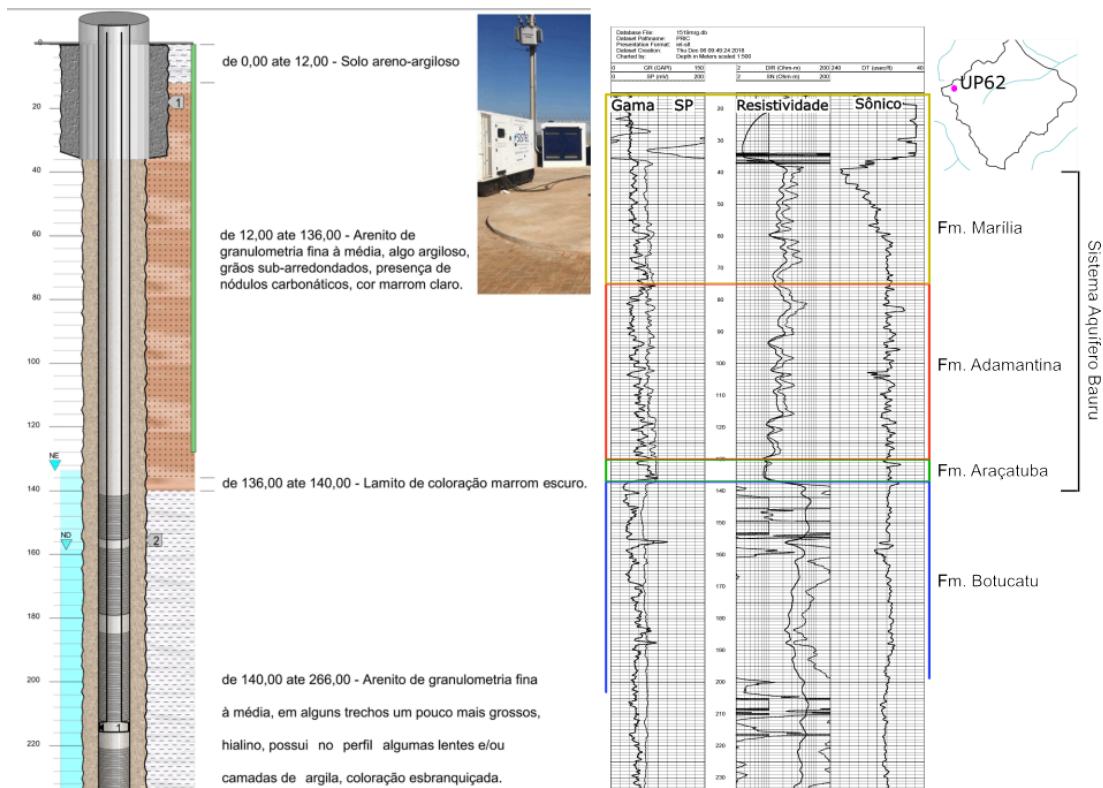


Figura 22: Reinterpretação das perfilagens geofísicas do poço UP62. Da esquerda para a direita: descrição litológica extraída do relatório técnico do poço, perfis de raios gama, potencial espontâneo, resistividade e sônico. Destaque para a linha de base de folhelho no perfil do potencial espontâneo. Fonte: DAE (2021).

Em 140 m, nota-se mudança de litologia, o que é corroborada pelas mudanças nos padrões das curvas de raios gama (~25 API) e resistividade (>200 Ohm.m), característicos da Formação Botucatu. Tais constatações confirmam que a base do Grupo Bauru foi atingida no local.

Os perfis geofísicos dos poços que integram as seções geológicas 1, 2 e 3 são apresentados nas Figuras 23 a 25. Seguindo o mesmo raciocínio da reinterpretação dos poços UP53 e UP62, todos os poços foram analisados com a finalidade de delimitar os contatos litoestratigráficos e que serão representados nas seções supracitadas, como também no modelo geológico.

Os contatos entre as unidades são representados por traços em cada perfil que constituem a separação litoestratigráfica do Grupo Bauru: a linha amarela indica a base da Formação Marília, a verde-clara a base da Formação Adamantina e a verde-escura, da Formação Araçatuba.

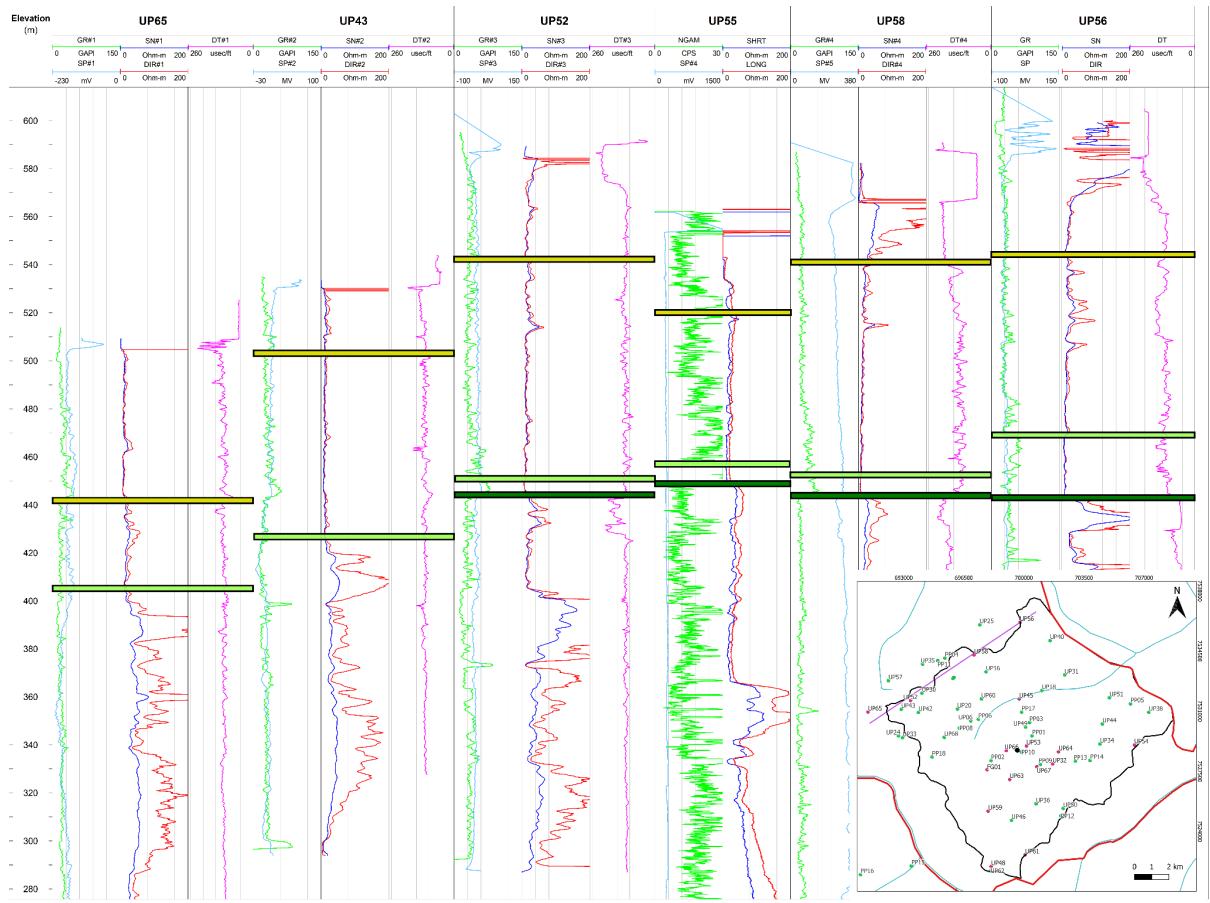


Figura 23: Perfis geofísicos integrados e alinhados dos poços que compõem a seção geológica 1. Destaque para os traços em cada perfil: a linha amarela indica a base da Formação Marília, verde-clara a base da Formação Adamantina e a verde-escura, a base da Formação Araçatuba.

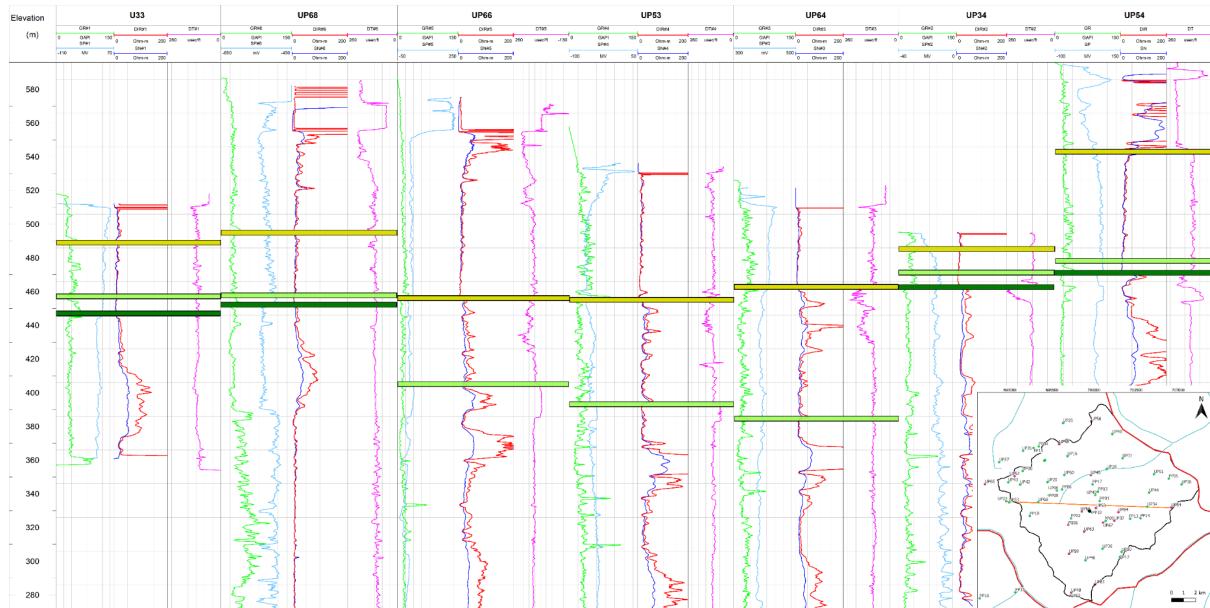


Figura 24: Perfis geofísicos integrados e alinhados dos poços que compõem a seção geológica 2. Destaque para os traços em cada perfil: a linha amarela indica a base da Formação Marília, a verde-clara a base da Formação Adamantina e a verde-escura, a base da Formação Araçatuba.

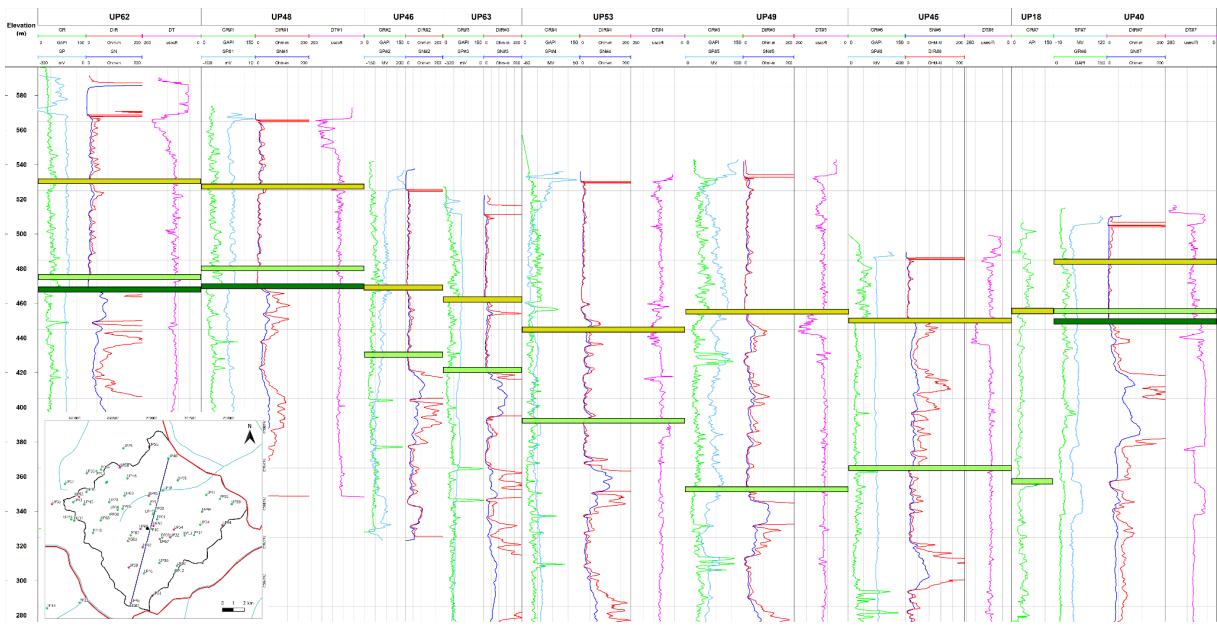


Figura 25: Perfis geofísicos integrados e alinhados dos poços que compõem a seção geológica 3. Destaque para os traços em cada perfil: a linha amarela indica a base da Formação Marília, a verde-clara a base da Formação Adamantina e a verde-escura, a base da Formação Araçatuba.

É possível notar nessas figuras, 23, 24 e 25, que a Formação Araçatuba não apresenta uma continuidade lateral e não está presente em todos os poços da região. Além disso, a linha mais inferior (verde-clara ou verde-escura), indica, neste caso, a base do Grupo Bauru na área de estudo.

6.1.2 Caracterização dos ambientes deposicionais

Conforme fundamentado no item 4.3, os padrões das curvas de potencial espontâneo (SP) e raios Gama (RG) podem ser utilizados como ferramentas importantes na interpretação de ambientes deposicionais. Segundo Nery (2013), essa relação só é possível caso as curvas estejam relacionadas ao conteúdo de argila. A análise das perfilagens SP e RG dos poços UP53 e UP52 (Figura 26), indica que as curvas não possuem o mesmo comportamento. Segundo Chaves (1988), como existem diversos fatores que podem influenciar a configuração da curva de potencial espontâneo (p.e. condições do poço, nível d'água, salinidade da lama, cabos e tubos enterrados), a correlação entre os padrões das curvas e a proposição dos ambientes de deposição das unidades do Grupo Bauru foram realizadas de forma mais fidedigna com as perfilagens RG.

Conforme a Figura 26, a geometria das curvas dos perfis de raios gama em ambos os poços, da sucessão correspondente à Formação Marília, indica um padrão funil serrilhado, mostra a prevalência de depósitos progressivamente mais arenosos em direção ao topo desta unidade (*coarsening upward*). O comportamento dessas curvas está de

acordo com o relatado por Paula e Silva et al. (2005) sobre o perfil de referência da Formação Marília extraído de poço perfurado na cidade de Álvaro de Carvalho (SP). Segundo Paula e Silva (2003) este formato funil caracteriza sistemas progradantes o que confirma o ambiente deposicional da unidade, o qual é definido por Menegazzo (2016) como depósitos de leques aluviais.

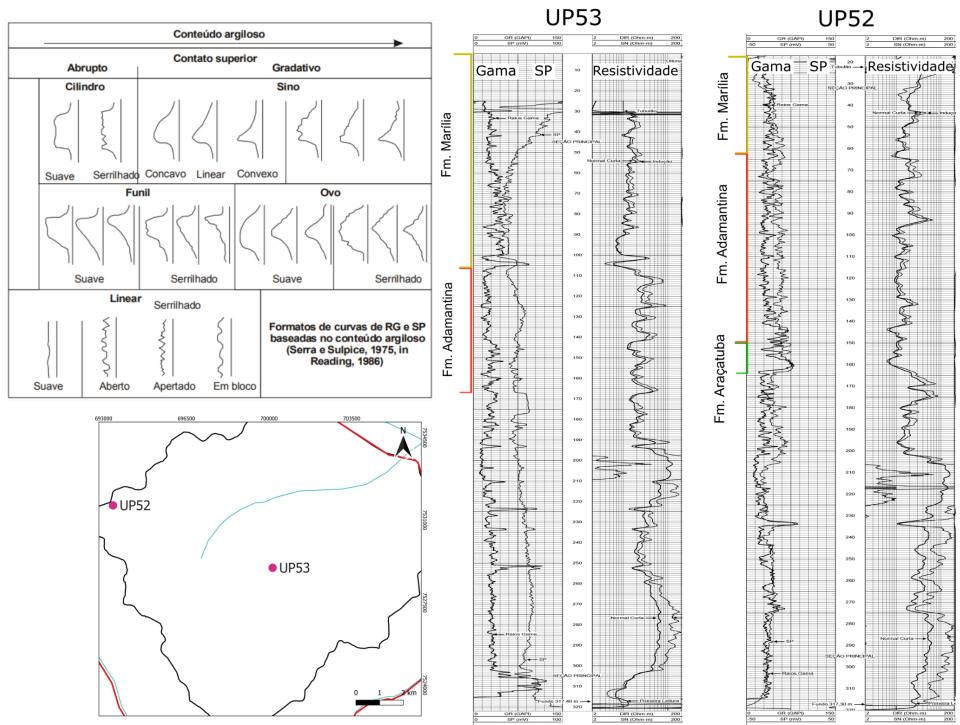


Figura 26: Perfilagens geofísicas dos poços UP53 e UP52, com os padrões das curvas de RG e a localização dos poços na área de estudo. Fonte: DAE (2021), Paula e Silva (2003).

Ainda na Figura 26, ao analisar o formato das curvas de RG no intervalo definido como Formação Adamantina em ambos os poços, observa-se um padrão sutil cilíndrico a funil também serrilhado. Tal comportamento é sugestivo de paleoambientes caracterizados por sistemas fluviais com variações de energia, segundo Nery (2013), o padrão cilíndrico é característico de fácies sujeitas a transgressões e regressões. Logo, tal hipótese é sustentada, por exemplo, por Paula e Silva et al. (2005) e Menegazzo (2016) que caracterizam o paleoambiente dessa unidade como um sistema fluvial meandrante com depósitos de planície de inundação.

Por fim, as curvas que representam a Formação Araçatuba no poço UP52, tanto a de SP (linha de base de folhelho) quanto a de RG, apresentam padrão linear serrilhado. Esse padrão indica sequências de lamitos intercaladas com arenitos e siltitos, depósitos de planície de inundação, folhelhos, carvão e áreas de pântano (Paula e Silva, 2003), o que valida o paleoambiente dessa unidade. Para essa unidade há um maior consenso das

propostas de paleoambiente lacustre. Fernandes (1998) até utiliza o termo “pantanal” para se referir a essa sedimentação em áreas alagadiças e Batezelli et al. (2003) defende o ambiente lacustre em processo de assoreamento.

Ademais, por meio da análise integrada das perfilagens geofísicas e das descrições litológicas, foi possível inferir os tipos de contatos entre as unidades descritas neste item. Entre as formações Marília e Adamantina predomina uma transição gradacional, a qual é evidenciada pelo aumento gradual de argila em direção à base da Formação Marília (*fining upward*), o que é considerado uma transição de ambiente deposicional dentro de um sistema fluvial. Por sua vez, entre as formações Adamantina e Araçatuba, nota-se um contato tanto abrupto quanto gradacional. A mudança da geometria cilíndrica (Adamantina) para a linear (Araçatuba) indica uma granodecrescência acentuada, ou seja, um contato abrupto. Já a passagem do formato funil (Adamantina) ao linear (Araçatuba) sugere um contato gradacional, o qual aumenta progressivamente o teor de argila.

6.2 Seções geológicas da área urbana de Bauru

Com base nas reinterpretações das perfilagens geofísicas supracitadas, apresentadas no item 6.1.1, três seções geológicas foram elaboradas para melhor compreensão sobre a interrelação entre as unidades do Grupo Bauru e, por conseguinte, do SAB na área de estudo (Figuras 27 a 29). Essas seções representam a distribuição em subsuperfície do Grupo Bauru, como também as unidades hidroestratigráficas do SAB: Marília, Adamantina e Araçatuba.

A Formação Marília ocorre no topo da sequência e está presente em todos os poços das seções. Essa unidade é descrita como arenitos finos a grossos, mal selecionados, subarredondados, avermelhados, intercalados a lentes ou camadas siltosas e lamíticas. Destaca-se também a presença de intercalações carbonáticas, sob a forma de cimento ou calcretes. Abaixo da unidade Marília, a Formação/Aquífero Adamantina também apresenta ampla distribuição nos poços analisados. Ela é caracterizada por arenitos finos de coloração marrom claro a cinza, grãos arredondados, bem selecionados, com lentes localizadas de silte, e uma cimentação carbonática leve. Em algumas localidades, é encontrada Formação/Aquitarde Araçatuba, composta por lamitos, desde marrom avermelhados e cinza esverdeados.

A seção geológica 1, com orientação SW-NE, está posicionada a noroeste da área urbana de Bauru e é composta pelos seguintes poços: UP65, UP43, UP52, UP55, UP58 e UP56 (Figura 27). Nesta seção, a espessura da Formação Marília varia de 45 m (UP55) a 98 m (UP65), enquanto a da Formação Adamantina oscila entre 37 m (UP65) e 89 m (UP58). Além disso, nota-se que dentre as três, é a seção com maior continuidade lateral de lamitos

da Formação Araçatuba, ultrapassando 20 m de espessura no poço UP56. Os contatos entre as Formações Marília e Adamantina é gradacional e o mesmo se aplica entre as Formações Adamantina e Araçatuba.

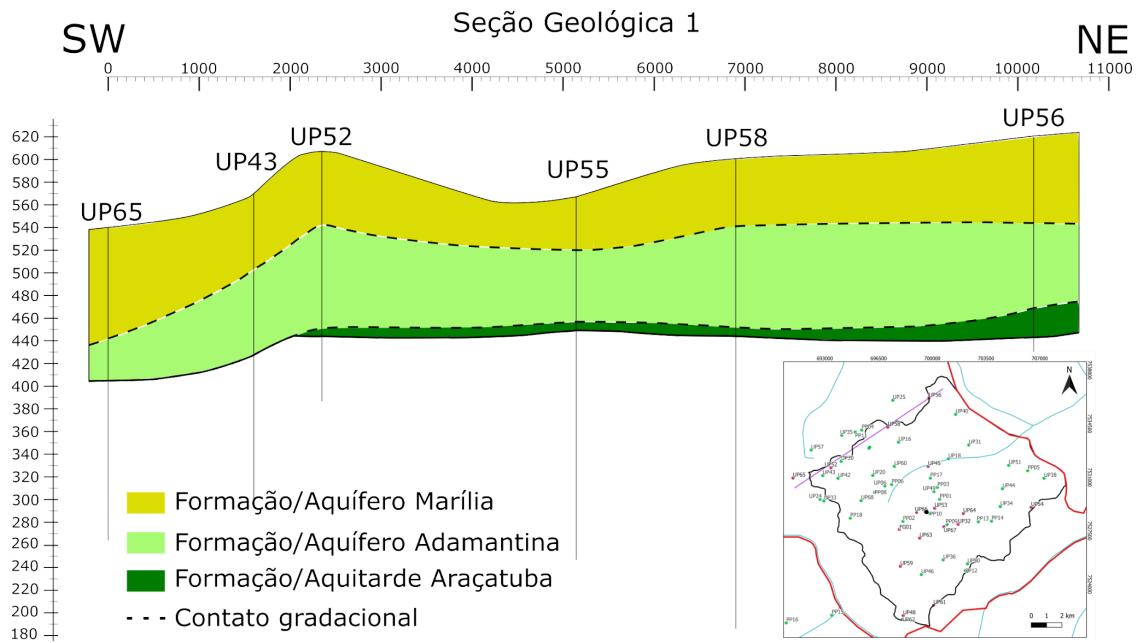


Figura 27: Seção Geológica 1 e as relações entre as Formações Marília, Adamantina e Araçatuba, na direção SW-NW da área urbana de Bauru.

Por sua vez, a seção 2 cruza a cidade na direção E-W, passando pelos poços UP33, UP68, UP66, UP53, UP64, UP34 e UP54 (Figura 28). A espessura da Formação Marília varia de 39 m (UP 34) a 133 m (UP66) e está assentada sobre a Formação Adamantina por meio de contato gradacional. Analogamente, a espessura da Formação Adamantina varia, aproximadamente, de 15 m (UP34) a 89 m (UP64), assentando-se sobre a Formação Araçatuba por meio de contato abrupto. Destaca-se que a Formação Araçatuba não foi observada no centro da zona urbana de Bauru, somente nas porções leste e oeste, com espessura média de 7,8 m.

A seção 3 apresenta direção SSW-NNE e é representada pelos poços UP62, UP48, UP46, UP63, UP53, UP49, UP45, UP18 e UP40 (Figura 29). É possível observar que a espessura da Formação Marília varia entre 50 m (UP40) e 102 m (UP49). A Formação Adamantina possui espessura mínima de 28 m (UP40) e máxima de 104 m (UP18) e está assentada sobre a Formação Araçatuba por meio de contato abrupto. Nesta seção, a Formação Araçatuba é quase ausente, restrita somente às porções norte e sul do território e sua espessura varia de 7 m (UP62 e UP 40) a 10 m (UP48).

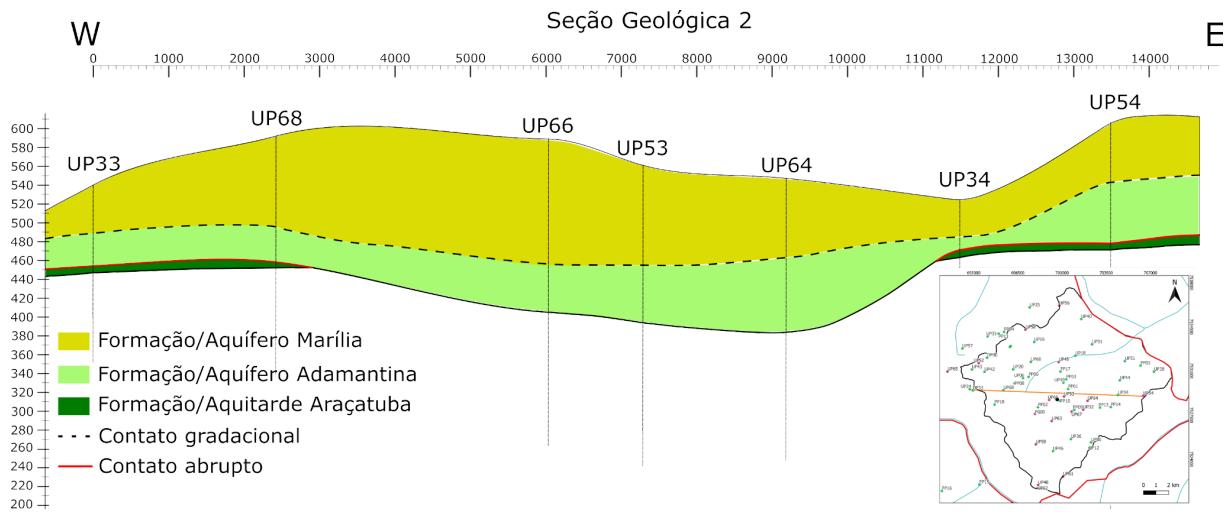


Figura 28: Seção Geológica 2 e as relações entre as Formações Marília, Adamantina e Araçatuba na direção E-W da área urbana de Bauru.

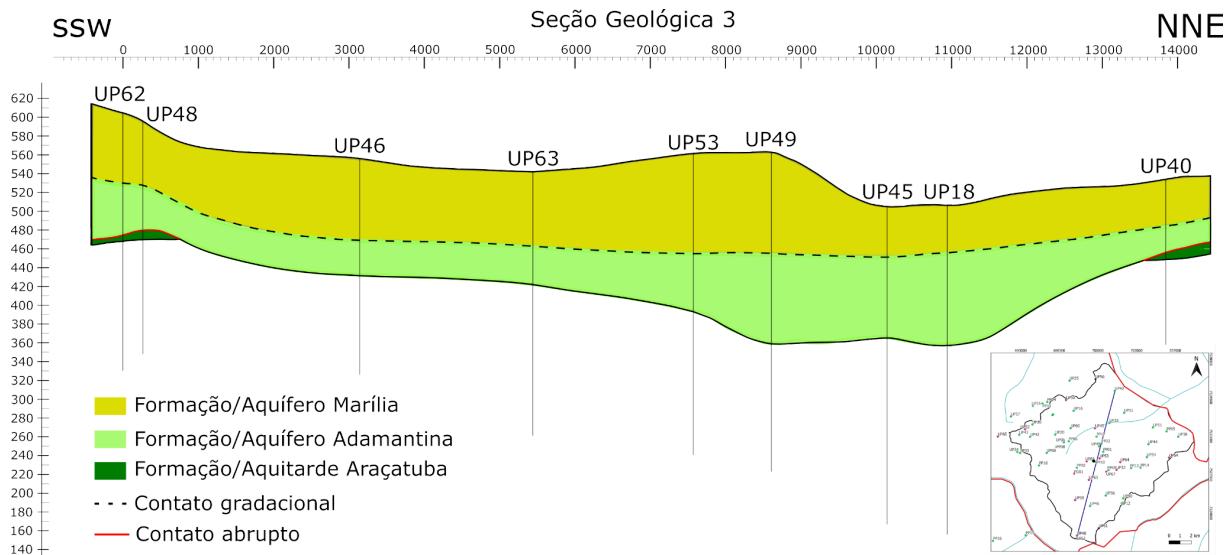


Figura 29: Seção Geológica 3 e as relações entre as Formações Marília, Adamantina e Araçatuba na direção SSW-NNE da área urbana de Bauru.

De modo geral, as descrições litológicas encontradas nos poços estão de acordo com os trabalhos previamente publicados sobre as formações Marília, Adamantina e Araçatuba.

Ao confrontar os resultados obtidos neste Trabalho de Formatura com aqueles apresentados em estudos anteriores na cidade de Bauru, é possível afirmar que as espessuras do Grupo Bauru na área urbana são maiores. Paula e Silva & Cavaguti (1994) apontaram que em Bauru a maior espessura preservada não ultrapassava 190 m nas cotas topográficas mais elevadas. Vale destacar que, até o momento, não há trabalhos que

delimitam detalhadamente os compartimentos do Grupo Bauru para compreender, de fato, sua real espessura.

6.3 Estratigrafia do Grupo Bauru na USP - Campus Bauru

6.3.1 Descrição dos testemunhos do furo de sondagem

A Tabela 7 mostra a descrição das amostras de calha, coletadas entre 0 e 12 m de profundidade, com destaque para cor e a unidade estratigráfica identificada.

Tabela 7: Descrição das amostras de calha coletadas entre 0 e 12 m de profundidade.

TOPO (m)	BASE (m)	DESCRÍÇÃO	COR	UNIDADE
0	3	Areia fina a grossa, moderadamente selecionada, sub-angulosa, grãos com menos de 1 mm, baixa esfericidade, composta por quartzo (95%), biotita (5%), sem cimentação carbonática.	Marrom alaranjado	Solo
3	5	Areia média a grossa bem selecionada, sub arredondada, grãos de 0,25 a 1,2 mm, baixa esfericidade, composta por quartzo (95%) e biotita (5%), sem cimentação carbonática.	Marrom avermelhado	Solo
5	7	Areia fina a grossa, moderadamente selecionada, sub-angulosa, grãos com menos de 1 mm, baixa esfericidade, composta por quartzo (95%), biotita (5%), sem cimentação carbonática.	Marrom escuro avermelhado	Solo
7	8	Areia muito fina a média, bem selecionada, alto grau de esfericidade e arredondamento dos grãos. Presença de concreções carbonáticas.	Marrom escuro	Solo
8	9	Areia quartzosa, muito fina a média, bem selecionada, alta esfericidade e grau de arredondamento, tamanho dos grãos entre 0,1 e 0,7 mm. Presença de seixos de ~20 mm, angulosos.	Vermelho amarronzado e seixos acinzentados	Solo
9	12	Areia siltosa, silte a areia média, mal selecionada, alta esfericidade e grau de arredondamento. Presença de seixos quartzosos de até 4 cm.	Vermelho amarronzado	Solo

Dos 12 aos 16 m não foi possível recuperar as amostras, portanto o início das descrições dos testemunhos ocorreu em 17 m. Dificuldades operacionais impediram a obtenção de uma melhor taxa de recuperação, que alcançou índice de 54,8% para o intervalo total amostrado, equivalente a 137,65 m. A Tabela 8 apresenta a descrição litológica sucinta desses materiais.

Tabela 8: Descrição sucinta dos testemunhos da sondagem S1, coletados entre 17 a 137 m de profundidade.

TOPO (m)	BASE (m)	DESCRÍÇÃO	COR	UNIDADE	IMAGENS
17	43,5	Arenito siltoso, pouco alterado, moderadamente selecionado, composto por quartzo (60%), argilominerais (20%) e carbonatos (20%). Presença de pouca cimentação carbonática e algumas intercalações de lentes carbonáticas (até 10 cm de espessura).	Marrom avermelhado com lentes carbonáticas esbranquiçadas	Fm. Marília	

43,5	56	Arenito fino, grãos subangulosos, com alguns clastos carbonáticos (mm a cm). Observa-se maior cimentação carbonática, alta efervescência. Mineralogia: quartzo, carbonatos, minerais maficos. Intercalações de lentes carbonáticas (até 30 cm de espessura).	Marrom avermelhado/bege escuro com lentes carbonáticas esbranquiçadas	Fm. Marília	
56	80,78	Arenito conglomerático com matriz sustentada por grãos, clastos milimétricos (até 0,5 cm) com carbonatos escuros. Matriz: arenito fino, bastante agregado, cimentação carbonática, alta efervescência ao HCl. Mineralogia: quartzo, carbonatos, minerais maficos.	Marrom alaranjado	Fm. Marília	
80,78	84,2	Calcrete, com grânulos carbonáticos de formato e tamanhos variados, alguns em formato de olho (sigmoidal).	Bege/branco	Fm. Marília	
84,2	110	Arenito siltoso com textura aveludada, subarredondado, bem selecionado, pouca cimentação carbonática, mais siltoso e cimentado na base. Observam-se intercalações de um arenito fino branco (até 15 cm).	Marrom avermelhado/Branco	Fm. Marília	
110	120	Argila siltosa (sem efervescência) com clastos carbonáticos milimétricos (1-10 mm) e outros maiores que podem ser fósseis retrabalhados (5-30 mm). Esses possíveis fósseis estão em matriz silto-argilosa e possuem diversos tamanhos e formas.	Marrom avermelhado	Fm. Marília	
120	137,45	Não houve recuperação de testemunhos da Fm Adamantina, pois a areia estava presente na lama, em grande quantidade.			
137,45	137,65	Areia muito fina a fina, com grãos bem arredondados, pouca efervescência carbonática entre os grãos.	Bege/Marrom	Fm. Adamantina	

Diante das informações apresentadas nas Tabelas 4 e 5, nota-se que a Formação Marília (porção sã) ocorre entre 17 e 120 m e está depositada sobre os sedimentos da Formação Adamantina. O furo guia foi inicialmente projetado até 120 m, uma vez que

esperava-se que a base da Formação Adamantina em subsuperfície fosse alcançada a esta profundidade, com base em estudos prévios sobre o Grupo Bauru na porção central da cidade de Bauru (Paula e Silva & Cavaguti, 1994; DAEE, 2015).

Entretanto, dada à ampla espessura da primeira unidade litoestratigráfica e aos custos financeiros envolvidos neste serviço, optou-se por encerrar as atividades em 137 m de profundidade, portanto, no topo da Formação Adamantina. De qualquer forma, a espessura da Formação Marília nesta localidade confirma aquilo que foi apresentado nos itens 6.1 e 6.2. As informações obtidas a partir da descrição dos testemunhos de S1, aliados à reinterpretação das perfilagens geofísicas dos poços, e elaboração das seções geológicas (1, 2 e 3), permitem concluir que a espessura desta unidade é muito maior do que apontada por outros trabalhos efetuados na cidade de Bauru (DAEE, 2015; Simonato et al., 2016), cujo valor era inferior a 30 m.

6.3.2 Modelo conceitual

A partir da descrição dos testemunhos do furo de sondagem (S1), um modelo lito-hidroestratigráfico conceitual foi elaborado para a área do Centro Esportivo da USP - Campus Bauru. No entanto, como S1 alcançou 137 m de profundidade, adotou-se também a interpretação do poço UP53, mais próximo, com o intuito de representar as unidades subjacentes, garantindo maior confiabilidade e representatividade no modelo. A Figura 30 ilustra o modelo lito-hidroestratigráfico conceitual concebido da área.

De acordo com o modelo conceitual proposto, observa-se que a Formação Marília é a mais heterogênea, representada por arenitos com lentes lamíticas e carbonáticas e até calcretes. Por meio dos testemunhos, foi possível confirmar que a porção basal desta unidade é constituída por lamitos (camada de 10 m), os quais indicam a transição gradacional para a Formação Adamantina, a qual também apresenta lentes silto-argilosas mas em menores proporções.

Neste local, a respeito da base do Grupo Bauru, não se sabe certamente se ela é composta pela Formação Araçatuba, no entanto, com base nas análises das perfilagens geofísicas do item 6.1, espera-se encontrar uma porção lamítica. O mesmo ocorre em relação às formações Serra Geral e Botucatu, através da interpretação do poço UP53, foi decidido compor o modelo com elas.

S1 no Centro Esportivo da USP-Bauru

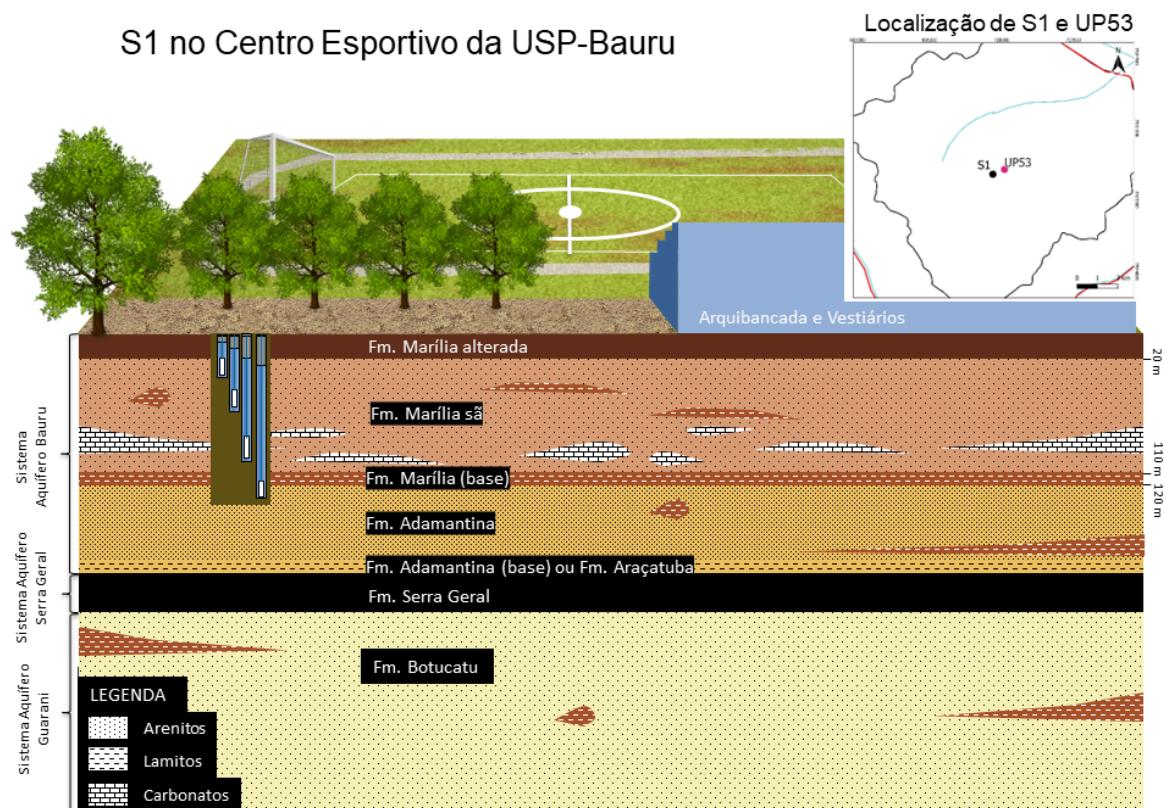


Figura 30: Modelo lito-hidroestratigráfico conceitual da área abrangida pelo Centro Esportivo da USP - *Campus Bauru*. Destaque para as unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru encontradas até 137 m de profundidade.

6.4. Modelo geológico tridimensional implícito

A modelagem geológica tridimensional implícita foi realizada com base na reinterpretação dos perfis de 42 poços operados pelo DAE, além do furo de sondagem S1, totalizando informações litológicas de 43 poços. Após a criação das superfícies de contatos, etapa descrita no item 5.5, os volumes finais de cada unidade litoestratigráfica foram criados, da mais recente à mais antiga: Grupo Bauru (formações Marília, Adamantina e Araçatuba), Grupo São Bento (formações Serra Geral, Botucatu e Piramboia) e, por fim, a Formação Teresina (Figura 31).

Vale destacar que, o Anexo II contem o link do vídeo completo da modelagem geológica, passo a passo realizado no programa Leapfrog Works®

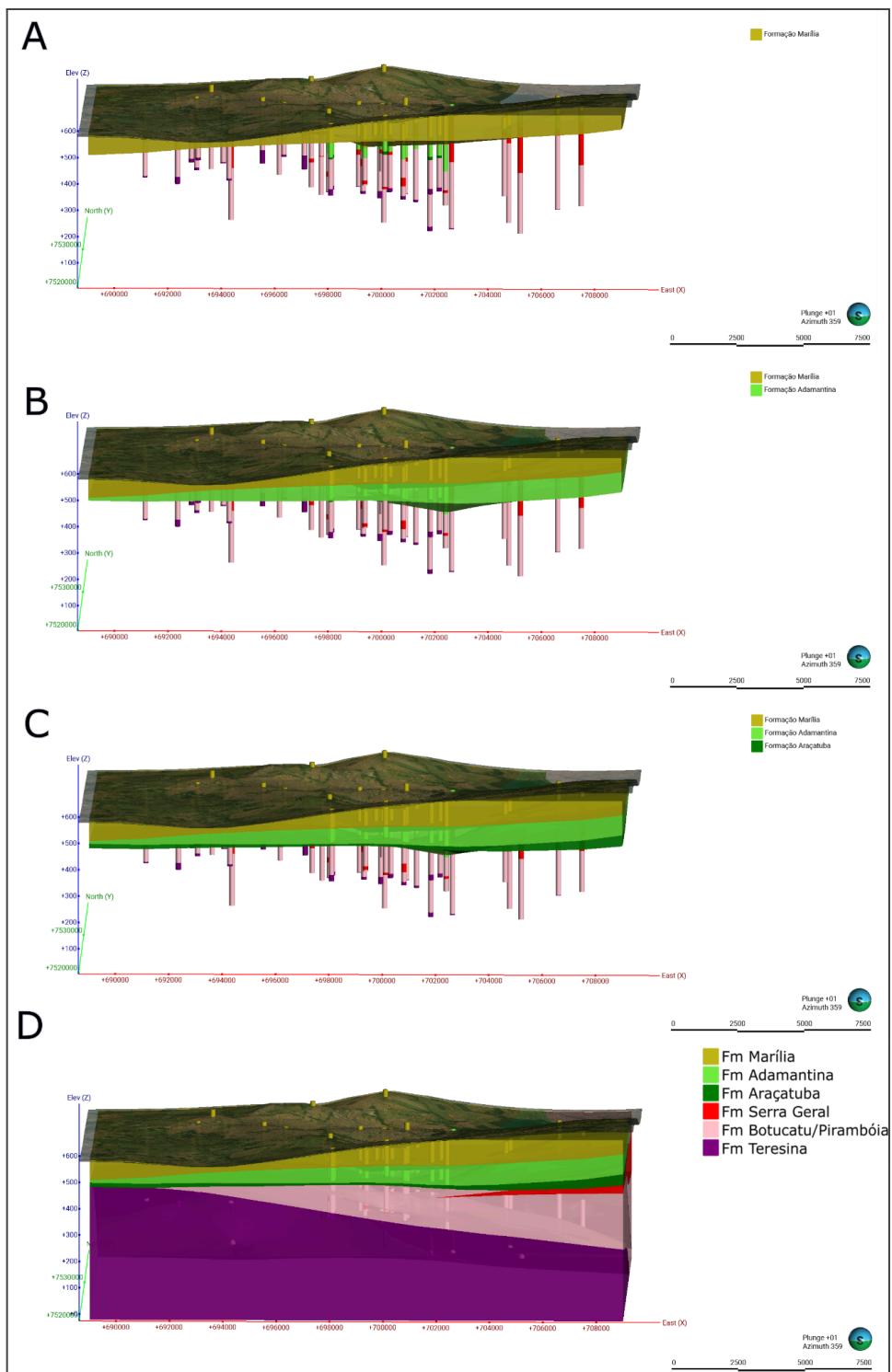


Figura 31: Volumes gerados, adicionando em A) Formação Marília; B) Formação Adamantina; C) Formação Araçatuba; D) Formação Serra Geral, as unidades do SAG (Botucatu e Piramboia) e a Formação Teresina.

A partir do modelo, observa-se que a Formação Marília está presente entre as cotas 624 e 442 m e possui espessura variando entre 22 m (UP38) e 150 m (UP67). Já a Formação Adamantina varia de 14 m (UP34) a 102 m (UP49) de espessura. Por fim, a Formação Araçatuba, apresenta desde 5 m (UP06) a 26 m (UP56) de espessura.

Posterior à elaboração do modelo geológico, um *grid* de elementos finitos foi criado com intuito de recortar o modelo geológico para os limites do domínio estudado. Ele possui as mesmas dimensões da área de estudo, onde o limite superior é dado pela topografia e inferior, na cota fixa de 350 m, com 50 camadas regulares de 5 a 2,5 metros de espessura. O resultado final é ilustrado na Figura 32.

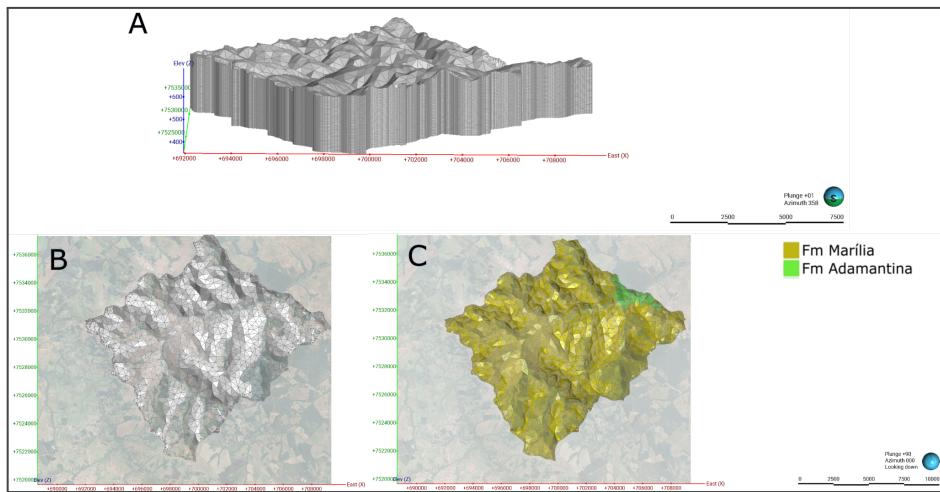


Figura 32: Grid adicionado sobre o modelo geológico para delimitação da área da área de estudo. A) Vista frontal; B) Vista em planta; e C) Vista em planta com as unidades aflorantes.

De modo geral, conforme modelo geológico, nota-se uma porção aflorante da Formação Adamantina na região nordeste da área de estudo. Além disso, na mesma região, diabásios de até 200 m de espessura da Formação Serra Geral, foram descritos nos poucos poços da região. Há uma relação entre ambas as litologias e o controle estrutural da área, visto que, locais em que houve acúmulo de espessas camadas de diabásios correspondem aos blocos deprimidos pelos falhamentos verticais reativados.

Esse tectonismo foi responsável pelo soerguimento do Grupo São Bento e posterior à erosão pré-Bauru que agiu sob as diversas formações (Paula e Silva & Cavaguti, 1994). Isso é confirmado também pela disposição da Formação Teresina, com mergulho abrupto à nordeste. Há, portanto, um afinamento do Grupo Bauru nessa borda, permitindo o afloramento da unidade Adamantina devido aos processos erosivos pós-Bauru.

Com intuito de avaliar os resultados da modelagem com as interpretações deste estudo, foram geradas seções no modelo com a mesma orientação das seções geológicas 1, 2 e 3, discutidas no item 6.2. A Figura 33 ilustra essas três seções no modelo tridimensional implícito.

Nota-se, por meio da Figura 33, que as formações Marília e Adamantina seguem a mesma disposição se comparadas às seções geológicas apresentadas anteriormente (item 6.2). Há um espessamento das camadas para o interior da área estudada, ora como

consequência da “janela” de basaltos da Formação Serra Geral ora como variações locais concordantes com a topografia (principalmente para a Formação Marília).

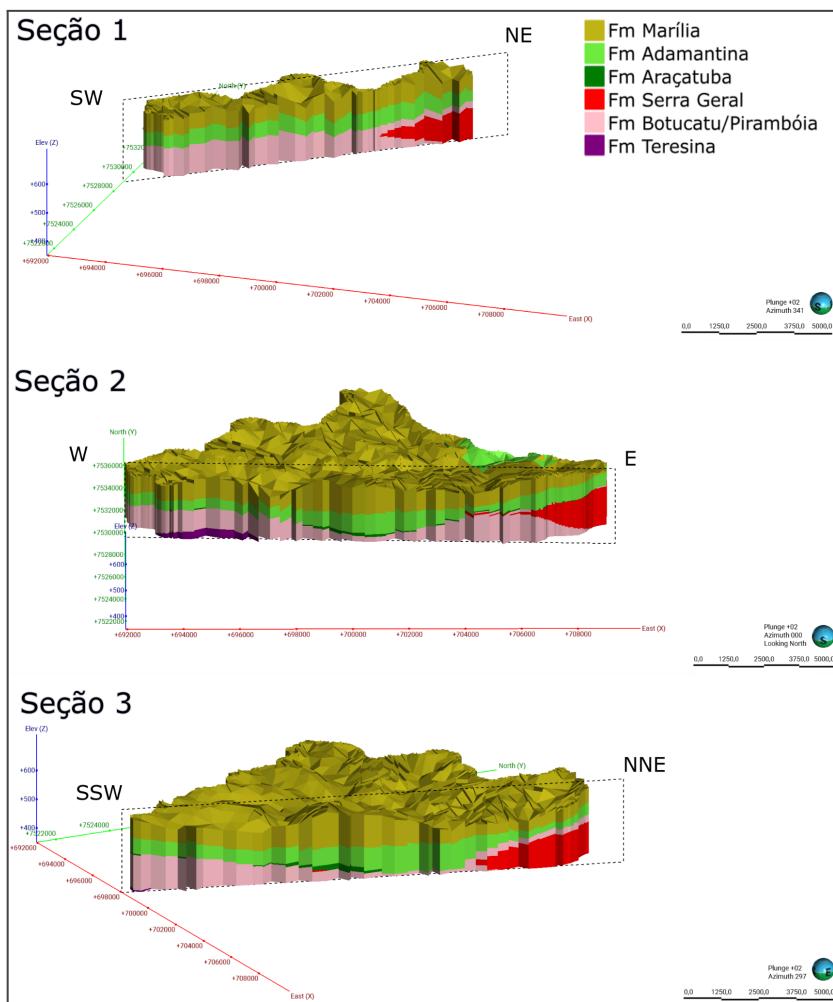


Figura 33: Seções 1, 2 e 3 no modelo geológico

Já a distribuição da Formação Araçatuba não corresponde exatamente com as posições nas seções 1, 2 e 3. Isso ocorre pois a geometria da camada, no modelo geológico, é resultado da aproximação dos contatos que foram possíveis de se inferir com base na interpretação das perfilagens geofísicas e descrições litológicas dos poços. Outro fator que dificulta seu real dimensionamento é que esta formação apresenta baixa espessura e continuidade lateral na área de estudo. Por fim, mais um ponto a se considerar é o fato do mapeamento das camadas litológicas para o *grid* depender de seu grau de refinamento, fazendo com que uma unidade pouco espessa, como a Formação Araçatuba, nem sempre prevaleça devido ao tamanho das células e espessuras adotadas para as camadas numéricas.

Os volumes de cada unidade na área de estudo também foram obtidos como resultado da modelagem geológica tridimensional. A Formação Marília representa mais da metade (57,4%) do Grupo Bauru. Já as unidades Adamantina e Araçatuba perfazem, respectivamente, 38,4% e 4,2% dessa sequência sedimentar neocretácea.

Esses números reforçam a maior abrangência da Formação Marília na área de estudo, algo que não havia sido constatado em estudos anteriores visto que não houve detalhamento nas interpretações das unidades que compõem o Grupo Bauru. Em relação à hidrogeologia, essa contribuição implica que aproximadamente 38,4% ou 23.391.000.000 m³ (Aquífero Adamantina) do SAB possui litologias com maior caráter exploratório de água.

Além dessa contribuição, a modelagem em si foi capaz de retratar a maior espessura do Grupo Bauru como um todo dentro da bacia, atingindo profundidades maiores do que os limites definidos por outros trabalhos (Paula e Silva & Cavaguti, 1994 e DAEE, 2015), algo já apontado também nas reinterpretações das perfilagens geofísicas dos poços.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As informações adquiridas neste Trabalho de Formatura, seja por meio da reinterpretação de perfis geofísicos, da análise integrada das descrições litológicas dos poços cadastrados, do furo de sondagem com coleta contínua de testemunhos, da elaboração de seções geológicas e da modelagem geológica tridimensional implícita, contribuíram significativamente para o avanço do conhecimento sobre o arcabouço lito-hidroestratigráfico na área urbana de Bauru.

O Grupo Bauru, e consequentemente o Sistema Aquífero Bauru (SAB), é composto pelas seguintes unidades, do topo para a base: Marília, Adamantina e Araçatuba. A Formação Marília é caracterizada pela ocorrência de depósitos de arenito, desde fino a grosso, mal selecionados, avermelhados, intercalados com lentes ou camadas siltosas e lamíticas. Ressalta-se a presença de intercalações carbonáticas, sob a forma de cimento ou calcretes. As curvas das perfilagens geofísicas de raios gama apresentam padrão funil serrilhado, o que indica um ambiente deposicional em leque aluvial. A espessura máxima desta unidade é 150 m, muito superior à apontada em trabalhos anteriores no local (<30 m).

Por sua vez, a Formação Adamantina está depositada sob a Formação Marília e o contato entre ambas é gradacional. Ela é composta por camadas de arenito e intercalações de siltitos e a sua espessura varia entre 14 e 102 m. Em alguns locais de Bauru, essa unidade está assentada sobre os depósitos da Formação Araçatuba, através de contatos desde abrupto a gradacional. As perfilagens geofísicas de raios gama apresentam padrão

sutil cilíndrico a funil também serrilhado. Tal comportamento é sugestivo de paleoambientes caracterizados por sistemas fluviais meandrantes com variações de energia.

Já a Formação Araçatuba, camada com menor continuidade lateral entre as três, é composta por lamitos, desde marrom avermelhados a cinza esverdeados, com espessuras variando de 5 a 26 m. As perfilagens RG e SP possuem valores altos e padrões lineares serrilhados, o que indica paleoambiente lacustre, o qual é calmo e úmido.

A modelagem geológica tridimensional implícita mostrou-se importante na compreensão da geometria e disposição das camadas em subsuperfície. Com base nelas e nas seções geológicas, constatou-se que o Grupo Bauru é mais espesso na região central da área urbana de Bauru, atingindo 228 m de espessura. Isso pode estar relacionado à topografia ou ao contexto geológico local, como a presença de espessas unidades intrusivas associadas aos eventos de deposição da Formação Serra Geral.

Constatou-se também que a base do Grupo Bauru é formada por uma camada lamítica e de extrema importância hidrodinâmica. Sua presença, sobretudo na área da “janela” da Formação Serra Geral, atua como uma descontinuidade hidráulica entre o SAB e o Sistema Aquífero Guarani (SAG).

Dessa forma, demonstra-se a relevância de dados completos em poços perfurados (descrição geológica, perfilagem geofísica, dados construtivos, etc.), integrados, de modo a permitir uma melhor compreensão dos modelos conceituais.

Como recomendação para a melhoria do modelo geológico, no futuro, propõe-se que mais sondagens sejam realizadas no local, mais profundas e com coleta contínua de testemunhos, atravessando todas as unidades do Grupo Bauru, além da realização de perfilagens geofísicas nesses furos. Assim, será possível relacionar essas amostras com os sinais petrofísicos de cada unidade.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albarelli, D.S.N.A, Batezelli, A., Junior, M.C., 2015, Paleoambientes e caracterização tecnológica para fins cerâmicos da Formação Araçatuba no vale do rio Santo Anastácio (Bacia Bauru, SP): *Geosciences= Geociências*, v. 34, no. 4, p. 784-800.
- ALT - Advaced Logic Technology, 2023, WellCad™ 5.7, release note. <https://www.alt.lu/wp-content/uploads/WellCAD-5.7-Release-Notes.pdf>
- Barreto, F.S., et al., 2023, Relações entre o uso do solo e a distribuição das concentrações de nitrato no aquífero urbano do município de Bauru, SP: Derbyana, v. 44.
- Basson, I.J., et al., 2017, Ore-structure relationships at Sishen Mine, Northern Cape, Republic of South Africa, based on fully-constrained implicit 3D modelling: *Ore Geology Reviews*, v. 86, p. 825-838.
- Batezelli, A., 1998, Redefinição litoestratigráfica da unidade Araçatuba e da sua extensão regional na Bacia Bauru no Estado de São Paulo [Dissertação de Mestrado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- Batezelli, A., 2003, Análise da sedimentação cretácea no Triângulo Mineiro e sua correlação com áreas adjacentes [Tese de Doutorado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- Batezelli, A., 2017, Continental systems tracts of the Brazilian Cretaceous Bauru Basin and their relationship with the tectonic and climatic evolution of South America: *Basin Research*, v. 29, p. 1-25.
- Brasil, 2021, Ministério da Saúde, Gabinete do Ministro, Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021.
- Chaves, W.S., 1988, Geofísica de poços aplicada à hidrologia de águas subterrâneas: *Pesquisa Geológica dos EUA*, v. 87, no. 539.
- Cowan, J., et al., 2003, Practical implicit geological modelling, in 5th international mining geology conference: Australasian Institute of Mining and Metallurgy Melbourne, v. 8, p. 89-99.
- DAE - Departamento de Água e Esgoto de Bauru, 2022, Registro e documentação das Unidades de Produção Municipal, ano base 2022 (documento interno).
- DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2015, Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP: São Paulo: DAEE/C3 Consultoria, (Relatório Técnico Final).
- D’Affonseca, F.M., Finkel, M., Cirpka, O.A., 2020, Combining implicit geological modeling, field surveys, and hydrogeological modeling to describe groundwater flow in a karst aquifer: *Hydrogeology Journal*, v. 28, no. 8, p. 2779-2802.
- Ernesto, M., Tamrat, E., Fúlfaro, V.J., Saad, A.R., Batezelli, A., Oliveiro, A.F., 2003, Application of magnetostratigraphy in dating the Bauru group (Uberaba and Marília formations) in the Triângulo Mineiro (MG): Latinamerican Congress of Sedimentology, 3th, Belém, PA, Abstracts, p. 184.
- Fernandes, L.A., 1992, A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá [Dissertação de Mestrado]: São Paulo Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, doi: 10.11606/D.44.1992.tde-24092013-094556.
- Fernandes, L.A., 1998, Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (KS) [Tese de Doutorado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, doi: 10.11606/T.44.1998.tde-16012014-142739.
- Fernandes, L.A., Coimbra, A.M., 1996, A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil): *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, no. 2, p. 195-205.
- Fernandes, L.A., Coimbra, A.M., 2000, Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo): *Revista brasileira de Geociências*, v. 30, no. 4, p. 717-728.
- Franzini, A.S., 2010, Avaliação hidrogeológica em área de assentamento [Dissertação de Mestrado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.

- Garcia, L.M., Goncalves, I.G., 2021, Implementação da modelagem implícita na graduação: Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 13, no. 1.
- García-Gil A., Baquedano C., Marazuela M.A., Martínez-Leon J., Cruz-Pérez N., Hernandez-Gutiérrez L.E., Santamarta J.C., 2023, A 3D geological model of El Hierro volcanic island reflecting intraplate volcanism cycles: Groundwater for Sustainable Development, v. 21, p. 100936.
- Gonzaga de Campos, L.F., 1905, Reconhecimento da zona compreendida entre Bauru e Itapura, São Paulo: Relatório Estrada de Ferro Noroeste do Brasil, Tipografia Ideal, p. 40.
- Hart, S.T., Bertolo, R.A., Feig, R., Barreto, F.S., Giovanni, J.C., Gouvêa Júnior, J.C.R., Agostini, M.S., 2023, Modelagem implícita para detalhamento do Modelo Conceitual Temporal de Área Complexa com remediação de Plumas Combinadas na Região Metropolitana de São Paulo: Geologia USP, Série Científica, v. 23, n. 3, p. 57-70. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v23-207070>.
- Hassen, I., Gibson, H., Hamzaoui-Azaza, F., Negro, F., Rachid, K., Bouhlila, R., 2016, 3D geological modeling of the Kasserine Aquifer System, Central Tunisia: New insights into aquifer-geometry and interconnections for a better assessment of groundwater resources: Journal of Hydrology, v. 539, p. 223-236.
- Hirata, R., Barbat, D., Marques, C.G., 2022, Quantas águas existem na cidade de Bauru (SP)?: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 22º, ABAS, São Paulo, p. 04.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018, 48,6% dos municípios do país foram afetados por secas nos últimos 4 anos: Munic 2017, <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/21636-munic-2017-48-6-dos-municipios-do-pais-foram-afetados-por-secas-nos-ultimos-4-anos> (acessado Janeiro 2023).
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2022, Cidades: São Paulo: Bauru, <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/bauru/panorama> (acessado Janeiro 2023).
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981, Mapa geológico do Estado de São Paulo: escala 1:500.000, v. 02.
- Langer, M.C., et al., 2022, The Bauru Basin in São Paulo and its tetrapods: Derbyana, v. 43, p. 776.
- MacCormack, K., Berg, R., Kessler, H., Russell, H., Thorleifson, L., 2019, Synopsis of Three-Dimensional Geological Mapping and Modelling at Geological Survey Organizations. Alberta Energy: Alberta Energy Regulator/Alberta Geological Survey.
- Menegazzo, M.C., 2016, Sedimentação da Bacia Bauru: Cenário Tectônico, idade dos depósitos e ambientes paleodepositacionais [Tese de Doutorado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- Montanheiro, F., 2014, Contaminação por nitrato no Aquífero Adamantina: o caso do município de Monte Azul Paulista [Dissertação de Mestrado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- Montanheiro, F., Chang, H.K., 2016, Nitrato no aquífero adamantina: o caso do município de Monte Azul Paulista, SP: Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 37, no. 2, p. 25-44.
- Nery, G.G., 1997, Perfilagem geofísica aplicada à água subterrânea, in Feitosa, F. A. C., Filho, J.M., org., Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações: Fortaleza, CPRM, p. 203-241.
- Nery, G.G., 2013, Perfilagem Geofísica em Poço Aberto – fundamentos básicos com ênfase em petróleo: Salvador, BA, p.231.
- Paula e Silva, F., Cavaguti, N., 1994, Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na Cidade de Bauru - SP: Geociências, Universidade Estadual Paulista, v. 13, p. 83-99.
- Paula e Silva, F., 2003, Geologia de superfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo[Tese de Doutorado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- Paula e Silva, F., Cavaguti, N., 1994, Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na Cidade de Bauru - SP: Geociências, Universidade Estadual Paulista, v. 13, p. 83-99.

- Paula e Silva, F., Kiang, C.H., Chang, M.R.C., 2005, Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no estado de São Paulo: Revista Brasileira de Geociências, v. 35, n. 1, p. 77-88.
- Paulipetro, 1980, Geologia do bloco 45, balizado pelas cidades de Bauru, Marília, Ourinhos e Águas de Santa Bárbara: Silva, R.B. da, Couto E.A., (Relatório Interno BP-01/80).
- Petri, S., Coimbra, A.M., Amaral, G., Ojeda, O.Y., Fúlfaro, V.J., Ponçano, W.L., 1986, Código brasileiro de nomenclatura estratigráfica: Revista Brasileira de Geociências, v. 16, no. 4, p. 372-376.
- Prefeitura Municipal de Bauru, 2017, Plano Municipal de Saneamento Básico. Bauru: Ampla Consultoria e Planejamento, v. 1, p. 873, (Relatório Técnico Final), https://smastr20.blob.core.windows.net/conesan/Bauru_AE_DU_RS_2017.pdf (acessado Janeiro 2023).
- Radwan, A.A., Abdelwahhab, M.A., Nabawy, B.S., Mahfouz, K.H., Ahmed, M. S., 2022, Facies analysis-constrained geophysical 3D-static reservoir modeling of Cenomanian units in the Aghar Oilfield (Western Desert, Egypt): insights into paleoenvironment and petroleum geology of fluviomarine systems: Marine and Petroleum Geology, v. 136, p. 105436.
- Riccomini, C., 1997, Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, v. 27, no. 2, p. 153-162.
- Roberto, T. K. A., 2022, Modelagem de dados geológicos e geofísicos com *Leapfrog*, campo terrestre da Bacia Potiguar [Trabalho de Conclusão de Curso]: Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Geologia, p. 67.
- Silva, S.R.D., 2009, Caracterização hidrogeoquímica dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani no município de Bauru [Dissertação de Mestrado]: Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.
- Simonato, M.D., Campos, J.E., Freitas Leitão, A.C., Brandão, D., Paula e Silva, F., de Paula, V.F., 2016, Há conexão hidráulica entre os sistemas Aquíferos Guarani e Bauru na “janela” de basalto, em Bauru - SP?: XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.
- Soares, P.C., Landim, P., Fúlfaro, V.J., Sobreiro Neto, A.F., 1980, Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru: Revista Brasileira de Geociências, v. 10, no. 3, p. 177-185.
- Souza, L.A. P., Gandolfo, O.C.B., 2021, Geofísica Aplicada à Geologia de Engenharia e Meio Ambiente: Manual de boas práticas: São Paulo, Brazil: ABGE, p. 162.

9. ANEXOS

ANEXO I - Modelo da ficha aplicada durante as visitas às áreas.

FICHA PARA ÁREAS POTENCIAIS



Endereço							CódÁrea	
Proprietário							Contato	
Autorização para acesso?	SIM	NÃO	UTM (N)	UTM (E)	Cota (m)	Datum	Data	
Características Topográficas Gerais (declividade, topos, altos e baixos...)						Área passa equipamento?	SIM	NÃO
Área (m ²)	Atividade no local					Folha topográfica		
Está em uma APP ou UC?			Qual?					
Tipo de substrato		Concreto	Vegetação rasteira		Árvores	Outro		
Tem rio próximo?		SIM	NÃO	Possib. de inundaçāo		Distância ao rio (m)		
Sistema de Tratamento		Água	SIM	NÃO	Obs.			
		Esgoto	SIM	NÃO	Obs.			
Presença de energia elétrica no Local?			SIM			NÃO		
Poço na área	SIM	Poço no Entorno (novo ou cadastrado)	SIM	Distância ao poço no entorno (m)				
	NÃO		NÃO					
Descrição geral da área (ocupação, histórico, características gerais...):								
POÇO NA ÁREA								
ID SACRE	ID DAEE		Nº LOCAL		Data Construção			
UTM (N)	UTM (E)	Cota	Sistemas Aquíferos Explorados					
Estruturas Geológicas importantes no entorno (presença de blocos, mazacões, outros materiais...)					Possui torneira para coleta?			
					Possui equipamento para nível de água?			
NE (m)	ND (m)	Vazão (m ³ /h)	Bombeamento (h/d)		Atividade	Ativo		
						Desativado		
Vedaçāo	Boa	Tampa (Sim/Não)			Laje de proteção			
	Ruim				Presente?			
Obs:		Equipamento (Sim/Não)			Inclinada?			
					Íntegra?			
Integridade do poço					Limpeza do entorno			
Fontes Potenciais de Contaminação no Entorno					Áreas Contaminadas no Entorno			

Observações:

Folha ____ de ____

ANEXO II- Link para pasta com o vídeo completo da modelagem geológica realizada no programa Leapfrog Works®

https://drive.google.com/drive/folders/1wugjQLkGV7cGKamXljtFFo7_hAYoq-6?usp=sharing