



**DAEE**

Governo do Estado de São Paulo  
Departamento de Águas e Energia Elétrica  
Gestão de Documentos

**OFÍCIO/DP/0910/2024**

São Paulo, na data da assinatura digital.

**06.01.10.03**

Ilustríssima Senhora

**ENG<sup>a</sup> ÉRICA RODRIGUES TOGNETTI**

Secretária Executiva do CBH-TJ

Comitê da Bacia Hidrográfica do Tietê - Jacaré

SÃO CARLOS - SP

DH-ccs

(SEI nº 137.00005511/2024-58) *(Pede-se o uso desta referência)*

Senhora Secretária Executiva,

Trata-se de resposta ao Ofício CBH – TJ nº 014/2024, por meio do qual solicita-se o Estudo e diagnóstico hidrogeológico do Município de Araraquara.

Nesse sentido, encaminhamos a Vossa Senhoria a cópia anexa do “Relatório Final do Diagnóstico Hidrogeológico do Município de Araraquara - Subsídios de Proteção, Utilização e Controle do Uso das Águas Subterrâneas”, elaborado pela Fundação para o Desenvolvimento da UNESP - Fundunesp.

Atenciosamente,

**ANDERSON ESTEVES**

Superintendente



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Barboza Esteves, Superintendente**, em 19/08/2024, às 19:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no [Decreto Estadual nº 67.641, de 10 de abril de 2023](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.sp.gov.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.sp.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0035559449** e o código CRC **D3186F20**.

# LEBAC

LABORATÓRIO DE ESTUDO DE BACIAS

Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
(IGCE/UNESP)

**DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO DO  
MUNICÍPIO DE ARARAQUARA – SUBSÍDIOS DE  
PROTEÇÃO, UTILIZAÇÃO E CONTROLE DO USO  
DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

**RELATÓRIO FINAL**

**Rio Claro, maio de 2024**

## EXECUÇÃO

### Coordenação Geral

*Prof. Dr. Chang, Hung Kiang (UNESP/LEBAC)*

### Equipe Técnica

*Geólogo Dr. Elias Hideo Teramoto (FUNDUNESP/LEBAC)*

*Geólogo Dr. Flávio de Paula e Silva (FUNDUNESP/GEODATA)*

*Geóloga Dr<sup>a</sup>. Márcia Regina Stradioto (FUNDUNESP/LEBAC)*

*Geólogo Msc. Eduardo Meneghel (FUNDUNESP/LEBAC)*

*Geólogo Msc. Bruno Zanon Engelbrecht (FUNDUNESP/LEBAC)*

*Geógrafo Bc. Pedro L. B. Crioni (FUNDUNESP/LEBAC)*

*Geóloga Bc. Barbara Panegassi (FUNDUNESP/LEBAC)*

*Geóloga Bc. Gabriela F. Aragoni (UNIPER)*

*Geóloga Bc. Sabrina Brandão Cardoso*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>10</b>
<b>3. BASE DE DADOS UTILIZADA</b> .....	<b>11</b>
3.1. Arquivos em formato shape ou raster.....	11
3.2. Cadastros de poços.....	12
3.2.1. Cadastro SIAGAS.....	12
3.2.2. Cadastros de outorgas DAEE .....	12
3.2.3. Cadastros de poços do DAAE-Araraquara.....	13
3.2.4. Cadastros de poços do DAEE.....	13
3.2.5. Estações hidrométricas .....	13
<b>4. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO</b> .....	<b>13</b>
4.1. Geomorfologia .....	13
4.2. Hipsometria.....	14
4.3. Declividade .....	15
4.4. Padrões de relevo.....	16
4.5. Clima.....	18
4.6. Uso e ocupação do solo .....	19
4.7. Características do solo .....	21
4.8. Bacias hidrográficas .....	23
<b>5. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA</b> .....	<b>26</b>
<b>6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA</b> .....	<b>30</b>
6.1. Sistemas Aquíferos.....	31
6.2. Sistema Aquífero Bauru – SAB .....	34
6.3. Sistema Aquífero Serra Geral - SASG .....	39
6.4. Sistema Aquífero Guarani – SAG.....	46

6.4.1.	Histórico .....	46
6.5.	Caracterização do SAG no município de Araraquara .....	47
6.5.1.	Distribuição das espessuras do SAG .....	51
6.5.2.	Arcabouço geológico do SAG .....	52
6.5.3.	Potenciometria do SAG .....	60
6.5.4.	Parâmetros hidrodinâmicos e potencialidades do SAG .....	62
6.5.5.	Mapa de intensidade de exploração do SAG .....	67
6.5.6.	Monitoramento de níveis de água do SAG .....	68
<b>7.</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL .....</b>	<b>75</b>
<b>8.</b>	<b>MODELO NUMÉRICO DO SAG .....</b>	<b>77</b>
8.1.	Parametrização do modelo numérico .....	77
8.1.1.	Geometria e discretização do modelo .....	77
8.1.2.	Condições de contorno e iniciais do modelo .....	78
8.1.3.	Calibração em regime permanente .....	80
8.1.4.	Calibração em regime transiente .....	81
8.2.	Simulação em regime transiente para previsões .....	84
8.3.	Resultados .....	85
8.3.1.	Calibração em regime permanente .....	85
8.3.2.	Calibração em regime transiente .....	87
8.3.3.	Previsão de superexploração .....	91
8.4.	Considerações finais sobre os resultados da simulação numérica .....	93
<b>9.</b>	<b>HIDROQUÍMICA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS .....</b>	<b>94</b>
9.1.	Rede de amostragem de água subterrânea .....	94
9.1.1.	Métodos de análises e de tratamento de dados hidroquímicos .....	95
9.1.2.	Representatividade dos resultados .....	97
9.2.	Parâmetros físico-químicos e principais íons presentes nas águas .....	101
1.1.	Classificação das águas subterrâneas .....	102
9.3.	Considerações finais .....	106

<b>10. ZONEAMENTO DA EXPLOTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SAG.....</b>	<b>106</b>
<b>11. ÁREAS DE RESTRIÇÃO E CONTROLE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E MEDIDAS DE PROTEÇÃO .....</b>	<b>109</b>
<b>12. PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE REDE DE MONITORAMENTO.....</b>	<b>112</b>
12.1. Rede de monitoramento existente .....	112
12.2. Critérios para seleção dos poços de monitoramento .....	113
12.3. Características dos poços de monitoramento .....	113
12.3.1. Poços ativos.....	114
12.3.2. Poços desativados .....	115
1.2. Monitoramento da quantidade .....	115
12.4. Monitoramento da qualidade .....	117
<b>13. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>120</b>
<b>2. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>123</b>
<b>3. ANEXOS.....</b>	<b>130</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Localização município de Araraquara e principais vias de acesso.....	11
Figura 4.1 – Divisão geomorfológica do Estado de São Paulo (modificado de IPT, 1981)..	14
Figura 4.2 – Mapa hipsométrico do município de Araraquara.....	15
Figura 4.3 – Mapa de declividade do município de Araraquara.....	16
Figura 4.4 – Distribuição dos tipos de relevo do município de Araraquara.....	17
Figura 4.5 – Mapa de classificação do relevo do município de Araraquara.....	18
Figura 4.6 – Precipitação média mensal do período de 2002 a 2021, registrada na estação C5-124 (Dados retirados de <a href="http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/">http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/</a> ).....	19
Figura 4.7 - Imagem do satélite CBERS 4 (cor verdadeira) utilizado para análise e geração do mapa de uso e ocupação do solo.....	20
Figura 4.8 – Mapa de uso do solo do município de Araraquara.....	22
Figura 4.9 – Mapa pedológico do município de Araraquara (Rossi, 2017).....	23
Figura 4.10 – Bacias hidrográficas do município de Araraquara.....	24
Figura 4.11 – Distribuição dos valores de $Q_{95}$ (L/s/km <sup>2</sup> ) das sub-bacias do município de Araraquara.....	25
Figura 5.1 – Mapa geológico do município de Araraquara (UNESP, 1980) e localização dos poços selecionados neste estudo.....	27
Figura 6.1 – Distribuição dos sistemas aquíferos do município de Araraquara e localização dos poços empregados nas análises litoestratigráficas e hidrogeológicas.....	33
Figura 6.2 - Subdivisão hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Bauru (Paula e Silva, 2003). .....	35
Figura 6.3 – Perfil geofísico típico do Aquífero Adamantina no município de Araraquara...	36
Figura 6.4 – Mapa de isópacas do Sistema Aquífero Bauru.....	37
Figura 6.5 – Potenciometria do SAB.....	40
Figura 6.6 – Mapa de isópacas do Sistema Aquífero Serra Geral.....	42
Figura 6.7 – Correlação entre carga hidráulica do SASG <i>versus</i> altitude do terreno. Pontos azuis mostram relação direta entre carga hidráulica e elevação topográfica. Pontos vermelhos não apresentam relação direta.....	44
Figura 6.8 – Evolução da perfuração de poços profundos de abastecimento público no município de Araraquara.....	47
Figura 6.9 – Relações estratigráficas entre as formações Piramboia, Botucatu e Serra Geral, representadas nas situações hipotéticas observadas nos poços A, B, C, D e E.....	48

Figura 6.10 – Interpretação litológica do poço perfurado na Fazenda Santa Helena, Boa Esperança do Sul (SP), com base em perfis geofísicos (Paula e Silva & Paula e Silva Filho, 2018). .....	49
Figura 6.11 – Perfil geofísico típico mostrando as relações entre as formações Serra Geral, Botucatu e Piramboia no município de Araraquara. RG= raios gama; IL= resistividade induzida; Dt= tempo de trânsito sônico. ....	51
Figura 6.12 – Principais estruturas geológicas que condicionaram o arcabouço físico e faciológico do SAG (OEA, 2009). ....	53
Figura 6.13 – Seção geológica transversal ao Alto Estrutural do Jacaré-Guaçu e localização de um poço perfurado na Fazenda Santa Helena. ....	53
Figura 6.14 – Contorno estrutural do topo do SAG. ....	55
Figura 6.15 – Seção geológica NW-SE cruzando a zona urbana de Araraquara. ....	57
Figura 6.16 – Seção geológica NW-SE / NE-SW cruzando a zona urbana de Araraquara. ....	58
Figura 6.17 – Seção geológica SW – NE cruzando a zona urbana de Araraquara. ....	59
Figura 6.18 – Seção geológica SW – NE cruzando a zona urbana de Araraquara. ....	59
Figura 6.19 – Distribuição da carga hidráulica (potenciometria) do SAG. ....	61
Figura 6.20 – Curva de rebaixamento e parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de aquífero realizado no poço do SESC Araraquara. ....	65
Figura 6.21 – Curva de rebaixamento e parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de aquífero realizado no poço Santa Lúcia III. ....	66
Figura 6.22 – Curva de rebaixamento e parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de aquífero realizado nos poços do Ouro. ....	66
Figura 6.23 – Mapa de intensidade de exploração do SAG. ....	69
Figura 6.24 - Monitoramento de níveis do poço Santa Lúcia II. ....	70
Figura 6.25 – Período de monitoramento do poço Santa Lúcia II, sem interferência do bombeamento do poço Santa Lúcia III. ....	71
Figura 6.26 – Período de monitoramento do poço Santa Lúcia II, correspondente a um intervalo cíclico de bombeamento e recuperação do poço Santa Lúcia III. ....	72
Figura 6.27 – Monitoramento de níveis de água do aquífero no poço da Faculdade de Odontologia da UNESP. ....	73
Figura 6.28 – Efeitos de maré terrestre nos níveis de água do aquífero no poço da Faculdade de Odontologia da UNESP. ....	73
Figura 6.29 – Monitoramento de níveis de água do poço Universal. ....	74
Figura 6.30 – Detalhe do monitoramento de níveis de água do poço Universal. ....	74

Figura 7.1 – Representação esquemática do modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo. (a) Modelo em visão 3D; (b) seção na direção NW-SE; (c) seção na direção NNE-SSW. ....	76
Figura 8.1 – Configuração da malha do modelo numérico, com destaque para os diâmetros dos elementos. ....	78
Figura 8.2 – Condições de contorno atribuídas no modelo numérico. ....	79
Figura 8.3 – Distribuição dos poços de observação ao longo da área do modelo, representando aqueles que se encontram na porção confinada e na porção livre. ....	81
Figura 8.4 – Curvas de previsão da vazão explorada nos próximos 50 anos no município de Araraquara. ....	84
Figura 8.5 – Curva sigmoide do crescimento populacional esperado para Araraquara. ....	85
Figura 8.6 – Distribuição do parâmetro de recarga obtido para o modelo. ....	86
Figura 8.7 – Distribuição do parâmetro de condutividade hidráulica obtido para o modelo. ....	87
Figura 8.8 – Potenciometria simulada do SAG. ....	88
Figura 8.9 – Resultado da calibração do modelo permanente, a partir da comparação. ....	88
Figura 8.10 – Gráficos de comparação entre o rebaixamento observado nos poços do DAAE e o rebaixamento calculado no modelo numérico. (a) Poço Fonte Luminosa; (b) Selmi Dei; (c) Ouro 2B; (d) Jd. Universal; (e) Chácara Flora; (f) Aldo Lupo; (g) Sta. Lúcia; (h) Rod. 255; (i) Santa Marta; (j) Standard I. ....	90
Figura 8.11 – Comparação entre o rebaixamento observado e o calculado para os 10 poços. ....	91
Figura 8.12 – Distribuição do rebaixamento estimado do SAG em Araraquara, para o ano de 2073. (a) cenário 1; (b) cenário 2; e (c) cenário 3. ....	92
Figura 8.13 – Curva de rebaixamento calculado para os próximos 50 anos (2023-2073) nos três cenários avaliados. ....	93
Figura 9.1 - Localização dos pontos amostrados na área de estudo. ....	94
Figura 9.2 - Diagramas de <i>Stiff</i> e <i>Piper</i> . ....	96
Figura 9.3 - Balanço iônico <i>versus</i> condutividade elétrica. ....	97
Figura 9.4 - Histogramas de pH e condutividade elétrica de amostras de águas subterrâneas. ....	101
Figura 9.5 - Médias das concentrações dos íons principais. ....	102
Figura 9.6 - Diagrama de <i>Piper</i> das águas subterrâneas do município de Araraquara. ....	103
Figura 9.7 - Distribuição dos diagramas de <i>Stiff</i> das águas subterrâneas do município de Araraquara. ....	104
Figura 9.8 - Distribuição dos tipos hidroquímicos. ....	105

Figura 10.1 – Mapa de zoneamento (intensidade) de exploração do SAG.....	108
Figura 11.1 – Área de controle de extração de água SAG.....	111

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 –Cronograma com o Plano de Ações proposto.....	10
Tabela 4.1 - Classes utilizadas na elaboração do mapa de declividade do município de Araraquara (EMBRAPA, 1979) .....	15
Tabela 4.2 - Atributos de padrões de relevo do município de Araraquara (Peixoto, 2010)..	17
Tabela 4.3 – Tipos de solo do município de Araraquara (Rossi, 2017). .....	22
Tabela 4.4 - Sub-bacias hidrográficas do município de Araraquara .....	24
Tabela 6.1 - Valores de porosidade eficaz de rochas. ....	30
Tabela 6.2 - Classificação de aquíferos em função da condutividade hidráulica.....	31
Tabela 6.3 – Características dos sistemas aquíferos do município de Araraquara .....	34
Tabela 6.4 – Áreas de ocorrência dos sistemas aquíferos do município de Araraquara .....	34
Tabela 6.5 – Vazões de produção e específicas do SAB na região de Araraquara. ....	38
Tabela 6.6 – Reservas hídricas do SAB no município de Araraquara .....	39
Tabela 6.7 – Vazões de produção e específicas do SASG na região de Araraquara.....	43
Tabela 6.8 – Reservas hídricas do SASG no município de Araraquara .....	45
Tabela 6.9 – Parâmetros hidrodinâmicos do SAG. ....	63
Tabela 6.10 – Estatística descritiva dos parâmetros hidrodinâmicos do SAG. ....	63
Tabela 6.11 – Parâmetros hidrodinâmicos do SAG obtidos no poço do SESC de Araraquara. .....	64
Tabela 6.12 – Parâmetros hidrodinâmicos do SAG obtidos no poço Santa Lúcia III.....	65
Tabela 8.1 - Intervalo de valores de condutividade hidráulica adotados na calibração do modelo em estado permanente.....	80
Tabela 8.2 - Dados dos poços de bombeamento utilizados no modelo em estado transiente .....	82
Tabela 8.3 – Resultado dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos nas simulações em estado permanente e transiente para o modelo. ....	91
Tabela 9.1 – Resultados das análises hidroquímicas .....	98
Tabela 9.2 – Resultados das análises hidroquímicas...continuação.....	99
Tabela 12.1 - Parâmetros químicos de monitoramento. ....	118
Tabela 12.2 – Parâmetros físico-químicos de monitoramento. ....	118
Tabela 12.3 – Parâmetros microbiológicos de monitoramento. ....	118
Tabela 12.4 - Parâmetros orgânicos de monitoramento. ....	118
Tabela 12.5 – Parâmetros agroquímicos de monitoramento. ....	119

## DIAGNÓSTICO HIDROGEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE ARARAQUARA – SUBSÍDIOS DE PROTEÇÃO, UTILIZAÇÃO E CONTROLE DO USO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

### 1. INTRODUÇÃO

A identificação de áreas potencialmente críticas em termos de exploração, disponibilidades e vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, presentes no município de Araraquara, particularmente do Sistema Aquífero Guarani (SAG), responsável por cerca de 65% da água distribuída à população segundo o DAAE – Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Araraquara –, é de fundamental importância para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos locais.

A formulação de ações e medidas que contribuam para o uso racional e sustentável das águas subterrâneas, essenciais para o abastecimento público e atividades econômicas, são importantes instrumentos de gestão que visam garantir o suprimento hídrico do município. Assegurar a disponibilidade e qualidade da água têm sido um assunto recorrente no âmbito de estudos e instrumentos de planejamento de recursos hídricos, debatido nos níveis federal, estadual e municipal com enfoque na segurança hídrica, conceito estabelecido no Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH). Nesse sentido, foi promulgada a Lei Complementar nº 49, de 22 de dezembro de 2001, que institui a Zona de Proteção do Aquífero Regional no município de Araraquara.

Com o objetivo de avaliar o cenário atual e as implicações quanto à sustentabilidade da utilização no longo prazo das águas subterrâneas do município, o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) concebeu o projeto “**Diagnóstico Hidrogeológico no Município de Araraquara – subsídios de proteção, utilização e controle do uso das águas subterrâneas**”, elaborado pela equipe do Laboratório de Estudo de Bacias (LEBAC), do Centro de Estudos Ambientais (CEA) e do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), pactuado no **Contrato nº 2022/15/00065.6**.

Em conformidade com os Termos de Referência (TRs) e consolidado em reuniões técnicas entre representantes do DAEE e do LEBAC, os estudos foram iniciados em setembro de 2022, com prazo de execução de 24 meses, e apresentados em quatro relatórios parciais e este relatório final, de acordo com cronograma exibido na Tabela 1.1.

Este **Relatório Final** trata da integração dos dados levantados, apresentação dos resultados e das conclusões obtidas ao longo dos estudos de caracterização e diagnóstico hidrogeológico

dos sistemas aquíferos presentes no município de Araraquara, bem como dos subsídios de proteção, utilização e controle do uso das águas subterrâneas, com destaque para o Sistema Aquífero Guarani, principal fonte de abastecimento da população de Araraquara.

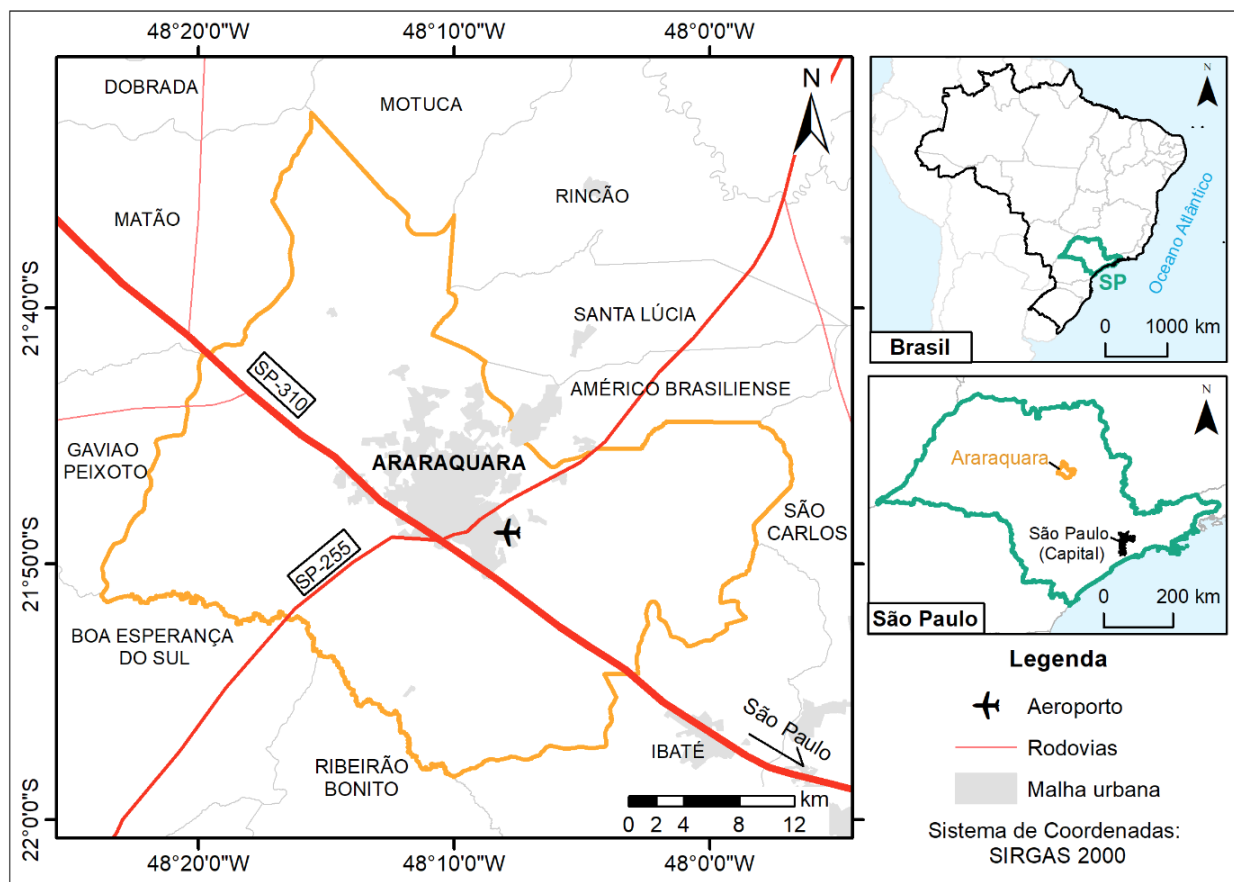
**Tabela 1.1 –Cronograma com o Plano de Ações proposto.**

Produtos	Conteúdo	Mês																							
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Relatório Parcial 01	Aquisição de dados e definição do Plano de Monitoramento	X	X	X																					
Relatório Parcial 02	Caracterização e diagnóstico hidrogeológico				X	X	X	X	X	X	X	X	X												
Relatório Parcial 03	Modelo hidrogeológico conceitual												X	X	X	X									
Relatório Parcial 04	Modelo hidrogeológico e simulações numéricas																X	X	X	X					
Relatório Final	Integração dos dados, apresentação dos resultados e conclusões																				X	X	X	X	

## 2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Araraquara localiza-se na região central do estado de São Paulo, a cerca de 270 km da capital paulista. Os acessos ao município podem ser efetuados pela Rodovia Washington Luiz (SP – 310), pela Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros (SP – 255), além do acesso aéreo pelo aeroporto Bartolomeu de Gusmão e do acesso ferroviário para escoamento de produtos. Os municípios limítrofes compreendem Dobrada, Motuca, Gavião Peixoto, Santa Lúcia, Américo Brasiliense, Ibaté, Ribeirão Bonito, Boa Esperança do Sul, Rincão, Matão e São Carlos ((Figura 2.1). Tem como ponto de referência as coordenadas geográficas -21°32' / -21° 58' de latitude S e -48° 24' e -48° 56' de longitude W, com base no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS2000.

O município de Araraquara possui área total de 1003,63 km<sup>2</sup>, sendo que 77,34 km<sup>2</sup> pertencem à região urbana. Sua população é estimada em 242.228 habitantes, e a densidade demográfica é de 241,35 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2022). É o 34º município mais populoso do estado e o 121º mais populoso do país (IBGE, 2022). O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M), de 0,815, é considerado elevado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (<https://www.undp.org/pt/brazil>), sendo o 14º maior do Brasil.



**Figura 2.1 – Localização município de Araraquara e principais vias de acesso.**

O município de Araraquara compreende três distritos: distrito-sede, distrito de Vila Xavier e distrito de Bueno de Andrada, além de dois assentamentos rurais, o Assentamento Bela Vista e o Assentamento Monte Alegre. A sede municipal encontra-se conurbada com o distrito de Vila Xavier e com o município de Américo Brasiliense, a leste.

### 3. BASE DE DADOS UTILIZADA

A base de dados e documental utilizada neste estudo está descrita nos itens a seguir.

#### 3.1. Arquivos em formato shape ou raster

- MDT extraído do *site* da EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária ([www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr](http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr)), folhas SF-22-X-D e SF-23-V-C, em formato *raster* GEOTIFF (16 bits), resolução espacial de 90 m, sistema de coordenadas Geográficas *datum* WGS-84, e adensado para malha de 50 m x 50 m;

- Hidrografia unifilar em formato *shape*, obtida da base vetorial disponibilizada pelo DAEE, a partir das cartas 1:50.000 do Mapeamento Topográfico Sistemático Terrestre do Brasil;
- Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 2017, 50k (BHO 2017 50k) (<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/home>).
- Mapa geológico do município de Araraquara obtido a partir do recorte do Mapa Geológico do Estado de São Paulo na escala de 1:250.000, elaborado por DAEE /UNESP (1980), convertido para arquivo *shape* por DAEE/UNESP (2013).

**Obs:** Para padronização e manutenção das funcionalidades do sistema SIG, todos os arquivos do tipo *shapefile* e *raster* apresentados neste estudo foram projetados para o mesmo *datum*, neste caso, o sistema Universal Transversa de Mercator (UTM), com referência ao fuso 22° K.

## 3.2. Cadastros de poços

### 3.2.1. Cadastro SIAGAS

O cadastro de poços do SIAGAS – Sistema de Informações de Águas Subterrâneas –, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM (<https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>) –, reúne 456 informações de poços perfurados no município de Araraquara (ANEXO I), compilados de fontes próprias e de outros bancos de dados existentes. Possui várias inconsistências, como coordenadas incorretas e dados faltantes, destacando-se:

- 146 dados sem informação do aquífero explotado;
- 13 dados sem indicação de profundidade dos poços;
- 140 dados sem informação de nível estático;
- 148 dados sem informação de nível dinâmico;
- 127 dados sem informação da vazão explotada;
- 150 dados sem informação de vazão específica;
- 73 dados sem data de perfuração.

### 3.2.2. Cadastros de outorgas DAEE

O cadastro de outorgas do DAEE listou 604 dados de poços outorgados no município de Araraquara (ANEXO II).

Esse cadastro contém informações sobre a vazão outorgada por aquífero, porém apresenta algumas inconsistências como:

- 54 dados sem indicação do aquífero explotado (discriminados como “freático”);
- 8 poços localizados fora dos limites municipais, provavelmente por erro de coordenadas.

Dentre os 604 poços outorgados pela autarquia, 79 foram desativados ou tamponados. Dentre os poços regularizados, 8 não possuem indicação de vazão.

### **3.2.3. Cadastros de poços do DAAE-Araraquara**

O cadastro de poços do DAAE-Araraquara contém 46 dados de poços, entre ativos e desativados. Destes, 39 incluem descrições litológicas, características construtivas, dados de testes de bombeamento e perfilações geofísicas, levantados no banco de dados da regional do DAAE de Araraquara (ANEXO III).

### **3.2.4. Cadastros de poços do DAAE**

Foram levantadas 248 informações de poços cadastrados no banco de dados do DAAE (ANEXO IV), sendo 201 perfurados nos municípios de Araraquara, 11 no município Américo Brasiliense, 10 no município de Gavião Peixoto e 25 no município de Matão.

### **3.2.5. Estações hidrométricas**

Os dados das estações hidrométricas foram levantados junto à Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) ([www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br)), ao Serviço Geológico do Brasil (SIAGAS/CPRM) (<http://siagasweb.cprm.gov.br>), ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAAE) ([www.daae.sp.gov.br/hidrologia](http://www.daae.sp.gov.br/hidrologia)) e à Agência Nacional de Águas (ANA) ([www.snirh.gov.br/hidroweb](http://www.snirh.gov.br/hidroweb)).

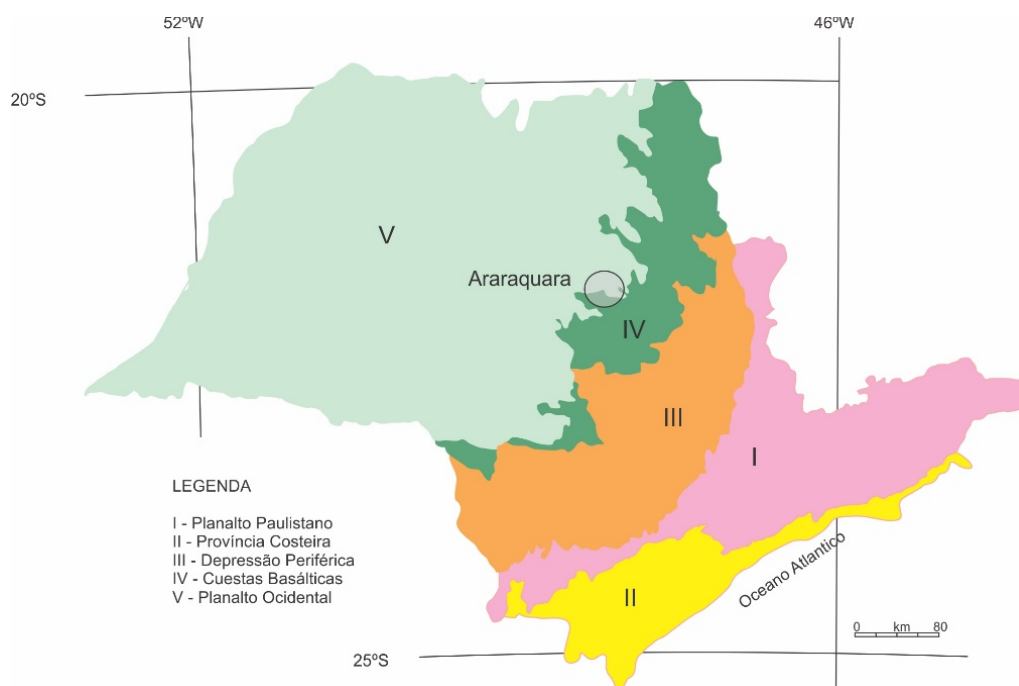
## **4. CARACTERIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO**

### **4.1. Geomorfologia**

Segundo divisão geomorfológica do Estado de São Paulo (IPT, 1981), o município de Araraquara situa-se nos limites do Planalto Ocidental com as Cuestas Basálticas (Figura 4.1).

A maior parte do município é constituída por morrotes e colinas que se destacam no substrato arenítico do Grupo Bauru e integram o Planalto Ocidental. Numa pequena porção junto ao limite

leste do município, onde afloram rochas basálticas, expõe-se o domínio geomorfológico das Cuestas, caracterizado por relevo mais ondulado e espigões proeminentes.



**Figura 4.1 – Divisão geomorfológica do Estado de São Paulo (modificado de IPT, 1981).**

## 4.2. Hipsometria

O mapa hipsométrico do município de Araraquara (Figura 4.2) foi elaborado a partir do MDT, disponibilizado no *site* da EMBRAPA ([www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr](http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr)). Para visualização da distribuição, as altitudes do MDT foram classificadas em intervalos de 50 m.

As maiores altitudes estão concentradas ao longo do limite leste do município, onde alcançam elevações entre 650 m e 750 m. Manchas dispersas com altitudes acima de 750 metros ocorrem no limite sul da área, na divisa com o município de Ibaté. Nessa região é onde se encontra a maior parte da área urbana de Araraquara.

As altitudes decaem progressivamente da porção leste para a porção oeste, onde atingem valores mínimos situados na faixa entre 480 m e 550 m, na divisa municipal com os municípios de Boa Esperança do Sul e Ribeirão Bonito, demarcada no traçado do Rio Jacaré-Guaçu. Exceção é observada no extremo leste do município, onde as altitudes diminuem no sentido contrário, para nordeste, alcançando também valores entre 480 m e 550 m. Em termos estatísticos, a altitude mínima observada no MDT do município é de 479 m, a máxima é de 791 m e a média é de 635 m.

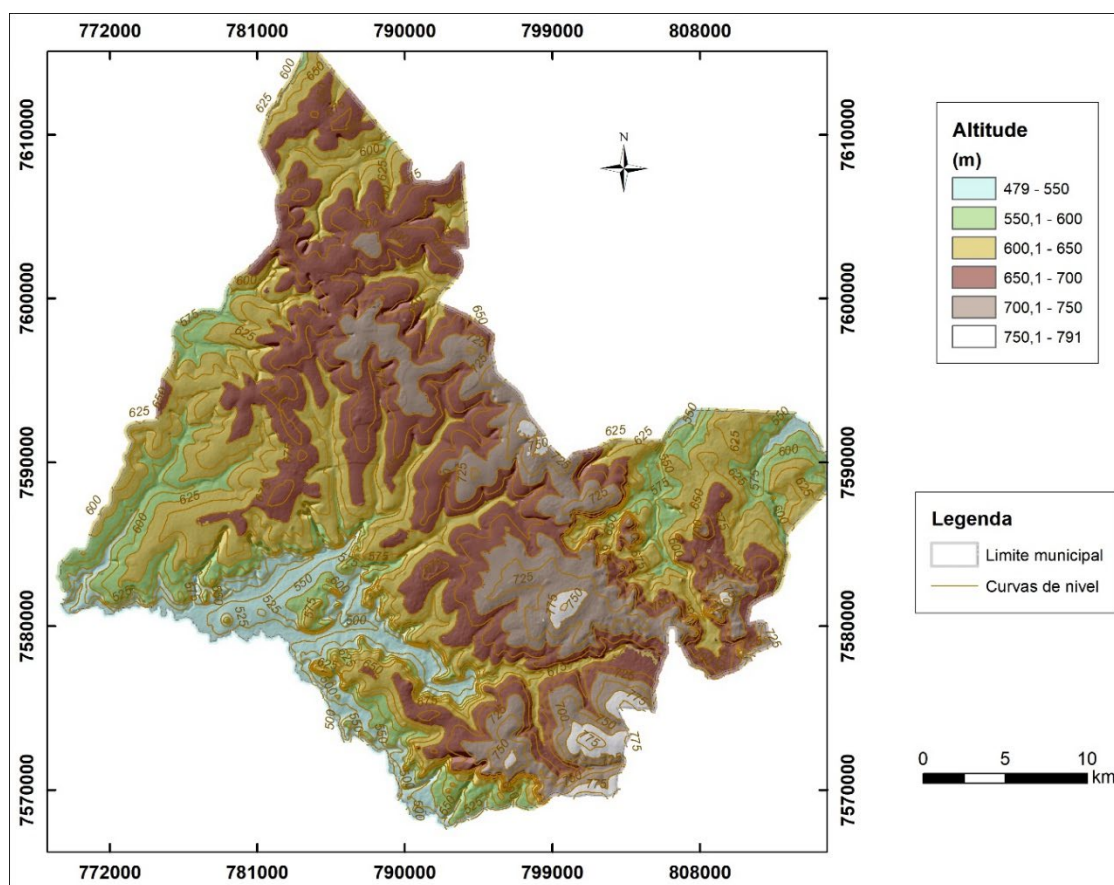


Figura 4.2 – Mapa hipsométrico do município de Araraquara.

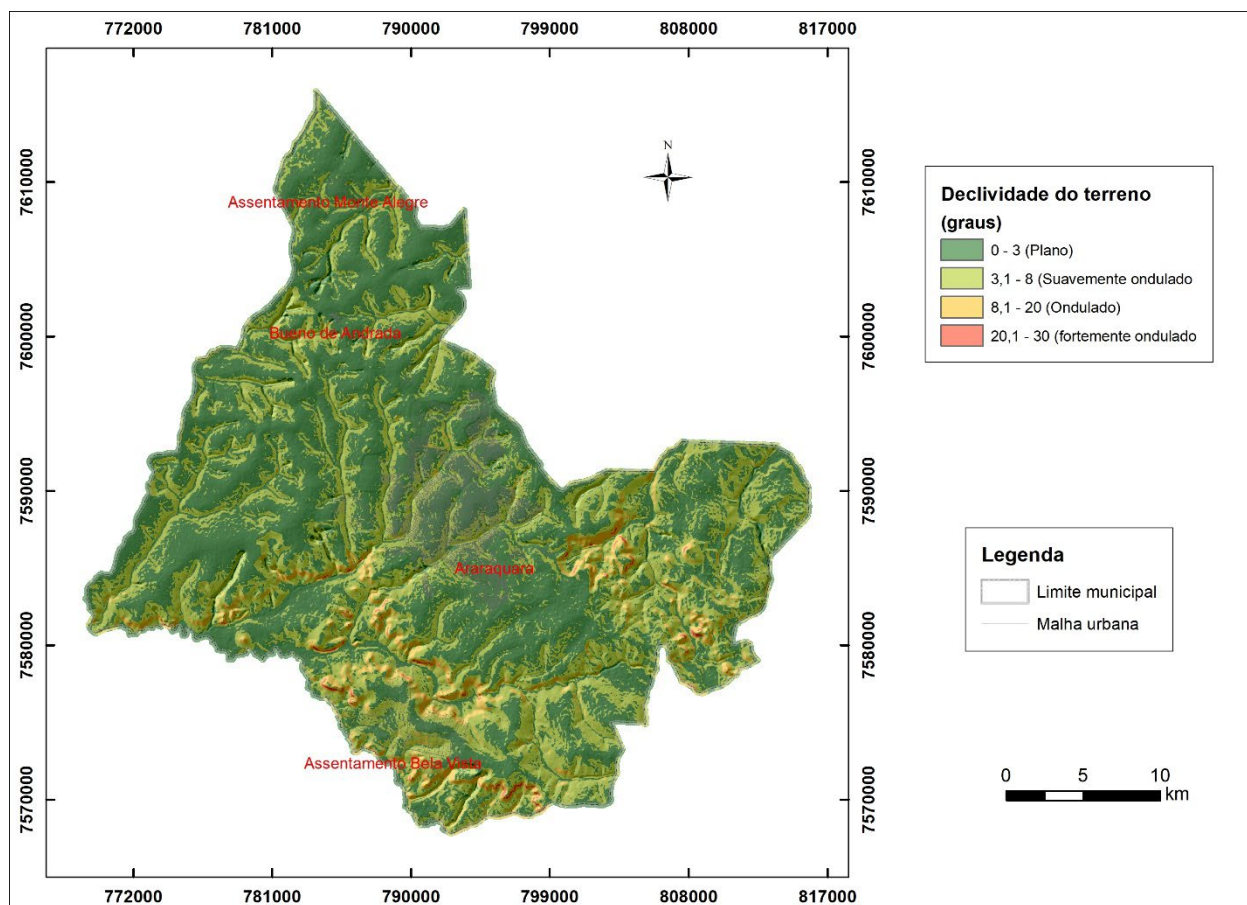
### 4.3. Declividade

A elaboração do mapa de declividades do município de Araraquara empregou a ferramenta *Slope* do módulo *Raster Surface*, do programa ArcGis, sobre base altimétrica extraída do modelo digital de terreno (MDT). As classes de declividade e respectivas categorias de relevo utilizadas na confecção deste mapa foram extraídas de EMBRAPA (1979), conforme discriminadas no Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Classes utilizadas na elaboração do mapa de declividade do município de Araraquara (EMBRAPA, 1979)

Classes de declividade	
Declividade (%)	Relevo
0 - 3	Plano
3 - 8	Suave-ondulado
8 - 20	Ondulado
20 - 45	Forte-ondulado
45 - 75	Montanhoso
>75	Forte-montanhoso

O mapa de declividades (Figura 4.3) permite observar que os terrenos do município de Araraquara são predominantemente planos a levemente ondulados, com declividades de até 8°. Declividades maiores (8° a 20°) são observadas nas áreas onde os processos erosivos remontantes deram origem a quebras de relevo, no contato entre diferentes litologias.



**Figura 4.3 – Mapa de declividade do município de Araraquara.**

#### 4.4. Padrões de relevo

Os padrões de relevo do município de Araraquara foram identificados com base em atributos morfológicos (Tabela 4.2), como declividade e de amplitude topográfica, sistematizados no mapa de geodiversidade do Estado de São Paulo (Peixoto, 2010).

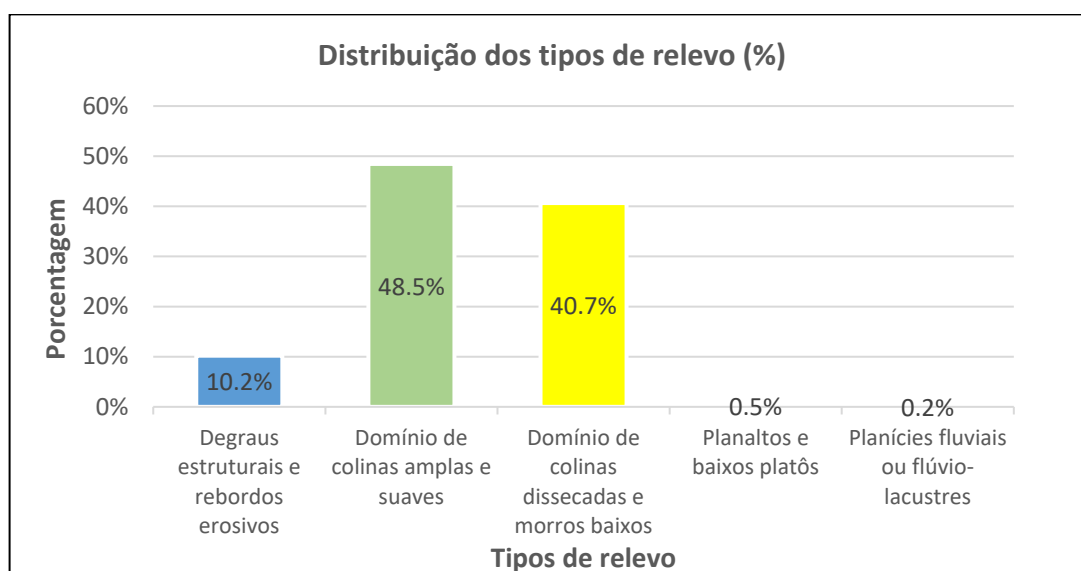
No município foram identificados cinco padrões de relevo: degraus estruturais e rebordos erosivos (R4e); domínio de colinas amplas e suaves (R4a1); domínio de colinas dissecadas e morros baixos (R4a2); planaltos e baixos platôs (R2b); e planícies fluviais e flúvio-lacustres (R1a).

Os relevos de colinas amplas e suaves (R41a) e colinas dissecadas e morros baixos (R4a2) predominam na paisagem do município de Araraquara, onde ocupam, respectivamente, 48% e

41% da área. Os demais tipos de relevo distribuem-se pelos 11% restantes da área (Figura 4.4). A distribuição dos tipos de relevo é mostrada na Figura 4.5.

**Tabela 4.2 - Atributos de padrões de relevo do município de Araraquara (Peixoto, 2010)**

Atributos de padrões de relevo do município de Araraquara			
Símbolo	Tipo de Relevo	Declividade (graus)	Amplitude Topográfica (m)
R1a	Planícies Fluviais ou Flúvio-lacustres	0 a 3	zero
R2b	Baixos Platôs	0 a 5	0 a 20
	Baixos Platôs Dissecados	0 a 5	20 a 50
R4a1	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10	20 a 50
R4a2	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20	30 a 80
R4e	Degraus Estruturais e Rebordos Erosivos	10 a 45	50 a 200



**Figura 4.4 – Distribuição dos tipos de relevo do município de Araraquara.**

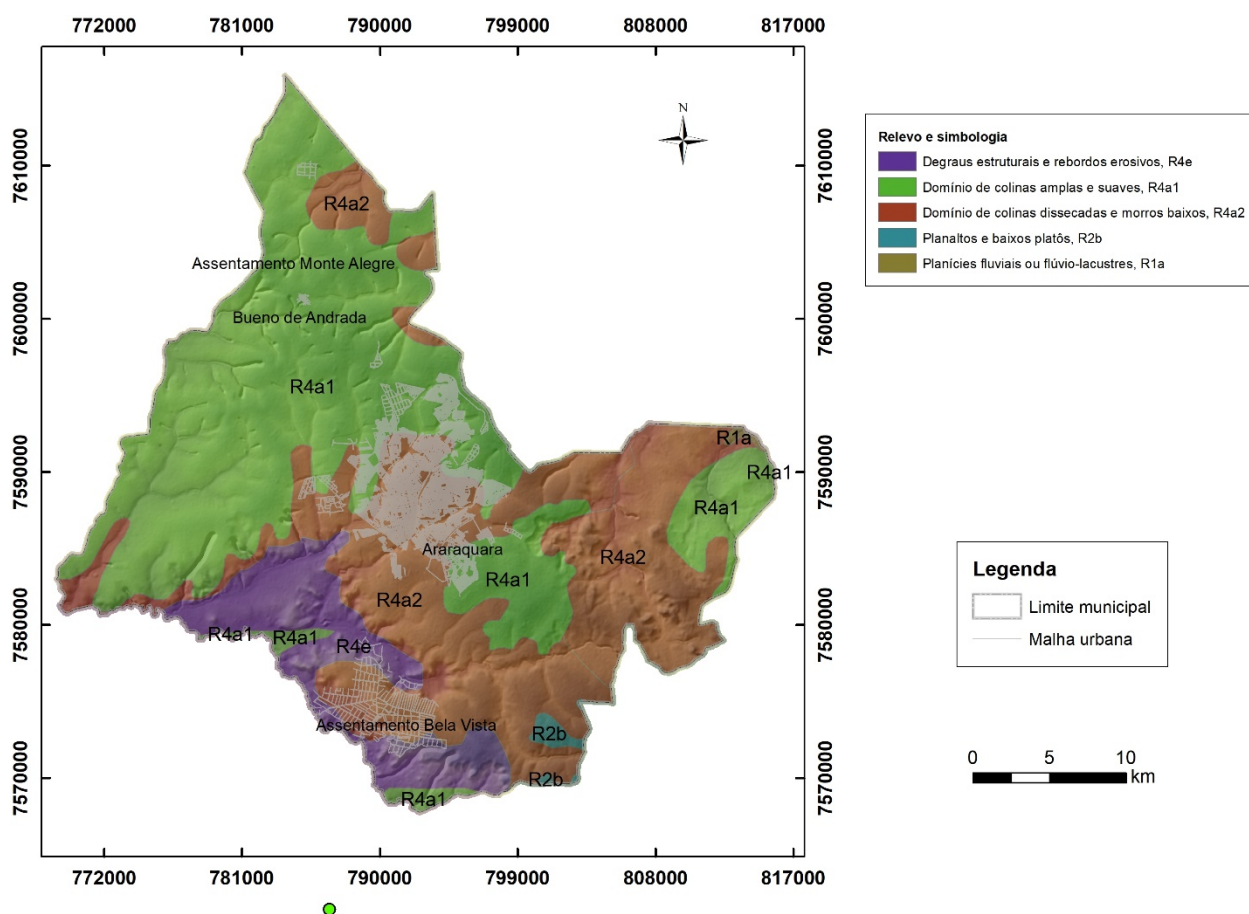


Figura 4.5 – Mapa de classificação do relevo do município de Araraquara.

#### 4.5. Clima

O clima do município de Araraquara é classificado como subtropical úmido (Cwa), de acordo com a Classificação de Köppen-Geiger, com invernos secos e amenos, e verões quentes e chuvosos. Junho é o mês mais seco, com precipitação média de 19 mm, enquanto o mês mais chuvoso é janeiro, com média de 333 mm. A quantidade média de chuva é de 1381 mm. Outubro é o mês mais quente do ano, com temperatura máxima média de 30° C, enquanto julho é o mês mais frio, com média de 13° C ([www.climatempo.com.br/climatologia/397/araraquara-sp](http://www.climatempo.com.br/climatologia/397/araraquara-sp)).

Dados pluviométricos do período de 2002 a 2021, registrados na estação meteorológica de código C5-124, do DAEE (<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br>), localizada na área de estudo, mostram que a distribuição de precipitação atmosférica no município de Araraquara é irregular, com 72,4% concentrando-se nos meses de novembro a março (Figura 4.6).

O mês relativamente mais seco é julho, com precipitação média de 25 mm, enquanto o mês mais chuvoso é janeiro, com média de 277 mm. A média mensal é de 1288 mm.

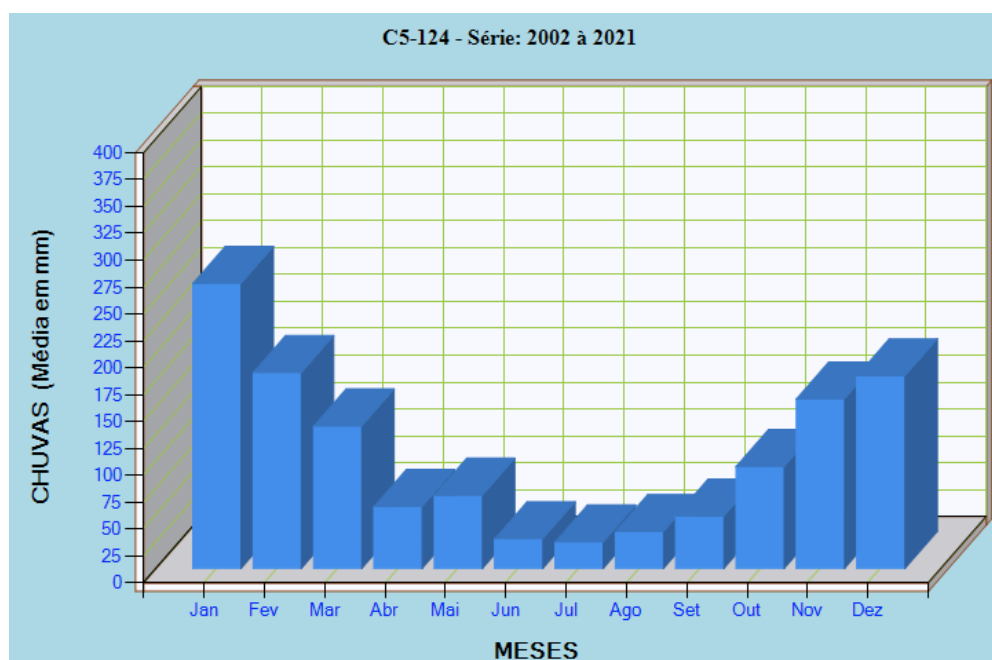


Figura 4.6 – Precipitação média mensal do período de 2002 a 2021, registrada na estação C5-124 (Dados retirados de <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>).

#### 4.6. Uso e ocupação do solo

As condições de uso e ocupação do solo no município de Araraquara foram caracterizadas a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto baseadas na classificação supervisionada, com o emprego de imagens do satélite CBERS 4 – Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres – , fruto da parceria intergovernamental envolvendo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Agência Espacial Brasileira (AEB), *Chinese Academy of Space Technology* (CAST) e *China National Space Administration* (Figura 4.7).

As imagens são provenientes de sensor Pancromático de Ampla Varredura (WPM), nível de processamento L4, registradas no dia 02/07/2022. As aquisições foram feitas a partir da plataforma de Catálogos de Imagens administrada pelo INPE, de domínio público.

Para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo, a partir da imagem RGB do CEBERS-4A, foi utilizada a extensão *Orfeo Toolbox* (OTB), que consiste em uma biblioteca de processamento de imagens de sensoriamento remoto desenvolvida pela CNES, a Agência Espacial Francesa.



**Figura 4.7 - Imagem do satélite CBERS 4 (cor verdadeira) utilizado para análise e geração do mapa de uso e ocupação do solo.**

Nesta abordagem, diferentes classes de cobertura do solo são definidas antecipadamente e suas propriedades são aprendidas a partir de amostras de treinamento coletadas. Em seguida, todos os pontos de dados são classificados usando esses modelos. O algoritmo *TrainImagesClassifier* é então aplicado para classificar cada pixel com base em suas características espectrais, considerando uma distribuição de probabilidade espacial predefinida dos dados. Isso permite que o algoritmo determine os parâmetros essenciais, como o vetor médio e a matriz de covariância, dos dados de treinamento. Cada pixel é então atribuído à categoria mais provável com base em suas características espectrais.

No município de Araraquara foram delimitadas nove classes: Asfalto; Concreto; Telhado; Solo exposto; Gramíneas/vegetação rasteira; Plantação temporária (Cana-de-açúcar); Plantação permanente (Plantação de laranja); Mata nativa ou reflorestamento; e Corpos d'água.

Após a classificação de cada pixel dentro das classes previamente definidas no treinamento, algumas foram agrupadas como novas classes. Desta maneira, as classes Asfalto, Concreto e Telhado foram combinadas dentro de uma nova classe, denominada "Áreas urbanizadas".

Com base nessa categorização, foi gerado um mapa com as classes de uso e ocupação do solo do município de Araraquara (Figura 4.8), sendo que 32% da extensão territorial municipal é destinada a cultivos temporários, especificamente cana-de-açúcar; 23% são áreas de solo exposto, enquanto 20% são ocupadas por florestas naturais ou reflorestadas; cerca de 16% do solo é coberto por gramíneas ou vegetação rasteira, enquanto 5% são áreas urbanas; os cultivos permanentes, principalmente de laranja, compreendem 2% da área, e apenas 1% corresponde a corpos d'água superficiais.

#### **4.7. Características do solo**

Os solos predominantes no município de Araraquara são os latossolos vermelhos (distróficos e distroférricos), os quais cobrem 69% da área (Rossi, 2017). Subordinadamente aparecem os latossolos vermelho-amarelos, os neossolos quartzarênicos e litólicos que ocupam, respectivamente, 14%, 5% e 4% da área do município. Os demais tipos, formados por organossolos, planossolos e gleissolos, têm menor expressão em área (Tabela 4.3 e Figura 4.9).

Os neossolos quartzarênicos estão associados à ocorrência de arenitos da Formação Piramboia, enquanto os latossolos estão associados à ocorrência de basaltos da Formação Serra Geral e de arenitos lamífticos da Formação Adamantina.

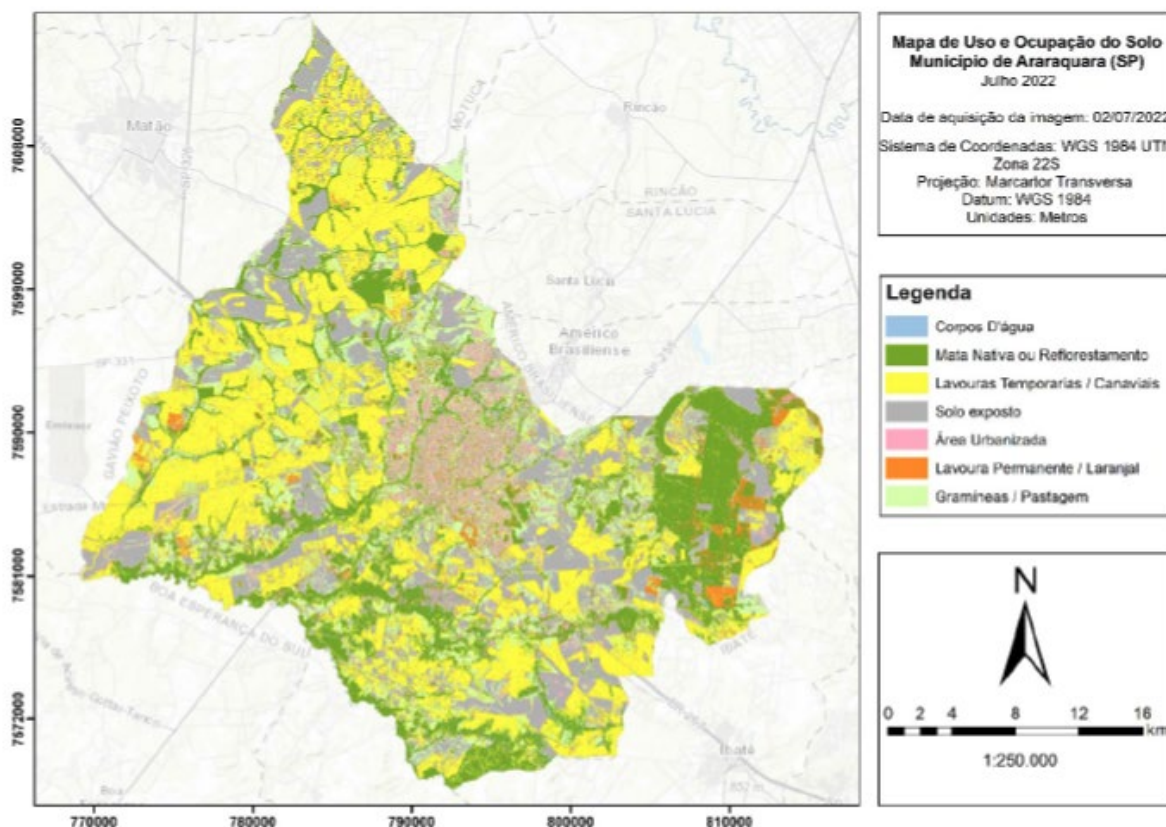
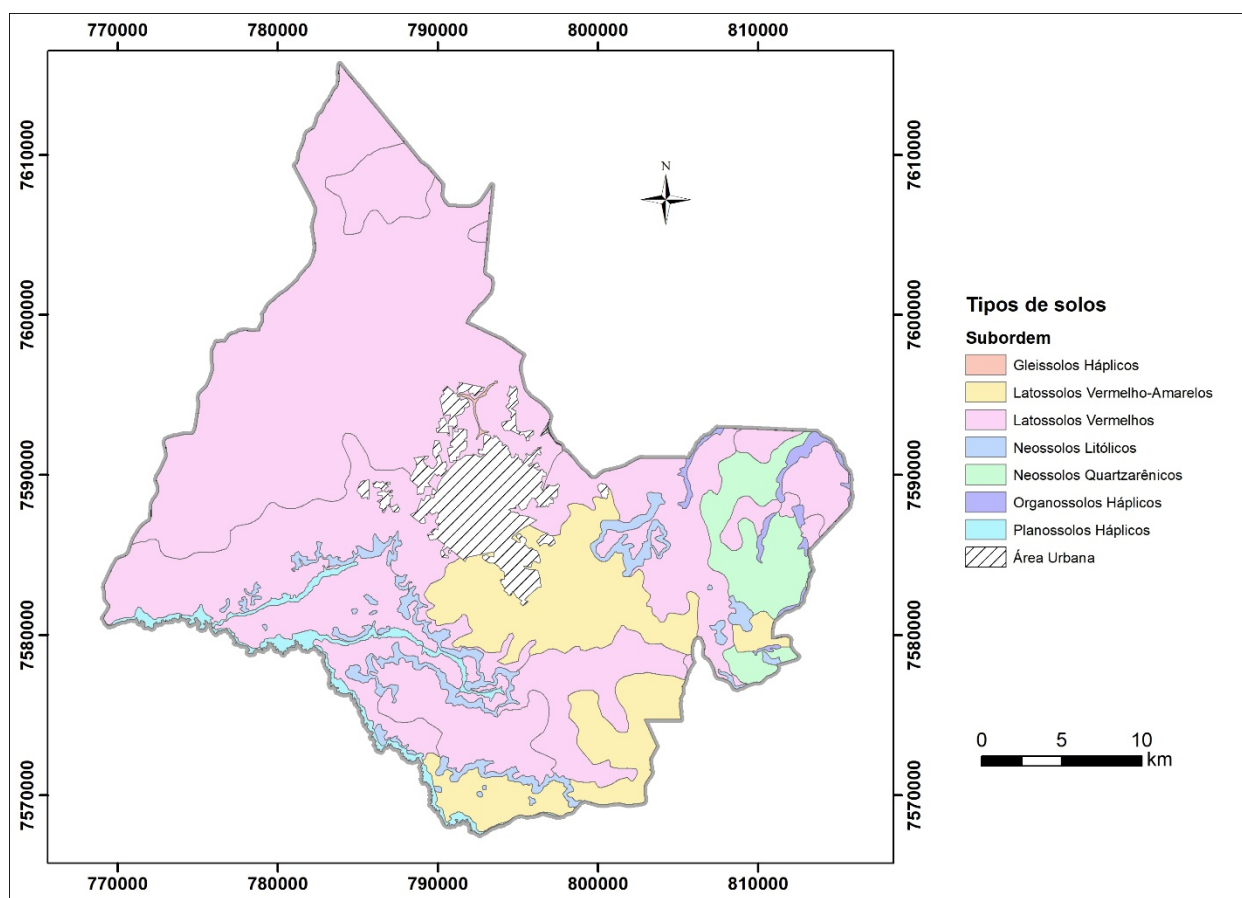


Figura 4.8 – Mapa de uso do solo do município de Araraquara.

Tabela 4.3 – Tipos de solo do município de Araraquara (Rossi, 2017).

Tipos de solo do município de Araraquara		
Tipos de solo	Área (km <sup>2</sup> )	% da área
Sem classificação	59,42	5,91%
Gleissolos Háplicos	0,72	0,07%
Latosolos Vermelho-Amarelos	140,94	14,02%
Latosolos Vermelhos	691,09	68,77%
Neossolos Litólicos	38,49	3,83%
Neossolos Quartzarênicos	48,09	4,79%
Organossolos Háplicos	8,00	0,80%
Planossolos Háplicos	18,19	1,81%
<b>Total</b>	<b>1004,93</b>	<b>100,00%</b>



**Figura 4.9 – Mapa pedológico do município de Araraquara (Rossi, 2017).**

#### 4.8. Bacias hidrográficas

O município de Araraquara insere-se nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI nº 13 e UGRHI nº 9 –, denominadas respectivamente Tietê/Jacaré e Mogi-Guaçu, formalizadas com base no Decreto 38.455, de 21 de março de 1994, juntamente com outras 20 unidades. A UGRHI-13 cobre área de 11.779 km<sup>2</sup> e é definida pelas bacias hidrográficas de cursos de água afluentes do rio Tietê, entre as barragens das usinas hidrelétricas (UHEs) de Ibitinga e Barra Bonita, onde destacam-se os rios Jacaré-Pepira, Jacaré-Guaçu e Jaú, afluentes da margem direita. A UGRHI-13 possui área total de 15.004 km<sup>2</sup> e é composta pela bacia do rio Mogi Guaçu e seus afluentes.

Por sua vez, o município de Araraquara é segmentado em duas grandes bacias: a maior parte de seu território (69%) ocupa a bacia do Rio Jacaré-Guaçu, pertencente à UGRHI-13; e uma porção menor (31%), com divisor situado a norte e leste, drena suas águas superficiais para a Bacia do Rio Mogi-Guaçu, pertencente à UGRHI-9.

Utilizando ferramentas de geoprocessamento do módulo *Hydrology* do programa ArcGis, foram delimitadas 14 sub-bacias que drenam as águas superficiais de Araraquara (Figura 4.10 e Tabela 4.4)

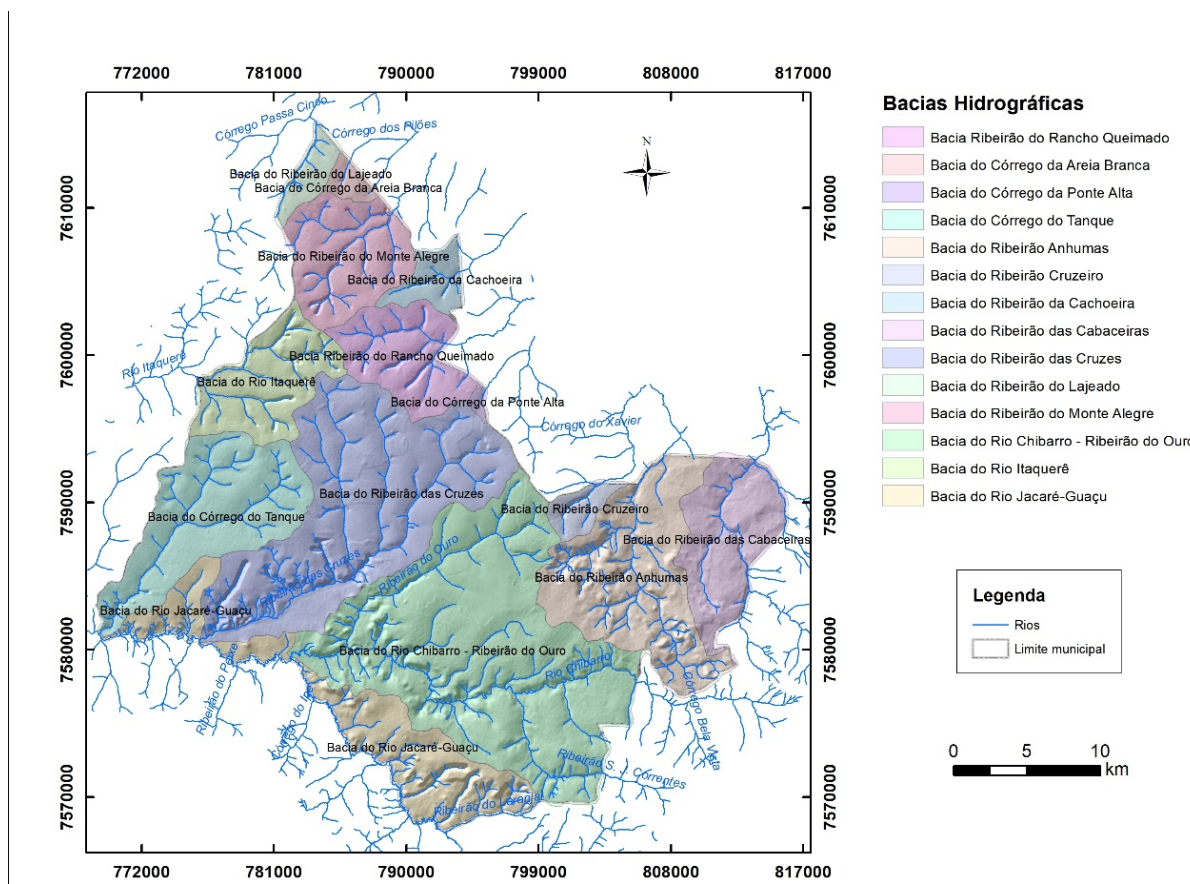


Figura 4.10 – Bacias hidrográficas do município de Araraquara.

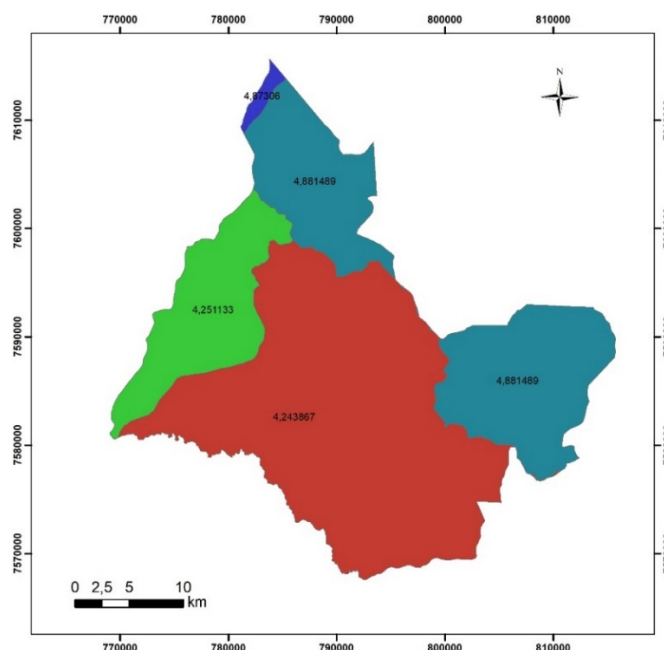
Tabela 4.4 - Sub-bacias hidrográficas do município de Araraquara

Bacias hidrográficas do município de Araraquara		
UGRI	Bacia hidrográfica	Área (km <sup>2</sup> )
9	Bacia do Ribeirão do Lajeado	13,30
	Bacia do Ribeirão da Cachoeira	16,40
	Bacia do Ribeirão do Monte Alegre	57,90
	Bacia Ribeirão do Rancho Queimado	48,40
	Bacia do Ribeirão Cruzeiro	11,40
	Bacia do Ribeirão das Cabaceiras	61,80
	Bacia do Ribeirão Anhumas	108,20
	<b>Subtotal</b>	<b>317,40</b>
13	Bacia do Córrego da Areia Branca	6,90
	Bacia do Rio Itaquerê	53,90
	Bacia do Córrego da Ponte Alta	2,20
	Bacia do Córrego do Tanque	91,50

Bacias hidrográficas do município de Araraquara	
Bacia do Ribeirão das Cruzes	185,20
Bacia do Rio Chibarro - Ribeirão do Ouro	255,50
Bacia do Rio Jacaré-Guaçu	91,40
<b>Subtotal</b>	<b>686,60</b>
<b>Total geral</b>	<b>1004,00</b>

A Bacia do Rio Jacaré-Guaçu, com área total de 686,6 km<sup>2</sup>, comporta as sub-bacias do córrego da Areia Branca, rio Itaquerê, córrego da Ponte Alta, córrego do Tanque, ribeirão das Cruzes, rio Chibarro/ribeirão do Ouro e rio Jacaré-Guaçu. A Bacia do Rio Mogi-Guaçu abrange as sub-bacias do ribeirão do Lajeado, ribeirão da Cachoeira, ribeirão do Monte Alegre, ribeirão do Rancho Queimado, ribeirão Cruzeiro, ribeirão das Cabaceiras e ribeirão Anhumas, e tem área total no município de 317,4 km<sup>2</sup>.

As disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de São Paulo têm sido baseadas no parâmetro Q<sub>95</sub> das bacias hidrográficas, que corresponde à vazão superficial mínima de permanência com frequência de 95% do tempo, conforme estimadas pelo DAEE. Esse parâmetro relaciona-se diretamente com a pluviosidade e as taxas de recarga dos aquíferos superficiais e tem sido adotado para definição das disponibilidades globais (superficial e subterrânea) nos relatórios de situação dos recursos hídricos estaduais (DAAE/LEBAC, 2013). Para as sub-bacias do município de Araraquara, o parâmetro Q<sub>95</sub> varia de 4,24 L/s/km<sup>2</sup> a 4,88 L/s/km<sup>2</sup> (Figura 4.11).



**Figura 4.11 – Distribuição dos valores de Q<sub>95</sub> (L/s/km<sup>2</sup>) das sub-bacias do município de Araraquara.**

## 5. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

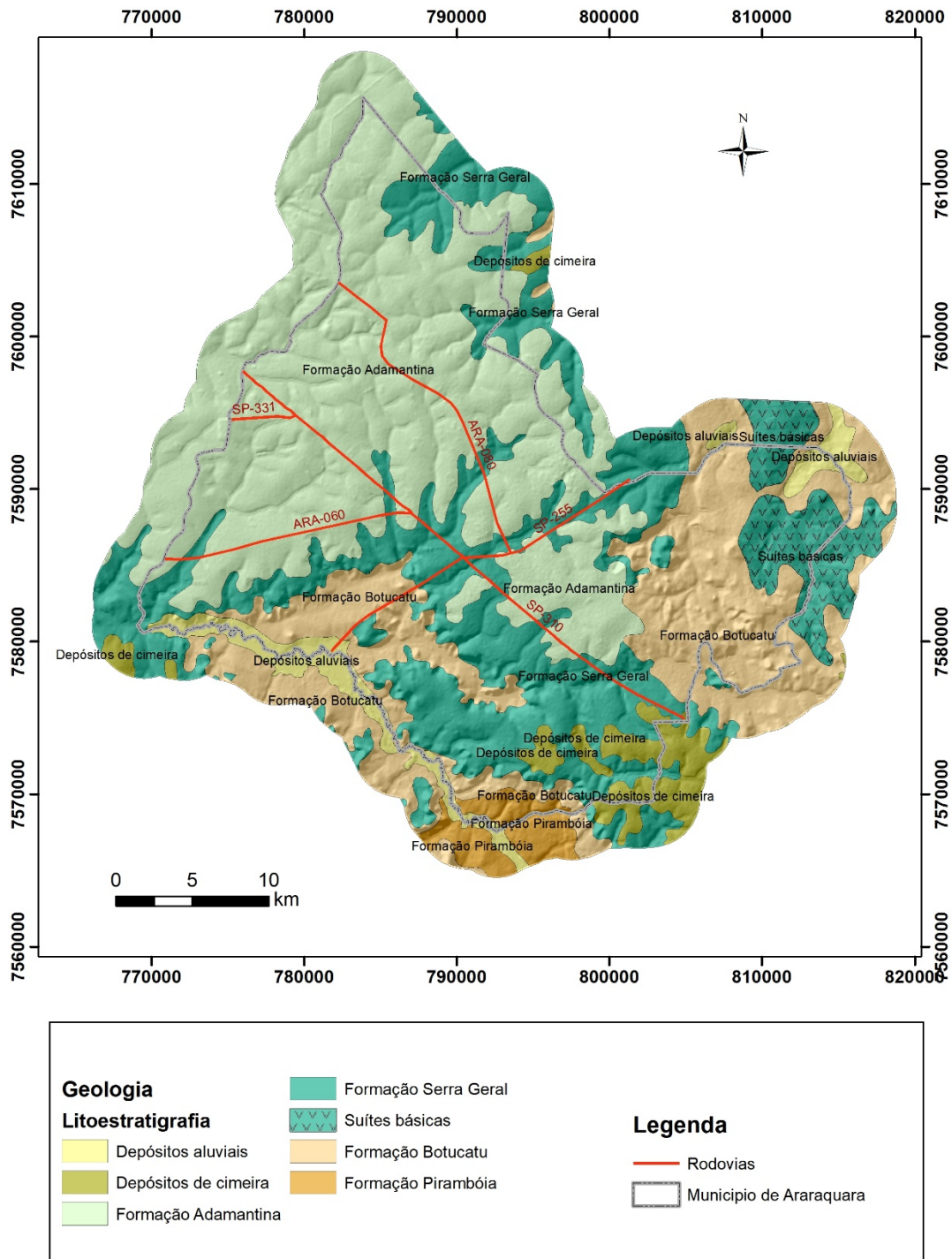
A sucessão vulcano-sedimentar exposta no município de Araraquara compreende o registro geológico remanescente depositado durante a Era Mesozoica, tempo que transcorreu entre 241 milhões de anos a 65 milhões de anos atrás, e depósitos cenozoicos de ocorrência localizada, que completam o arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná.

A Bacia Geológica do Paraná é uma unidade geotectônica com área de 1.400.000 km<sup>2</sup>, preenchida por rochas com idades variando entre o Ordoviciano e o Cenozoico, estabelecida inteiramente sobre crosta continental da Plataforma Sul-Americana (Almeida, 1967).

A litoestratigrafia do município é representada pelas rochas sedimentares do Grupo Bauru (Cretáceo Superior) e das formações Botucatu (Cretáceo Inferior), Guará (Jurássico Superior) e Piramboia (Triássico Médio a Superior), e pelas rochas vulcânicas básicas da Formação Serra Geral (Cretáceo Inferior), além de depósitos cenozoicos aluviais e de cimeira.

A unidade Guará, descrita originalmente no Rio Grande do Sul, foi recentemente reconhecida em perfis geofísicos em toda a Bacia do Paraná (Paula e Silva *et al.*, 2023). Essa unidade corresponde à porção superior do intervalo litoestratigráfico abrangido pela Formação Piramboia, definida anteriormente por Soares *et al.* (1973). No entanto, não foi discriminada neste estudo, já que o mencionado trabalho foi publicado após o término da análise estratigráfica efetuada neste projeto. Nesse sentido, a unidade Piramboia, representada no mapa geológico da Figura 5.1, engloba também a unidade Guará, conforme proposição de Paula e Silva *et al.* (2023).

A unidade litoestratigráfica basal da sucessão mesozoica é representada pela Formação Piramboia, depositada em ambiente eólico-fluvial, onde se intercalam fácies de dunas de pequeno a médio portes, interdunas úmidas e interdunas secas, com associações de fácies fluviais de rios temporários (Caetano-Chang, 1997). Os termos litológicos são predominantemente arenosos, constituídos por arenitos finos a médios, arenitos grossos e arenitos conglomeráticos, com intercalações subordinadas de siltitos e argilitos. A espessura máxima desta unidade em Araraquara é ainda desconhecida, uma vez que os poços perfurados nesta formação não atingiram o topo da Formação Corumbataí, que delimita a sucessão mesozoica. A maior espessura constatada em perfurações foi de 208 m, no poço Vitória de Santi II, do DAAE.



**Figura 5.1 – Mapa geológico do município de Araraquara (UNESP, 1980) e localização dos poços selecionados neste estudo.**

A Formação Botucatu recobre a unidade Pirambóia por meio de contato basal que representa uma discordância regional, segundo grande parte dos autores, entre eles Caetano-Chang (1997). É constituída predominantemente por sucessão monótona de arenitos finos a médios, exibindo estratificações cruzadas de grande e médio portes, depositados por processos eólicos em

ambiente desértico. As formas originais das construções eólicas foram preservadas pelo recobrimento concordante de derrames basálticos que cobriram a Bacia do Paraná, como exemplificado na Figura 5.2 A variação de espessura da Formação Botucatu é, em grande parte, função da distribuição dos campos de dunas e de seu recobrimento pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Nas perfurações de poços públicos do DAAE, as espessuras constatadas da Formação Botucatu variaram de 50 m (Poço ETA Paiol) a 178 m (poço do Parque Planalto), com média de 92 m.



**Figura 5.2 – Recobrimento concordante dos arenitos da Formação Botucatu pelos derrames da Formação Serra Geral. Rodovia Araraquara/Boa Esperança do Sul (Foto Flavio de Paula e Silva).**

A Formação Serra Geral, sobrejacente, compreende o conjunto de derrames de rochas basálticas e de magmatitos intrusivos associados (Figura 5.3). As espessuras dessa unidade variam desde uma dezena de metros (Poço De Santi II) até 198 m (poço ETA Paiol), incluindo intercalações de arenitos intertrapeanos que podem alcançar até mais de 20 m.

Por sua vez, o conjunto de magmatitos intrusivos (diabásios) pode registrar espessuras totais notáveis, como no poço De Santi II, onde alcançou 75 m.

O contato basal com a Formação Botucatu, localmente abrupto, mostra regionalmente relações de interdigitação entre os primeiros derrames basálticos e os arenitos eólicos desta unidade. A recorrência de arenitos nas camadas inferiores dos basaltos da Formação Serra Geral assinala a contemporaneidade entre a sedimentação eólica e os primeiros derrames de lavas.



**Figura 5.3 – Exposição de rochas basálticas da Formação Serra Geral na Pedreira Ouro Fino (Foto Flavio de Paula e Silva).**

O Grupo Bauru, unidade posicionada no topo da sucessão mesozoica e com área de ocorrência de 483 km<sup>2</sup> no município de Araraquara, é representado exclusivamente pela Formação Adamantina. Essa unidade assenta-se discordantemente sobre substrato basáltico da Formação Serra Geral e aflora de modo generalizado na área. Caracteriza-se pela presença de arenitos avermelhados a acastanhados, finos a muito finos, argilosos, algo carbonáticos, quartzosos, intercalados por camadas de lamito marrom a avermelhado, arenoso, carbonático (Paula e Silva, 2003).

Recobrando localmente áreas de afloramento dos basaltos Serra Geral aparecem sedimentos pouco consolidados, compostos por argilas, siltes e arenitos finos argilosos, com raros e pequenos níveis de cascalhos, pertencentes às coberturas sedimentares de cimeiras, conforme indicado no mapa geológico (Figura 5.1).

Nas porções baixas dos terrenos, associadas às planícies aluvionares dos principais rios do município, ocorrem depósitos recentes compostos por areias finas a grossas e sedimentos silto-argilosos.

## 6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Os reservatórios de água subterrânea (aquíferos) são formados por diferentes tipos de rocha, cujas características de permoporosidade permitem armazenar e transmitir quantidades consideráveis de água em condições naturais. Quando portadores de água de boa qualidade podem ser utilizados economicamente para abastecimento humano, principalmente de cidades de pequeno e médio portes, núcleos urbanos, ou ainda de modo complementar ao abastecimento superficial, além de outros usos como industrial, irrigação, comercial, pecuária, mineração etc.

Os aquíferos ou sistemas aquíferos encontram-se em diferentes condições de pressão, sendo designados livres quando a zona saturada está sob pressão atmosférica e o limite superior dessa zona representa a superfície potenciométrica; são designados confinados quando o nível de água se encontra com pressão maior do que a atmosférica, ou seja, a superfície potenciométrica eleva-se acima da zona saturada ou topo do aquífero; já os aquíferos semiconfinados são similares aos confinados, porém, permitem a recarga ou a descarga de água através das camadas semiconfinantes, tanto acima como abaixo de seus limites, dependendo das relações de pressão com os aquíferos contíguos.

Do ponto de vista do armazenamento de água, a propriedade mais importante dos aquíferos é a porosidade, definida pela relação entre o volume de poros e o volume total da rocha. De modo prático, a porosidade pode ser classificada em: granular, no caso de rochas sedimentares, onde a água preenche os espaços entre os grãos da rocha; fissural, no caso de rochas fraturadas, onde a água preenche as fendas e outras descontinuidades rochosas; porosidade por dissolução, no caso de rochas carbonáticas, onde a água preenche cavidades originadas por dissolução dos componentes rochosos; e porosidade granular/fissural, no caso de rochas sedimentares e/ou metassedimentares com porosidade dupla (fissural e granular).

Uma vez que o escoamento subterrâneo depende da conexão entre poros e/ou fissuras, o parâmetro que define o volume de água que efetivamente pode ser liberado da rocha por drenagem gravitacional, e tem importância fundamental na avaliação da quantidade de água disponível no aquífero, é a porosidade eficaz (Tabela 6.1).

**Tabela 6.1 - Valores de porosidade eficaz de rochas.**

Valores de porosidade eficaz	
<b>Argila</b>	2
<b>Areia argilosa</b>	7
<b>Silte</b>	18
<b>Areia fina</b>	21
<b>Areia média</b>	26
<b>Areia grossa</b>	27
<b>Areia conglomerática</b>	25

Morris & Johnson  
(1967)

Valores de porosidade eficaz	
Cascalho fino	25
Cascalho médio	23
Cascalho grosso	22
Granito	<0,2
Calcário maciço	<0,5
Dolomita	<0,5
Basalto denso	<1
Basalto vesicular	5
Arenito	10
Calcário detrítico	3

Custodio (1996):  
compilação de vários  
autores

Em termos de movimento, a propriedade das rochas que controla o fluxo das águas subterrâneas é condutividade hidráulica ou permeabilidade. Aquíferos possuem condutividades hidráulicas que variam de  $10^{-2}$  m/d a  $10^4$  m/d (Custódio & Llamas, 1996). Quando o meio rochoso transmite água muito lentamente, ou seja, é pouco permeável a semipermeável, é classificado como aquífero. Se o meio é praticamente impermeável, é definido como aquícluído (Tabela 6.2).

**Tabela 6.2 - Classificação de aquíferos em função da condutividade hidráulica.**

Classificação de aquíferos em função da condutividade hidráulica											
Condutividade hidráulica (m/d)	1E-06	1E-05	1E-04	1E-03	1E-02	1E-01	1E+00	1E+01	1E+02	1E+03	1E+04
Classificação da permeabilidade	Impermeável		Pouco permeável		Moderadamente permeável		Permeável		Muito permeável		
Classificação do aquífero	Aquiclúido		Aquífero		Aquífero pobre		Aquífero regular a bom		Aquífero excelente		
Exemplo de materiais	Argila compacta		Lamito arenoso		Areia fina/muito fina		Areia limpa		Cascalho limpo		
	Piçarra		Lamito		Areia argilosa		Cascalho e areia				
	Granito		Argila arenosa		Calcário fraturado		Areia média a grossa				

Referência: Custódio e Llamas (1996).

Além de sua utilização como fonte de suprimento de recursos hídricos para abastecimento público e demais usos, as águas subterrâneas desempenham papel determinante na sustentabilidade dos cursos de água superficiais ao contribuir, principalmente, com a manutenção do escoamento de base durante os períodos de estiagem.

### 6.1. Sistemas Aquíferos

As águas subterrâneas presentes no município de Araraquara estão armazenadas em reservatórios de porosidade granular e fissural, e discriminadas em termos de sistemas aquíferos com base nas características litológicas do arcabouço rochoso e tipo de porosidade predominante.

Os sistemas aquíferos correspondem a um corpo heterogêneo de materiais com intercalações permeáveis e pobremente permeáveis, que funcionam como uma unidade hidroestratigráfica produtora de água, compreendendo duas ou mais camadas permeáveis separadas, ao menos localmente, por aquíferos que dificultam o movimento das águas subterrâneas, mas que não afetam a continuidade hidráulica do sistema (Poland *et al.*, 1972). Esse conceito foi adotado neste estudo para designar o conjunto de aquíferos e aquíferos enfeixados em uma ou mais unidades litoestratigráficas contíguas, admitidas como hidráulicamente conectadas.

Os sistemas aquíferos foram distinguidos e delimitados com base nas unidades litoestratigráficas reconhecidas na região de Araraquara, delineadas no mapa geológico elaborado por DAEE/UNESP (1980). Pequenos ajustes foram realizados nesse mapa, de modo a compatibilizar o traçado das unidades litoestratigráficas com os dados de poços existentes. Foram definidos os sistemas aquíferos Bauru (SAB), Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG), sendo que as coberturas sedimentares e aluvionares delimitadas no mapa do DAEE/UNESP (1980), de pouca expressão em termos de extensão e de capacidade de armazenamento de água, foram agrupadas aos sistemas aquíferos subjacentes (Figura 6.1 e Tabela 6.3).

Os principais sistemas aquíferos presentes no município de Araraquara distribuem-se em unidades litoestratigráficas depositadas durante o período mesozoico e assentadas sobre rochas pelíticas permianas do Aquífero Passa Dois, de ocorrência regional.

Com exceção do SAB, que é aflorante na área do município, o SASG e o SAG encontram-se parcialmente cobertos, respectivamente, por rochas do SAB e por rochas do SASG. Por outro lado, janelas estruturais presentes na área colocam o SAG diretamente em contato com o SAB, na ausência dos basaltos Serra Geral.

As áreas de ocorrência desses sistemas aquíferos, tanto em superfície como em subsuperfície, são mostradas na Tabela 6.4.

O ANEXO IV lista os poços empregados nas análises litoestratigráficas e hidrogeológicas apresentadas neste capítulo, conforme localizados na Figura 6.1.

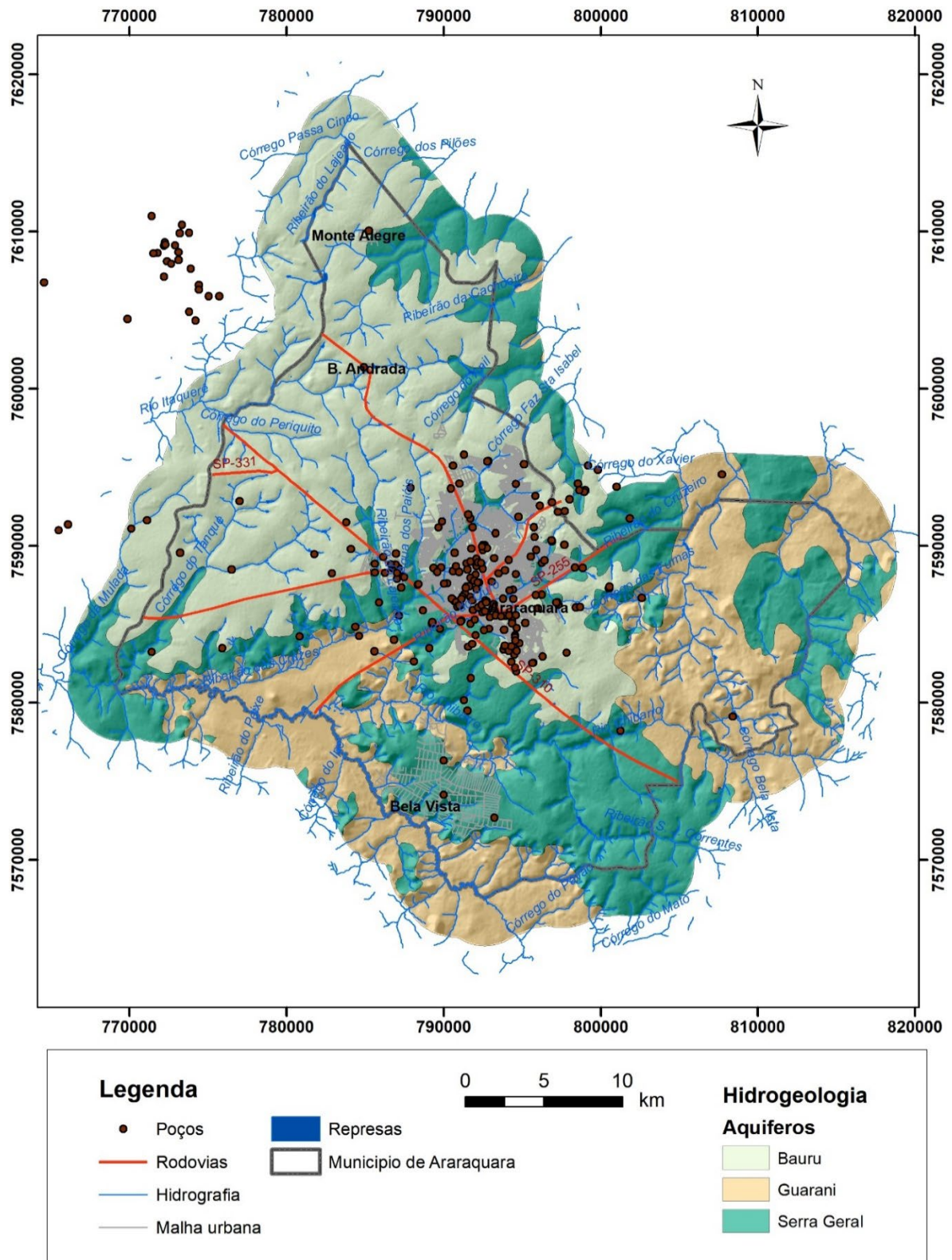


Figura 6.1 – Distribuição dos sistemas aquíferos do município de Araraquara e localização dos poços empregados nas análises litoestratigráficas e hidrogeológicas.

**Tabela 6.3 – Características dos sistemas aquíferos do município de Araraquara**

Características dos Sistemas Aquíferos do município de Araraquara					
Sistemas	Unidade litoestratigráfica	Porosidade	Extensão	Continuidade	Natureza
Bauru	Adamantina	Granular	Regional	Contínuo	Livre a semiconfinado
Serra Geral	Basalto	Fissural	Regional	Descontínuo	Livre
	Diabásio		Local		
Guarani	Botucatu	Granular	Regional	Contínuo	Livre a confinado
	Piramboia				

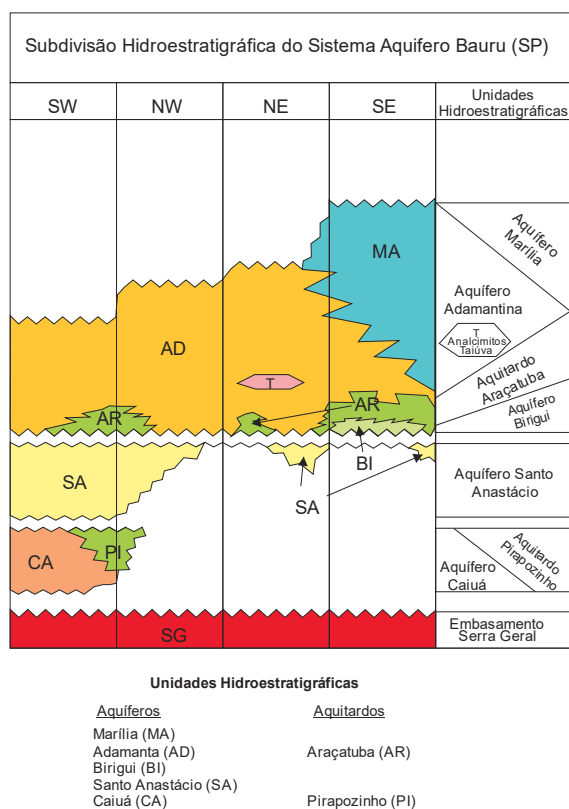
**Tabela 6.4 – Áreas de ocorrência dos sistemas aquíferos do município de Araraquara**

Distribuição dos Sistemas Aquíferos do município de Araraquara						
Sistemas	Área aflorante (km <sup>2</sup> )	Área coberta (km <sup>2</sup> )	Área total (Km <sup>2</sup> )	% área aflorante	% área coberta	% área total
Bauru	456	0,0	456	45,4%	0,0%	45,4%
Serra Geral	319	456	775	31,8%	45,4%	77,2%
Guarani	229	775	1004	22,8%	77,2%	100,00%
Total	<b>1004</b>					

## 6.2. Sistema Aquífero Bauru – SAB

No Estado de São Paulo, o SAB, reúne os aquíferos Marília, Adamantina, Birigui, Santo Anastácio e Caiuá, e os aquíferos Araçatuba e Pirapozinho, com base na subdivisão hidroestratigráfica proposta por Paula e Silva (2003) e Paula e Silva *et al.* (2005a), conforme mostrado na Figura 6.2.

Na região de Araraquara, o SAB é representado exclusivamente pelo Aquífero Adamantina. Esse aquífero é regionalmente caracterizado por depósitos arenosos em ciclos de *fining upward* com terminação em pelitos, indicativos de sedimentação em canais fluviais meandantes. O padrão geral é de sucessões em *coarsening upward*, constituindo ciclos maiores, que indicam progradação do sistema fluvial sobre nível de base lacustre. Podem assim representar depósitos associados a pequenos deltas, onde os processos de progradação e regressão são controlados, respectivamente, pela retração e expansão do sistema lacustre (Paula e Silva *et al.*, 2005b). A Figura 6.3 mostra um perfil geofísico típico da unidade hidroestratigráfica Adamantina no município de Araraquara.

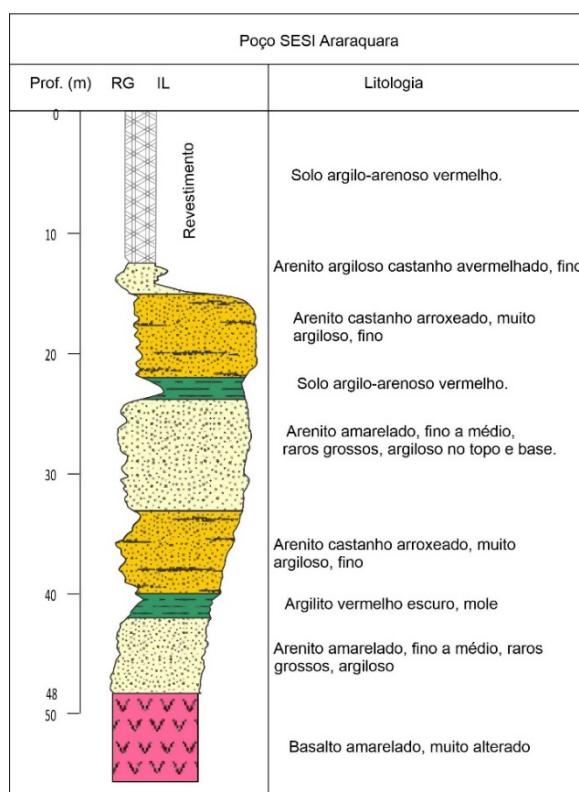


**Figura 6.2 - Subdivisão hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Bauru (Paula e Silva, 2003).**

Esse aquífero ocorre tão somente em superfície, onde distribui-se por 456 km<sup>2</sup>, o que corresponde a 45,4 % da área de estudo, ocupando sobretudo as porções noroeste, norte e nordeste do município (Tabela 6.4). Assenta-se predominantemente sobre rochas basálticas e muito localmente sobre sedimentos componentes do SAG na porção sudeste do município, onde os magmatitos estão ausentes.

O Aquífero Adamantina apresenta extensão regional, sendo considerado livre a semiconfinado e contínuo (DAEE, 1977). O semiconfinamento é decorrente, principalmente, das variações de permeabilidade dos sedimentos em função do maior ou menor teor de argila da matriz, ou de camadas pelíticas que se intercalam aos corpos arenosos.

A frequência das camadas lamíticas e as variações de argilosidade dos arenitos desta unidade hidroestratigráfica determinam seu comportamento hidráulico bastante heterogêneo e anisotrópico, mesmo em localidades relativamente próximas (Paula e Silva, 2003).



**Figura 6.3 – Perfil geofísico típico do Aquífero Adamantina no município de Araraquara.**

A distribuição das espessuras (isópacas) do SAB na região de Araraquara foi traçada por meio de técnicas de geoprocessamento de interpolação de dados de poços que atravessaram os sedimentos da Formação Adamantina (Figura 6.4). As rochas componentes do SAB possuem espessura média de pouco mais de 40 m, podendo alcançar espessuras de até 100 m em pontos topograficamente elevados do terreno. As variações de espessura dos sedimentos componentes do Aquífero Adamantina foram controladas por irregularidades do substrato basáltico e pelos processos erosivos que moldaram a superfície topográfica (Paula Silva, 2003).

As potencialidades hídricas do SAB na região de Araraquara foram avaliadas a partir de dados extraídos do cadastro SIAGAS. Neste estudo, potencialidade é definida como a vazão explotável ou recomendada de extração dos aquíferos, ou seja, a vazão que pode ser extraída de forma sustentável por longos períodos e com rebaixamentos moderados da espessura saturada, conforme DAEE (2005). As vazões de produção de 66 poços perfurados nesse sistema variaram entre 0,4 m<sup>3</sup>/h e 20,0 m<sup>3</sup>/h, com média de 3,38 m<sup>3</sup>/h e mediana de 1,80 m<sup>3</sup>/h; as vazões específicas de 63 poços variaram entre 0,06 m<sup>3</sup>/h/m e 2,46 m<sup>3</sup>/h/m, com média de 0,42 m<sup>3</sup>/h/m e mediana de 0,23 m<sup>3</sup>/h/m (Tabela 6.5).

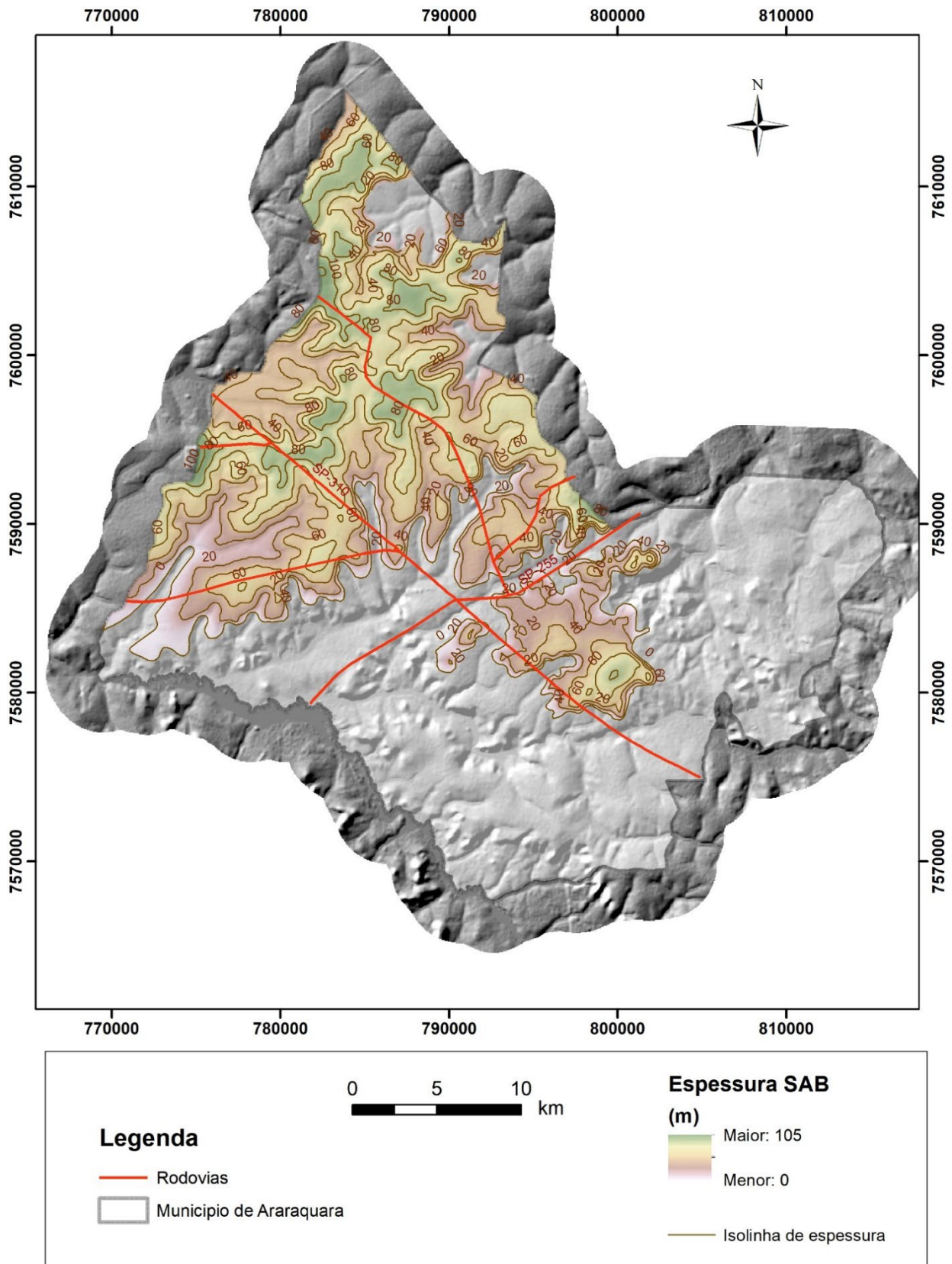


Figura 6.4 – Mapa de isópacas do Sistema Aquífero Bauru.

**Tabela 6.5 – Vazões de produção e específicas do SAB na região de Araraquara.**

Vazões de produção e vazões específicas do SAB		
Parâmetros	Vazão de produção m <sup>3</sup> /h)	Vazão específica (m <sup>3</sup> /h/m)
Média	3,38	0,42
Mediana	1,80	0,23
Mínimo	0,40	0,06
Máximo	20,00	2,46
Contagem	66,00	63,00

Segundo a classificação apresentada por DAEE/UNESP (2013), os resultados da análise estatística dos parâmetros hidrodinâmicos levantados conferem ao SAB um potencial predominantemente baixo, localmente podendo apresentar potencialidades média a alta.

A recarga do SAB é proveniente das precipitações atmosféricas sobre sua superfície aflorante e depende da taxa de infiltração. Estimativas robustas da quantidade anual de recarga do SAB em Araraquara ainda não foram realizadas. Meaulo (2007) registrou variação sazonal do nível d'água do SAB, nesse município, da ordem de 3 m a 4 m, em poços do tipo cacimba. Com base em dados de vazões mínimas Q<sub>95</sub> das sub-UGRHs do Estado de São Paulo, disponíveis em DAEE/UNESP (2013), a recarga do SAB foi estimada em 6,35 x 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>/ano. Essa recarga corresponde a 10% da média histórica anual das precipitações atmosféricas sobre a superfície do aquífero, estimada em 1374 mm.

As reservas hídricas renováveis dos aquíferos representam a quantidade de água armazenada e renovada anualmente a cada ciclo hidrológico. Essas reservas são determinantes para a manutenção do escoamento de base dos rios e podem variar anualmente, dependendo da quantidade de chuva precipitada em cada ciclo (Custódio & Llamas, 1996). De forma conservadora, admite-se neste estudo que as reservas renováveis do SAB equivalem à recarga sazonal, ou seja, são estimadas em 6,35 x 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>/ano.

As reservas permanentes correspondem ao volume de água acumulado no aquífero, não variável em decorrência da flutuação sazonal da superfície potenciométrica (Custódio & Llamas, 1996). Compreendem o volume de água contido no armazenamento drenável do aquífero, expresso pela equação abaixo:

$$R_p = A \cdot E \cdot \phi_e$$

Onde: R<sub>p</sub>= reserva drenável permanente (m<sup>3</sup>); A= área do aquífero (m<sup>2</sup>); E= espessura do aquífero (m); e  $\phi_e$ = porosidade efetiva (%).

Aplicando-se ferramentas de geoprocessamento, o volume rochoso do SAB foi calculado em  $2,03 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ; considerando-se uma porosidade efetiva de 5% para o SAB (DAEE, 2005), a reserva permanente foi calculada em  $1,01 \times 10^9 \text{ m}^3$ .

A Tabela 6.6 lista as reservas hídricas renováveis, permanentes e totais do SAB no município de Araraquara.

**Tabela 6.6 – Reservas hídricas do SAB no município de Araraquara**

Reservas hídricas do SAB				
Volume rochoso (m <sup>3</sup> )	Poros. Efetiva (%)	Reserva permanente (m <sup>3</sup> )	Reserva renovável (m <sup>3</sup> /ano)	Reservas totais (m <sup>3</sup> )
2,03E+10	5	1,01E+09	6,35E+07	1,08E+09

Muitos estudos demonstram que, em regiões úmidas, a superfície livre dos aquíferos normalmente apresenta a mesma conformação da superfície topográfica (Fetter, 2001). No estudo regional de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, o DAEE (1974) mostrou que a superfície potenciométrica dos aquíferos livres possui configuração muito semelhante à superfície topográfica, de modo que, em termos práticos, o fluxo subterrâneo natural se dá das altitudes mais altas para as mais baixas. Assim, a configuração do fluxo subterrâneo do SAB deve mostrar tendência de escoamento no sentido das drenagens e das porções mais elevadas para as menos elevadas do terreno (Figura 6.5).

### 6.3. Sistema Aquífero Serra Geral - SASG

O SASG reúne rochas magmáticas do período Eocretáceo da Bacia do Paraná, depositadas entre 134 Ma e 131 Ma (Almeida *et al.*, 2018).

O SASG é constituído por derrames de lavas basálticas e rochas intrusivas básicas da unidade estratigráfica Serra Geral e, localmente, por arenitos intertrapeanos de características texturais similares aos eolianitos Botucatu. De maneira generalizada, os termos petrológicos da Formação Serra Geral são dominados por basaltos toleíticos e andesitos basálticos, ocorrendo quantidades subordinadas de riolitos e riodacitos (Peate *et al.*, 1992).

O SASG compreende uma unidade hidrogeológica de extensão regional, descontínua, heterogênea, anisotrópica e livre – eventualmente pode apresentar semiconfinamento. Seu armazenamento de água se dá em fraturas, falhas e outras discontinuidades como contatos interderrames, uma vez que a porosidade primária dos magmatitos é quase nula.

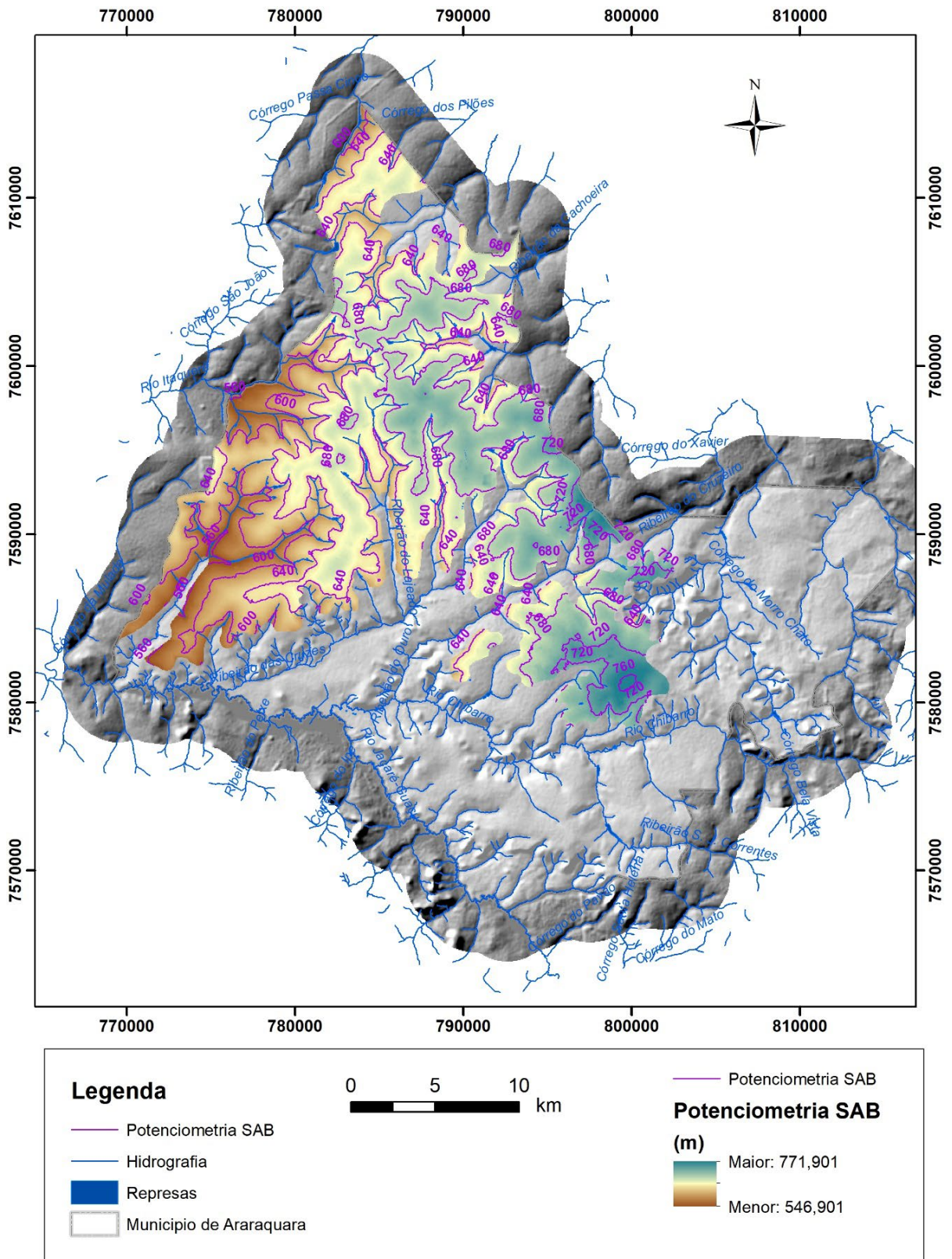


Figura 6.5 – Potenciometria do SAB.

Os sistemas de fraturamento do SASG estão relacionados tanto a esforços tectônicos, gerando fraturas subverticais, quanto aos processos de resfriamento que originaram descontinuidades sub-horizontais (Campos, 2004).

Esse sistema aflora na metade sul do município de Araraquara, até o limite dos ribeirões do Ouro e Cruzes, em área de 319 km<sup>2</sup>, onde encontra-se fragmentado por processos erosivos que modelaram o relevo do Planalto Ocidental. Em pequena porção da metade sul e na quase totalidade da porção norte do município, o SASG apresenta-se encoberto pelo SAB, estendendo-se em subsuperfície por área de 456 km<sup>2</sup> e perfazendo o total de 775 km<sup>2</sup> (Tabela 6.4).

Em termos percentuais, aflora em 31,8% e está encoberto em 45,4% da área do município.

Dados de 117 poços perfurados no SASG na região de Araraquara exibiram espessuras de rochas vulcânicas variando desde pouco menos de uma dezena de metros até 215 m, com média de 113 m.

A distribuição das espessuras do SASG revela grande variabilidade, com tendência de espessamento no sentido noroeste – em direção ao município de Matão – e adelgaçamento no sentido sudoeste, em direção à calha do Rio Jacaré-Guaçu, e na região sul, onde encontra-se parcial ou quase totalmente erodido (Figura 6.6). Em muitas situações, as rochas vulcânicas se intercalam a arenitos eólicos – intertrapes – e são confundidas com sills e/ou diques de diabásio.

A espessura das rochas intrusivas básicas aflorantes (diabásios), localizadas na porção leste do município, não foi avaliada devido à falta de informações. Em subsuperfície, dados de 34 poços perfilados mostram que em 18 deles foram constatados corpos de diabásio intrudidos na Formação Piramboia. As espessuras constatadas na área urbana variaram de poucos metros a 75 m no poço Vitório de Santi II. Um poço localizado na área rural do município, na porção aflorante do SAG, atravessou espessura de 146 m de rochas intrusivas. Muitas dessas espessuras são consideradas parciais, uma vez os poços não atravessaram completamente as rochas magmáticas.

As ocorrências de diabásio na coluna mesozoica são aleatórias e de espessuras variáveis, como é de conhecimento geral. Todavia, uma análise preliminar mostra que um intervalo sedimentar característico, situado na porção mediana da unidade Piramboia, foi mais propenso a alojar esses corpos magmáticos, conforme revelado pelos perfis geofísicos. Ao alcançar esses corpos rochosos, as perfurações de poços são geralmente encerradas, abstendo-se de investigar e avaliar o potencial hídrico do intervalo subjacente.

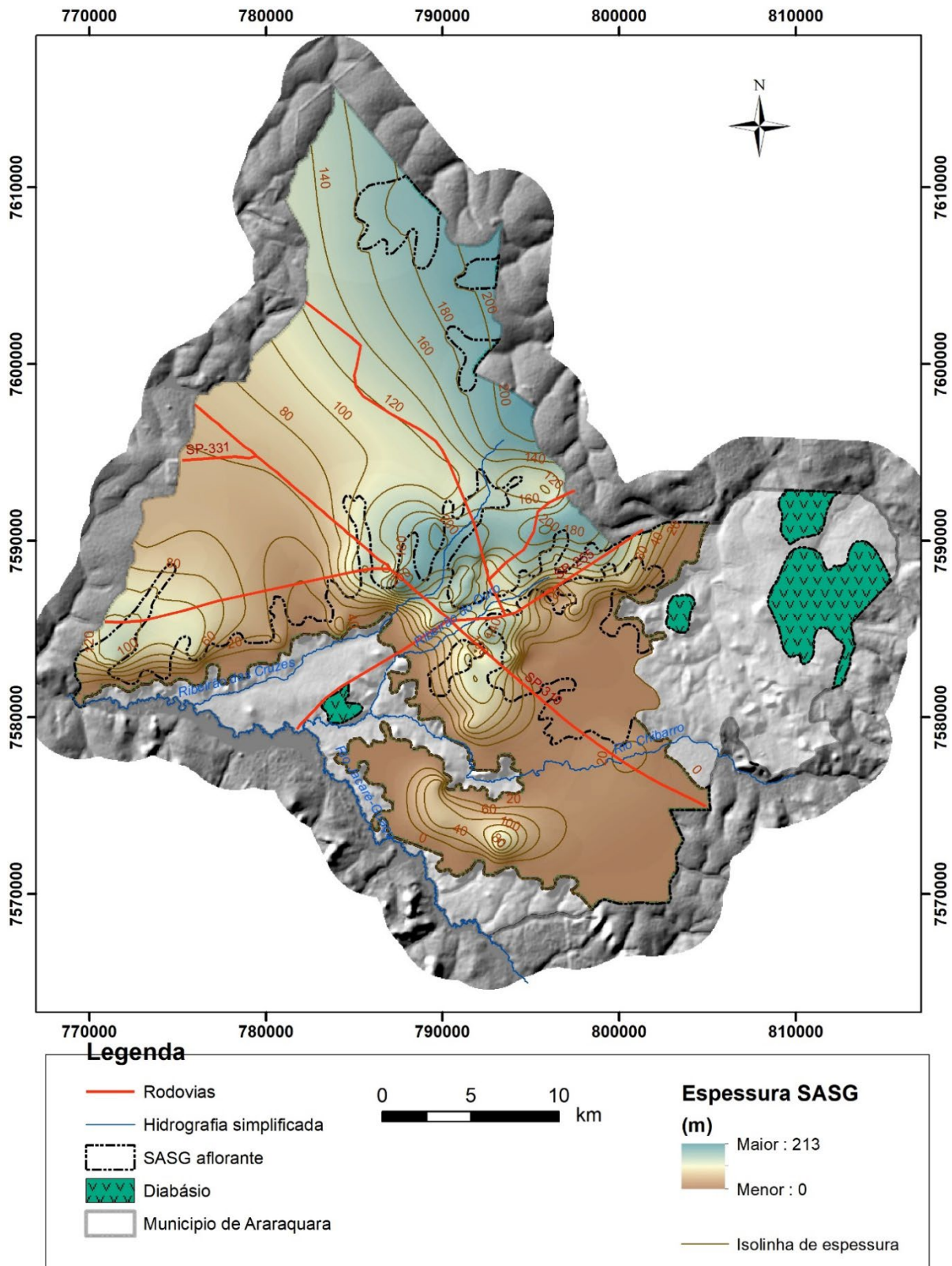


Figura 6.6 – Mapa de isópacas do Sistema Aquífero Serra Geral.

As potencialidades hídricas do SASG na região de Araraquara foram avaliadas a partir de dados de poços do cadastro SIAGAS. As vazões de produção de 103 poços perfurados nesse sistema variaram entre 0,9 m<sup>3</sup>/h até 28,8 m<sup>3</sup>/h, com média de 5,89 m<sup>3</sup>/h e mediana de 4,0 m<sup>3</sup>/h; as vazões específicas variaram entre 0,02 m<sup>3</sup>/h/m a 2,59 m<sup>3</sup>/h/m, com média de 0,55 m<sup>3</sup>/h/m e mediana de 0,27 m<sup>3</sup>/h/m (Tabela 6.7). Importante salientar que esse cadastro apresenta alguns dados de vazão e de vazão específica improváveis, que podem ser atribuídos à falta de consistência do banco de dados do SIAGAS. Outra questão que deve ser levada em conta na análise estatística é que poços com vazão nula não são cadastrados.

**Tabela 6.7 – Vazões de produção e específicas do SASG na região de Araraquara**

Vazões de produção e vazões específicas do SASG		
Parâmetros	Vazão de produção (m <sup>3</sup> /h)	Vazão específica (m <sup>3</sup> /h/m)
Média	5,89	0,55
Mediana	4,00	0,27
Mínimo	0,90	0,02
Máximo	28,80	2,59
Contagem	103	103

Segundo a classificação apresentada por DAEE/UNESP (2013), os resultados da análise estatística dos parâmetros hidrodinâmicos levantados conferem ao SASG um potencial predominantemente baixo, com potencialidades locais média a alta.

Estudos apresentados por DAEE (2005) não constataram correlação entre a vazão de produção de poços perfurados no basalto com a densidade de lineamentos e de intersecções de lineamentos. Atribuíram tal fato à maior condutividade hidráulica das fraturas horizontais e a contatos interderrames, que não são identificáveis por sensores remotos. Autores como Lastoria *et al.* (2006), Wahnfried (2010) e Fernandes *et al.* (2006) também apontaram essas estruturas como principais armazenadoras e controladoras do fluxo das águas subterrâneas do SASG.

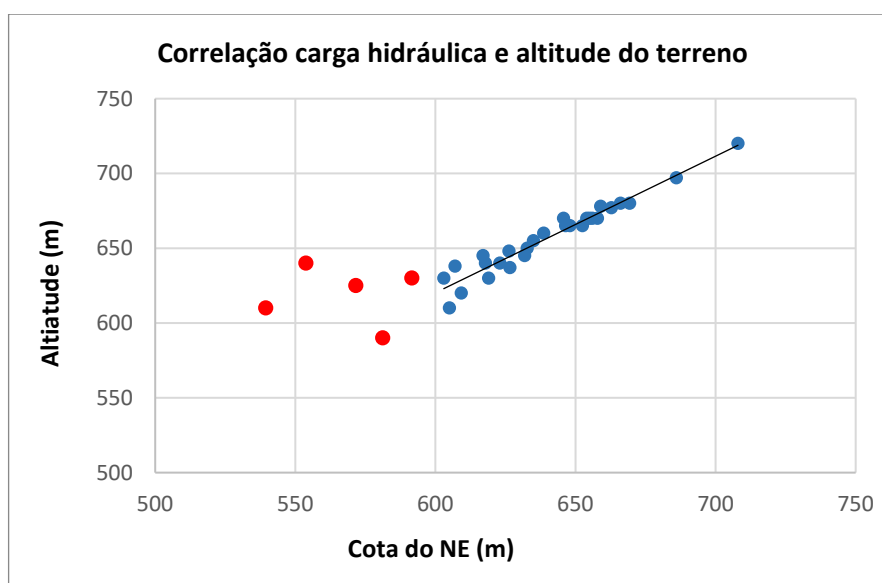
Os parâmetros hidrodinâmicos SASG na região de Araraquara são desconhecidos. No estado de São Paulo foram observadas transmissividades variando de 1,0 m<sup>2</sup>/d a 95 m<sup>2</sup>/d, com média de 20 m<sup>2</sup>/d, e porosidades efetivas de 1% a 5% (DAEE, 1976). Farjallat (1974) apontou condutividades hidráulicas entre 10<sup>-3</sup> m/s e 10<sup>-5</sup> m/s em basaltos diaclasados horizontalmente; entre 3 x 10<sup>-10</sup> m/s e 6 x 10<sup>-10</sup> m/s para basaltos diaclasados verticalmente; e entre 1,2 x 10<sup>-8</sup> m/s e 6 x 10<sup>-9</sup> m/s para os basaltos vesiculares e amigdaloidais.

Determinar a configuração da superfície potenciométrica de aquíferos fraturados, como o SASG, é uma tarefa bastante complexa. A carga hidráulica de cada uma das fraturas ou descontinuidades individuais atravessadas pela perfuração é diferente. Assim, a carga hidráulica medida no poço representa uma média das cargas de cada fratura, por sua vez, fortemente

influenciada pelas fraturas maiores (Cook, 2003). Se a carga hidráulica não varia com a profundidade dentro do poço, significa que as fraturas estão conectadas; caso contrário, indica ausência de conexão.

A superfície potenciométrica de aquíferos fraturados, heterogêneos e anisotrópicos é descontínua, isto porque a água subterrânea flui somente por caminhos preferenciais e não em toda a formação rochosa, razão pela qual sondagens podem atingir ou não o nível de água, ou ainda encontrar estes níveis em posições bastante diferentes (Custódio & Llamas, 1996).

No gráfico da Figura 6.7 foram plotadas cotas do NE (nível estático) de poços perfurados no SASG, concentrados na porção urbana do município de Araraquara, *versus* altitude do terreno. Observa-se um alinhamento dos pontos azuis, que representam uma relação direta entre carga hidráulica e altitude do terreno, condição normalmente verificada em aquíferos livres; ao contrário, os pontos vermelhos não apresentam relação direta entre carga e altitude, condição verificada em situações de confinamento hidráulico.



**Figura 6.7 – Correlação entre carga hidráulica do SASG *versus* altitude do terreno. Pontos azuis mostram relação direta entre carga hidráulica e elevação topográfica. Pontos vermelhos não apresentam relação direta.**

Montanheiro *et al.* (2017) demonstraram que o empilhamento de horizontes permoporosos do SASG, que atuam como aquíferos, e horizontes de baixa porosidade e permeabilidade, que configuram aquitardos, pode ocasionar comportamento similar ao de aquífero confinado, podendo haver alguma drenança devido ao fraturamento presente no interior dos derrames.

A recarga do SASG em sua porção aflorante é proveniente das precipitações atmosféricas e depende da taxa de infiltração. Nas porções onde encontra-se coberto por sedimentos do Grupo

Bauru, a recarga é feita por drenança das águas do SAB. A recarga da porção aflorante do SASG em Araraquara foi estimada com base em dados de vazões mínimas  $Q_{95}$  das sub-UGRHs do Estado de São Paulo, disponíveis em DAEE/LEBAC (2013). Para a porção em subsuperfície, foi admitida uma contribuição através do SAB correspondente a 8% da reserva renovável desse aquífero, em razão da inexistência de estudos específicos e dados disponíveis na literatura científica.

A recarga na porção aflorante do SASG foi estimada em  $4,42 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ , equivalente a 10% da média histórica anual das precipitações atmosféricas sobre a superfície do aquífero, estimada em 1393 mm. A recarga em subsuperfície do SASG foi estimada em  $5,08 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ; a recarga total do SASG foi calculada em  $4,93 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

As reservas hídricas renováveis do SASG representam a quantidade de água armazenada e renovada anualmente a cada ciclo hidrológico, correspondendo à recarga sazonal, sendo determinantes para a manutenção do escoamento de base dos rios. De forma conservadora, admite-se neste estudo que as reservas renováveis do SASG equivalem à recarga sazonal, ou seja, são estimadas em  $4,93 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ .

As reservas permanentes correspondem ao volume de água acumulado no aquífero, não variável em decorrência da flutuação sazonal da superfície potenciométrica (Custódio & Llamas, 1996). Compreendem os volumes de água contidos no armazenamento drenável do aquífero, sendo expressos pela equação abaixo:

$$R_p = A \cdot E \cdot \phi_e$$

Onde:  $R_p$ = reserva drenável permanente ( $\text{m}^3$ );  $A$ = área do aquífero ( $\text{m}^2$ );  $E$ = espessura do aquífero (m); e  $\phi_e$ = porosidade efetiva (%).

Aplicando-se ferramentas de geoprocessamento, o volume rochoso do SASG foi calculado em  $6,25 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ; considerando-se uma porosidade efetiva de 3% com base em DAEE (2005), a reserva permanente foi calculada em  $1,88 \times 10^9 \text{ m}^3$ . As reservas hídricas renováveis, permanentes e totais do SASG no município de Araraquara são apresentadas na Tabela 6.8.

**Tabela 6.8 – Reservas hídricas do SASG no município de Araraquara**

Reservas hídricas do SASG				
Volume rochoso ( $\text{m}^3$ )	Poros. Efetiva (%)	Reserva permanente ( $\text{m}^3$ )	Reserva renovável ( $\text{m}^3/\text{ano}$ )	Reservas totais ( $\text{m}^3$ )
6,25E+10	3	1,88E+09	4,42E+07	1,92E+09

## 6.4. Sistema Aquífero Guarani – SAG

### 6.4.1. Histórico

O SAG é o mais importante manancial hídrico subterrâneo utilizado para abastecimento da população de Araraquara. Dentre os 25 poços profundos que atualmente captam água desse sistema, a maioria (22 poços) abastece a zona urbana, 2 abastecem o Assentamento Bela Vista e um poço abastece o Assentamento Monte Alegre.

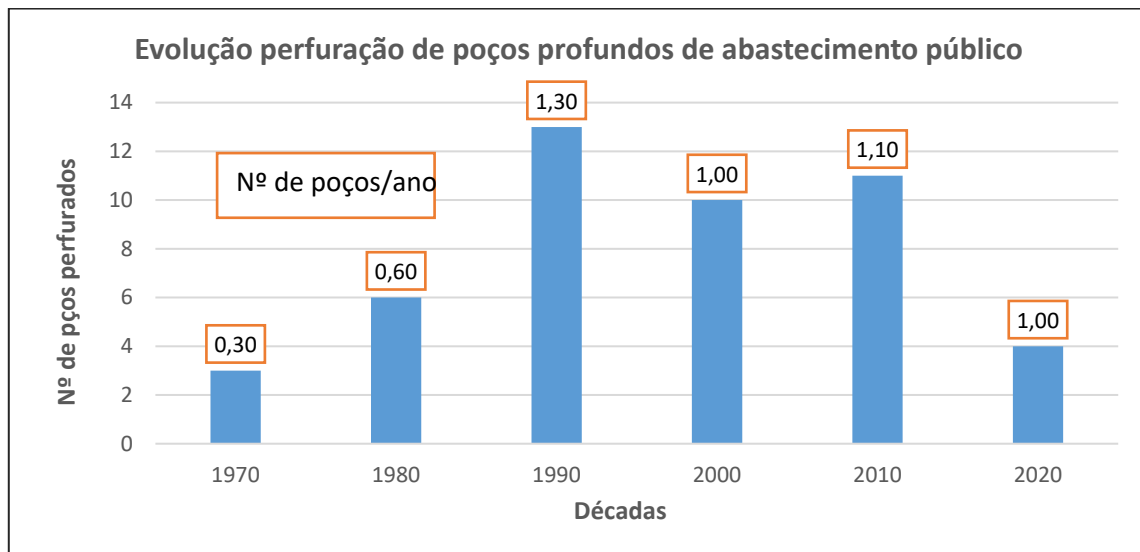
Segundo levantamento feito nos arquivos do DAEE, órgão gestor dos recursos hídricos subterrâneos no território paulista, e no SIAGAS, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), foram encontrados 47 registros de poços tubulares profundos de propriedade do DAEE ou da prefeitura municipal, perfurados no município de Araraquara.

O primeiro registro de poço de abastecimento público que se tem conhecimento foi perfurado no Jardim Eliana pela empresa Passarelli, em 1972, com 200 m de profundidade, para extração de 30 m<sup>3</sup>/h de água do SAG, vazão insignificante se comparada às vazões extraídas atualmente. Desde então, por conta do avanço no conhecimento hidrogeológico e desenvolvimento das técnicas de perfuração, o uso da água subterrânea se intensificou e hoje constitui um recurso imprescindível para complementação e manutenção da oferta hídrica à população, respondendo por cerca de 65% de toda a água distribuída no município.

A implantação de poços profundos para abastecimento público no município de Araraquara foi estimulada a partir dos estudos hidrogeológicos pioneiros realizados pelo DAEE no Estado de São Paulo, na década de 70, em especial na região administrativa nº 6. O estudo contou com a perfuração de um poço profundo experimental no “Aquífero Botucatu” – hoje renomeado Guarani, conforme proposição do geólogo uruguaio Danilo Anton, em 1996 – com 300 m de profundidade (DAEE, 1974; DAEE, 1976). O poço experimental, denominado de Santana I, apresentou vazão de produção de 113 m<sup>3</sup>/h e vazão específica de 1,57 m<sup>3</sup>/h/m, com nível estático na cota 546 m.

A partir da década de 1970, a implantação de poços para captação de água no SAG foi intensificada, passando de 3 para 21 unidades até o final da década de 1990, que registrou nesse período mais de um poço construído por ano. Daí até o final da década de 2010 e início da década de 2020, foram perfurados mais 26 poços profundos, registrando média de 1 poço por ano.

Embora novas captações tenham sido projetadas para suprir o crescimento da demanda pública ao longo desse período, parte delas também foi projetada para substituir captações que tiveram de ser abandonadas por problemas técnicos (Figura 6.8).



**Figura 6.8 – Evolução da perfuração de poços profundos de abastecimento público no município de Araraquara.**

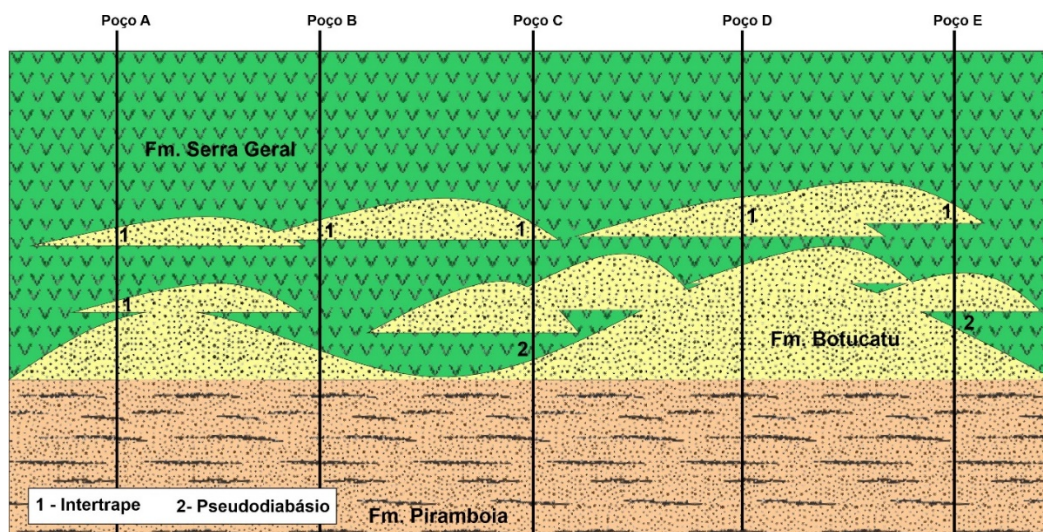
### 6.5. Caracterização do SAG no município de Araraquara

O SAG aflora em área de 229 km<sup>2</sup> nas porções nordeste e sudoeste, correspondente a 23% da superfície do município de Araraquara, encontrando-se intrudido por diversos corpos de diabásio (Figura 6.1). Nos 775 km<sup>2</sup> restantes do município, equivalentes a 77% de sua área total de ocorrência, encontra-se coberto por rochas vulcânicas da Formação Serra Geral e sedimentos do Grupo Bauru, perfazendo área total de 1004 km<sup>2</sup> (Tabela 6.4).

O SAG é constituído pelo conjunto de rochas sedimentares mesozoicas continentais clásticas da Bacia do Paraná, estando delimitado na base por discordância regional permotriássica (250 milhões de anos) e, no topo, pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral (OEA, 2009), de idades variando entre 134 Ma e 131 Ma (Almeida *et al.*, 2018).

Segundo Soares *et al.* (1973), o contato superior com a Formação Serra Geral pode ser localmente abrupto ou interdigitado com os primeiros derrames basálticos. O contato interdigitado caracteriza a continuidade do processo eólico no início do vulcanismo, que originou numerosos corpos arenosos intertrapeanos. Soares (1975) reconheceu que é difícil precisar se os magmatitos, aos quais se intercalam corpos arenosos, são intrusivos ou extrusivos.

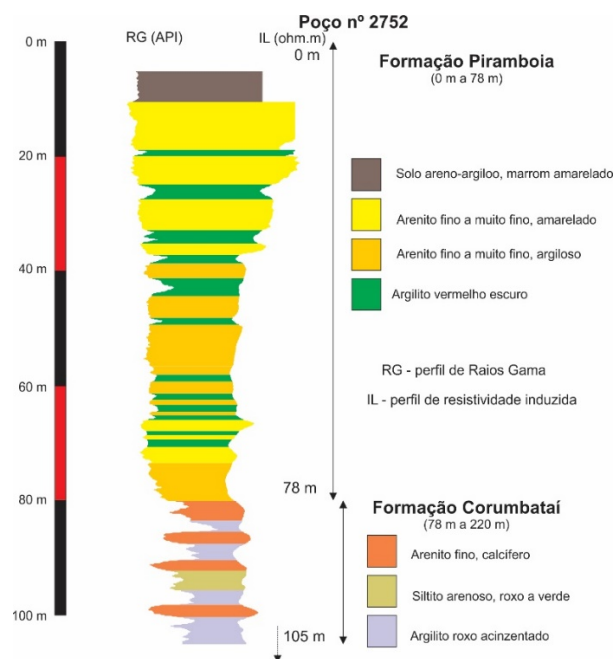
Essa interação entre lavas e sedimentos é bastante complexa e pode conduzir a interpretações conflitantes, como exemplificado na Figura 6.9. Como critério operacional, Soares (1975) propôs marcar o contato na base do primeiro derrame basáltico. Por outro lado, Paula e Silva *et al.* (2008) inferiram, com base em perfis geofísicos, que a maior parte dos magmatitos intercalados na porção superior da Formação Botucatu deve corresponder a rochas extrusivas.



**Figura 6.9 – Relações estratigráficas entre as formações Piramboia, Botucatu e Serra Geral, representadas nas situações hipotéticas observadas nos poços A, B, C, D e E.**

As intercalações entre lavas da Formação Serra Geral e arenitos eólicos da Formação Botucatu e a coalescência entre dunas proporcionam diferentes interpretações quanto à definição de intertrapes (1) e pseudodiabásios (2), dependendo da posição relativa de cada poço no contexto geológico. Em algumas situações, as lavas basálticas podem cobrir diretamente o topo da Formação Piramboia – que, neste caso, é confundida com a Formação Botucatu.

No município de Araraquara, o contato inferior do SAG é discordante com Formação Corumbataí, do Permiano Superior (299 Ma a 252 Ma), composta predominantemente por siltitos argilosos com intercalações de siltitos arenosos, depositada em ambiente marinho raso (Schneider *et al.*, 1974). Não se tem registros de poços que atingiram essa unidade no município; contudo, perfurações realizadas no vizinho município de Boa Esperança do Sul alcançaram essa formação na região do Alto Estrutural da Fazenda Santa Helena, como mostrado na Figura 6.10 (Paula e Silva & Paula e Silva Filho, 2018).



**Figura 6.10 – Interpretação litológica do poço perfurado na Fazenda Santa Helena, Boa Esperança do Sul (SP), com base em perfis geofísicos (Paula e Silva & Paula e Silva Filho, 2018).**

O arcabouço litoestratigráfico do SAG no município de Araraquara é constituído pelas formações Piramboia, Guará e Botucatu, conforme concepção apresentada em estudo recente por Paula e Silva *et al.* (2023). A Formação Guará, originalmente definida no Estado do Rio Grande do Sul, compreende a porção superior da unidade definida anteriormente como Piramboia, e representa o reservatório de maior potencialidade hídrica da Bacia do Paraná. Em razão dessa nova concepção ter sido publicada após a finalização deste estudo, a unidade Guará é aqui mantida como parte integrante da Formação Piramboia.

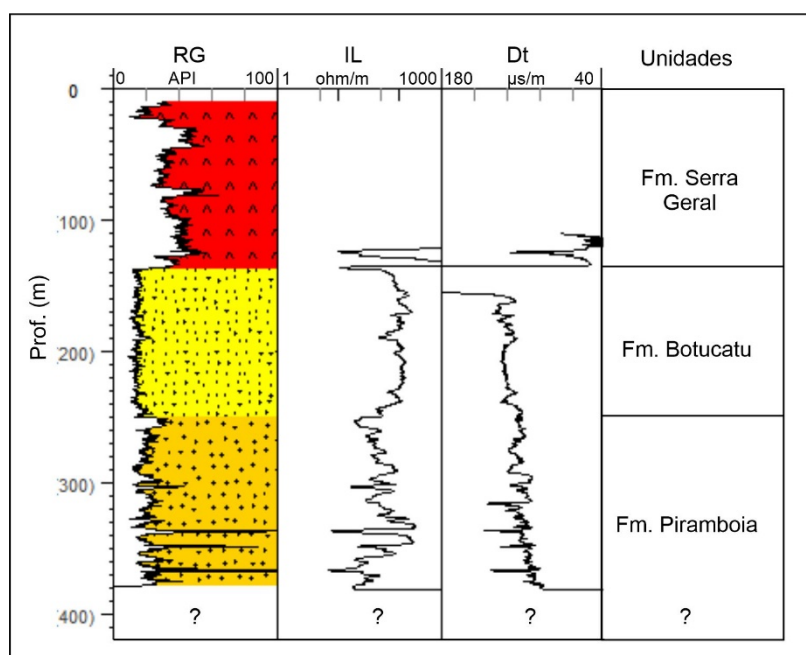
A Formação Piramboia assenta-se discordantemente sobre rochas permianas e foi formalmente definida por Soares *et al.* (1973) e Soares (1975). Originalmente com deposição atribuída a ambiente fluvial meandrante psamítico por Soares *et al.* (1973), a Formação Piramboia teve sua gênese revista por Caetano-Chang (1997), que demonstrou a predominância da deposição eólica sobre a deposição fluvial, na região centro-leste paulista. A unidade, essencialmente arenosa, foi depositada em ambiente eólico, com meta-saturação em areias, onde se intercalam fácies de dunas com *foresets* de pequeno a grande portes, de arenitos geralmente finos, regular a bem selecionados; fácies de interdunas úmidas, predominantes, compostas por arenitos siltosos com estruturas preservadas de ondulas eólicas e bioturbações; fácies de interdunas secas e lençóis de areia, mais frequentes nas porções média e superior da unidade; fácies de interdunas aquáticas ou de *overbank*, em geral compostas por lamitos

arenosos, mais frequentes na porção inferior da formação, onde se associam à fácies fluviais de rios temporários.

Arenitos fluviais grossos a conglomeráticos, hoje atribuídos à Formação Guará (Paula e Silva *et al.*, 2023), são frequentemente encontrados nas porções mediana e superior da Formação Piramboia, em poços perfurados no SAG (Paula e Silva, 1988; Paula e Silva & Cavaguti, 1994; Paula e Silva *et al.*, 2008), tendo sido descritos também, em superfície, na região de São Pedro (Assine, 1993). Esses depósitos foram denominados “Arenitos Itirapina” por Caetano-Chang & Wu (2006). Massoli & Caetano-Chang (2007) correlacionaram os arenitos grossos e conglomeráticos da região de Ribeirão Preto (SP) aos “Arenitos Itirapina”. Em perfurações de poços, esses arenitos são conhecidos como “fácies pré-filtro”, em alusão ao cascalho inserido entre o revestimento e a parede do poço, para impedir a passagem de areia da formação para seu interior.

A Formação Botucatu assenta-se em contato discordante sobre a Formação Piramboia, conforme assumido por diversos autores (Massoli & Caetano-Chang, 2007; Zalán *et al.*, 1987). Essa unidade apresenta grande homogeneidade e foi definida formalmente por Soares *et al.* (1973) e Soares (1975), sendo constituída predominantemente por arenitos finos a médios, exibindo estratificações cruzadas de grande e médio portes, depositados por processos eólicos em ambiente desértico. Na sucessão predominam fácies de *foresets* de dunas eólicas, de interdunas secas e de lençóis de areia (Caetano-Chang, 1997). Arenitos fluviais grossos a conglomeráticos, anteriormente atribuídos às fácies torrenciais da porção inferior da Formação Botucatu (Soares & Landim, 1973; Soares, 1975; Strugale *et al.*, 2004), foram posicionados na Formação Piramboia (Caetano-Chang & Wu, 1992, 1993; Paula e Silva *et al.*, 2008), e atualmente na Formação Guará (Paula e Silva *et al.*, 2023).

A Figura 6.11 mostra as relações entre as formações Serra Geral, Botucatu e Piramboia e suas características geofísicas típicas, com base em um perfilagem representativa de poço perfurado no município de Araraquara.



**Figura 6.11 – Perfil geofísico típico mostrando as relações entre as formações Serra Geral, Botucatu e Piramboia no município de Araraquara. RG= raios gama; IL= resistividade induzida; Dt= tempo de trânsito sônico.**

### 6.5.1. Distribuição das espessuras do SAG

Estudos regionais desenvolvidos pela OEA (2009) mostraram a existência de dois grandes compartimentos deposicionais no SAG, o principal deles na porção norte da Bacia do Paraná abrangendo os estados do Mato Grosso do Sul e de São Paulo. Em território paulista, esse depocentro é delimitado, a norte, pelos limites erosivos da bacia e, a sul, pelo Arco de Ponta Grossa. Nesse compartimento, as espessuras constatadas do SAG podem superar 400 m (DAEE, 2005).

No município de Araraquara, as espessuras totais do SAG são ainda desconhecidas, uma vez que os poços não são totalmente penetrantes. A espessura máxima parcial conhecida da unidade hidroestratigráfica Piramboia, com base em 35 perfis geofísicos de poços profundos, é de 189 m no poço Standard III, e a da unidade Botucatu é de 143 m no poço Santa Lúcia III. A espessura máxima do SAG constatada nos perfis geofísicos foi de 305 m, também no poço Standard III. Hirata *et al.* (2012) citam espessura máxima de 328 m, todavia, os autores incluíram 65 m de diabásio nesse total.

Correlações regionais com base em perfis geofísicos sugerem que as espessuras do SAG nesse município possam alcançar cerca de 400 m, mas é preciso confirmação com base em

dados de perfuração. Um incremento na espessura do SAG potencializaria a produtividade de novos poços.

A definição das espessuras das unidades hidroestratigráficas do SAG, em subsuperfície, é dificultada tanto pelas relações de interdigitação entre arenitos eólicos da Formação Botucatu e lavas basálticas da Formação Serra Geral, quanto pela similaridade litológica na zona de contato entre arenitos das formações Botucatu e Piramboia. No primeiro caso, frequentes divergências na distinção entre intertrapes, derrames e corpos intrusivos complicam a definição do limite superior da unidade Botucatu; no segundo caso, é impraticável determinar o contato entre as duas unidades somente pelos aspectos texturais dos arenitos descritos em amostras de calha. Essas situações, contudo, podem ser solucionadas, na maioria das vezes, a partir da análise dos parâmetros geofísicos mensurados pelas perfilagens.

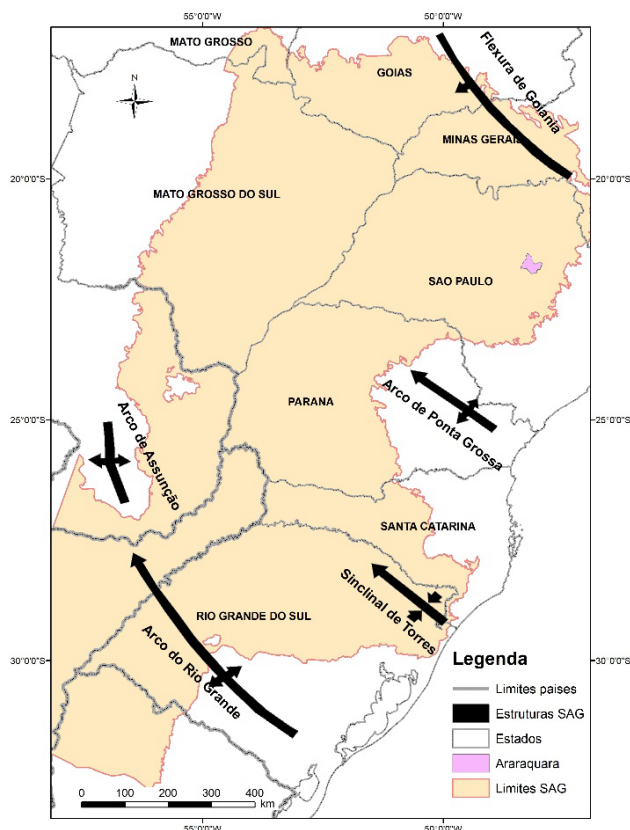
Considerando que as espessuras totais do SAG são ainda desconhecidas em Araraquara, um mapa de isópacas não pôde ser elaborado.

### **6.5.2. Arcabouço geológico do SAG**

Importantes estruturas de caráter regional definiram os limites, a geometria e condicionaram o arcabouço físico e faciológico do SAG em toda a bacia (OEA, 2009), destacando-se o Arco de Ponta Grossa no controle da sedimentação e erosão das unidades hidroestratigráficas do SAG no Estado de São Paulo (Figura 6.12). Esses elementos estruturais regionais, com tendência à subsidência ou ao soerguimento, mantiveram essa propensão durante toda a história evolutiva da bacia, mas manifestaram-se com maior intensidade entre o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior, durante a primeira fase da Reativação Wealdeniana (Almeida, 1980).

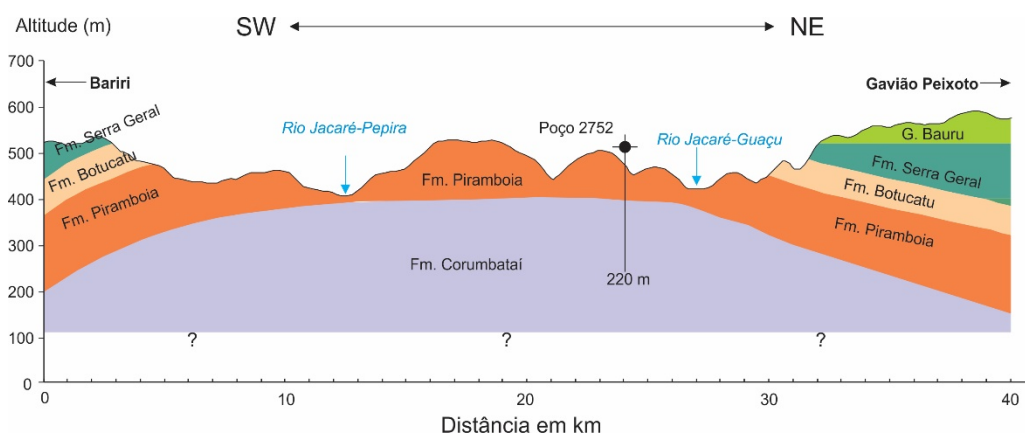
Estruturas locais ou subestruturas internas à bacia, como falhas, fraturas, arqueamentos e depressões, têm sido descritas na porção paulista da área de ocorrência do SAG desde há muito (p. ex., Soares *et al.*, 1973; Soares, 1974; Paulipetro, 1980). Essas estruturas afetam as características geométricas e hidrodinâmicas do aquífero, produtividade de poços, reservas subterrâneas e condicionam as direções do escoamento subterrâneo.

Em Boa Esperança do Sul (SP), Soares (1974) reconheceu uma estrutura anticlinal com eixo mergulhando para N50W, configurado pelo arqueamento das camadas mesozoicas expostas na bacia do rio Jacaré-Guaçu, denominada pelo autor Alto do Jacaré-Guaçu. Essa estrutura foi definida principalmente pela faixa alongada de afloramentos da Formação Botucatu que se estende para o interior da bacia e se sobressai aos basaltos da Formação Serra Geral. Sua origem, segundo Soares (1974), poderia ter sido resultado tanto de processos tectônicos como de intrusão de rochas básicas (diabásios).



**Figura 6.12 – Principais estruturas geológicas que condicionaram o arcabouço físico e faciológico do SAG (OEA, 2009).**

Dados de poços e de perfilação geofísica na região desse alto revelaram que o substrato do SAG, representado pelo Aquitardo Passa Dois, foi soerguido, causando remoção parcial do Aquífero Piramboia e total do Aquífero Botucatu (Figura 6.13), conforme demonstrado por Paula e Silva & Paula e Silva Filho (2018).



**Figura 6.13 – Seção geológica transversal ao Alto Estrutural do Jacaré-Guaçu e localização de um poço perfurado na Fazenda Santa Helena.**

Dados de subsuperfície revelam a presença de uma estrutura local na área urbana da cidade de Araraquara, já bem conhecida pelo DAEE desde a década de 1980, mas ainda com seus contornos indefinidos. Perfurações nessa área, onde se encontram o Distrito Industrial II e o aeroporto do município, revelaram cenários geológicos anômalos, como a inexpressiva ou mesmo ausência de cobertura basáltica do SAG e contato direto entre as formações Adamantina e Botucatu. Essa estrutura, localizada na porção sudeste do município, deve representar parte de um alto estrutural com mergulho na direção noroeste e flancos com caimento para sudoeste e nordeste, como ilustrado no mapa de contorno estrutural do topo do SAG (Figura 6.14). Esse alto apresenta um desnível de cerca de 150 m entre o ápice (cota 690 m) e seu flanco no sentido do mergulho (cota 540 m), em distância aproximada de 5 km. Essa direção estrutural NW combina com a direção dos alinhamentos dos diques de diabásio na região do Arco de Ponta Grossa (Ferreira, 1982) e das principais estruturas geológicas que condicionaram o arcabouço físico e faciológico do SAG (Figura 6.12). É possível que o arqueamento das camadas sedimentares resultante da intrusão de diabásio tenha gerado falhas de acomodação normais, principalmente nos flancos da estrutura.

O arcabouço litoestratigráfico e faciológico do SAG no município de Araraquara é bastante complexo e seu entendimento passa pela análise de perfis geofísicos, daí a importância da realização de perfilagens nos poços. Os padrões geofísicos das formações Piramboia e Botucatu são bem característicos e destacam as variações faciológicas de cada uma das unidades, além de permitirem boa correlação entre poços, como mostrado nas seções das figuras 6.15 a 6.18.

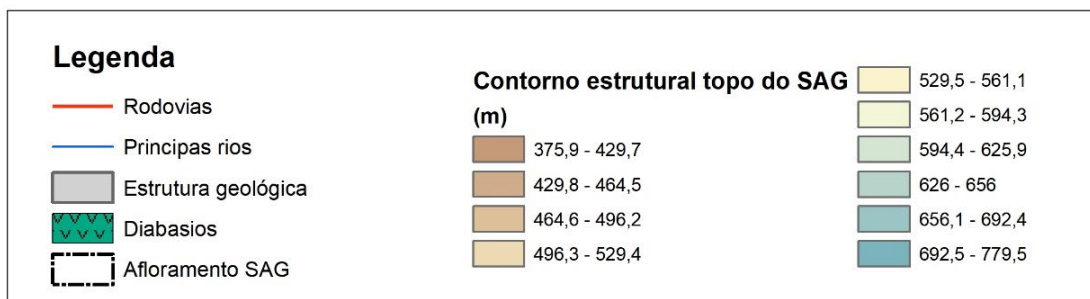
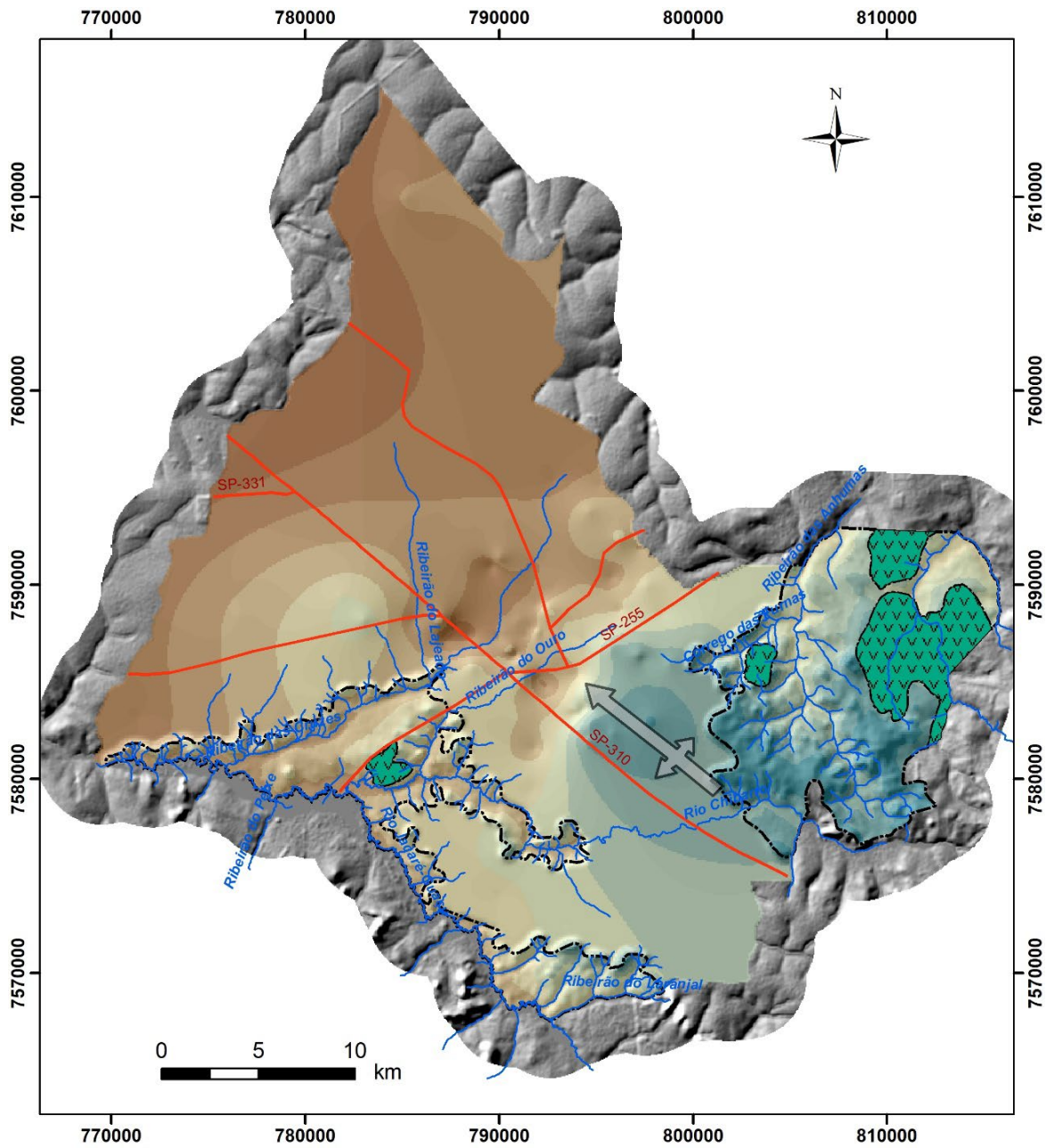


Figura 6.14 – Contorno estrutural do topo do SAG.

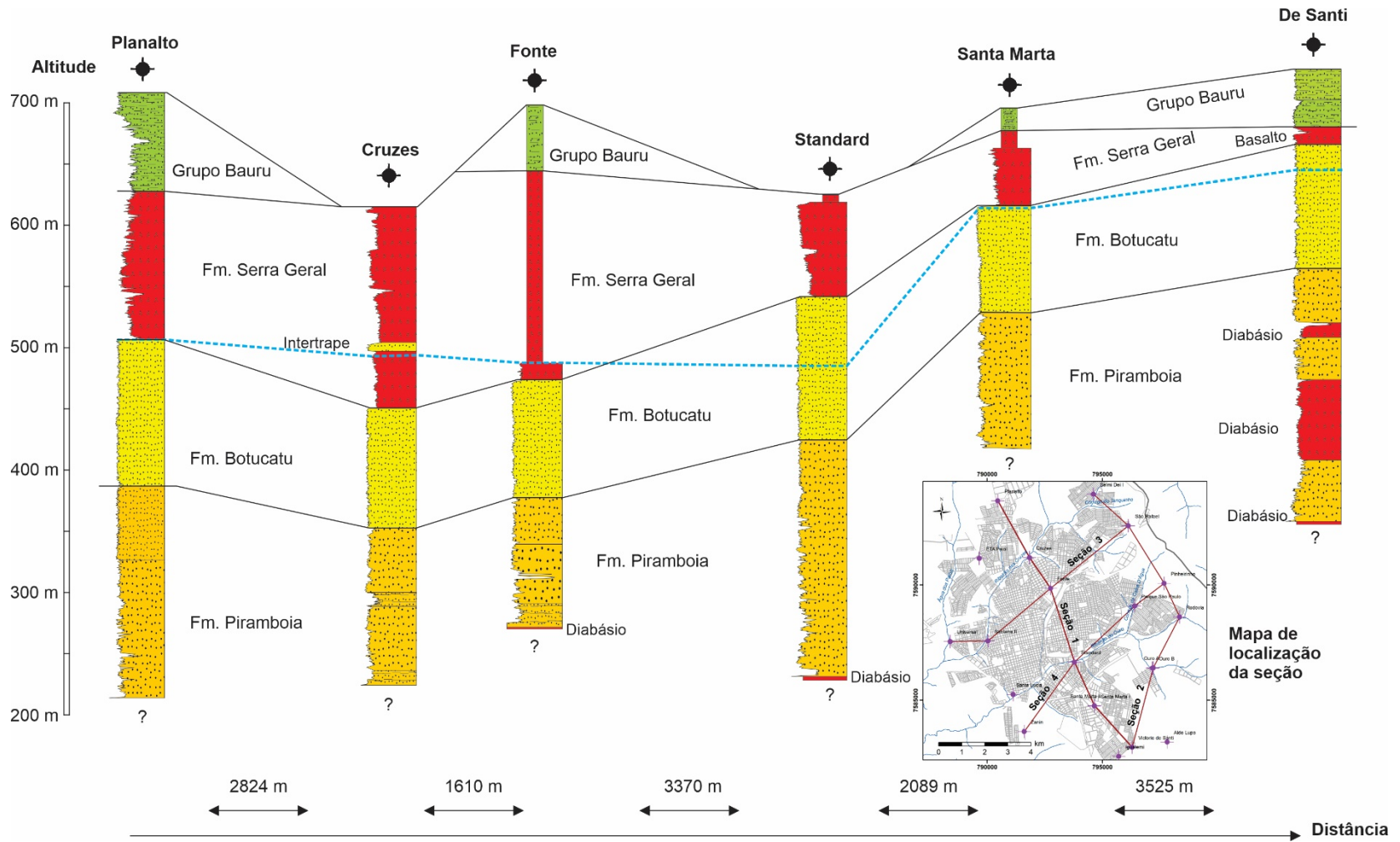


Figura 6.15 – Seção geológica NW-SE cruzando a zona urbana de Araraquara.

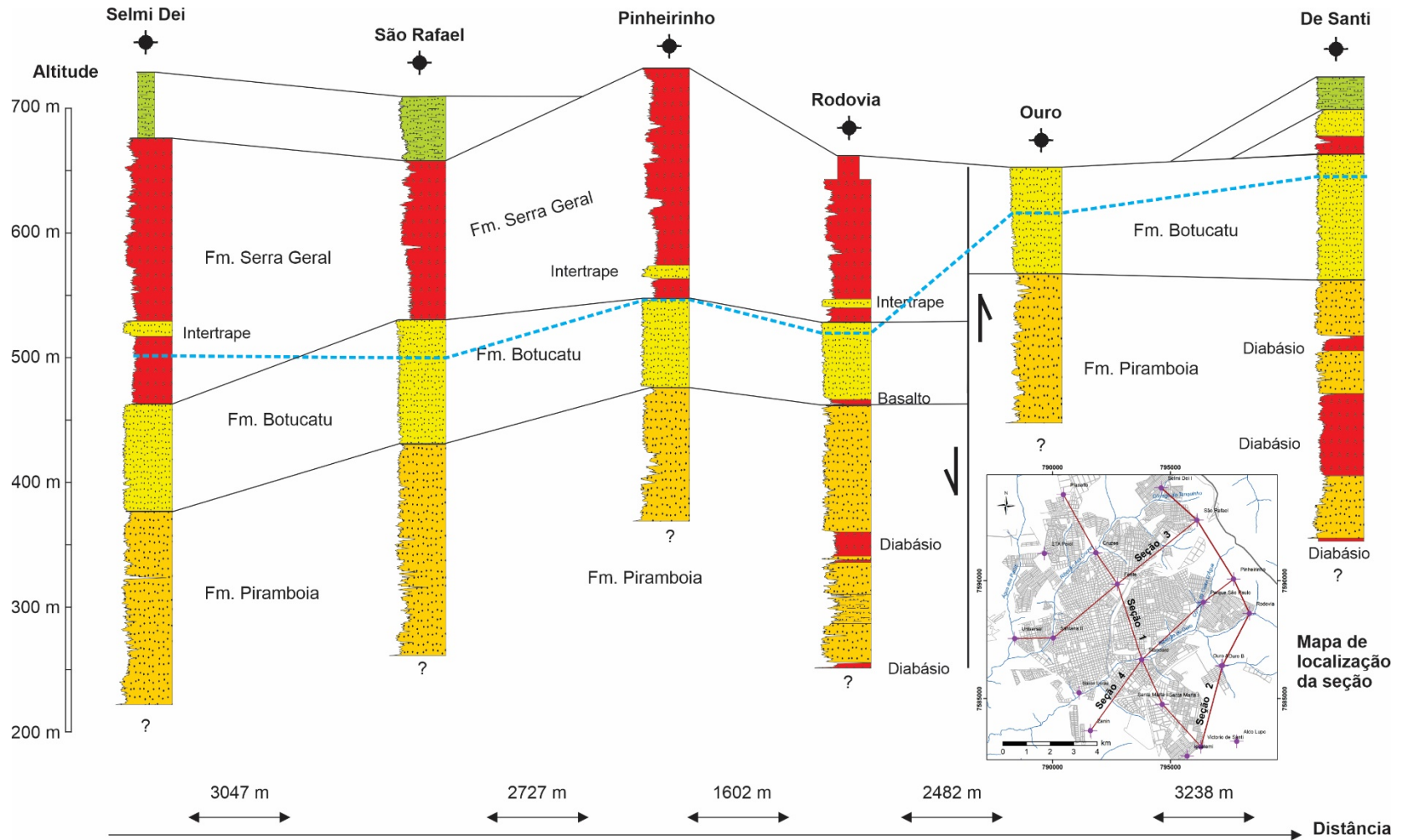


Figura 6.16 – Seção geológica NW-SE / NE-SW cruzando a zona urbana de Araraquara.

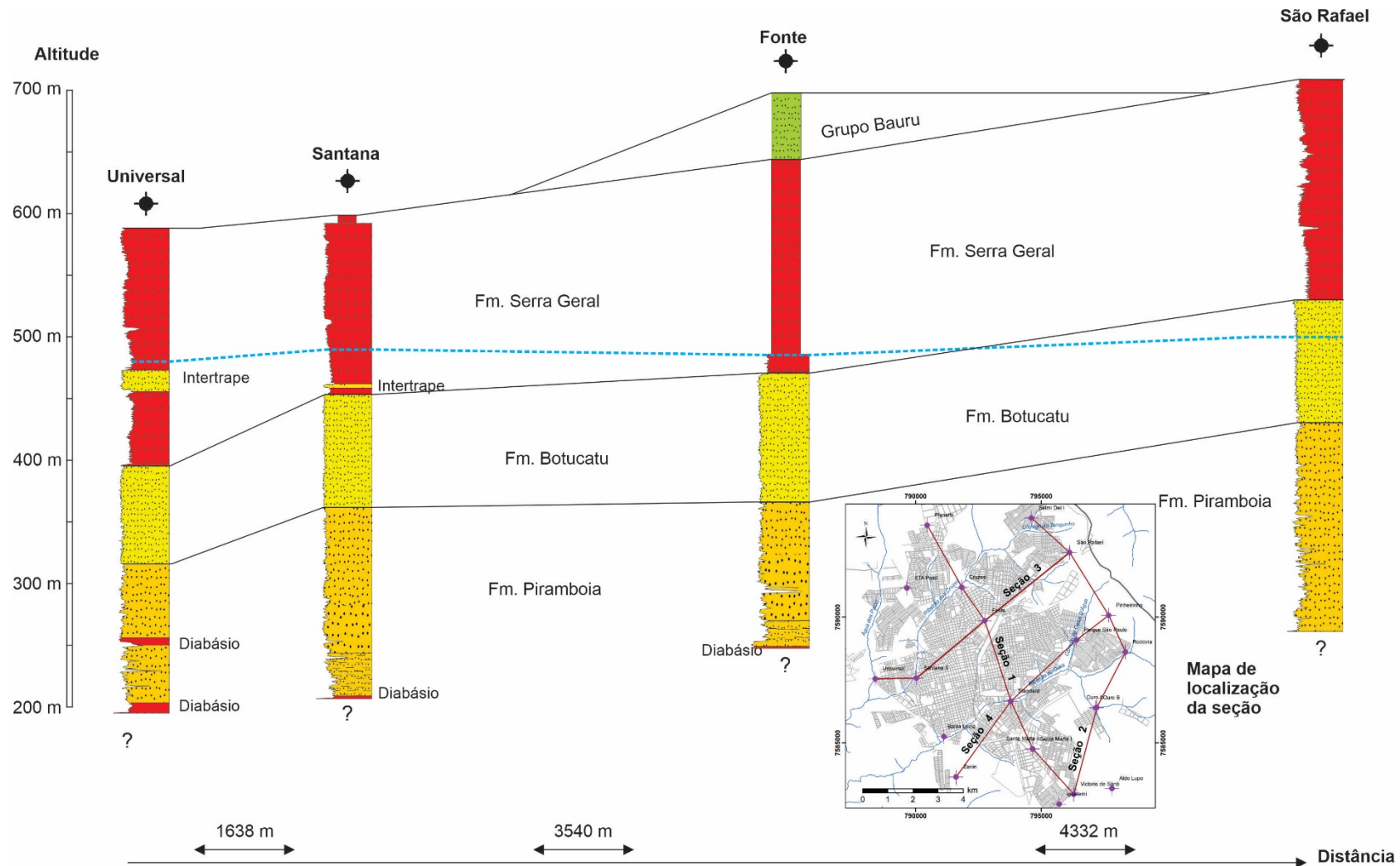


Figura 6.17 – Seção geológica SW – NE cruzando a zona urbana de Araraquara.

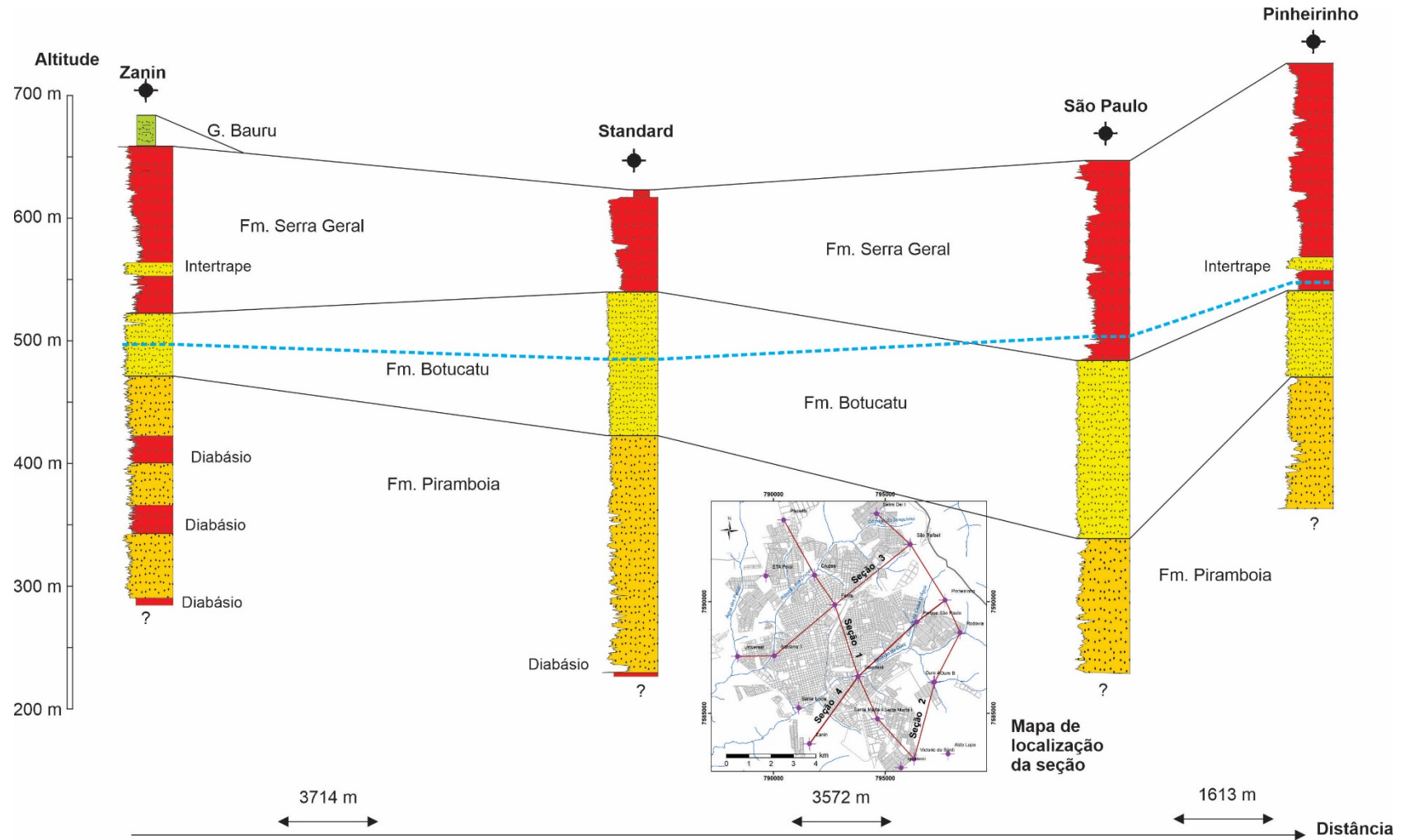


Figura 6.18 – Seção geológica SW – NE cruzando a zona urbana de Araraquara.

### 6.5.3. Potenciometria do SAG

O mapa potenciométrico do SAG foi elaborado com 142 dados de nível de água extraídos de relatórios de poços profundos perfurados nos municípios de Araraquara, Américo Brasiliense, Matão e Gavião Peixoto, além de pontos de descarga de água subterrânea de áreas de afloramento do sistema aquífero. Os dados de nível de água representam registros obtidos à época da perfuração dos poços; portanto, abrangem um intervalo temporal de medição bastante longo. Embora o mapa potenciométrico possa apresentar imprecisões por conta desse fato, no geral traduz o comportamento do fluxo subterrâneo atual no âmbito do município (Figura 6.19).

A distribuição das cargas hidráulicas do SAG na metade sul do município demarca uma grande área de recarga direta por infiltração de águas pluviais, onde o sistema aquífero está coberto por camada delgada de sedimentos do Grupo Bauru e/ou de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral. A partir dessa área, o fluxo subterrâneo segue na direção noroeste, no sentido da área de confinamento do aquífero, e ramifica-se igualmente no sentido das áreas de afloramento, onde as águas subterrâneas são descarregadas na rede de drenagem das bacias do ribeirão Anhumas, a nordeste, e dos rios Chibarro e do Ouro, a sudoeste. Em praticamente toda essa extensão, a superfície potenciométrica é de natureza livre, uma vez que os níveis de água subterrânea se encontram abaixo do topo do aquífero (Figura 6.19).

Na metade norte, as rochas do SAG mergulham por sob as camadas de basalto, e a superfície potenciométrica está posicionada acima do topo do aquífero, configurando condições de confinamento (Figura 6.19). A direção principal do fluxo subterrâneo nessa metade é para sudeste e sudoeste, no sentido das áreas de afloramento do SAG e da bacia do ribeirão das Cruzes, onde o aquífero também descarrega suas águas.

A região de confluência entre os fluxos subterrâneos provenientes de norte e de sul define um baixo potenciométrico gerado pelo abatimento dos níveis de água do SAG na área urbana do município. Em razão da grande concentração de poços, principalmente públicos, que extraem elevadas vazões (Figura 6.1), esse baixo potenciométrico causou uma inversão do fluxo subterrâneo natural, cujo sentido seria para noroeste. Em boa parte dessa área houve um desconfinamento hidráulico, com os níveis potenciométricos caindo abaixo do topo do aquífero.

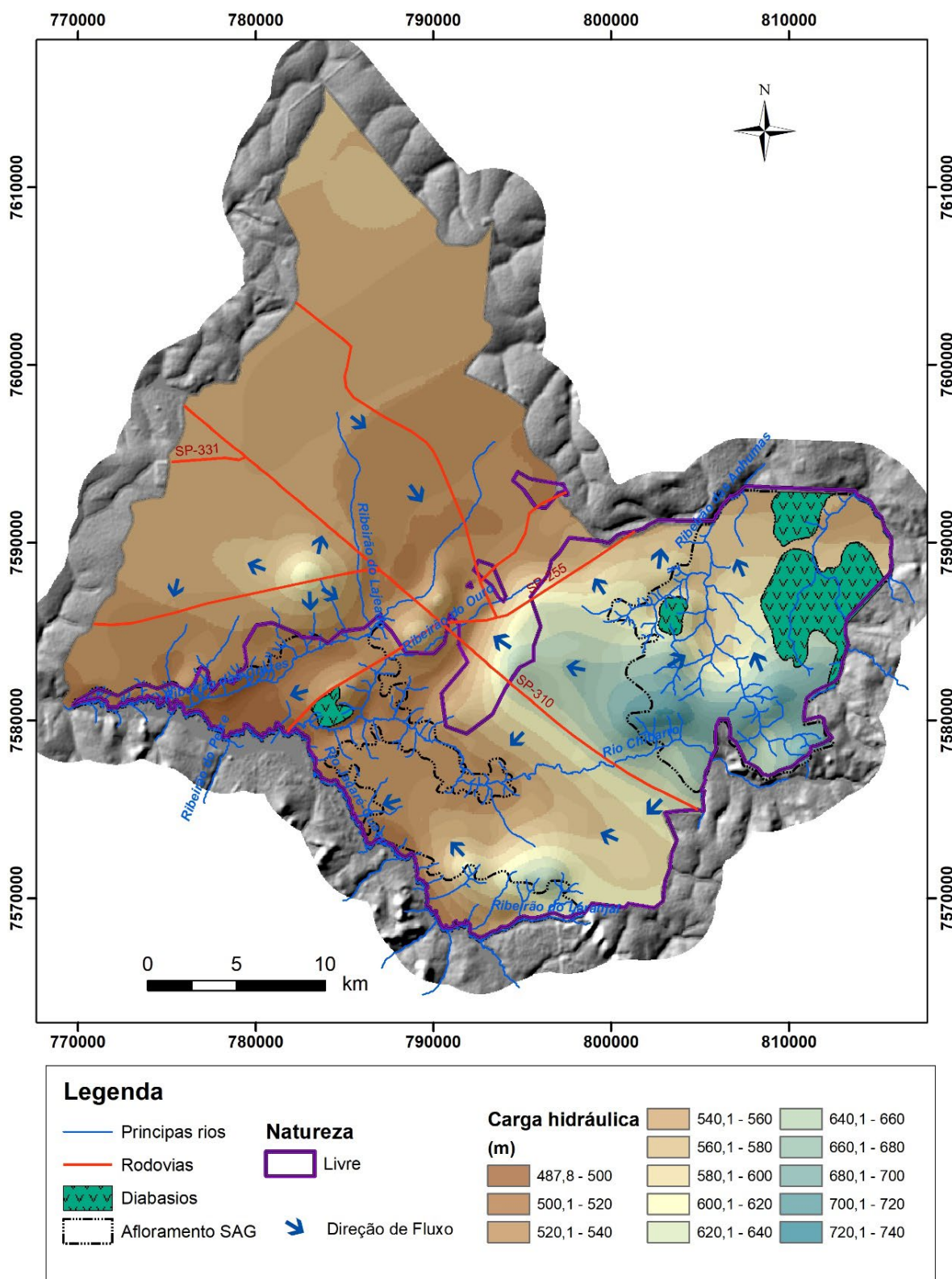


Figura 6.19 – Distribuição da carga hidráulica (potenciometria) do SAG.

Hirata et al. (2012) consideraram que não houve redução sensível na superfície potenciométrica no centro da cidade, no período de 1966 a 2003, sugerindo uma certa

estabilização dos níveis de água do SAG. Na realidade, essa aparente estabilização de níveis se deve à passagem do aquífero do estado confinado para o livre; neste caso, a extração de água que era feita na reserva compressível (coeficiente de armazenamento =  $10^{-4}$ ) passou a ser feita na reserva permanente (porosidade efetiva = 17%, conforme OEA, 2009).

Para uma delimitação precisa dos divisores hidrogeológicos atuais do SAG no município de Araraquara é imprescindível a implementação, pelos órgãos gestores, de um monitoramento sistemático e de longo termo dos níveis de água do aquífero.

#### **6.5.4. Parâmetros hidrodinâmicos e potencialidades do SAG**

Os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos são obtidos a partir de testes de bombeamento que podem ser classificados em testes de produção e testes de aquífero.

Os testes de produção têm o objetivo de determinar a vazão máxima de exploração e as perdas de carga lineares e exponenciais envolvidas no rebaixamento dos níveis de água do poço em operação. Esse tipo de teste fornece o parâmetro hidrodinâmico vazão específica ou capacidade específica ( $q/s$ ), que é frequentemente utilizado para estimativa do potencial hídrico dos aquíferos ou rendimento do poço. Apesar de sua facilidade de obtenção, esse parâmetro tem o inconveniente de ser fortemente influenciado pelas características construtivas do poço, refletindo também em sua grandeza as perdas de carga devidas ao dano de formação (Paula e Silva, 2003).

Os parâmetros hidrodinâmicos que governam a circulação e o armazenamento das águas subterrâneas no subsolo, responsáveis pela quantidade de água acumulada e explorável desses reservatórios são a porosidade efetiva ( $\phi_e$ ), a condutividade hidráulica ( $K$ ), a transmissividade ( $T$ ) e o coeficiente de armazenamento ( $S$ ). Esses parâmetros permitem caracterizar e prever o comportamento do fluxo subterrâneo em situações de interferência entre poços, infiltração de contaminantes, rebaixamentos de longo termo etc., fornecendo os elementos necessários ao conhecimento, planejamento e gestão dos recursos hídricos subterrâneos. São obtidos a partir de testes de aquífero, que consistem no bombeamento de um poço com descarga constante e acompanhamento da evolução do rebaixamento em um ou mais poços de observação ou piezômetros.

Comumente, a transmissividade ( $K$ ) é estimada com base nas curvas de rebaixamento e de recuperação do próprio poço de bombeamento, de modo a se obter uma ordem de grandeza desse parâmetro.

Todavia, o resultado dessa estimativa reflete os rebaixamentos adicionais devidos às perdas de carga construtivas e ao dano de formação do poço, de modo que o valor calculado é menor

do que o real. Resultados mais ajustados para cálculo da transmissividade podem ser obtidos com a utilização da curva de recuperação do poço.

As características hidrodinâmicas do SAG foram obtidas principalmente a partir de 24 testes de produção realizados em poços perfurados pelo DAAE-Araraquara (Tabela 6.9). A estatística descritiva dos parâmetros vazão específica ( $q/s$ ), transmissividade ( $T$ ) e condutividade hidráulica ( $K$ ) é mostrada na Tabela 6.10.

**Tabela 6.9 – Parâmetros hidrodinâmicos do SAG.**

Poço	Data	Prof. (m)	Esp. Sat (m)	NE (m)	ND (m)	Q ( $m^3/h$ )	$q/s$ ( $m^3/h/m$ )	T ( $m^2/d$ )	K (m/d)	Natureza	Em operação
Aldo Lupo	ago-98	362,00	206,00	64,23	91,51	193,25	7,08	252,84	1,23	Livre	Livre
Bela Vista II	jun-98	280,00	155,00	141,36	157,95	29,30	1,77	64,98	0,42	Livre	Livre
Bela Vista III	nov-06	156,00	80,00	76,10	91,14	29,90	1,99	81,00	1,01	Livre	Livre
Chácara Flora I	nov-99	453,00	208,00	157,01	202,20	173,02	3,83	166,60	0,80	Confinado	Confinado
Cruzes	ago-12	402,00	225,00	130,26	197,56	283,90	4,22	83,29	0,37	Confinado	Livre
De Santi	jul-18	372,00	218,00	79,56	150,10	257,35	3,65	120,28	0,55	Livre	Livre
ETA Paiol	set-11	453,00	196,00	173,14	219,06	262,73	5,72	233,43	1,19	Confinado	Confinado
Iguatemi II	jan-11	294,00	203,00	74,67	112,80	285,00	7,47	246,35	1,21	Livre	Livre
Ouro B	jul-08	205,00	174,00	31,10	56,77	112,42	4,38	170,28	0,98	Livre	Livre
Santa Marta I	out-05	310,00	230,00	76,62	96,66	103,10	5,14	176,68	0,77	Confinado	Livre
São Paulo	nov-10	380,00	225,00	153,40	211,44	286,10	4,93	143,39	0,64	Confinado	Confinado
São Rafael	jun-18	440,00	231,00	208,41	262,03	238,40	4,45	166,73	0,72	Livre	Livre
Selmi Dei II	nov-07	500,00	234,00	226,81	268,92	198,40	4,71	238,87	1,02	Confinado	Livre
Selmi Dei I	jan-92	405,00	248,00	140,74	174,22	184,00	5,50	234,94	0,95	Confinado	Livre
Standard III	abr-13	391,00	252,00	136,43	165,86	197,10	6,70	166,90	0,66	Livre	Livre
Universal	mar-17	392,00	190,00	107,98	141,69	233,10	6,91	312,26	1,64	Confinado	Confinado
Zanin	nov-14	391,00	159,00	185,49	217,02	85,20	2,70	72,30	0,45	Livre	Livre
Bela Vista I	abr-98	204,00	66,00	138,06	146,27	13,60	1,66	78,80	1,19	Livre	Livre
Planalto	ago-11	500,00	290,00	198,65	258,81	177,70	2,95	183,26	0,63	Livre	Livre
Santa Lucia	nov-83	340,00	246,00	70,50	99,67	201,33	6,90	297,74	1,21	Livre	Livre
Santa Marta II	nov-06	305,00	223,00	77,20	106,40	177,60	6,08	319,00	1,43	Confinado	Livre
Santana	set-01	390,00	227,00	91,40	158,65	300,50	4,47	561,00	2,47	Confinado	Livre
Pinheiros III	set-21	420,00	214,00	206,32	256,89	235,10	4,65	80,18	0,37	Livre	Livre
Chácara Flora II	dez-21	446,00	211,00	178,19	208,34	95,70	3,17	162,59	0,77	Confinado	Confinado

**Tabela 6.10 – Estatística descritiva dos parâmetros hidrodinâmicos do SAG.**

Estatística	$q/s$ ( $m^3/h/m$ )	T ( $m^2/d$ )	K (m/d)	Q ( $m^3/h$ )
Média	4,63	178,73	0,89	181,41
Mediana	4,56	168,59	0,87	195,18
Desvio padrão	1,72	78,84	0,35	86,10

Estatística	q/s (m <sup>3</sup> /h/m)	T (m <sup>2</sup> /d)	K (m/d)	Q (m <sup>3</sup> /h)
Mínimo	1,66	64,98	0,37	13,60
Máximo	7,47	319,00	1,64	300,50
Contagem	24	24	24	24,00

As vazões específicas (q/s) e de produção (Q) médias dos poços públicos são, respectivamente, 4,63 m<sup>3</sup>/h/m e 181,43 m<sup>3</sup>/h, e estão bem próximas das medianas (Tabela 6.10). Segundo a classificação apresentada por DAEE/UNESP (2013), os resultados da análise estatística conferem ao SAG um potencial predominantemente elevado, com possibilidades de extração de vazões da ordem de 300 m<sup>3</sup>/h. Os resultados obtidos neste estudo são compatíveis com aqueles observados nas demais áreas de ocorrência do SAG (OEA, 2009).

Observa-se na Tabela 6.10 que a vazão específica (q/s), a transmissividade (T) e a condutividade hidráulica (K) médias são, respectivamente, 4,63 m<sup>3</sup>/h/m, 178,73 m<sup>2</sup>/d e 0,89 m/d, e também estão bem próximas das medianas.

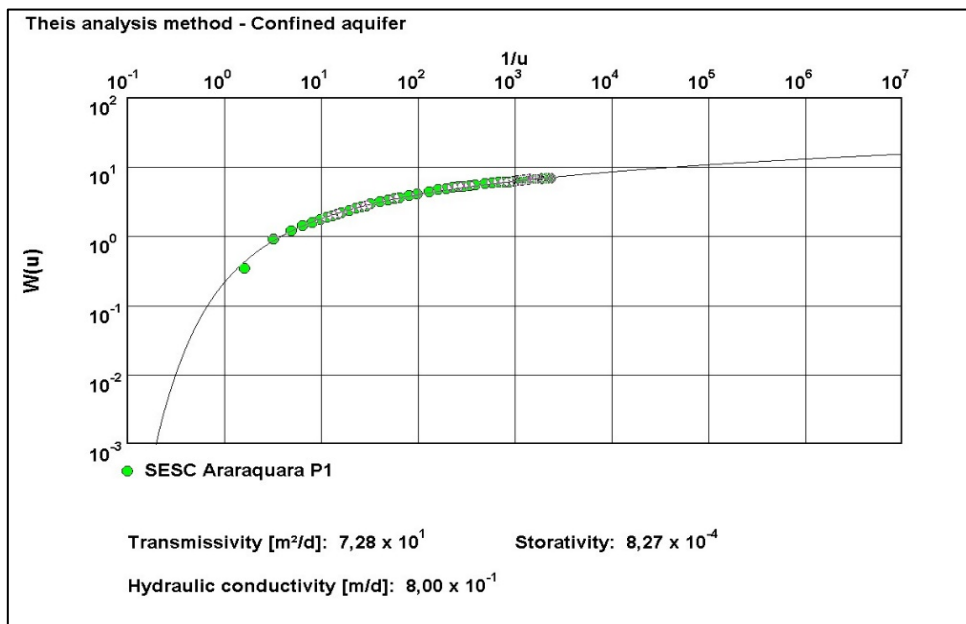
A análise das curvas de rebaixamento e recuperação dos poços listados na Tabela 6.9, utilizadas para cálculo dos parâmetros hidrodinâmicos do SAG, mostram inconsistências nos registros de nível de água e de vazão anotados nos relatórios. Por esse motivo, os resultados apresentados devem ser analisados com cautela.

Três testes de aquífero foram realizados no SAG, sendo dois em poços situados na região de confinamento, e um situado na porção livre, os quais permitiram obter informações mais confiáveis e completas dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero em Araraquara.

O primeiro deles, realizado no SESC de Araraquara (Geodata, 2007), na porção confinada, apresentou os resultados mostrados na Tabela 6.11.

**Tabela 6.11 – Parâmetros hidrodinâmicos do SAG obtidos no poço do SESC de Araraquara.**

Teste de aquífero - SESC Araraquara					
Data	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Distância do poço bombeado (m)	T (m <sup>2</sup> /d)	K (m/d)	S
09/08/2007	14,3	14	72,8	0,80	8,27E-04



**Figura 6.20 – Curva de rebaixamento e parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de aquífero realizado no poço do SESC Araraquara.**

O segundo, também na porção confinada, foi realizado pelo LEBAC no poço Santa Lúcia III, e apresentou os resultados mostrados na Tabela 6.12 e Figura 6.21.

**Tabela 6.12 – Parâmetros hidrodinâmicos do SAG obtidos no poço Santa Lúcia III**

Teste de aquífero - Poço Santa Lúcia III					
Data	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	Distância do poço bombeado (m)	T (m <sup>2</sup> /d)	K (m/d)	S
18/12/2022	231	17	157,2	0,71	1,13E-03

Os resultados desses dois testes de aquífero mostram valores dos parâmetros hidrodinâmicos similares. As condutividades hidráulicas calculadas também ficaram próximas da média obtida com dados de testes de produção.

O terceiro teste foi realizado em poços da região do Ouro, na porção livre do SAG. A transmissividade calculada foi de 302 m<sup>2</sup>/d, a condutividade hidráulica foi de 1,74 m/d e o coeficiente de armazenamento foi de 1,1 x 10<sup>-3</sup>. Os valores de transmissividade e condutividade hidráulica, calculados neste último teste, ficaram bem acima dos valores obtidos nos dois testes anteriores.

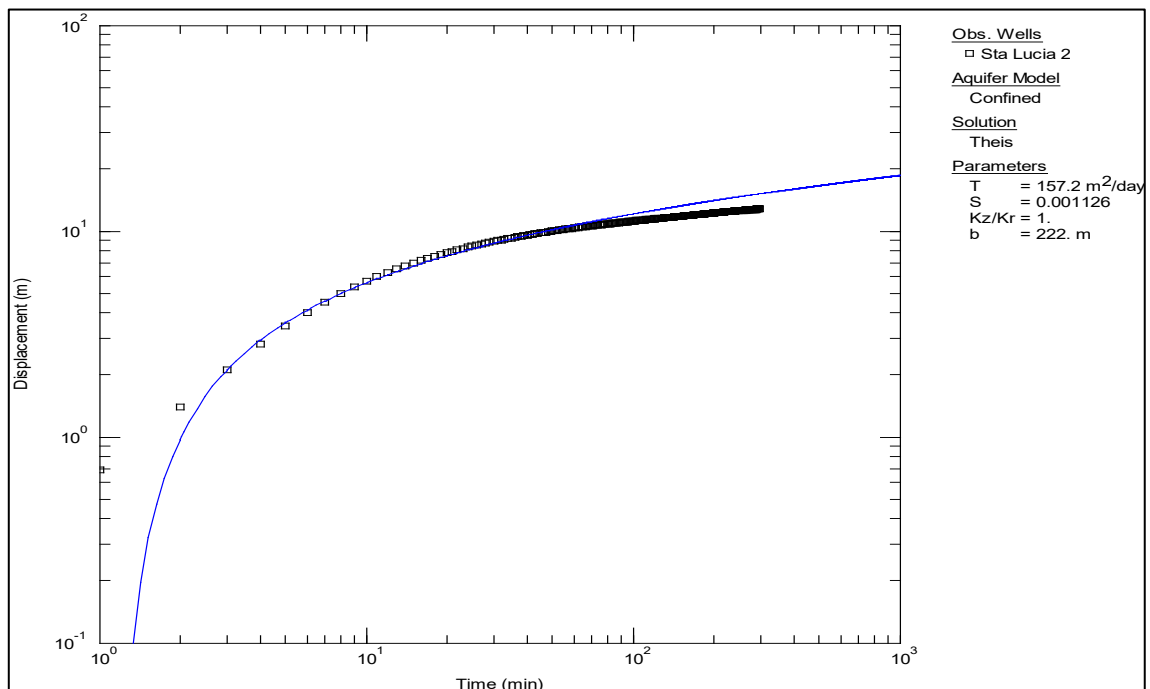


Figura 6.21 – Curva de rebaixamento e parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de aquífero realizado no poço Santa Lúcia III.

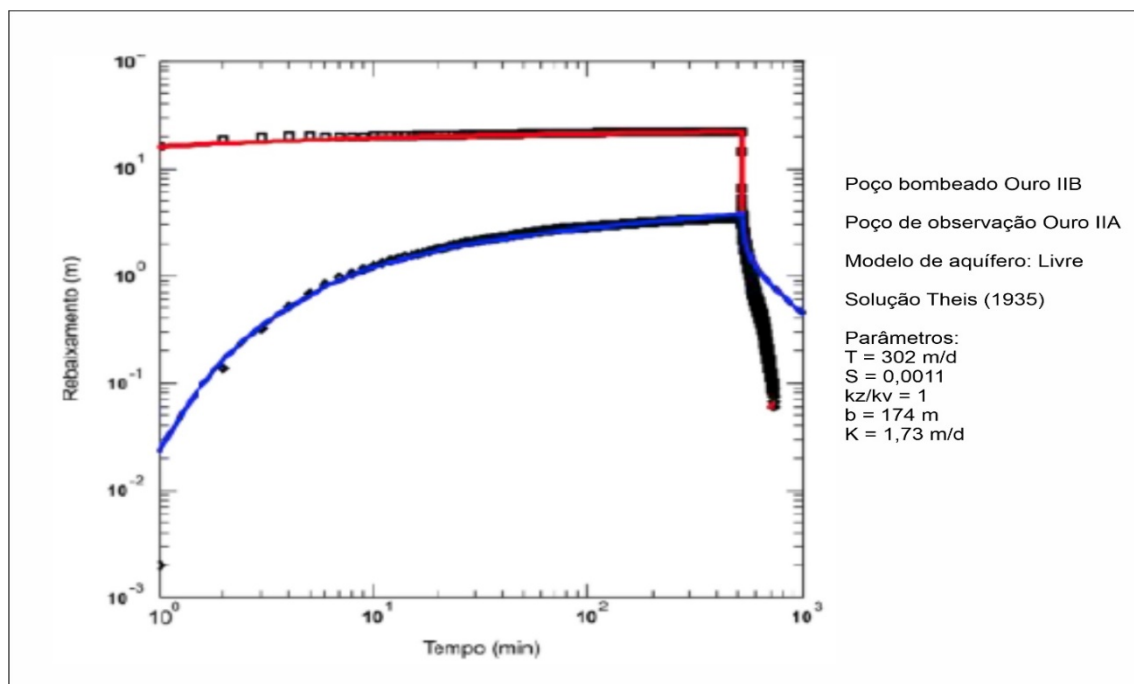


Figura 6.22 – Curva de rebaixamento e parâmetros hidrodinâmicos obtidos no teste de aquífero realizado nos poços do Ouro.

Os parâmetros hidrodinâmicos calculados nos testes apresentados neste estudo são, em parte, concordantes com aqueles apresentados por Hirata *et al.* (2012). De acordo com os referidos autores, as transmissividades obtidas a partir de testes de produção variaram de 50

m<sup>2</sup>/d a 224 m<sup>2</sup>/d, enquanto as condutividades hidráulicas variaram de 0,35 m/d a 0,78 m/d. Por sua vez, Scalvi & Gastmans (2016) apontaram transmissividade média de 239,6 m<sup>2</sup>/d.

### 6.5.5. Mapa de intensidade de exploração do SAG

A outorga de direito de uso ou interferência de recursos hídricos é um ato administrativo, de autorização ou concessão, mediante o qual o Poder Público faculta ao outorgado fazer uso da água por determinado tempo, finalidade e condição expressa no respectivo ato. No Estado de São Paulo, cabe ao DAEE o poder outorgante, por intermédio do Decreto 41.258 e artigo 7º das disposições transitórias da Lei 7.663/91 ([www.daee.sp.gov.br](http://www.daee.sp.gov.br)).

O cadastro de poços outorgados do município de Araraquara, fornecido pelo DAEE, registrou 604 captações autorizadas para extração de água subterrânea dos aquíferos locais. Dentre essas, 111 extraem um volume total de água do SAG correspondente a 155.217 m<sup>3</sup>/d, com vazão média de 70 m<sup>3</sup>/h.

A avaliação do estresse hídrico dos aquíferos é um procedimento baseado na relação entre consumo e oferta de água subterrânea, que visa identificar regiões com acentuada redução das disponibilidades ou mesmo com déficit, em um cenário de comprometimento da sustentabilidade do recurso, que pode afetar significativamente a economia e o ecossistema da bacia. Nesse sentido, o estresse hídrico atesta em que grau a capacidade hídrica dos aquíferos está sendo afetada, ou seja, se há equilíbrio entre disponibilidade e demanda de água subterrânea ou, caso contrário, qual a magnitude ou severidade do desequilíbrio. Essa informação constitui um dos passos mais importantes para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, uma vez que aponta áreas nas quais há necessidade de intervenção por parte dos órgãos gestores, no sentido de aplicar políticas públicas para preservação e manutenção dos recursos hídricos subterrâneos (Paula e Silva *et al.*, 2021).

Na ausência de dados consistentes sobre disponibilidade, a elaboração do mapa de intensidade de exploração permite distinguir áreas críticas, nas quais a exploração é intensiva e impactante nas reservas hídricas subterrâneas. Os níveis de intensidade de exploração são representados em mapa de densidade de vazões anuais extraídas, elaborado com emprego da ferramenta de geoprocessamento *Kernel Density* (Paula e Silva *et al.*, 2021). A função *Kernel* gera uma superfície de interpolação bidimensional suave, que é proporcional à intensidade dos valores pontuais das amostras e dependente do raio de busca. No método *Kernel* define-se uma vizinhança circular em torno de cada ponto da amostra e a ferramenta de geoprocessamento aplica, automaticamente, uma função “k” normal que atribui pesos variando de 1, no local do ponto, a 0 no limite da vizinhança (Pôssa, 2014).

Os parâmetros utilizados na análise espacial para confecção do mapa de intensidade de exploração do SAG no município de Araraquara foram *grid* de saída regular de 100 m, raio de pesquisa de 2 km e campo de população igual à vazão outorgada, em m<sup>3</sup>/ano.

O mapa de intensidade de exploração resultante (Figura 6.23) destaca áreas com elevada extração de água subterrânea do SAG, que podem alcançar o máximo de 124.000 m<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup>, concentradas na área urbana do município e geradas, principalmente, pelo uso do recurso para abastecimento público.

#### **6.5.6. Monitoramento de níveis de água do SAG**

O monitoramento contínuo de níveis e qualidade da água dos aquíferos constitui procedimento de grande importância para a gestão dos recursos hídricos, pois proporciona a reunião de informações qualitativas e quantitativas e permite avaliar os impactos das atividades antrópicas nos sistemas hídricos subterrâneos (Mourão, 2009).

O monitoramento contínuo e sistemático em intervalos de tempo regulares permite analisar a variação espacial e temporal desses parâmetros, projetar situações futuras e identificar áreas nas quais estejam ocorrendo contaminações e/ou intensa exploração dos aquíferos. As redes de monitoramento de água subterrânea são basicamente compostas por poços tubulares rasos ou profundos, os quais devem apresentar requisitos técnicos compatíveis com o propósito do monitoramento, seja de quantidade, qualidade ou de ambos.

A Rede Integrada de Monitoramento de Quantidade e Qualidade das Águas Subterrâneas, operada conjuntamente pelos órgãos gestores de qualidade e quantidade no estado de São Paulo, CETESB e DAEE, iniciou-se em 2009 e, atualmente, monitora o poço de prefixo 5C-510Z (Salto Grande), perfurado no SAG no município de Araraquara (CETESB, 2022). Além deste, o DAEE também monitora os níveis dos poços de prefixo 5C-502 Z (Paiva), 5C-503 Z (Penitenciária) e 5C-504 Z (Gramado). Uma vez que o monitoramento não é feito de modo sistemático, os registros arquivados são descontínuos e não permitem uma análise conclusiva. Além do mais, os registros possuem evidências de erros de medição e de nivelamento da referência, razão pela qual não serão discutidos neste estudo.

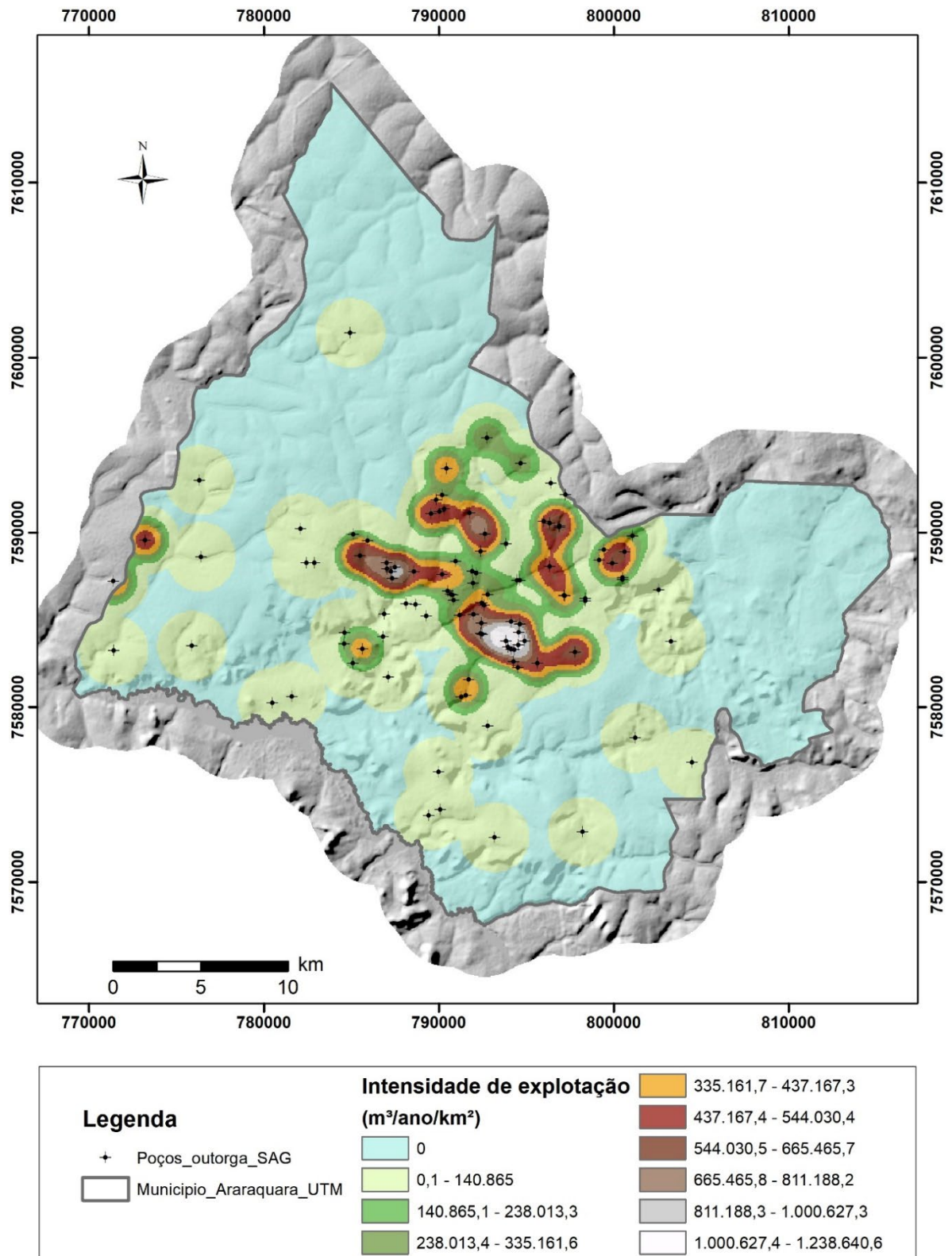
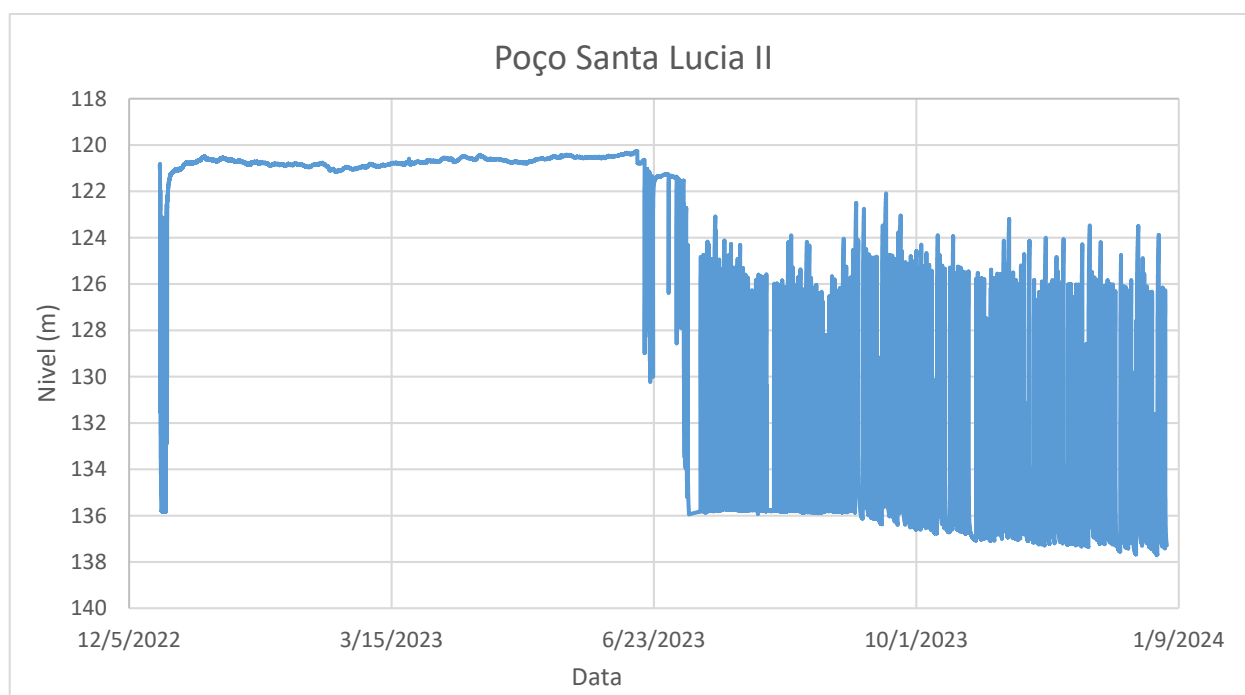


Figura 6.23 – Mapa de intensidade de exploração do SAG.

Scalvi & Gastmans (2016) avaliaram as oscilações de nível de água de um poço profundo perfurado localizado na Faculdade de Odontologia da UNESP, por um período de 710 dias. De caráter confinado, o rebaixamento de nível neste poço foi de 4,98 m no período, correspondendo a um descenso de 2,55 m /ano. Os autores atribuíram as oscilações observadas à recarga e à variação nas taxas de bombeamento do aquífero.

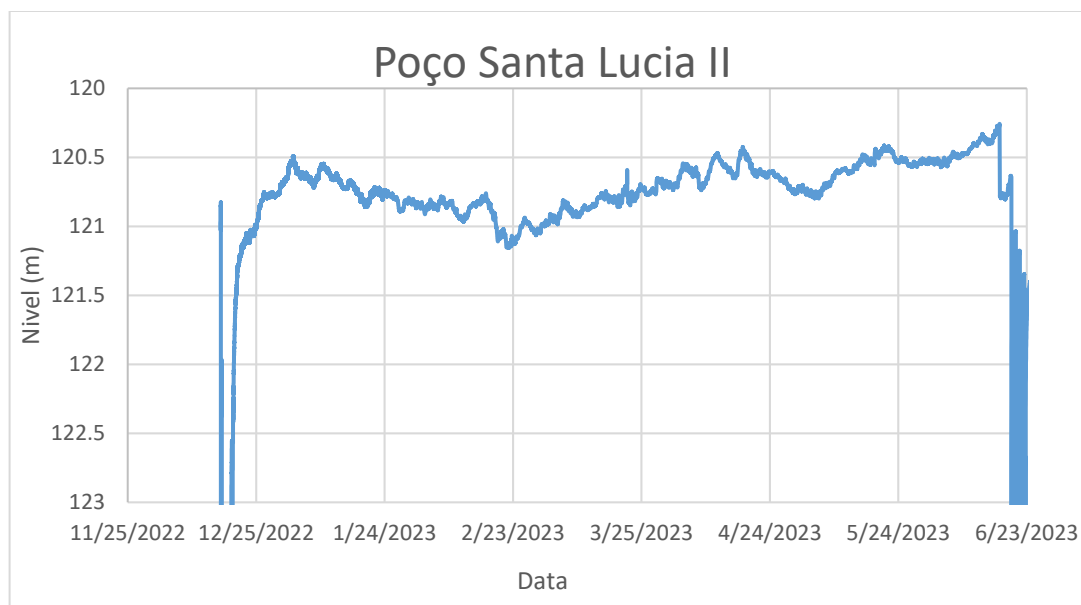
No âmbito deste projeto, foram instalados transdutores para monitoramento de níveis do SAG nos poços Cruzes, Santa Lúcia II, SESC, Odontologia (UNESP), Universal (DAEE) e Iguatemi (DAEE). Os registros de nível de água do aquífero, obtidos no monitoramento dos poços Cruzes I e SESC, e do nível de água do poço Iguatemi, não se mostraram consistentes em razão de problemas operacionais na instalação dos transdutores. Dados de monitoramento do poço Santa Lúcia II, também localizado na porção confinada do aquífero e ao lado do poço de bombeamento Santa Lúcia III, obtidos ao longo de 383 dias de monitoramento contínuo, registraram oscilações de níveis em dois períodos distintos. O primeiro abrange o intervalo de tempo que antecede o início do bombeamento do poço Santa Lúcia III, incluindo o intervalo inicial correspondente aos testes de bombeamento executados logo após sua construção. O segundo período engloba o tempo posterior ao início do bombeamento do poço Santa Lúcia III (Figura 6.24).



**Figura 6.24 - Monitoramento de níveis do poço Santa Lúcia II.**

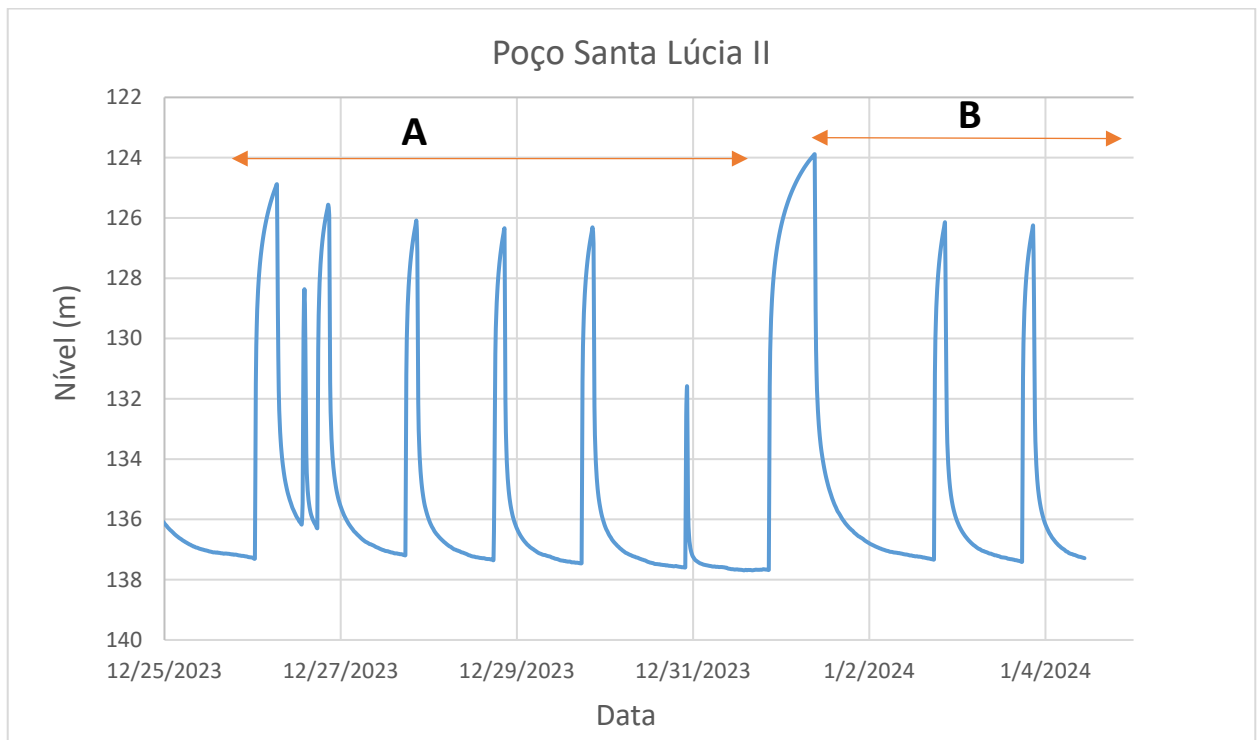
O monitoramento do poço Santa Lúcia II, sem interferência do bombeamento local, mostra variações máximas dos níveis de água do aquífero inferiores a 1 m, no período de pouco mais

de 5 meses. As oscilações de baixa amplitude dos níveis de água do aquífero, registradas nesse período, são atribuídas às interferências de poços situados nas proximidades da área e/ou efeitos de recarga natural (Figura 6.25).



**Figura 6.25 – Período de monitoramento do poço Santa Lúcia II, sem interferência do bombeamento do poço Santa Lúcia III.**

A Figura 6.26 mostra o monitoramento de níveis de água do sistema aquífero realizado no poço Santa Lúcia II, sob influência de operações cíclicas de bombeamento e repouso do poço Santa Lúcia III, durante um período de cerca de dez dias. É possível identificar na porção “A” do hidrograma uma tendência de incremento gradual nos rebaixamentos dos níveis de água do aquífero sob influência do bombeamento e um decréscimo gradual na recuperação dos níveis de água após cessar o bombeamento. Na porção “B” do hidrograma é possível observar uma subida geral desses níveis, logo após a paralisação do bombeamento por um período de tempo mais longo. Esse gráfico ilustra a importância da recuperação dos níveis de água para garantir a sustentabilidade na exploração do aquífero.

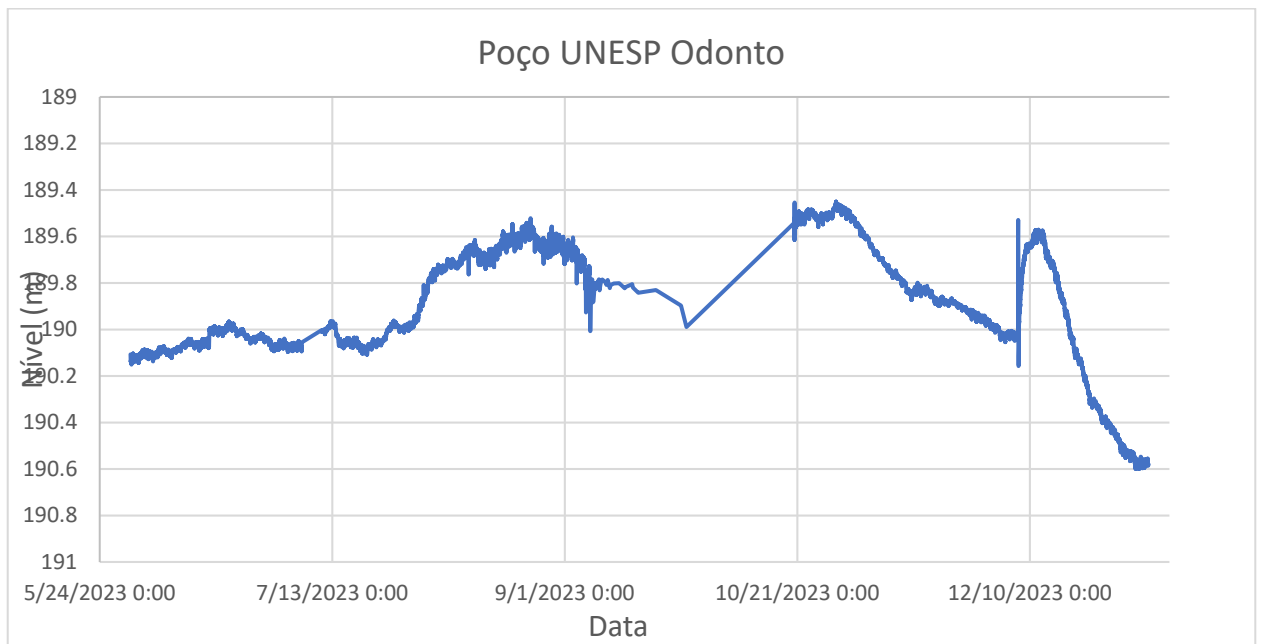


**Figura 6.26 – Período de monitoramento do poço Santa Lúcia II, correspondente a um intervalo cíclico de bombeamento e recuperação do poço Santa Lúcia III.**

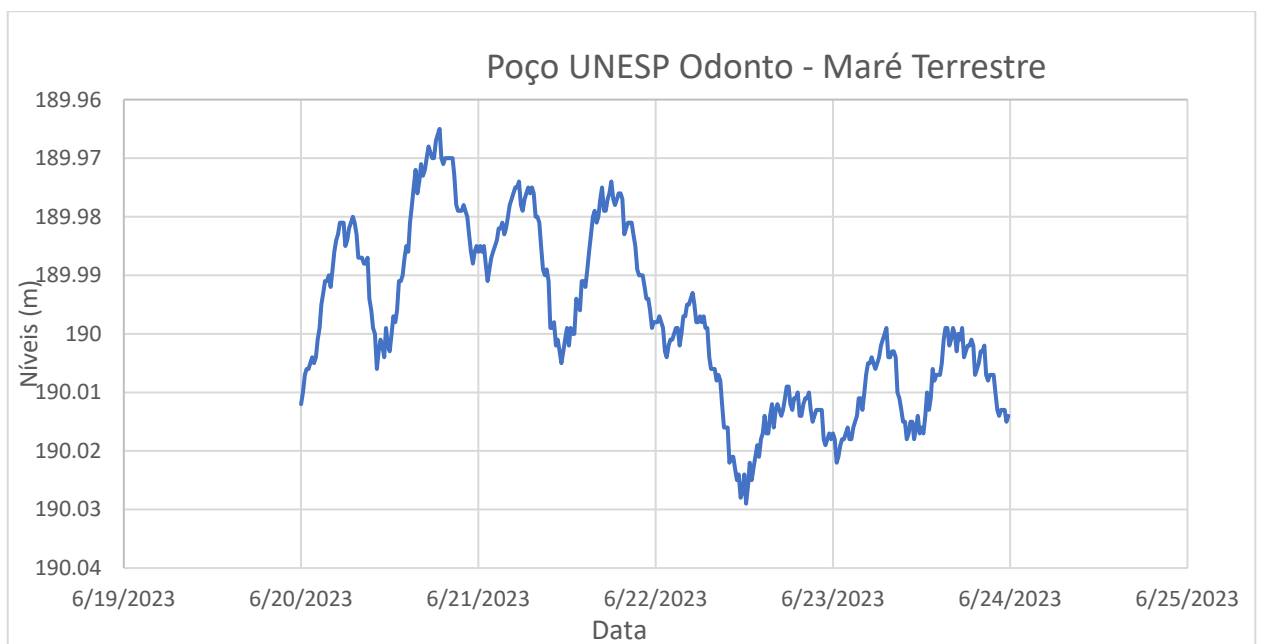
Dados de monitoramento de níveis do aquífero realizados no poço da Faculdade de Odontologia da UNESP de Araraquara, na porção confinada do SAG, em período de mais de 200 dias, também mostrou variações máximas dos níveis de água do aquífero inferiores a 1 m (Figura 6.27). As oscilações de baixa amplitude dos níveis de água do aquífero, registradas nesse período, são atribuídas às interferências de poços situados nas proximidades da área e/ou efeitos de recarga natural.

Oscilações cíclicas de baixa amplitude, com frequência de dois ciclos diários, como mostradas em detalhe na Figura 6.28, referente ao monitoramento do poço da UNESP, são atribuídas aos efeitos de maré terrestre, cujo fenômeno é bem conhecido e documentado em publicações técnicas.

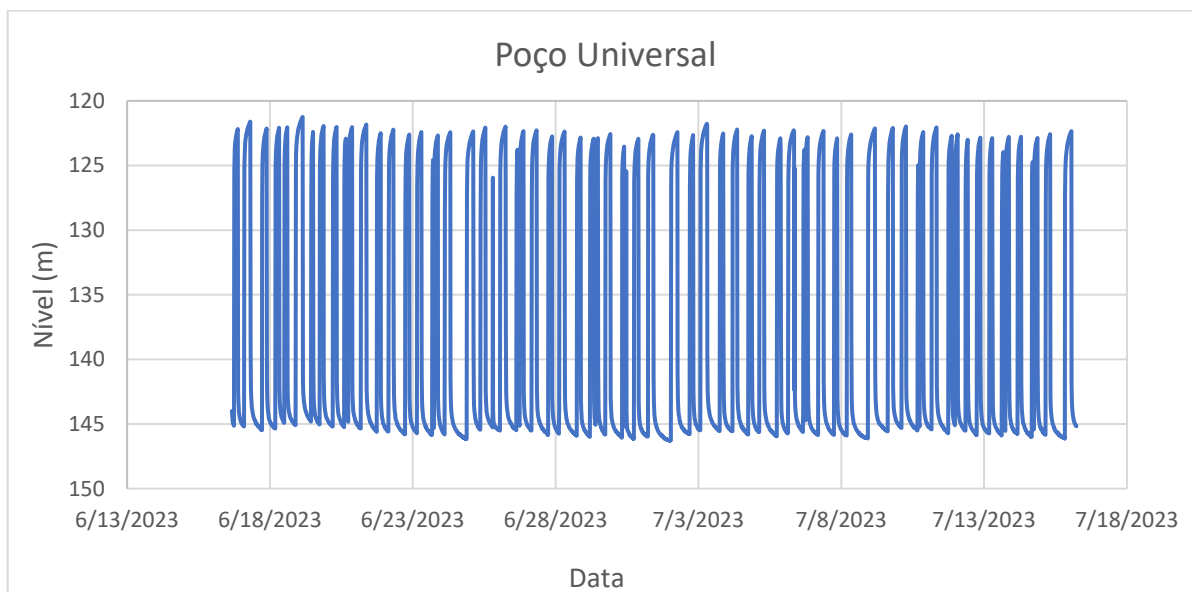
Dados de monitoramento de níveis de água de operação do poço Universal, localizado na porção confinada do SAG, durante cerca de 30 dias, exibem as flutuações cíclicas decorrentes dos rebaixamentos causados pela extração de água do poço e das recuperações de nível após o desligamento da bomba (Figura 6.29).



**Figura 6.27 – Monitoramento de níveis de água do aquífero no poço da Faculdade de Odontologia da UNESP.**

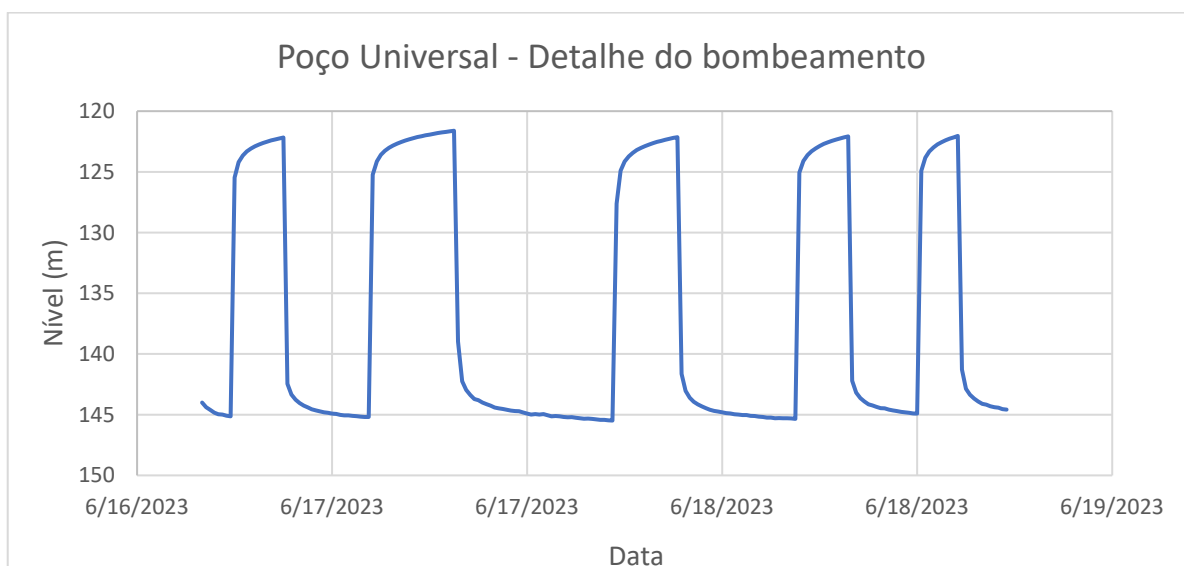


**Figura 6.28 – Efeitos de maré terrestre nos níveis de água do aquífero no poço da Faculdade de Odontologia da UNESP.**



**Figura 6.29 – Monitoramento de níveis de água do poço Universal.**

A Figura 6.30 mostra um detalhe desse monitoramento ao longo de dois dias de operação do poço, onde observa-se o comportamento variável da descida e subida dos níveis em função da duração dos tempos de bombeamento e de recuperação. Uma vez mais, destaca-se a importância da recuperação dos níveis de água para garantir a sustentabilidade na exploração do aquífero.



**Figura 6.30 – Detalhe do monitoramento de níveis de água do poço Universal.**

## 7. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

A fase de desenvolvimento do modelo conceitual implicou na análise criteriosa de informações previamente existentes, com o propósito de identificar as premissas essenciais do modelo e orientar os resultados desejados. Durante essa etapa, foram formuladas previsões sobre o comportamento do fluxo na área de estudo, fundamentadas em pesquisas anteriores e dados disponíveis.

O SAG no município de Araraquara exibe uma transição entre condições de fluxo livre e confinada ao longo de sua extensão. Nas regiões mais orientais onde aflora, o SAG manifesta-se como um aquífero livre; à medida que se distancia da zona de afloramento, em direção a oeste, passa para uma condição semiconfinada a confinada, exercida pelas unidades hidroestratigráficas sobrejacentes.

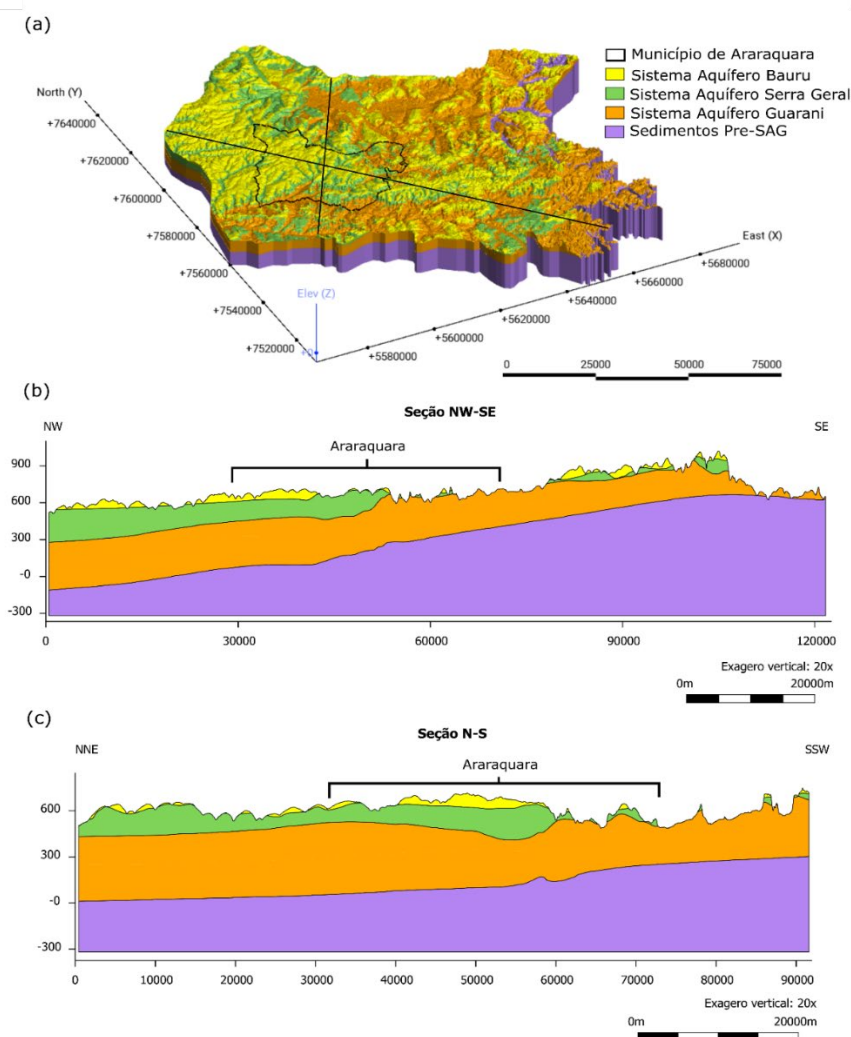
A contribuição hidráulica dos aquíferos adjacentes ao SAG, como o SASG e o Passa Dois (Pré-SAG), respectivamente acima e abaixo, é um tema controverso. O DAEE (1974) foi pioneiro em levantar a hipótese da possibilidade de ocorrerem trocas de águas verticais entre o SASG e o SAG, sugerindo, inclusive, que essas trocas poderiam ser mais significativas do que o próprio fluxo de descarga.

De acordo com modelo hidrogeológico apresentado pelo DAEE (1977), a condição para o estabelecimento do sentido do fluxo hídrico entre essas formações era baseada nas diferenças entre cargas hidráulicas, de forma que se as cargas do SAG fossem superiores às dos aquíferos sobrepostos, o fluxo seria ascendente; caso contrário, o fluxo seria descendente.

Em simulação numérica de fluxo, Gonçalves *et al.* (2020) assumiram que a recarga efetiva ocorre exclusivamente nas áreas de afloramento do SAG, cujo valor estimado foi de 5 mm/ano. Por outro lado, Teramoto *et al.* (2020) e Quaggio *et al.* (2022) concluíram, com base em análises hidroquímicas e isotópicas, haver contribuições dos aquíferos contíguos na recarga. Teramoto *et al.* (2020) sugeriram uma contribuição de mais de 50% do SASG, enquanto Quaggio *et al.* (2022) propuseram contribuição de 53% do Pré-SAG e de 47% do SASG. No geral, ambos os autores verificaram que, conforme se adentra nas porções semiconfinadas a confinadas, a interação hidráulica entre as unidades litoestratigráficas torna-se mais relevante do que a recarga pelas zonas de afloramento.

Devido a isso, nenhuma imposição foi adotada quanto à troca de água entre o SASG e o SAG através de fluxo vertical. No entanto, devido à falta de informação sobre a espessura das unidades do Pré-SAG, e por sua baixa permeabilidade, que é contrastante em relação ao SAG, assumiu-se aqui como impermeável.

A Figura 7.1 ilustra o modelo hidrogeológico conceitual do SAG adotado neste estudo, onde as relações espaciais e espessuras relativas das unidades confinantes acima (SAB e SASG) e abaixo (Pré-SAG) são representadas.



**Figura 7.1 – Representação esquemática do modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo. (a) Modelo em visão 3D; (b) seção na direção NW-SE; (c) seção na direção NNE-SSW.**

No município de Araraquara, o SAG encontra-se confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral (SASG) nas porções norte e noroeste, e livre nas porções sul e sudeste da área, como explanado ao longo deste documento. As seções geológicas (Figura 7.1,b,c) indicam um afinamento desse aquífero na porção leste da área, onde está exposto localmente. Por outro lado, na porção oeste, esse sistema atinge sua máxima espessura, estimada em aproximadamente 400 m. A configuração desse modelo leva em conta recentes dados regionais publicados por Paula e Silva et al. (2023).

## 8. MODELO NUMÉRICO DO SAG

A construção da malha e simulação do modelo numérico foi realizada no programa FEFLOW 7.5, da DHI ([www.dhigroup.com](http://www.dhigroup.com)). A configuração da área do modelo foi fundamentada nas características hidrodinâmicas, que serão discretizadas nos tópicos a seguir, e nos limites das unidades hidrogeológicas definidas com base no mapa geológico da área.

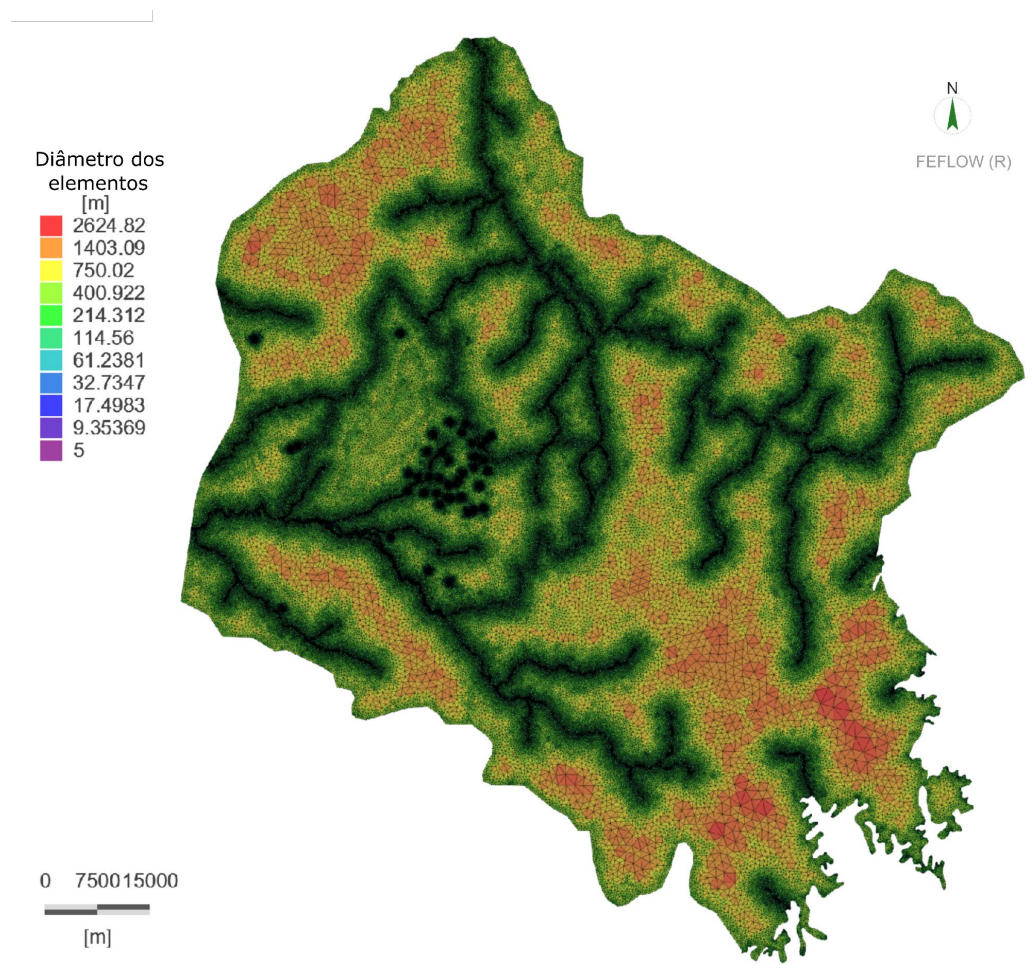
### 8.1. Parametrização do modelo numérico

#### 8.1.1. Geometria e discretização do modelo

O modelo numérico foi construído com base no método dos elementos finitos, com o código FEFLOW (Diersch, 2014), em malha triangular e não estruturada. O modelo possui uma extensão em área de 8903,34 km<sup>2</sup>, discretizado em 864.136 elementos triangulares por camada e 433.622 nós por superfície (Figura 8.1).

Maiores refinamentos foram realizados ao longo do limite do município de Araraquara e em sua abrangência, assim como nas drenagens e nos poços de observação e de bombeamento. A malha se enquadra no parâmetro ótimo de Delaunay (1934) e apresenta apenas 12,7% dos triângulos com ângulo superior a 90° e 0,0% com ângulo acima de 120°. Os diâmetros estão entre 2,6 km nas porções de menor influência, e 5 m nas porções de maior interesse e interferência, sendo que o diâmetro médio é 155 m.

Quanto à espessura do modelo e a sua discretização vertical, essa foi feita com base nas divisões litoestratigráficas construídas no modelo geológico. No total, o modelo apresenta 4 camadas e 5 superfícies, que condizem com a quantidade de unidades presentes: Bauru, Serra Geral, Botucatu e Piramboia. A profundidade máxima que o modelo atinge é de 1130,6 m, que ocorre na porção oeste da área.

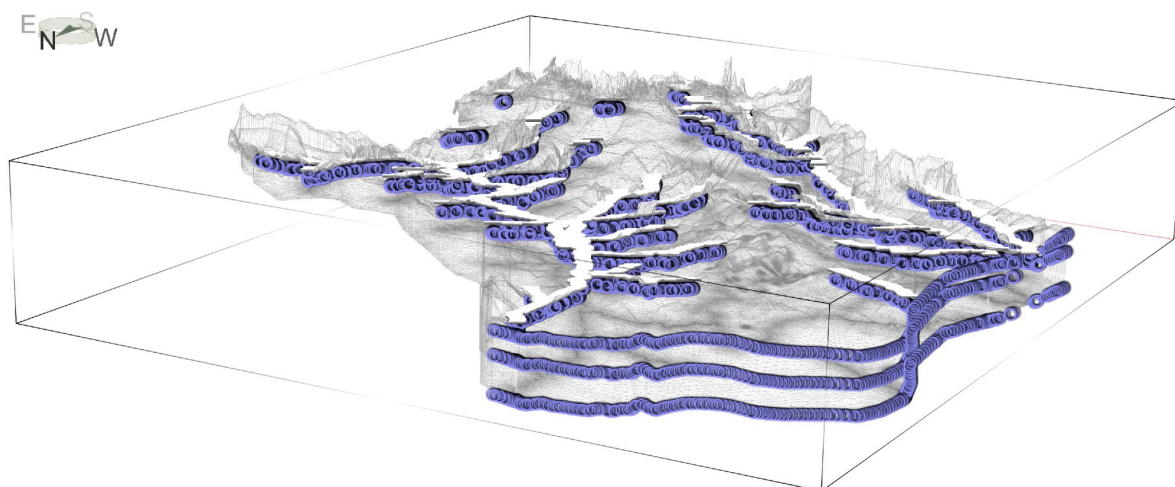


**Figura 8.1 – Configuração da malha do modelo numérico, com destaque para os diâmetros dos elementos.**

### 8.1.2. Condições de contorno e iniciais do modelo

Com base nas informações de carga hidráulica de Gastmans *et al.* (2012), foi determinada a condição de contorno do Tipo I na borda oeste, apenas nas camadas onde o SAG ocorre confinado. Para essas porções, foi atribuída uma carga hidráulica de 525 m. A condição do Tipo I também foi imposta nas drenagens, dessa vez atrelada à condição de *seepage face* (zona de infiltração), cuja carga hidráulica foi associada à elevação, e o fluxo de entrada por essas zonas é igual a zero (Figura 8.2).

A condição do Tipo II, de não-fluxo, foi adotada nos contatos com as unidades Pré-SAG. Na área, esse contato limitou a base do modelo e seu limite a leste. A mesma condição de contorno foi adotada nos limites norte e sul, mas nesses casos marcado pela presença de divisores de água e linhas de fluxo paralelas.



**Figura 8.2 – Condições de contorno atribuídas no modelo numérico.**

Para a simulação em regime transiente, os poços de bombeamento foram tratados como uma condição do Tipo II, especificamente sob a configuração *multilayer well*. A vazão de exploração atribuída foi extraída do banco de dados do DAEE e de Walm (2013).

Essa etapa consiste na determinação das condutividades hidráulicas e os valores de recarga efetiva, no caso da simulação em regime permanente, e na determinação do coeficiente de armazenamento e porosidade específica, para o regime transiente.

As coberturas sedimentares mais recentes não foram discretizadas devido a sua pequena extensão, espessura e escassa interferência hidrodinâmica no SAG. Esses sedimentos foram incorporados nas unidades subjacentes, conforme reportado anteriormente.

Os valores de condutividade hidráulica adotados nesse trabalho foram retirados de dados da literatura. A Tabela 8.1 apresenta o intervalo de valores de condutividade hidráulica, máximos e mínimos, considerados aceitáveis para calibração do modelo, e o valor inicial escolhido para a calibração em regime permanente.

Os valores de armazenamento específico ( $S_s$ ) para cada unidade foram calculados segundo:

$$S_s = b\gamma(\beta n + \alpha) \quad \text{Equação 1}$$

Sendo,  $b$  a espessura do aquífero [L];  $\gamma$  o peso específico da água [M/L];  $\beta$  a compressibilidade da água [1/M];  $\eta$  a porosidade; e  $\alpha$  a compressibilidade do aquífero [1/M]. Os valores de compressibilidade do aquífero foram retirados de Freeze & Cherry (1979), com base no tipo de rocha predominante.

**Tabela 8.1 - Intervalo de valores de condutividade hidráulica adotados na calibração do modelo em estado permanente.**

Unidades litoestratigráficas	Condutividade hidráulica (m/s)			Fonte
	Min.	Máx.	Valor inicial	
<b>Bauru</b>	1,17E-06	3,47E-05	1,79E-05	São Paulo (2005)
<b>Serra Geral</b>	5,45E-09	5,10E-05	1,14E-05	Wahnfried (2010); Reginato (2013); Hirata et al. (1999); Engelbrecht et al. (2020); Navarro (2021)
<b>Botucatu</b>	6,40E-06	8,10E-05	4,17E-05	Engelbrecht et al. (2020); Gonçalves et al. (2020)

Os valores de porosidade específica foram obtidos da literatura, com base nas características petrofísicas das rochas que compõem cada unidade.

Na determinação dos valores de recarga, buscou-se atribuir um valor inicial próximo a 10% da precipitação média anual para as unidades hidroestratigráficas do SAB e SASG, conforme levantado por DAEE/LEBAC (2013). Para o SAG aflorante, buscou-se um valor um pouco superior a 10%. Portanto, a variação do valor de recarga se deu em função, principalmente, das características das unidades litoestratigráficas em superfície.

### 8.1.3. Calibração em regime permanente

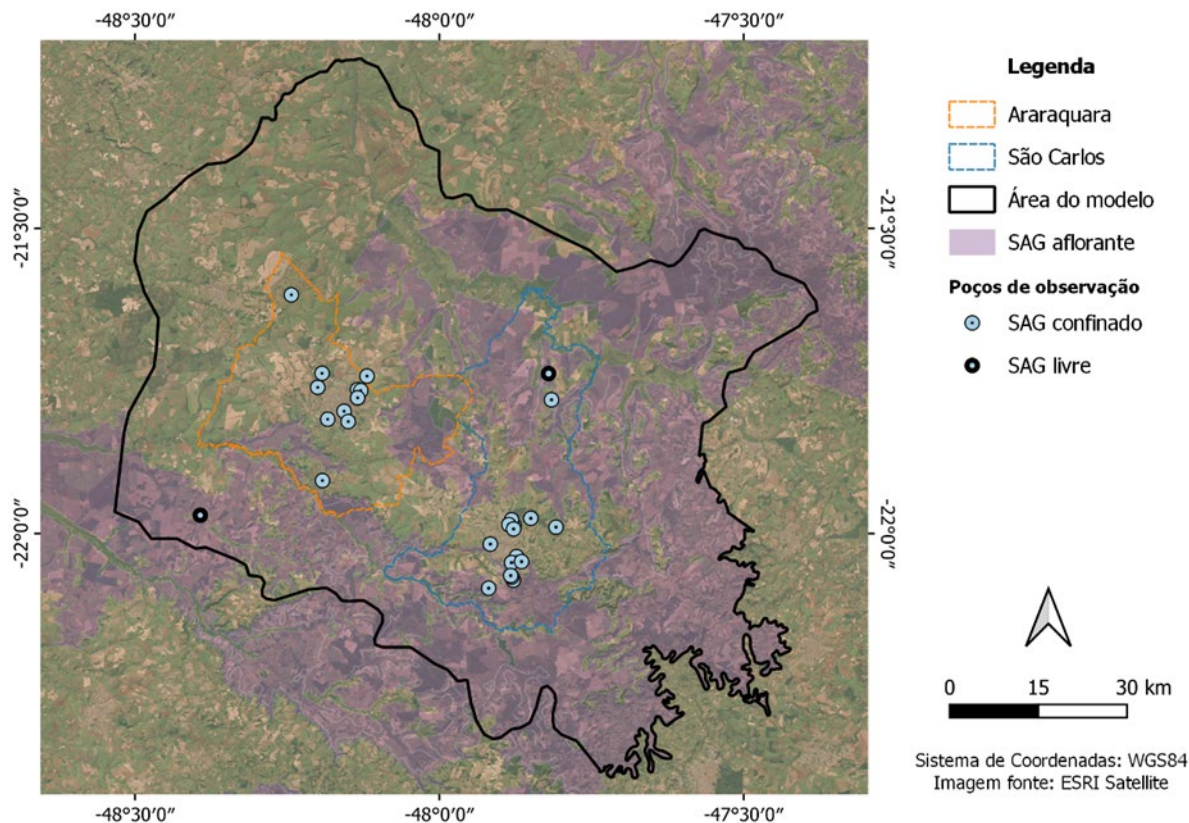
O modelo permanente foi calibrado com base no método de tentativa e erro, cujo parâmetro adotado para a calibração foram as medidas de carga hidráulica dos poços de monitoramento do SAG. No total, foram considerados 20 poços de observação, distribuídos, majoritariamente, ao longo do município de Araraquara e São Carlos (Figura 8.3).

O período selecionado para a calibração do regime permanente foi determinado com base na maior disponibilidade de dados. Nesse sentido, optou-se por utilizar um período equivalente ao ano de 2010, abrangendo dados de carga hidráulica dos anos de 2005 a 2011, a fim de consolidar um conjunto mais robusto de informações para a calibração. Nesta etapa de simulação em regime permanente são consolidados os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga para o modelo.

O critério para a calibração foi a obtenção de um NRMSE (*normalized root mean square error*) próximo ou inferior a 5%. O valor de NRSME é dado por:

$$NRSME = \frac{RMSE}{X_{obs,máx} - X_{obs,min}} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo que o Xobs máx é a maior carga hidráulica medida e Xobs min é a menor carga hidráulica medida nos poços de observação, conforme fornecido pelo FEFLOW.



**Figura 8.3 – Distribuição dos poços de observação ao longo da área do modelo, representando aqueles que se encontram na porção confinada e na porção livre.**

#### 8.1.4. Calibração em regime transiente

Uma etapa de verificação foi realizada em regime transiente, a fim de reproduzir o comportamento da carga hidráulica registrado em 10 poços de monitoramento que possuíam dados entre o período de 1990 a 2023. Para essa simulação, foram adicionados os poços de bombeamento presentes no município de Araraquara (Tabela 8.2).

Os poços de bombeamento cadastrados foram inicialmente organizados por ano de perfuração e, quando possível, associados ao ano de início de operação. Para simplificar o processo de importação e atribuição da taxa de bombeamento no software FEFLOW, os poços foram agrupados em intervalos de 2 a 3 anos. As taxas de exploração foram obtidas dos registros do banco de dados do DAEE e, nesse processo de agrupamento, foi realizada a soma das vazões e distribuída igualmente para os poços do respectivo intervalo de tempo associado.

**Tabela 8.2 - Dados dos poços de bombeamento utilizados no modelo em estado transiente**

AP	AA	ID	X	Y	Q [m³/h]	AP	AA	ID	X	Y	Q [m³/h]
1980	<1990	Paiva	792900	7584700	130	1999	1998	Chácara Flora	792300	7594850	300
1974	<1990	Santana I	790200	7587600	74	2001	2001	Santana	790010	7584550	230
1976	<1990	Santa Lúcia I	791210	7585250	106	2001	2001	Saps 1	800520	7587300	7
1978	<1990	Vila Standard	794150	7586650	54	2001	2001	Saps 2	800540	7587400	8
1986	1990	Santa Lúcia II	791287	7585227	200	2002	2001	UNESP Farmácia (Poço 2)	789331	7585182	30
1982	1990	Estrada do Ouro	797300	7586250	168	2002	2001	Lupo S/A	792236	7587673	30
1987	1990	DR4	790600	7586550	5	2003	2004	Cequil	794195	7584869	5
1988	1990	Jardim São Judas Tadeu	799200	7598100	76	2004	2004	Penitenciária 5	796360	7590520	102
1987	1990	Empresa Cruz	792044	7585264	25	2005	2004	Jd.Santa Marta (Poço 1)	794660	7584730	121
1983	1990	Faz. Salto Grande (Lupo S/A)	786981	7585287	20	2006	2007	Jd. Santa Marta (Constroli)	794665	7584765	178
1989	1990	Faz. Morro da Uva	786788	7584004	10	2008	2007	Bairro Laranjeiras	785624	7588286	5
1990	1990	Penitenciária	795940	7590620	9	2008	2007	Ouro II-A	797210	7586360	110
1990	1990	Vila Standart I	793956	7586667	250	2008	2007	Ouro II-B	797177	7586309	112
1992	1992	Fertibrás	794687	7583297	12	2009	2010	Parque Pinheirinho II	796924	7590353	180
1992	1992	Selmi Dei	794694	7593946	183	2011	2010	ETA/Paiol	789577	7591068	263
1994	1995	Externato Santa Therezinha	791723	7587990	2	2011	2010	Jd. Iguatemi II	795650	7582520	285
1994	1995	Recinto de Exposições	799000	7593550	97	2013	2013	Vila Standart III	793728	7586553	197
1994	1995	Kaiser 1	792506	7584776	250	2017	2016	Jd. Universal	788348	7587490	233
1994	1995	Kaiser 2	792445	7584183	250	1985	2016	Pq. São Paulo	796250	7588900	174
1995	1995	Fertibrás P2	794762	7583115	12	1992	2016	Bairro Pinheirinho	796900	7590300	250
1995	1995	Chácara Bambina	794596	7582203	5	1993	2016	Bueno de Andrada	784950	7601400	15
1996	1995	FMC	794342	7583627	23	1998	2016	Bela Vista 2	793198	7572574	30
1995	1995	ETA Fonte Luminosa	792669	7589939	309	1998	2016	Bela Vista 1	789958	7576364	14
1996	1995	Rodovia-255	798500	7588650	167	2005	2016	Monte Alegre VI	785413	7607933	4
1997	1998	Unesp/Odontologia	791450	7587400	15	2006	2016	Bela Vista 3	790103	7574132	30

AP	AA	ID	X	Y	Q [m³/h]	AP	AA	ID	X	Y	Q [m³/h]
1998	1998	Posto Morada do Sol	794332	7582566	7	2010	2016	Jardim São Paulo II	796350	7589050	286
1998	1998	Aldo Lupo	797800	7583150	193	2011	2016	Parque Planalto	790440	7593650	178
1998	1998	Nigro	792479	7588955	20	2012	2016	Captação das Cruzes	791771	7591103	284
1998	1998	Nestlé	794691	7587246	100	2014	2016	Reservatório Zanin R3	791561	7583560	85
1999	1998	Lupo S/A	787545	7587999	180						

AP = Ano de perfuração; AA = Ano atribuído no modelo numérico.

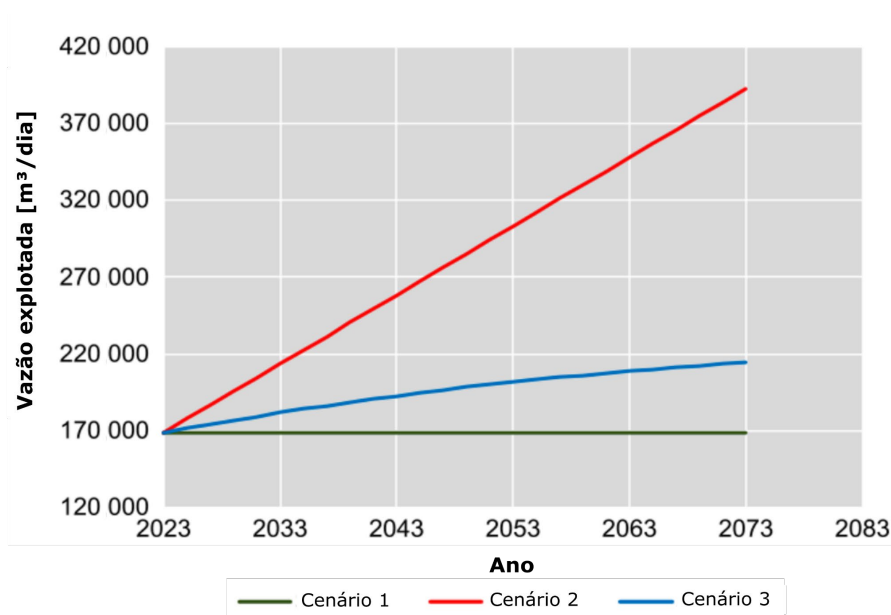
Essa etapa de simulação em regime transiente serviu para calibrar os parâmetros hidrodinâmicos de armazenamento específico e porosidade específica.

Vale ressaltar que, como os períodos iniciais adotados na simulação em regime transiente e permanente são distintos, os valores de carga hidráulica obtidos não são concordantes. No entanto, uma vez que o foco está na variação do nível da água, essa variável foi reproduzida e calibrada de forma independente da carga hidráulica, ou seja, não está vinculada a um período específico.

## 8.2. Simulação em regime transiente para previsões

Para avaliar o impacto da superexploração do SAG nos próximos 50 anos, foi necessário prever e avaliar possíveis cenários ao longo desse período (Figura 8.4). Para tanto, foram considerados três cenários possíveis:

- (1) Estabilização da vazão de exploração no valor atual;
- 2) Crescimento linear da exploração;
- (3) Crescimento da exploração em função do crescimento populacional.

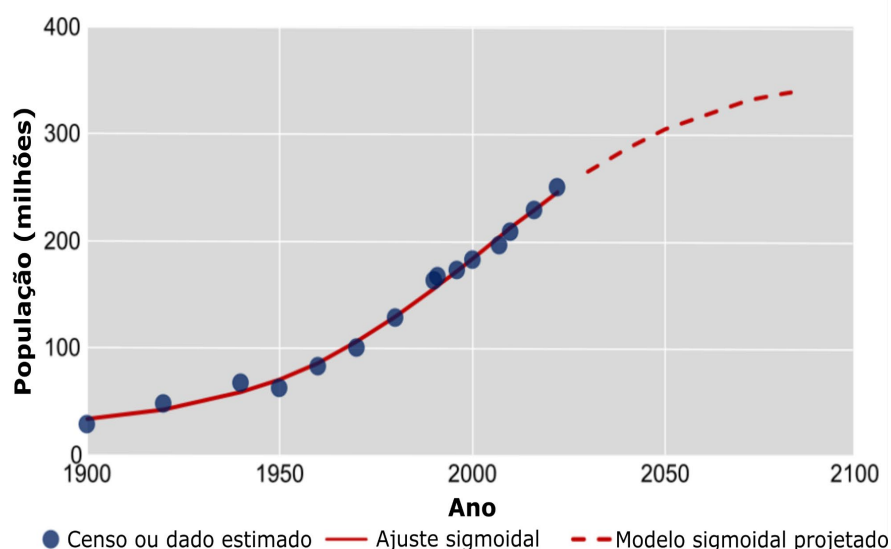


**Figura 8.4 – Curvas de previsão da vazão explorada nos próximos 50 anos no município de Araraquara.**

O cenário 1 é caracterizado por uma situação hipotética e otimista, na qual não se prevê um aumento no número de poços perfurados. Nesse cenário, a vazão atualmente explorada será mantida constante nos próximos 50 anos.

O cenário 2 envolve um aumento linear no volume de água explorado, extrapolado a partir da análise da curva de vazão dos últimos anos, que apresentou um coeficiente angular de 186,5 m<sup>3</sup>/h por unidade de tempo.

O terceiro cenário assume que a demanda de água está intrinsecamente associada ao crescimento populacional. Para estimar o aumento da demanda hídrica subterrânea até o ano 2073, foi ajustada uma curva de função sigmoideal baseada nos dados do censo de Araraquara entre 1900 e 2020 (Figura 8.5). A taxa de exploração projetada para os anos futuros foi baseada na média de produção dos últimos 10 anos, resultando em uma constante de 0,54 m<sup>3</sup>/dia/capita.



**Figura 8.5 – Curva sigmoide do crescimento populacional esperado para Araraquara**

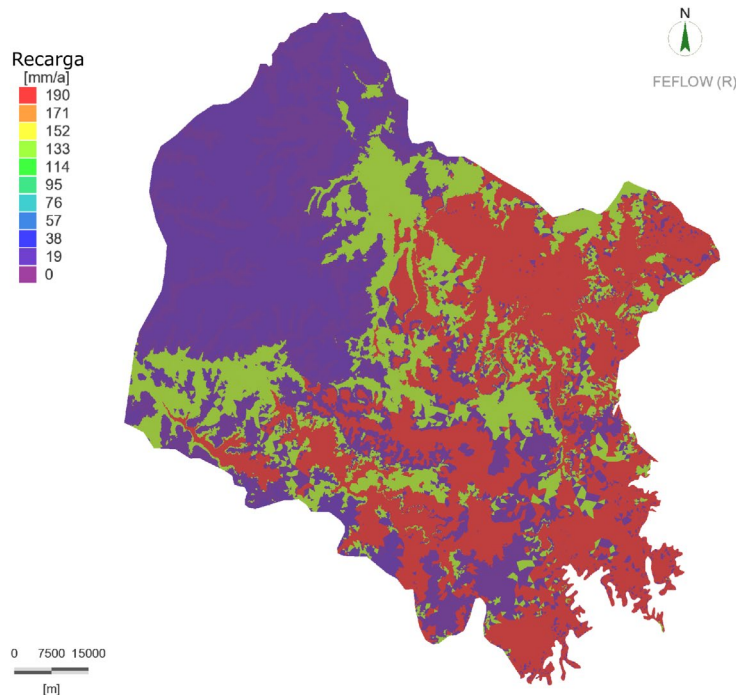
### 8.3. Resultados

#### 8.3.1. Calibração em regime permanente

A Figura 8.6 apresenta os valores de recarga do SAG obtidos com a simulação. A recarga do SAG em sua área de afloramento foi calculada entre 140 mm/ano e 190 mm/ano, valores equivalentes a 10% e 14%, respectivamente, da precipitação direta média no município de Araraquara (1381 mm/ano). Para as áreas de confinamento, cobertas pelo SAB e do SASG, os valores de recarga obtidos na simulação variaram de 10 mm/ano a 15 mm/ano, correspondentes respectivamente a 0,7% e 1% da precipitação média anual. Os valores aqui calculados são duas a três vezes maiores do que os valores regionais de recarga obtidos por modelagem de fluxo em toda a área de confinamento do SAG na Bacia do Paraná, estimados em 4,9 mm/ano por Gonçalves et al. (2020). Esse fato pode ser explicado, em parte, pelo contexto hidrogeológico do

município de Araraquara, onde a área de confinamento se localiza muito próxima da área de afloramento do sistema aquífero e pela menor espessura das camadas confinantes na zona de transição. Neste contexto, é factível uma recarga mais elevada.

A condutividade hidráulica do SAG apresentou variações de  $1,5 \times 10^{-5}$  m/s a  $4,2 \times 10^{-5}$  m/s, distribuídas entre as formações Botucatu e Piramboia, sendo os valores mais baixos atribuídos à camada mais profunda.



**Figura 8.6 – Distribuição do parâmetro de recarga obtido para o modelo.**

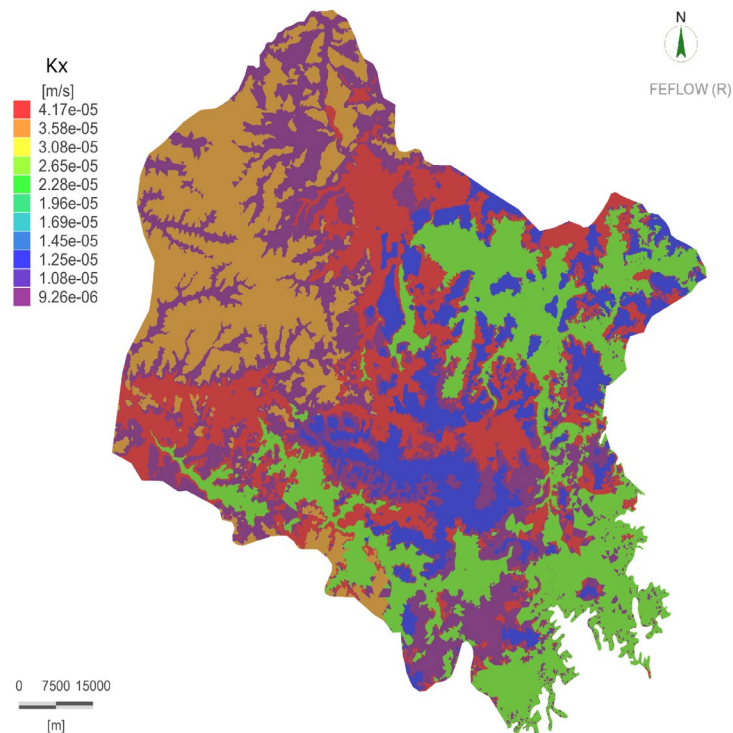
De maneira semelhante, houve uma redução na condutividade hidráulica em profundidade para o SASG, com variação de  $9,26 \times 10^{-6}$  m/s a  $1,16 \times 10^{-6}$  m/s. No SAB, a variação ocorreu apenas na primeira camada, entre os sedimentos sobre os basaltos, com  $3,47 \times 10^{-5}$  m/s, e os depósitos de cimeira da Serra do Itaqueri, com  $1,27 \times 10^{-5}$  m/s (Figura 8.7).

A Figura 8.8 apresenta o resultado da potenciometria simulada do SAG em regime permanente, com fluxo predominantemente leste-oeste no município de Araraquara.

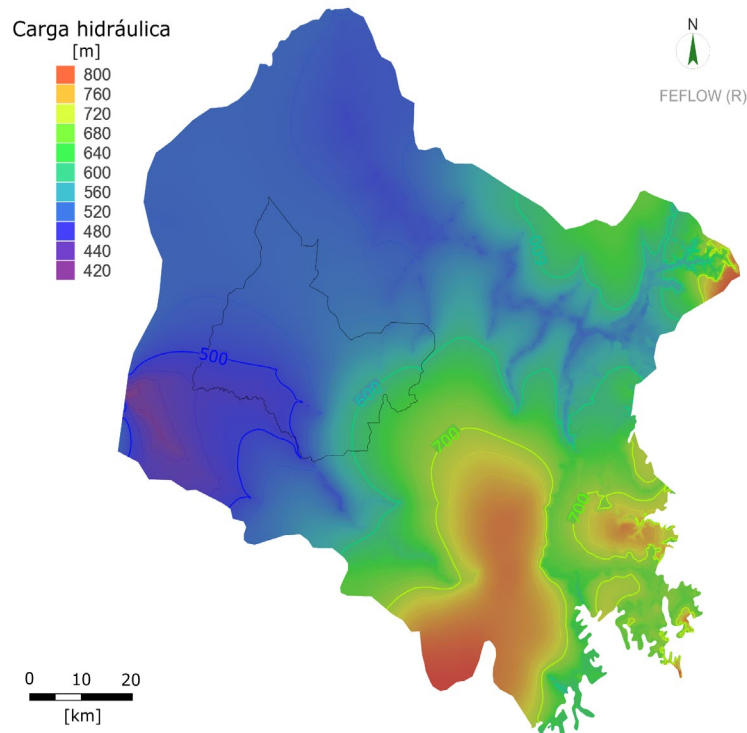
A calibração do modelo permanente foi realizada pela comparação entre os valores de carga hidráulica observados e simulados (Figura 8.9). O resultado mostra um NRMSE = 6,04% e coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,96, indicando uma correspondência em grau satisfatório entre os valores observados e simulados de carga hidráulica do SAG na área de estudo.

### 8.3.2. Calibração em regime transiente

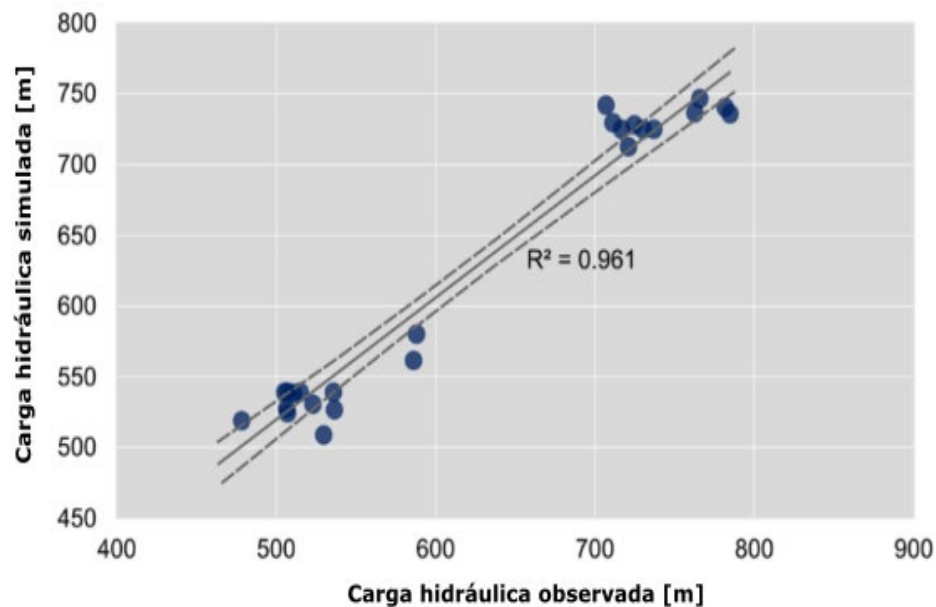
Para verificar a consistência dos parâmetros atribuídos ao modelo, foi feita uma simulação em regime transiente e observada as respostas ao rebaixamento em poços que possuíam registros disponíveis de 1990 a 2023. No total, foram avaliados 10 poços e o critério de calibração foi a reprodução do rebaixamento observado.



**Figura 8.7 – Distribuição do parâmetro de condutividade hidráulica obtido para o modelo.**

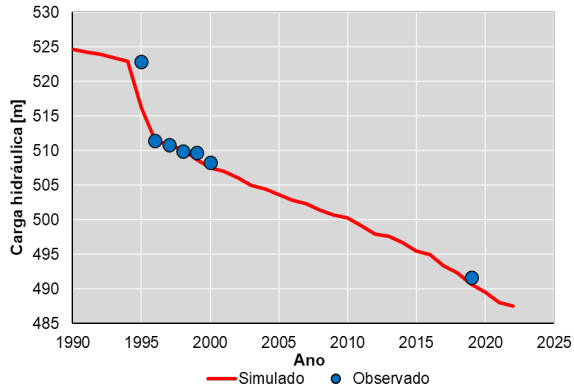


**Figura 8.8 –Potenciometria simulada do SAG.**

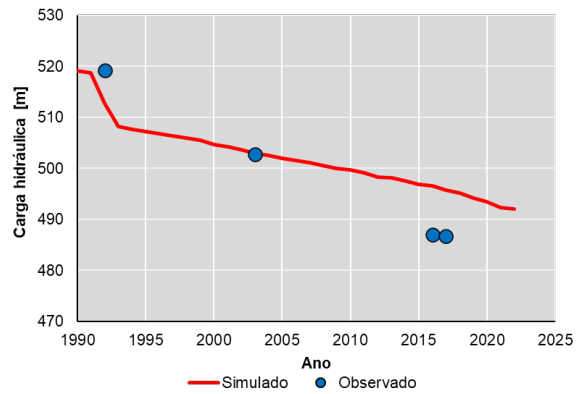


**Figura 8.9 – Resultado da calibração do modelo permanente, a partir da comparação.**

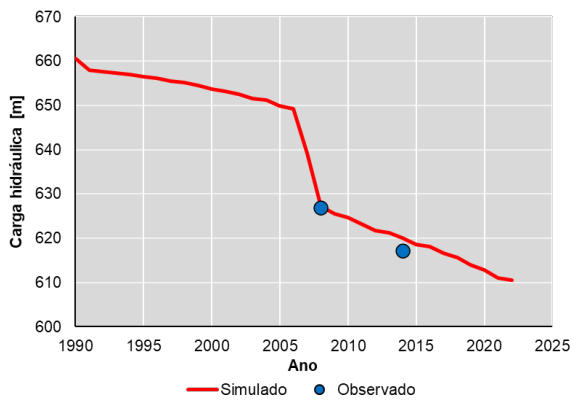
A Figura 8.10 (letras a – j) ilustra a sobreposição entre a curva simulada de rebaixamento e a curva observada nos poços mencionados, o que sugere que o modelo conseguiu replicar de maneira satisfatória o rebaixamento registrado no SAG, no período analisado.



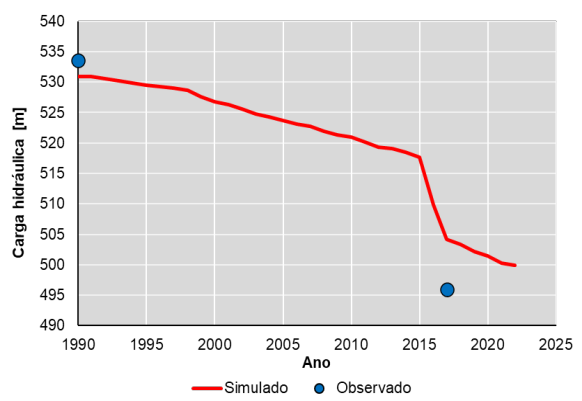
(a)



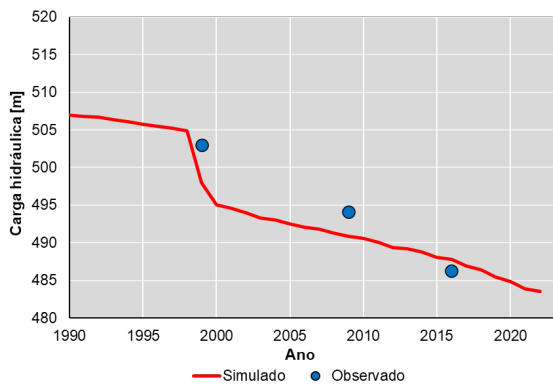
(b)



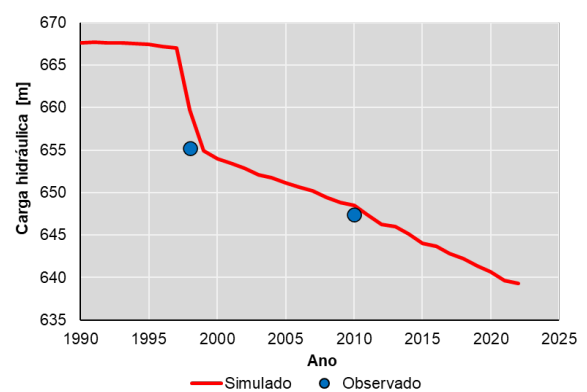
(c)



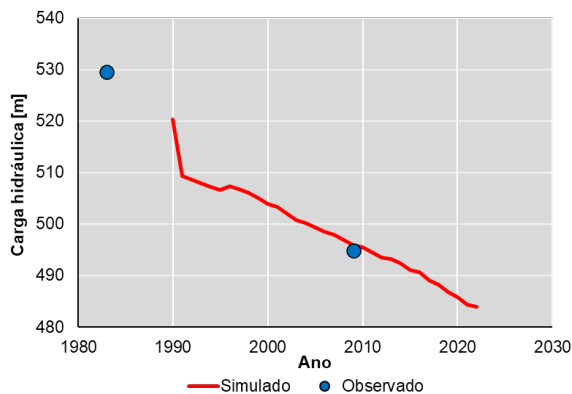
(d)



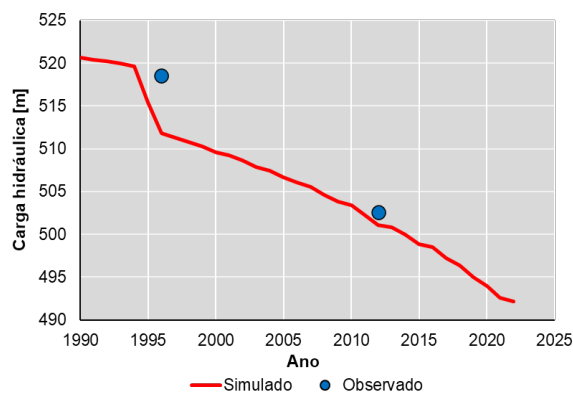
(e)



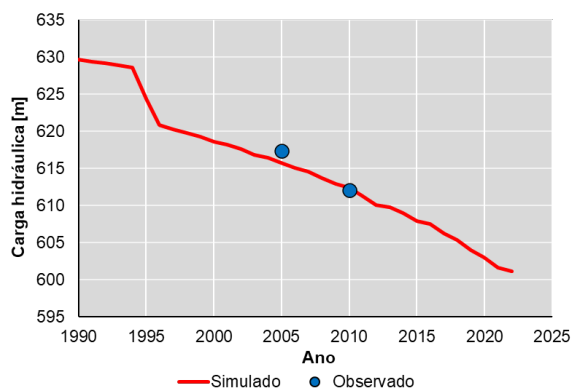
(f)



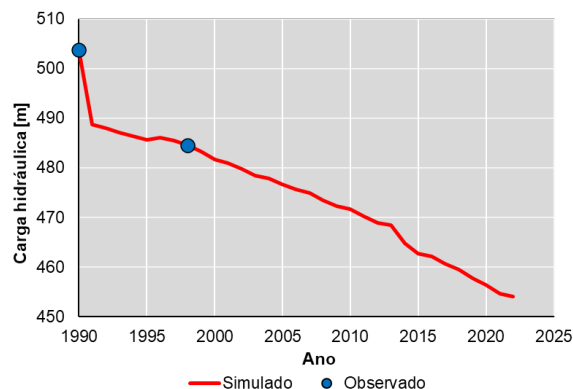
(g)



(h)



(i)



(j)

**Figura 8.10 – Gráficos de comparação entre o rebaixamento observado nos poços do DAAE e o rebaixamento calculado no modelo numérico. (a) Poço Fonte Luminosa; (b) Selmi Dei; (c) Ouro 2B; (d) Jd. Universal; (e) Chácara Flora; (f) Aldo Lupo; (g) Sta. Lúcia; (h) Rod. 255; (i) Santa Marta; (j) Standard I.**

A Figura 8.11 apresenta o gráfico de correlação observado e simulado de todos os poços, evidenciando a consistência da calibração do modelo em regime transitório. Em média, os poços tiveram um rebaixamento de cerca de 30 m entre 1990 e 2023, que resulta em uma taxa de rebaixamento de 0,9 m/ano.

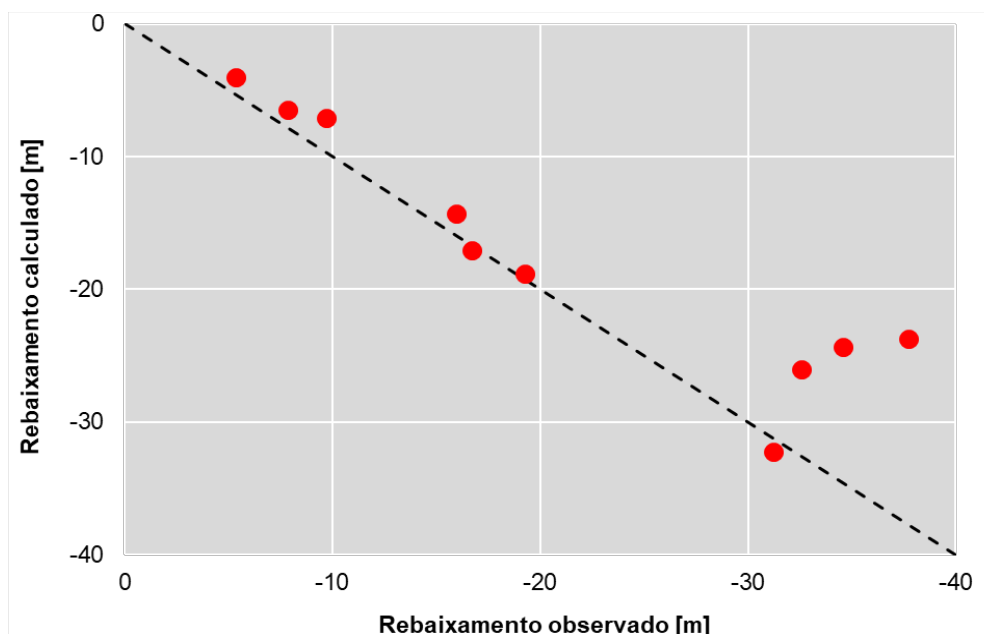


Figura 8.11 – Comparação entre o rebaixamento observado e o calculado para os 10 poços.

Quanto aos parâmetros de armazenamento específico e porosidade específica, a Tabela 8.3 sintetiza os valores utilizados, bem como detalha a condutividade hidráulica das diversas camadas.

Tabela 8.3 – Resultado dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos nas simulações em estado permanente e transiente para o modelo.

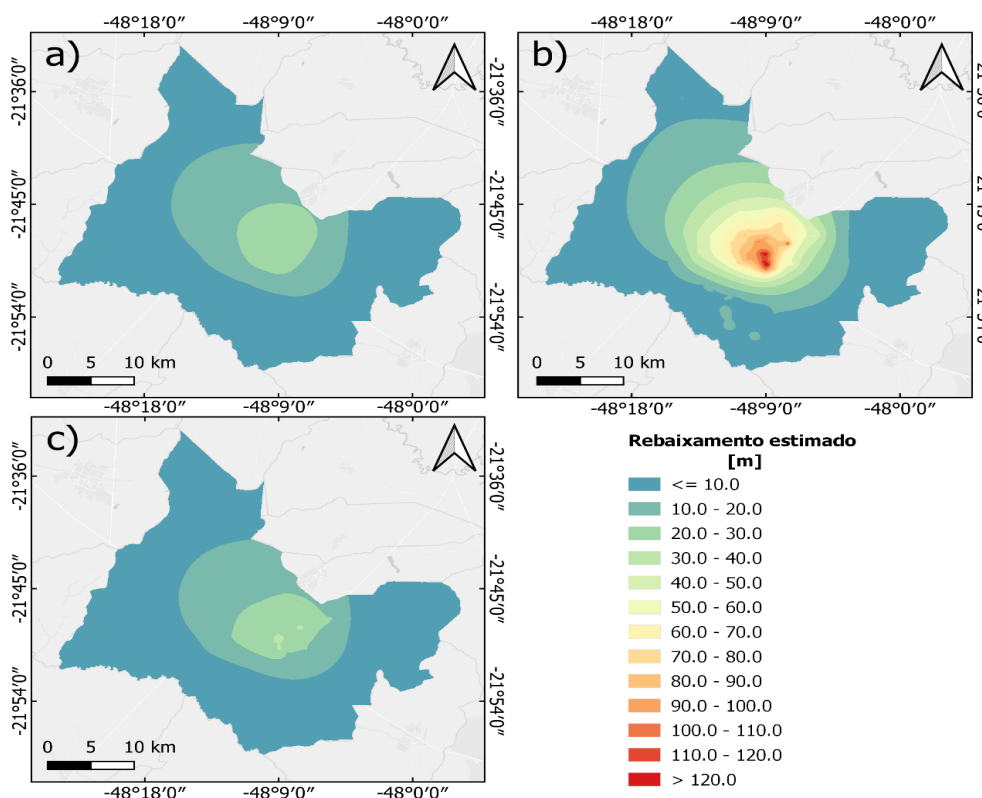
Sistemas Aquíferos	Condutividades hidráulicas		Ss [1/m]	Sy
	K [m/s]	Camadas		
Bauru	1,27E-05	1 a 4	9,00E-04	0,12
	3,47E-05	1		
Serra Geral	9,26E-06	1	1,00E-06	0,08
	4,63E-06	2		
	1,16E-06	3 e 4		
Guarani (Botucatu)	4,17E-05	1 a 3	9,90E-05	0,2
	2,78E-05	4		
Guarani (Piramboia)	2,55E-05	1	9,90E-05	0,15
	1,74E-05	2 e 3		
	1,50E-05	4		

### 8.3.3. Previsão de superexploração

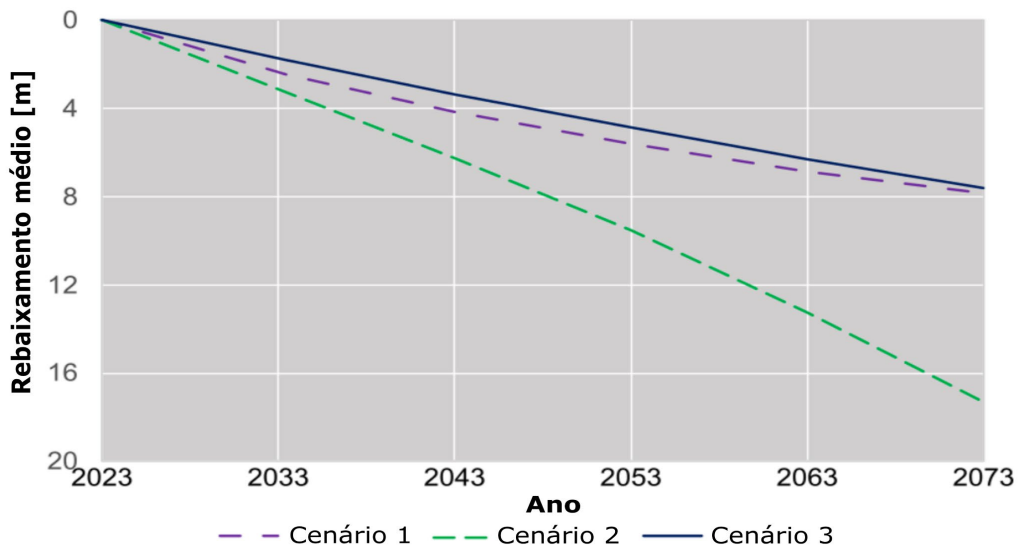
A Figura 8.12 (a, b e c) apresenta os mapas dos rebaixamentos previstos entre os anos de 2023 e 2073, para os diferentes cenários simulados. Nestes, é possível notar uma intensificação do rebaixamento na zona urbana do município, onde se encontra a maior concentração de poços de bombeamento. No cenário mais crítico, nota-se que até mesmo os poucos poços na região rural reagem às interferências decorrentes da superexploração.

O maior rebaixamento para o cenário 1 (Figura 8.12a) é 29,2 m, para o cenário 2 (Figura 8.12b) é de 124,0 m, e para o cenário 3 (Figura 8.12c) é 36,7 m. Nesses cenários, as taxas máximas de rebaixamento anual são de 0,6 m, 2,48 m e 2,5 m, respectivamente.

Ao avaliar o rebaixamento médio ao longo do período de 50 anos (Figura 8.12), nota-se que o cenário 1 apresenta um declínio linear nos primeiros 10 anos, seguido por uma redução da taxa de rebaixamento, descrevendo um comportamento assintótico a partir desse período. Enquanto isso, o aumento linear da taxa de exploração no cenário 2 levou a um rebaixamento acentuado e sem previsão de estabilização.



**Figura 8.12 – Distribuição do rebaixamento estimado do SAG em Araraquara, para o ano de 2073. (a) cenário 1; (b) cenário 2; e (c) cenário 3.**



**Figura 8.13 – Curva de rebaixamento calculado para os próximos 50 anos (2023-2073) nos três cenários avaliados.**

Finalmente, o cenário 3 apresentou a curva com o menor valor médio de rebaixamento; entretanto, essa curva mostra uma persistência à queda linear até os primeiros 30 anos, sendo seguida por uma tendência ao comportamento assintótico, porém com estabilização prevista a ocorrer mais tardiamente do que a do cenário 1.

#### 8.4. Considerações finais sobre os resultados da simulação numérica

Não obstante incertezas intrínsecas devidas à escassez de informações, as seguintes considerações podem ser feitas a partir dos resultados da simulação numérica do SAG no município de Araraquara, em regime permanente e transiente, sob três cenários distintos, até o ano de 2073:

- Observou-se uma rápida diminuição da carga hidráulica do SAG na área urbana de Araraquara, no período de apenas duas décadas. Essa redução alcançou cerca de 20 m em alguns poços.
- As simulações dos impactos decorrentes da exploração do SAG contemplaram três cenários distintos: (1) estabilização da vazão de exploração no valor atual; (2) crescimento linear da exploração; e (3) crescimento da exploração em função do crescimento populacional. Independentemente das premissas atribuídas a cada cenário, as simulações demonstram o progressivo descenso dos níveis de água do aquífero, em maior ou menor taxa. Essa condição é típica de aquíferos confinados, fato que reforça a necessidade de implementação de um sistema de



Previamente à coleta, as bombas existentes nos poços foram ligadas por alguns minutos para assegurar a renovação da água estagnada na tubulação e no poço. As coletas foram efetuadas em pontos antecedentes aos processos de tratamento, como fluoretação e/ou cloração.

Durante as amostragens, foram medidos parâmetros específicos com medidores portáteis, como:

- Temperatura (parâmetro importante para as interpretações geoquímicas, já que a interação entre os constituintes presentes na rocha e na água varia em função da temperatura);
- Condutividade elétrica (capacidade da água em conduzir corrente elétrica; está relacionada aos tipos e concentração das espécies dissolvidas em água);
- pH (representa a atividade do íon hidrogênio na solução; é importante para o entendimento da hidrogeoquímica do sistema aquoso, já que este parâmetro pode ser modificado com a maior ou menor presença dos íons maiores na água).

Ainda em campo, as amostras de água para análises inorgânicas foram filtradas em um conjunto Millipore, utilizando filtros de 0,45 µm. As amostras encaminhadas para análise de metais foram preservadas em ácido nítrico concentrado (2%). Todos os frascos foram fechados e, aqueles que necessitaram, foram conservados sob refrigeração até serem entregues ao laboratório.

### 9.1.1. Métodos de análises e de tratamento de dados hidroquímicos

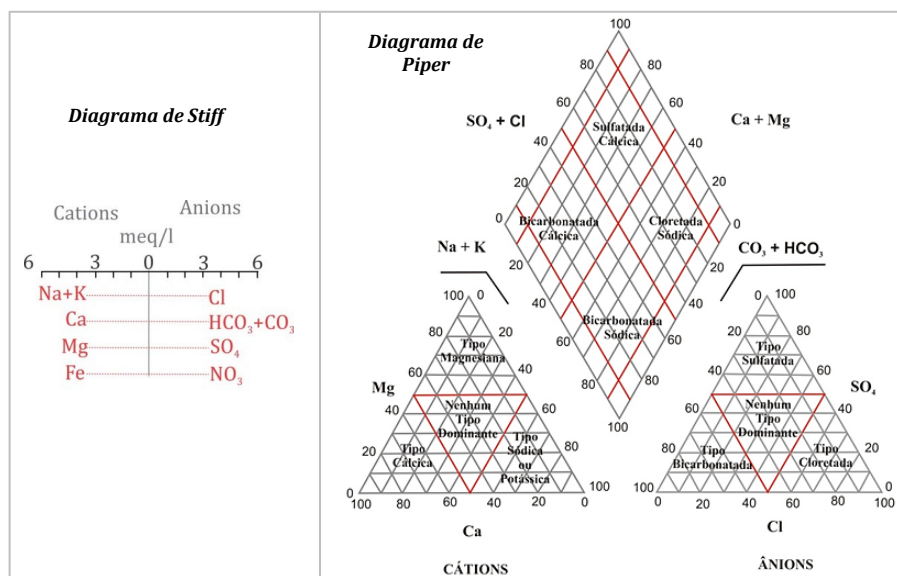
As análises físico-químicas foram feitas no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica, do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP, Campus de Rio Claro (SP). Tais análises foram baseadas nos métodos *da Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (22ª edição, 2012).

Os elementos Alumínio, Bário, Berílio, Cálcio, Cádmi, Cobalto, Crômio, Cobre, Ferro, Potássio, Lítio, Magnésio, Manganês, Molibdênio, Sódio, Níquel, Fósforo, Chumbo, Silício, Estanho, Estrôncio, Vanádio e Zinco foram determinados pelo método de espectrometria de emissão óptica, com fonte de plasma de argônio indutivo (ICP-OES).

A alcalinidade (HCO<sub>3</sub> e CO<sub>3</sub>) foi obtida por titulação; os ânions (fluoreto, cloreto, nitrito, nitrato, fosfato, sulfato, brometo) e os cátions (sódio, potássio, lítio e amônio) foram determinados por cromatografia de íons (IC).

Os dados hidroquímicos foram analisados com o propósito de identificar as características químicas, bem como os diferentes tipos hidroquímicos dos sistemas aquíferos estudados. Na

classificação dos tipos hidroquímicos foram utilizados os diagramas de Stiff e de Piper (Figura 9.2).



**Figura 9.2 - Diagramas de Stiff e Piper.**

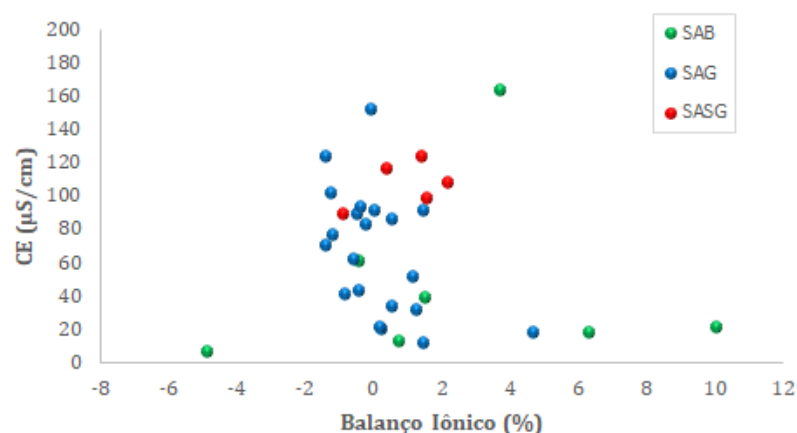
O diagrama de *Stiff* contém linhas dispostas à esquerda e à direita de uma linha vertical que representa o valor zero. Utilizou-se para este estudo os cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$ ) plotados à esquerda, enquanto os ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  e  $\text{NO}_3^-$ ) foram plotados à direita dessa linha. As concentrações iônicas foram expressas em miliequivalentes por litro (meq/L) e os pontos gerados foram interligados por linhas, como mostrado na Figura 9.2, originando um polígono. As variedades de formas e de tamanhos gerados expressam as características das águas e permitem sua classificação e correlação.

O diagrama de Piper (Piper, 1944), por sua vez, é frequentemente utilizado quando se trabalha com grande número de análises químicas de água, classificando e comparando os distintos grupos de água quanto aos íons dominantes. Esse diagrama combina três diferentes campos de plotagem, sendo dois campos triangulares e um romboédrico. Os triangulares estão situados na parte inferior, onde são plotados os cátions, à esquerda, e os ânions, à direita. Os resultados das análises foram plotados em porcentagem; os pontos foram marcados nos triângulos, indicando as concentrações relativas dos diversos constituintes dissolvidos na água. O campo romboidal central, localizado entre os dois triângulos, é utilizado para representar o caráter químico total da água. Essa determinação é feita projetando-se o ponto do cátion à linha identificada com  $\text{Mg}^{2+}$ , e o ponto do ânion paralelo à linha do  $\text{SO}_4^{2-}$ ; a intersecção das duas linhas origina um ponto no campo romboidal (Figura 9.2). A posição desse ponto indica a composição química relativa da água.

### 9.1.2. Representatividade dos resultados

As análises químicas contemplaram a quantificação dos íons maiores presentes em solução na água subterrânea. Os resultados analíticos estão apresentados na Tabela 9.1 e Tabela 9.2. Considerando que as soluções são eletricamente neutras, uma forma de avaliar a representatividade dos resultados obtidos é a verificação do balanço de cargas negativas e positivas. Para o balanço de carga foram utilizados os resultados analíticos convertidos em meq/L, conforme Custódio & Llamas (1996).

A maioria das amostras coletadas apresentou balanço de carga com até 10% de erro, sendo que 94% das amostras ficaram com erros abaixo de 5%. Os erros maiores que 5% podem ser resultado da baixa concentração iônica, que aumenta o erro analítico devido a restrições dos limites de detecção dos equipamentos, sendo essa a hipótese mais provável; pode ainda indicar precipitação de substâncias antes da análise, ou a não inclusão de algumas substâncias presentes dentre os parâmetros quantificados.



**Tabela 9.1 – Resultados das análises hidroquímicas**

Amostra	Aquífero	CE μS/cm	pH	HCO <sub>3</sub>	F	Cl	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Acetato	Br	PO <sub>4</sub>	Li	Na	NH <sub>4</sub>	K	Al	B
											mg/L							
Lebac100	SASG	117	6,71	61,5	0,057	1,81	< 0,02	10,1	0,072	< 0,10	< 0,03	0,56	< 0,01	2,92	< 0,05	1,58	0,03	< 0,002
Lebac102	SASG	124	7,38	82,6	0,047	0,2	< 0,02	0,38	0,15	< 0,10	< 0,03	0,15	< 0,01	8,05	< 0,05	0,7	0,079	< 0,002
Lebac103	SAG	86,7	7,12	56,9	0,041	0,034	< 0,02	0	0,16	< 0,10	< 0,03	0,53	< 0,01	1,94	< 0,05	1,85	0,027	< 0,002
Lebac104	SASG	89,8	6,6	49,6	0,035	1,12	< 0,02	5,9	0,072	< 0,10	< 0,03	0,47	< 0,01	1,82	< 0,05	1,48	0,025	< 0,002
Lebac296	SASG	108	7,26	61,8	0,15	0,19	< 0,02	0,37	0,23	< 0,10	< 0,03	0,93	< 0,01	3,09	0,11	2,76	0,037	< 0,002
Lebac297	SASG	98,9	7	59,6	0,19	0,1	< 0,02	0,16	0,18	< 0,10	< 0,03	0,76	< 0,01	1,35	0,09	4,46	0,039	< 0,002
Lebac299	SAB	13,2	5,54	6,01	0,02	0,12	< 0,02	0,15	< 0,040	< 0,10	0,19	0,14	< 0,01	0,46	< 0,05	1,78	0	< 0,002
Lebac300	SAB	60,8	6,74	35,8	0,07	0,32	< 0,02	0,12	0,07	< 0,10	< 0,03	0,34	< 0,01	0,83	0,12	3,53	0,023	< 0,002
Lebac302	SAB	16,3	5,86	8,12	0,03	0,04	< 0,02	0,06	< 0,040	< 0,10	0,05	0,07	< 0,01	0,23	< 0,05	2,74	0,025	< 0,002
Lebac303	SAB	21,6	6,08	11,7	0,04	0,28	< 0,02	0,16	< 0,040	< 0,10	0,19	0,03	< 0,01	0,65	< 0,05	2,91	0,01	< 0,002
Lebac304	SAB	18,3	6,18	8,96	0,03	0,046	0,07	0,28	< 0,040	< 0,10	0,52	0,08	< 0,01	0,47	< 0,05	2,53	0	< 0,002
Lebac305	SAB	39,3	6,62	22,5	0,03	0,06	< 0,02	0	< 0,040	< 0,10	< 0,03	0,13	< 0,01	0,73	< 0,05	4,47	0,014	< 0,002
Lebac306	SAB	6,6	5,16	1,25	0,1	0,04	< 0,02	0	< 0,040	< 0,10	0,15	0,12	< 0,01	0,25	< 0,05	0,08	0,007	< 0,002
AL	SAG	12,2	5,76	4,52	0,011	0,039	< 0,02	0,26	< 0,040	< 0,10	< 0,03	0,049	< 0,01	0,12	< 0,05	2	0,007	< 0,002
BVII	SAG	40,9	6,48	22,5	0,041	0,28	< 0,02	0,7	0,067	< 0,10	< 0,03	0,27	< 0,01	1,01	< 0,05	3,17	0,01	< 0,002
BVIII	SAG	62,5	6,67	37,3	0,051	0,19	< 0,02	0,24	0,1	< 0,10	< 0,03	0,37	< 0,01	1,75	< 0,05	2,33	0,019	< 0,002
MAc	SAG	82,8	8,16	101	0,09	< 0,010	< 0,02	0	0,099	< 0,10	< 0,03	0,037	0,013	12,6	< 0,05	1,4	0,041	0,006
CF	SAG	152	7,4	89,9	0,1	1,74	< 0,02	0	0,34	< 0,10	< 0,03	2,33	< 0,01	5,47	< 0,05	4,61	0,054	< 0,002
ETAf	SAG	91,7	6,75	54,1	0,13	0,35	< 0,02	0,16	0,21	< 0,10	< 0,03	0,86	< 0,01	1,5	< 0,05	3,78	0,03	< 0,002
ETAp	SAG	102	7,3	62,1	0,14	0,017	< 0,02	0	0,086	< 0,10	< 0,03	1,41	< 0,01	0,97	< 0,05	4,05	0,035	< 0,002
IGT	SAG	19,9	6,07	10,1	0,024	0,037	< 0,02	0,068	< 0,040	< 0,10	< 0,03	< 0,04	< 0,01	0,19	< 0,05	3,34	0	< 0,002
OUR	SAG	21,11	5,58	5,48	0,024	6,58	< 0,02	1,46	0,13	< 0,10	< 0,03	< 0,04	< 0,01	0,79	< 0,05	3,98	0,054	0,006
PSP	SAG	51,7	6,62	30,3	0,072	0,024	< 0,02	0	0,029	< 0,10	< 0,03	0,4	< 0,01	0,77	< 0,05	4,15	0,013	< 0,002
ROD	SAG	43,1	7,09	49,1	0,086	0,021	< 0,02	0	0,048	< 0,10	< 0,03	0,53	0,011	0,81	< 0,05	5,34	0,026	0,004

Amostra	Aquífero	CE μS/cm	pH	HCO <sub>3</sub>	F	Cl	NO <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Acetato	Br	PO <sub>4</sub>	Li	Na	NH <sub>4</sub>	K	Al	B
SL	SAG	89,4	6,74	50,1	0,16	0,57	< 0,02	2,15	0,12	< 0,10	< 0,03	1,99	< 0,01	1,42	< 0,05	3,61	0,028	< 0,002
SII	SAG	31,9	6,07	16,8	0,026	0,48	< 0,02	0,095	< 0,040	< 0,10	< 0,03	0,061	< 0,01	1,05	< 0,05	2,18	0,004	< 0,002
STN	SAG	91,8	7,43	53	0,17	0,097	< 0,02	0,72	0,084	< 0,10	< 0,03	1,75	< 0,01	0,96	< 0,05	4,42	0,03	< 0,002
SDI	SAG	77,3	6,86	45,2	0,15	0,038	< 0,02	0	0,067	< 0,10	< 0,03	1,23	< 0,01	0,75	< 0,05	4,76	0,024	< 0,002
SDII	SAG	93,6	7,35	56	0,11	0,045	< 0,02	0	0,1	< 0,10	< 0,03	0,71	< 0,01	0,89	< 0,05	5,56	0,028	< 0,002
STD	SAG	70,3	7,22	41,7	0,083	0,029	< 0,02	0,09	0,029	< 0,10	< 0,03	0,89	< 0,01	0,79	< 0,05	3,87	0,03	< 0,002
UNV	SAG	124	7,5	75,2	0,2	0,062	< 0,02	0,11	0,12	< 0,10	< 0,03	1,29	< 0,01	1,77	< 0,05	4,92	0,035	< 0,002
VDS	SAG	18,4	6,06	8,62	0,02	0,055	< 0,02	0,11	< 0,040	< 0,10	< 0,03	< 0,042	< 0,01	0,21	< 0,05	3,29	< 0,003	< 0,002
ZAN	SAG	34,2	6,35	19,2	0,036	0,043	< 0,02	0,22	< 0,040	< 0,10	< 0,03	0,23	< 0,01	0,77	< 0,05	2,53	0,019	< 0,002

Tabela 9.2 – Resultados das análises hidroquímicas...continuação

Amostra	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Ni	P	Pb	SiO <sub>2</sub>	Sr	V	Zn	STD
Lebac100	0,053	13	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003	5,21	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,19	< 0,009	40,8	0,18	0,011	0	78,6
Lebac102	0,015	17	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,072	2,09	0,003	< 0,001	< 0,002	0,061	< 0,009	34,0	0,16	0,014	0,35	92,4
Lebac103	0,019	11,3	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	3,21	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,18	< 0,009	42,8	0,097	0,008	< 0,001	61,5
Lebac104	0,13	8,63	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003	4,68	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,16	< 0,009	34,0	0,12	0,008	0,003	60,5
Lebac296	0,1	9,77	< 0,001	< 0,001	0,005	< 0,001	0,003	4,91	0,001	0,003	< 0,002	0,26	< 0,009	59,7	0,1	0,024	0,035	69,7
Lebac297	0,14	12,2	< 0,001	< 0,001	0,005	< 0,001	0,003	3,11	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,24	< 0,009	37,6	0,1	< 0,001	0,004	66,9
Lebac299	0,048	0,28	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	0,4	0,003	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	16,9	0,006	< 0,001	0,012	8,9
Lebac300	0,12	5,81	< 0,001	< 0,001	0,004	< 0,001	0,009	2,18	0,003	< 0,001	< 0,002	0,061	< 0,009	27,4	0,049	< 0,001	0,003	41,2
Lebac302	0,067	0,38	< 0,001	< 0,001	0,005	< 0,001	0,042	0,55	0,004	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	20,0	0,009	< 0,001	0,006	11,4
Lebac303	0,083	1,53	< 0,001	< 0,001	0,003	< 0,001	0,005	0,87	0,002	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	24,0	0,022	< 0,001	0,003	16,0
Lebac304	0,076	0,75	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,022	0,01	0,65	0,013	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	19,7	0,013	< 0,001	0,26	13,0
Lebac305	0,13	2,38	< 0,001	< 0,001	0,005	< 0,001	0,011	1,43	< 0,001	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	31,9	0,023	< 0,001	0,013	27,9

Amostra	Ba	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Ni	P	Pb	SiO <sub>2</sub>	Sr	V	Zn	STD
mg/L																		
<b>Lebac306</b>	0,007	0,069	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,11	0,022	0,021	0,003	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	6,1	< 0,001	< 0,001	0,13	2,0
<b>AL</b>	0,065	0,1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,005	0,016	0,24	0,002	< 0,001	< 0,002	0,016	< 0,009	21,4	0,006	< 0,001	0,003	7,0
<b>BVII</b>	0,047	2,93	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002	1,45	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,089	< 0,009	22,2	0,03	0,002	0,002	28,0
<b>BVIII</b>	0,048	5,87	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003	2,39	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,12	< 0,009	26,3	0,058	0,004	< 0,001	42,4
<b>MAc</b>	0	18,8	< 0,001	< 0,001	0,005	< 0,001	< 0,001	1,45	< 0,001	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	37,6	0,22	0,011	0,006	115,3
<b>CF</b>	0,028	22,1	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,22	1,55	0,092	< 0,001	< 0,002	0,76	< 0,009	29,3	0,042	0,008	< 0,001	104,5
<b>ETAf</b>	0,024	12,5	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,003	0,006	2,12	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,28	< 0,009	32,9	0,031	0,002	< 0,001	61,1
<b>ETAp</b>	0,007	14,6	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	0,002	2,02	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,46	< 0,009	34,9	0,034	0,003	< 0,001	68,8
<b>IGT</b>	0,059	0,49	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,61	< 0,001	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	23,7	0,01	< 0,001	0,006	13,8
<b>OUR</b>	0,43	0,85	< 0,001	0,007	< 0,001	0,009	0,005	1,17	0,3	0,007	0,005	< 0,014	< 0,009	15,7	0,047	< 0,001	0,071	18,5
<b>PSP</b>	0,039	5,15	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	1,54	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,13	< 0,009	27,6	0,019	0,002	< 0,001	35,8
<b>ROD</b>	0,018	10,1	< 0,001	< 0,001	0,003	0,003	< 0,001	1,67	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,19	< 0,009	25,5	0,03	0,003	< 0,001	56,0
<b>SL</b>	0,004	11,8	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	2,3	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,65	< 0,009	35,7	0,035	0,004	< 0,001	60,1
<b>SMII</b>	0,059	1,89	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	1,26	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,02	< 0,009	29,9	0,018	< 0,001	< 0,001	20,7
<b>STN</b>	0,008	12,9	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	1,78	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,57	< 0,009	32,5	0,027	0,004	< 0,001	61,2
<b>SDI</b>	0,01	9,72	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	1,56	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,4	< 0,009	28,0	0,02	0,003	< 0,001	52,2
<b>SDII</b>	0,011	12,1	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	1,86	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,23	< 0,009	28,2	0,03	0,003	< 0,001	63,4
<b>STD</b>	0,035	8,92	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,012	1,4	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,29	< 0,009	30,8	0,028	0,003	< 0,001	47,5
<b>UNV</b>	0,006	15,5	< 0,001	< 0,001	0,002	< 0,001	< 0,001	3,31	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,42	< 0,009	31,4	0,056	0,007	< 0,001	83,7
<b>VDS</b>	0,057	0,47	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,51	0,002	< 0,001	< 0,002	< 0,014	< 0,009	26,1	0,008	< 0,001	0,002	12,3
<b>ZAN</b>	0,081	2,17	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,014	1,47	< 0,001	< 0,001	< 0,002	0,075	< 0,009	23,5	0,026	0,002	0,002	23,0

## 9.2. Parâmetros físico-químicos e principais íons presentes nas águas

Dentre as amostras coletadas, a média dos valores de pH é 6,8 para o SAG; 7,0 para o SASG e 6,4 o SAB. O pH máximo determinado foi na amostra Mac – SAG (pH=8,2), enquanto os valores mais baixos foram 5,6 e 5,8, nos poços Ouro e Aldo Lupo, respectivamente. É importante destacar que os poços que captam água do SAG na porção livre do aquífero (p. ex. poços AL e OUR) apresentam pH mais ácido, enquanto na porção confinada os valores de pH são mais altos. No SASG o valor máximo de pH encontrado foi 7,4 (amostra lebac100) e o mínimo 6,6 (amostra lebac102); No SAB o valor máximo de pH encontrado foi de 8,2 (amostra 302) e o mínimo de 5,2 (amostra 306) (Figura 9.4a).

A condutividade elétrica do SAG varia de 152  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (poço CF) a 12,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (poço AL), com média de 66,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . No SASG a condutividade média encontrada é de 107,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com valores que variam de 89,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 124  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , enquanto nas amostras do SAB a CE varia de 6,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 164  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , com média de 46  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figura 9.4b).

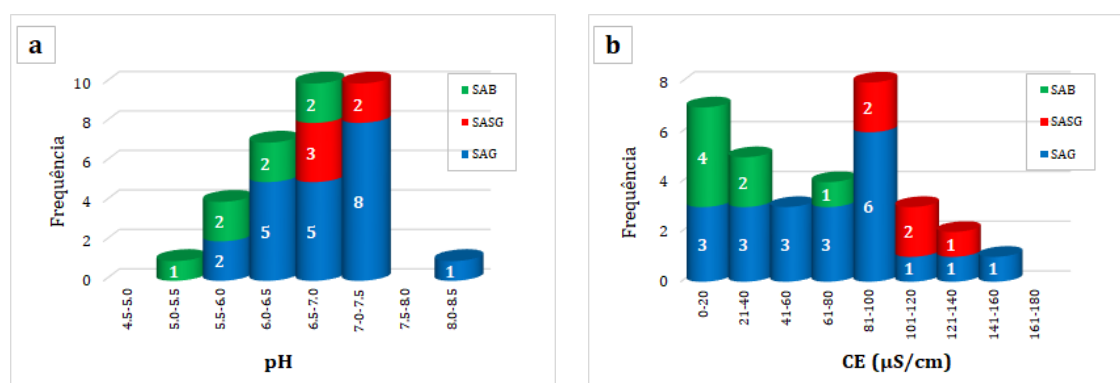
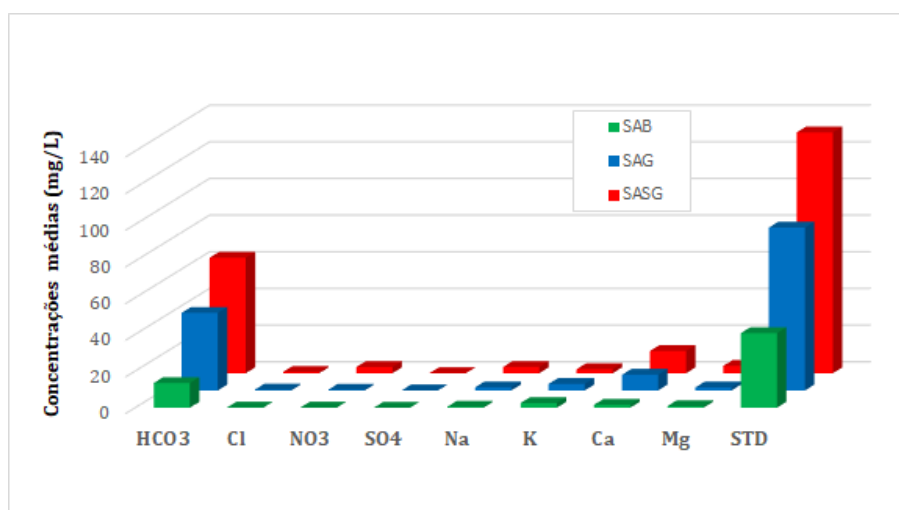


Figura 9.4 - Histogramas de pH e condutividade elétrica de amostras de águas subterrâneas.

O bicarbonato é o ânion encontrado em maior concentração nas amostras coletadas, único responsável pela alcalinidade das águas no presente estudo (Figura 9.5). Nas amostras o valor máximo de  $\text{HCO}_3^-$  é 101 mg/L (poço MAC) e o mínimo é 4,52 mg/L (poço AL), com média de 42,3 mg/L. No SASG a média para  $\text{HCO}_3^-$  encontrada é de 63,02 mg/L e, no SAB a média é 13,5 mg/L. O cátion que ocorre em maior concentração nas águas é o cálcio, com máximo de 22,1 mg/L no poço CF e mínimo de 0,1 mg/L no poço AL para as amostras do SAG. No SASG as concentrações de cálcio estão entre 8,6 mg/L a 17 mg/L e, no SAB variam entre 0,07 mg/L e 2,18 mg/L.

É importante destacar que teores de  $\text{NO}_3$  acima de 1,0 mg/L, atingindo o máximo de 10 mg/L, foram detectadas em quatro poços, dois no SASG (Lebac 100 e 102) e dois no SAG (OUR e SL). Todos são poços produtores localizados em zonas de recarga ou próximas da porção não-confinada, e apresentam teores mais elevados de Cl, indicando provável contaminação por efluentes domésticos ou industriais.

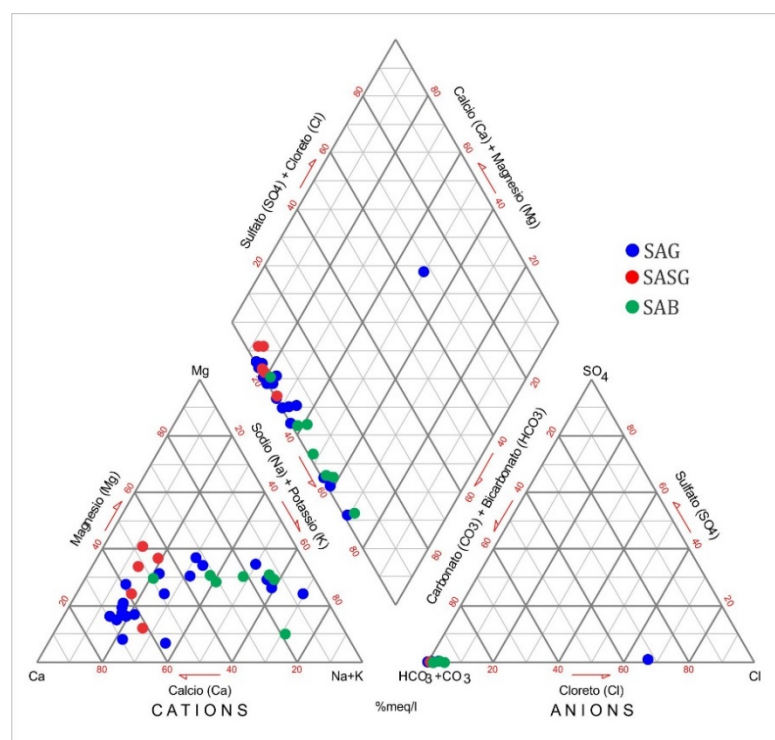


**Figura 9.5 - Médias das concentrações dos íons principais.**

### 1.1. Classificação das águas subterrâneas

A classificação hidroquímica das águas subterrâneas do município de Araraquara foi realizada com emprego dos diagramas de *Piper* e *Stiff*.

No diagrama de Piper (Figura 9.6) observa-se que as amostras do SAG são predominantemente bicarbonatadas cálcicas em sua maioria (81% do total). Águas bicarbonatadas sódicas foram constatadas em amostras provenientes dos poços Victório De Santi, Aldo Lupo e Iguatemi. A amostra do poço Ouro está no limite entre a classificação de águas cloretadas sódicas e sulfatadas cálcicas, sendo, portanto, categorizada como água mista.

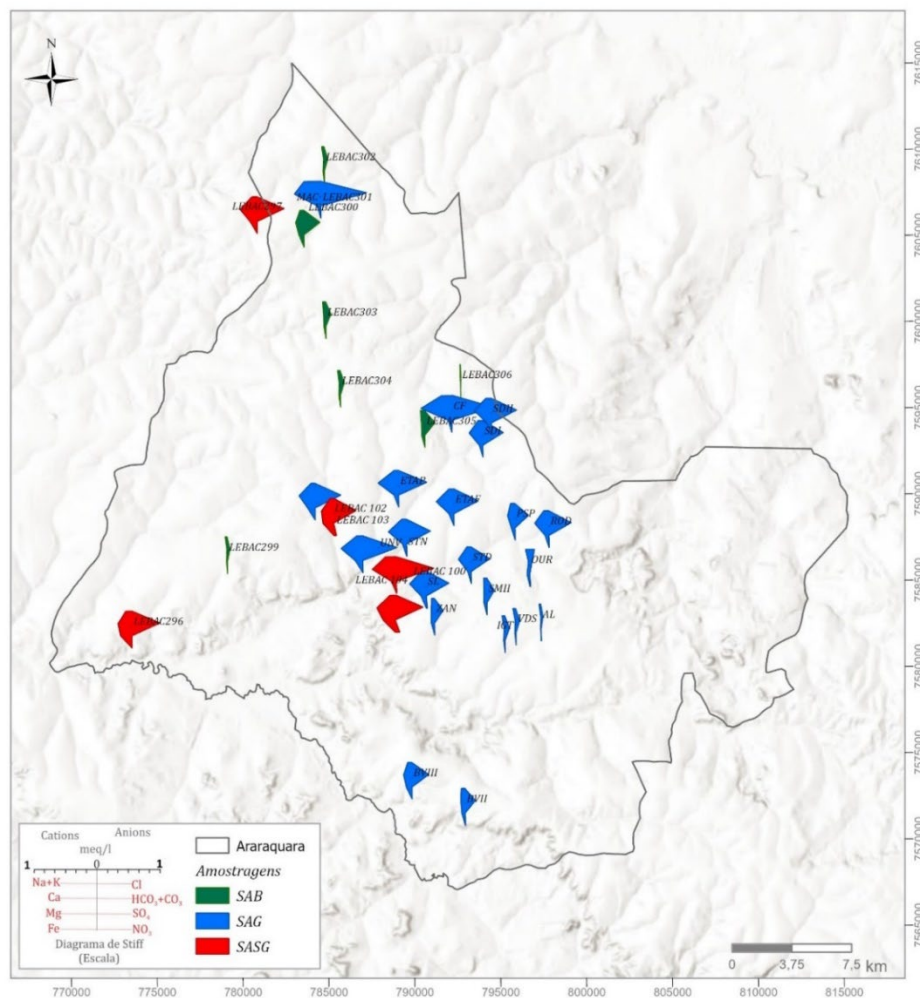


**Figura 9.6 - Diagrama de Piper das águas subterrâneas do município de Araraquara.**

As águas coletadas nos poços que exploram o SASG foram classificadas como bicarbonatadas cálcicas. Já as amostras de água do SAB são predominantemente bicarbonatadas cálcicas (57%), seguidas pelas bicarbonatadas sódicas (43%) (Figura 9.6).

Nos diagramas de *Stiff* (Figura 9.7), é possível identificar padrões distintos de concentração dos íons sódio, potássio, magnésio, cálcio, cloreto, bicarbonato e sulfato presentes nas águas analisadas. Esses padrões geralmente se correlacionam com os tipos hidroquímicos obtidos no diagrama de *Piper*.

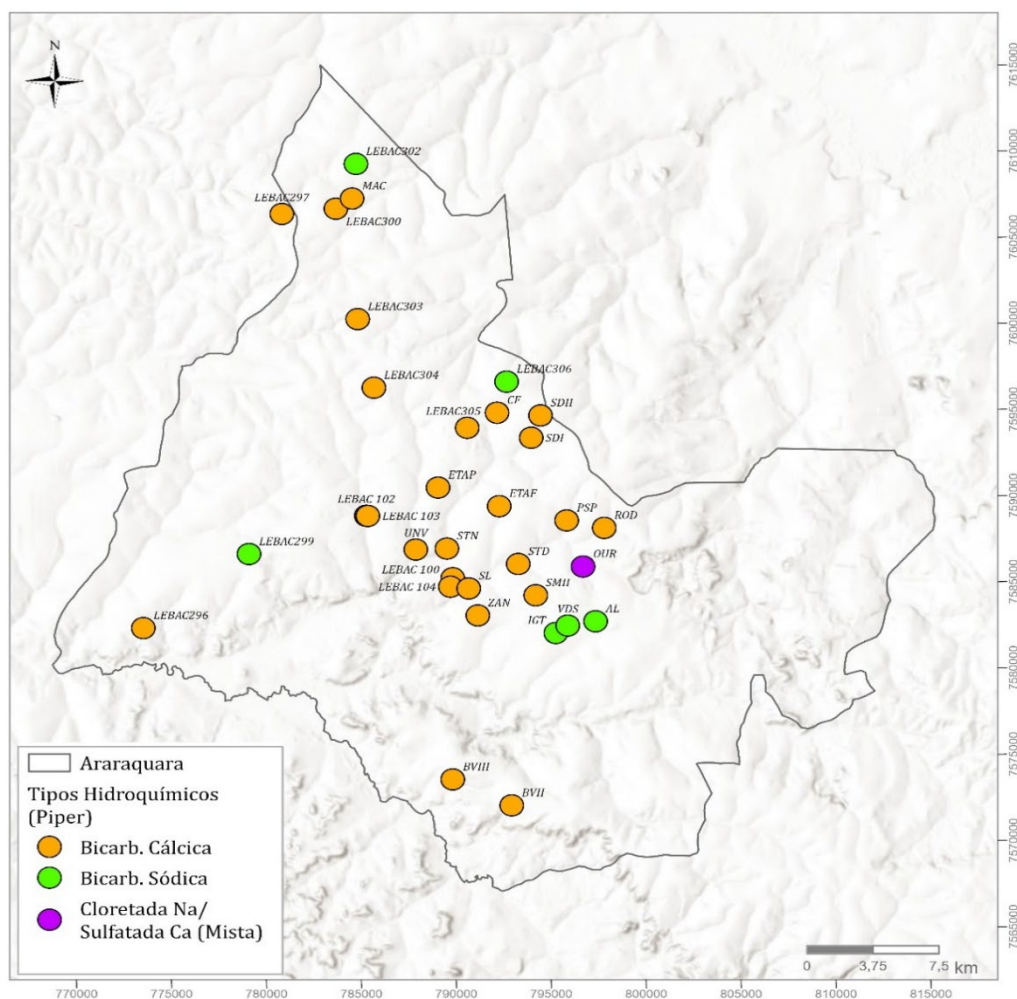
No mapa de distribuição das fácies hidroquímicas (Figura 9.7), os diagramas do SAG apresentam características semelhantes no centro da área de estudo, onde as águas exibem maiores salinidades, enquanto os diagramas tendem a ser mais delgados na porção centro-sudeste, indicando águas menos mineralizadas. Os diagramas do SASG assemelham-se aos das amostras do SAG mais mineralizadas. Por outro lado, as amostras do SAB exibem diagramas mais delgados, representando águas menos mineralizadas.



**Figura 9.7 - Distribuição dos diagramas de *Stiff* das águas subterrâneas do município de Araraquara.**

A mineralização da água do SAG mostra variações significativas ao longo da área de estudo, com tendência de maior mineralização nas porções norte e central. Isso é claramente evidenciado pelos diagramas de *Stiff*, onde os poços MAC, UNP, ETAp, PP, CF, SDI, SDII, CRZ, ETAf, STN, STD, SL e ROD, exibem diagramas com larguras maiores. Em direção à porção sul/sudeste, a mineralização tende a diminuir gradualmente, alcançando os valores mais baixos nos poços OUR, AL, VDS e IGT, como pode ser observado na Figura 9.7 (diagramas menos espessos).

No mapa com a distribuição dos tipos de água (Figura 9.8), as águas bicarbonatadas cálcicas estão predominantemente distribuídas nas porções norte e central de Araraquara, enquanto as bicarbonatadas sódicas encontram-se nas bordas da área do município: norte (1 amostra - SAB), oeste (1 amostra - SAB) e sudeste (3 amostras - SAG).



**Figura 9.8 - Distribuição dos tipos hidroquímicos.**

Com base em dados hidrogeológicos e perfis geofísicos, observa-se que os poços Ouro, Aldo Lupo, Victório de Santi e Iguatemi não estão hidráulicamente confinados, ou seja, o nível estático desses poços encontra-se abaixo do topo do aquífero. Os poços Ouro e Iguatemi não possuem cobertura de rochas basálticas, enquanto os poços Victório de Santi e Aldo Lupo apresentam delgada cobertura de basaltos. Esses poços localizam-se na região centro-sudeste do município de Araraquara, na porção livre do SAG, reconhecida como área de recarga do aquífero. Por esta condição, as águas do SAG nessa região são menos mineralizadas devido à mistura com águas pluviais infiltradas. À medida em que se adentra às porções confinadas do aquífero, as águas do SAG tornam-se mais mineralizadas, como pode ser constatado pelos resultados das análises hidroquímicas dos poços localizados na parte norte do município.

Na área de confinamento, as águas do SAG são classificadas como bicarbonatadas cálcicas, enquanto nas áreas de recarga essas águas são classificadas como bicarbonatadas sódicas.

### 9.3. Considerações finais

Regionalmente, as águas do SAG são predominantemente bicarbonatadas cálcicas e subordinadamente bicarbonatadas calco-magnesianas e calco-sódicas nas faixas de afloramento e nas proximidades desse limite com as zonas de confinamento. Onde o aquífero se encontra confinado em porções mais profundas, as águas do SAG tornam-se principalmente bicarbonatadas sódicas e apresentam maior grau de mineralização, refletido nas médias das condutividades elétricas observadas.

O que se observa em Araraquara em amostras de água de poços profundos destinados ao abastecimento público, perfurados na área de recarga do SAG, na região sudeste do município, são concentrações relativas maiores de sódio do que de cálcio. Ainda que pequenas, essas concentrações incomuns são sugestivas de um processo de contaminação em andamento nessa área que abrange o Distrito Industrial II e se estende até a região do Bairro do Ouro. Concentrações maiores de cloreto, nitrato e sulfato podem indicar contaminação por atividade antrópica; todavia, nenhum desses parâmetros mencionados mostrou valores acima dos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS 888.

Por se tratar da principal área de recarga do SAG no município, desprovida de cobertura espessa de rochas basálticas, que poderia proporcionar certa proteção, e na presença de fontes potenciais de contaminação no seu perímetro, é recomendável o monitoramento sistemático da qualidade da água subterrânea em todas as captações, tanto de abastecimento público como de uso privado.

## 10. ZONEAMENTO DA EXPLOTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO SAG

O zoneamento da exploração é um procedimento técnico que visa delimitar áreas nas quais a extração de águas subterrâneas apresenta comportamentos similares em termos de vazão. Esse procedimento permite visualizar áreas onde a extração desse recurso hídrico é ou pode se tornar crítica, em função da grande concentração de poços, das vazões totais extraídas e das disponibilidades hídricas existentes.

O zoneamento auxilia no planejamento estratégico e racional da exploração do aquífero, identificando e categorizando as áreas segundo classes de intensidade de extração ou de déficit/superávit hídrico. Assim, esse procedimento aponta áreas nas quais há necessidade de intervenção por parte dos órgãos gestores, no sentido de aplicar políticas públicas para preservação e manutenção dos recursos hídricos subterrâneos.

Um dos métodos utilizados para delinear o zoneamento da extração das águas subterrâneas com resultados bastante eficazes é o da avaliação da intensidade de exploração. O método da avaliação da intensidade de exploração é o principal indicador de consumo das águas

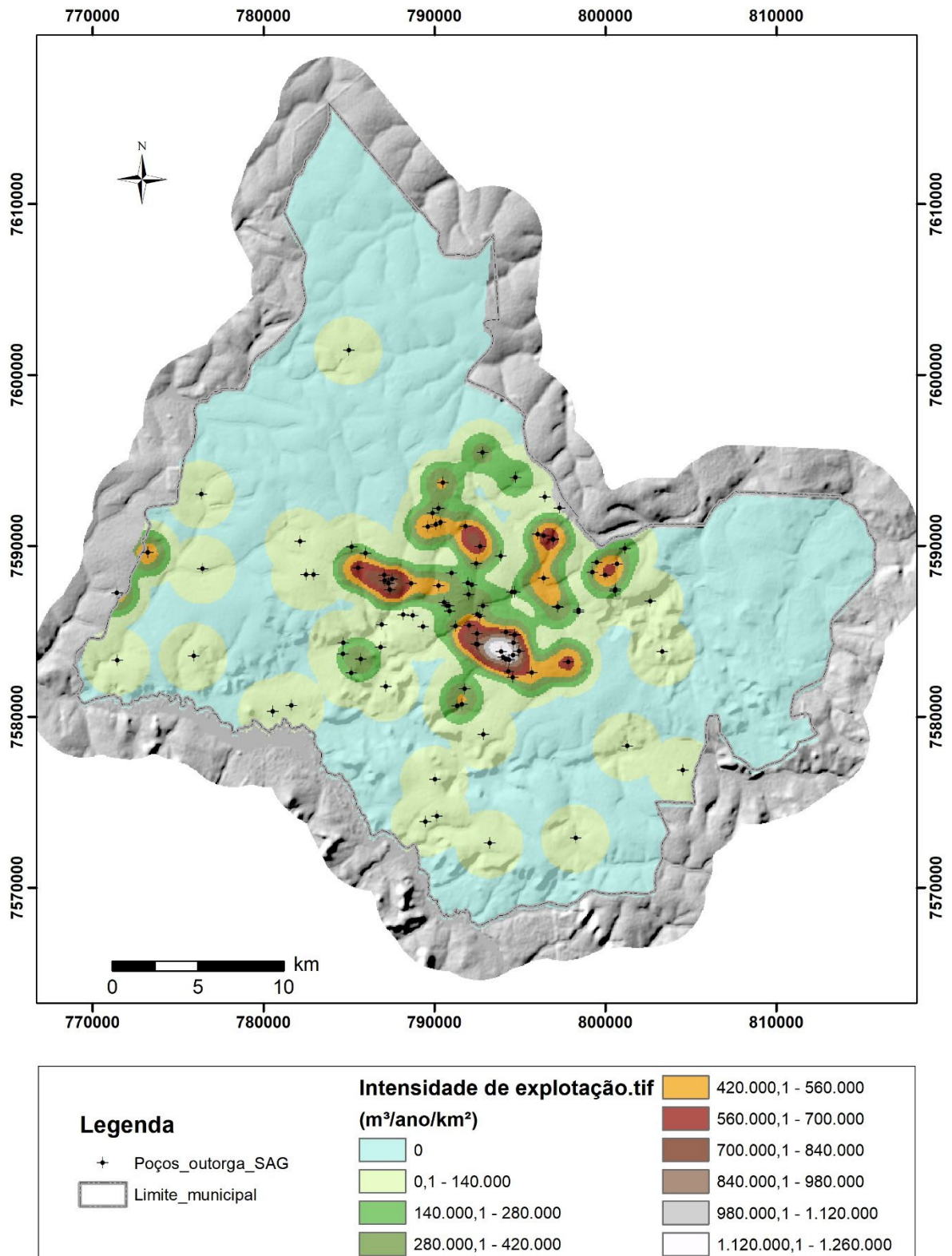
subterrâneas (Paula e Silva *et al.*, 2021) e está descrito aos longos dos capítulos 6 e 8 deste relatório.

A avaliação da intensidade de exploração utiliza ferramentas de geoprocessamento aplicadas a dados de poços, considerando tanto o número absoluto de captações como as vazões individuais extraídas. Neste estudo, a análise da intensidade de exploração empregou a ferramenta de geoprocessamento “*Kernel Density*”, do programa *ArcGIS*, com inserção de dados de outorga de uso do SAG fornecidos pelo DAEE. Os dados cadastrais de outorga incluíram 111 registros de captações no SAG, cuja extração total de água subterrânea alcançou 155.217 m<sup>3</sup>/d, com vazão média de 70 m<sup>3</sup>/h.

O mapa de avaliação da intensidade de exploração, elaborado neste estudo (Figura 6.23 e Figura 10.1), mostra o zoneamento das áreas de extração de água subterrânea do SAG com base nas densidades de vazão ou intensidade de exploração em m<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup>. As densidades de vazão foram classificadas em 10 faixas, variando desde 0 m<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup> para áreas inexploradas, até 1,26 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup> para as áreas de maior exploração.

Com base nesse zoneamento de vazões anuais por km<sup>2</sup>, observa-se que as áreas potencialmente críticas têm seu limite inferior na faixa de ocorrência de densidade de vazão de 0,14 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup>. Se comparado com a recarga máxima da zona confinada do SAG, calculada em 15 mm/ano (capítulo 8) ou 0,015 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup>, as vazões extraídas nesta faixa são quase dez vezes maiores do que a recarga alcançada pelo aquífero. Por outro lado, se comparado com a recarga máxima de 190 mm/ano ou 0,19 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ano/km<sup>2</sup>, calculada para zona aflorante do aquífero, essa faixa de vazão equivale a 74% da recarga.

Certamente, a realimentação dos aquíferos confinados é significativamente lenta e pouco expressiva, resultando em um desequilíbrio constante quando comparada às taxas de extração do aquífero.



**Figura 10.1 – Mapa de zoneamento (intensidade) de exploração do SAG.**

## 11. ÁREAS DE RESTRIÇÃO E CONTROLE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E MEDIDAS DE PROTEÇÃO

A Deliberação CRH nº 052 instituiu, no âmbito do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SIGRH –, diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Dentre as considerações iniciais, a portaria ressalta que as reservas de águas subterrâneas, apesar de renováveis, são limitadas e que a situação atual de exploração dos aquíferos em determinadas regiões pode superar as recargas naturais, o que pode provocar acentuado rebaixamento dos níveis de água e interferências múltiplas entre poços. Essas áreas são caracterizadas como críticas e suscetíveis de enquadramento em programas de racionalização da captação. Em relação à qualidade natural da água subterrânea, a portaria destaca que quando houver alteração, estatisticamente comprovada em relação aos parâmetros naturais de qualidade das águas, haverá necessidade de sua remediação.

Nesse sentido, a Deliberação CRH nº 052 define “Áreas de Restrição e Controle” do uso das águas subterrâneas” como aquelas onde existe necessidade de disciplinar as atividades que possam causar alterações ou efeitos negativos sobre a quantidade ou qualidade das águas subterrâneas.

A delimitação dessas áreas deve ser estabelecida com o apoio de estudos hidrogeológicos tendo em consideração os Planos de Bacias Hidrográficas, os Relatórios de Situação dos Recursos Hídricos, os Programas Estaduais de Monitoramento de Qualidade e Atendimento à Potabilidade que evidenciem os efeitos negativos da exploração e contaminação, apontando a necessidade da aplicação de ações preventivas e corretivas.

As Áreas de Restrição e Controle (ARCs) de captação e uso das águas subterrâneas, conforme definidas na Deliberação CRH nº 052, são classificadas em:

- a) Áreas Potenciais de Restrição e Controle (ARC-PO) são aquelas onde a densidade de poços tubulares e o volume de água extraído indicam superexploração, ou aquelas onde estão sendo ou foram desenvolvidas atividades potencialmente contaminantes de solo e águas subterrâneas;
- b) Áreas Prováveis de Restrição e Controle (ARC-PR) são aquelas onde são observados indícios de superexploração e interferência entre poços ou apresentam indícios de contaminação no solo e águas subterrâneas;
- c) Áreas Confirmadas de Restrição e Controle (ARC-CO) são aquelas onde foram constatadas superexploração ou contaminação das águas subterrâneas.

De acordo com o zoneamento de densidades de vazão apresentados neste estudo, o limite inferior para a definição das áreas potencialmente críticas de exploração do SAG foi estabelecido pela faixa de densidade mínima de vazão de  $0,14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{km}^2$ . As densidades de vazão acima desse valor mínimo se concentram, principalmente, na área urbanizada do município e são influenciadas, sobretudo, por captações de abastecimento público de propriedade do DAAE e por captações industriais. Também na porção extremo oeste do município aparece uma pequena área com densidade de vazão acima de  $0,14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{km}^2$ , resultante de atividades de irrigação de plantas cítricas (Figura 10.1).

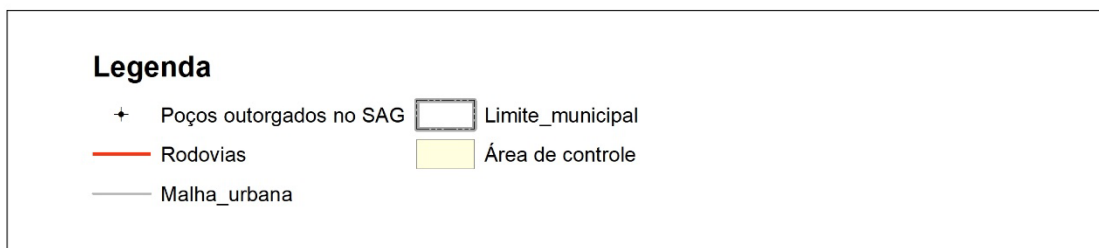
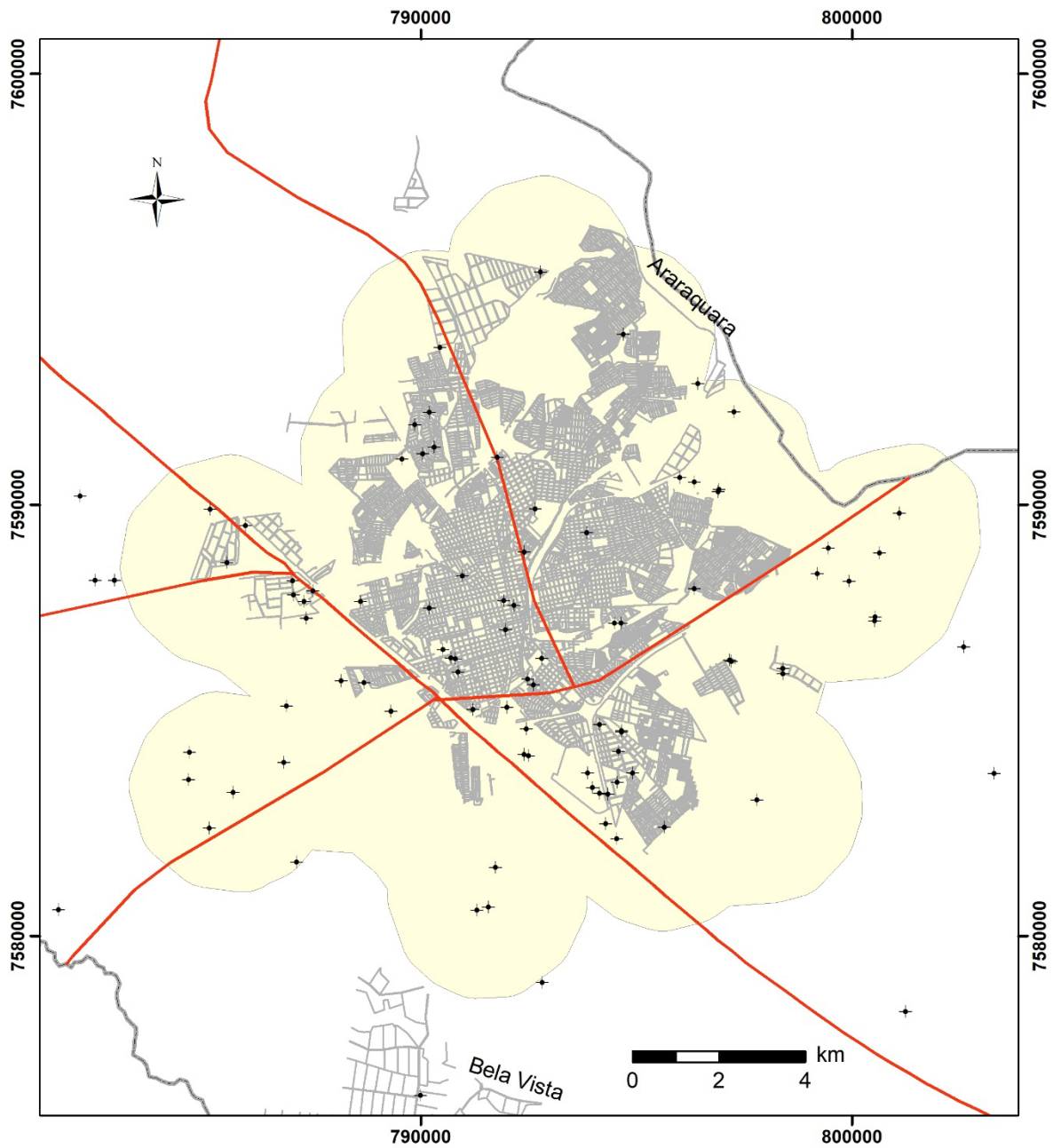
A análise estatística com base no *raster* de intensidade de exploração (Figura 10.1) mostra que o consumo de água subterrânea do SAG na área urbanizada é da ordem de  $5,13 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ , enquanto o consumo na área total do município é da ordem de  $5,67 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Esses dados mostram que o uso da água subterrânea do SAG na zona urbana representa quase 91% do consumo total do município. Essa condição atual de exploração do SAG na área urbanizada do município é motivo de preocupação, uma vez que as águas subterrâneas representam cerca de 60% do total ofertado pelo DAAE à população de Araraquara.

Considerando essas premissas, foi delimitada uma área de controle com *buffer* de 1 km envolvendo as faixas de densidade de vazão maiores do que  $0,14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{km}^2$  (Figura 11.1).

Essa área de controle pode ser classificada como uma Área Potencial de Restrição e Controle (ARC-PO) de acordo com a Deliberação CRH nº 052, devido à alta densidade de poços tubulares e às vazões de água extraídas, o que indica um estágio de exploração intensiva em progressão. Até o momento, não foram constatadas contaminações da água do SAG nos poços. No entanto, na região do Bairro do Ouro, alguns parâmetros hidroquímicos do SAG apontam para um início de contaminação por nitrato.

Tendo em vista o cenário configurado acima, torna-se necessário implementar medidas de proteção para garantir a sustentabilidade do uso das águas subterrâneas do município, dentre as quais destacam-se:

- Monitoramento sistemático dos níveis de água dos aquíferos, especialmente do SAG;
- Monitoramento da qualidade da água subterrânea em todos os poços outorgados pelo DAAE;
- Mapeamento de fontes potenciais de contaminação;
- Disciplinamento do uso e ocupação das áreas de afloramento do SAG.



**Figura 11.1 – Área de controle de extração de água SAG.**

## 12. PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE REDE DE MONITORAMENTO

Uma rede de monitoramento de águas subterrâneas compreende um arranjo espacial de pontos apropriados à medição das cargas hidráulicas distribuídas no terreno e à coleta de amostras para avaliação da qualidade físico-química e microbiológica dessas águas. O monitoramento frequente e sistemático de longo termo permite analisar a variação espacial e temporal desses parâmetros, projetar situações futuras e identificar áreas nas quais estejam ocorrendo contaminações e/ou intensa exploração dos aquíferos.

A implantação de uma rede de monitoramento quali-quantitativa é caracterizada por um processo dinâmico que deve ser ajustado continuamente em conformidade com a intensificação da exploração dos recursos hídricos subterrâneos, nível de estresse dos aquíferos e identificação de alterações da qualidade da água subterrânea provocadas por atividades humanas ou causas naturais. Um fator importante que deve ser levado em conta na implementação de uma rede de monitoramento de águas subterrâneas é o econômico/financeiro, uma vez que os custos de instalação, manutenção e operação crescem na proporção em que mais poços são incorporados à rede. Além disso, é preciso prever a integração da rede com outras redes de monitoramento existentes.

### 12.1. Rede de monitoramento existente

No município de Araraquara, a CETESB e o DAEE monitoram quatro poços no âmbito da Rede Integrada de Monitoramento de Quantidade e Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo, desde 2009. Conforme descrito acima, atualmente são monitorados pelo DAEE os poços identificados pelos prefixos 5C-510Z (Salto Grande), 5C-502 Z (Paiva), 5C-503 Z (Penitenciária) e 5C-504 Z (Gramado). Devido ao monitoramento não sistemático desses poços, os registros são irregulares e dificultam uma análise mais explícita do comportamento dos níveis de água do aquífero. Além disso, há indícios de erros de medição e de nivelamento da referência nesses registros.

No âmbito federal, o Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas – RIMAS –, administrado pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM –, não contempla poços de monitoramento no município de Araraquara.

No âmbito municipal, o DAAE-Araraquara não possui uma rede de monitoramento quali-quantitativa.

## 12.2. Critérios para seleção dos poços de monitoramento

Poços são os principais instrumentos utilizados para o monitoramento das águas subterrâneas. As condições fundamentais para a inserção de um poço na rede de monitoramento são o conhecimento de suas características construtivas, hidrodinâmicas e hidrogeológicas.

Os poços eleitos para integrar uma rede quali-quantitativa devem cumprir os seguintes requisitos básicos:

- Possuir relatório de perfuração completo, contemplando os aspectos construtivos, descrições litológicas, testes de bombeamento, parâmetros hidrodinâmicos, análises de água e histórico de manutenções;
- Captar água de um único aquífero ou unidade hidrogeológica;
- Ter sido construído de acordo com as normas técnicas da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- Apresentar revestimento de proteção sanitária com cimentação do espaço anular, em profundidades compatíveis com as condições hidrogeológicas locais;
- Apresentar laje de proteção sanitária de acordo com os padrões exigidos pela legislação de recursos hídricos;
- Apresentar cerca de proteção de modo a impedir a entrada de pessoas estranhas ou animais no ambiente do poço.

Além disso, é imprescindível conduzir uma vistoria técnica minuciosa, realizada por profissional experiente, com o objetivo de verificar as condições estruturais reais das captações e identificar os serviços necessários para, quando possível, adaptar o poço à rede de monitoramento. Também é recomendável realizar uma avaliação cuidadosa das possíveis fontes de contaminação situadas nas proximidades dos poços selecionados.

## 12.3. Características dos poços de monitoramento

Uma rede de monitoramento quali-quantitativa pode comportar poços ativos, inativos ou dedicados, conforme discriminados abaixo:

- Poços ativos ou em operação: são poços equipados e em operação com a finalidade de extração de água subterrânea para diferentes usos, como abastecimento urbano, irrigação, industrial etc.;
- Poços inativos ou desativados: são poços que por motivos técnicos – queda de vazão, produção de areia, contaminações, colapso da estrutura etc. – foram desligados e desaparelhados;

- Poços dedicados: são poços relativamente rasos, construídos especialmente para monitoramento da quantidade e/ou qualidade das águas subterrâneas dos sistemas aquíferos livres.

Dada a grande quantidade de poços outorgados no município de Araraquara (604 poços), recomenda-se a priorização dessas estruturas existentes para compor a rede de monitoramento. Nesse sentido, há necessidade do empenho do órgão gestor na identificação e validação das captações que atendam aos critérios requeridos para inserção na rede quali-quantitativa. Após a validação dos poços, o órgão gestor deverá estabelecer um programa de implementação da rede a partir de critérios de priorização a serem definidos.

### **12.3.1. Poços ativos**

Poços ativos ou em operação são abundantes em áreas urbanas e utilizados principalmente para abastecimento público e industrial. Esses poços costumam ser profundos e extrair água da reserva permanente dos aquíferos livres e confinados.

As variações de nível mensuradas nos poços ativos em aquíferos livres e confinados registram o comportamento das oscilações cíclicas causadas pela retirada (rebaixamento) e reposição (recuperação) da água.

Os registros dos níveis estáticos desses poços permitem avaliar a evolução do rebaixamento da superfície potenciométrica dos aquíferos e a depleção das reservas hídricas subterrâneas, ao longo do tempo.

Em uma área de intensa exploração, com grande quantidade de poços em operação, tanto os níveis estáticos quanto os dinâmicos apresentam descensos adicionais por conta da sobreposição dos cones de rebaixamento dos poços próximos. Esses descensos adicionais geram custos progressivamente maiores para a extração de água nos poços ativos.

Como são poços equipados com dispositivos de bombeamento que possibilitam a coleta de amostras de água em torneiras instaladas no cavalete, os poços em operação são estruturas indispensáveis para obtenção de informações sobre a qualidade físico-química e microbiológica da água subterrânea.

A vantagem de utilização de poços ativos se deve principalmente ao monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, uma vez que o custo de monitoramento hidroquímico fica restrito apenas às despesas operacionais, que incluem a coleta de amostras e as análises laboratoriais.

Nesse sentido, não há necessidade de se implementar uma rede específica de monitoramento hidroquímico, já que estão registrados no sistema de outorgas do DAEE mais de

100 poços que extraem água do SAG, que podem ser utilizados para controle da qualidade da água subterrânea.

A proposição é que o DAEE determine em Portaria que os usuários outorgados devam apresentar uma análise físico-química e microbiológica a cada 6 meses, contemplando parâmetros especificados pelo órgão gestor.

Ressalta-se que tais poços devem ser tecnicamente bem construídos e possuírem adequada proteção sanitária (cimentação sanitária, laje e tampa de proteção), além de passarem por manutenções preventivas em intervalos regulares, de modo a garantir o acesso e confiabilidade das medições de nível e das análises químicas e microbiológicas.

### **12.3.2. Poços desativados**

Poços desativados proporcionam o monitoramento integrado da quantidade e qualidade das águas subterrâneas.

Quando situados em áreas sob interferência do bombeamento de outros poços, o monitoramento de níveis fornece informações sobre as variações do armazenamento em razão do estresse hídrico provocado pela extração de água dos aquíferos livres e confinados. Em situações de não interferência, o monitoramento sistemático de níveis dos aquíferos livres permite a estimativa da recarga.

Normalmente, os poços desativados não se encontram equipados com dispositivos de bombeamento. Nesse caso, a coleta de amostras de água destinadas às análises hidroquímicas pode ser feita com utilização de equipamentos adequados às condições hidrogeológicas locais e características construtivas dos poços, tais como *bailer*, *low flow* e bombas submersas.

Os poços desativados oferecem acesso direto às águas subterrâneas através de uma estrutura já existente, pronta para monitoramento quali-quantitativo. Por isso, recomenda-se não realizar o tamponamento dos poços antes de uma avaliação do órgão gestor quanto à sua adequação para inclusão em uma rede.

## **1.2. Monitoramento da quantidade**

O monitoramento quantitativo é conduzido por meio de registros sistemáticos e de longo prazo das flutuações nos níveis de água, os quais são medidos em poços específicos designados para essa finalidade. A observação dos níveis nos aquíferos freáticos fornece informações essenciais sobre a recarga direta resultante das precipitações atmosféricas, bem como sobre as mudanças no armazenamento subterrâneo e na descarga natural. Esses elementos desempenham um papel significativo no escoamento de base nos corpos d'água superficiais.

A estimativa da recarga dos aquíferos livres, utilizando as oscilações do nível de água da superfície freática, é conduzida através do método conhecido como WTF (*water table fluctuation*). Esse método parte do pressuposto de que as flutuações no nível de água dos aquíferos livres resultam principalmente da infiltração das águas pluviais. Sua metodologia se baseia na análise da curva de recessão, a qual é construída a partir da hidrógrafa gerada pelos dados de monitoramento (Scalon et al., 2002). A diferença entre o pico de elevação do nível de água durante o período chuvoso e o nível mais baixo observado no final do período de recessão reflete a variação na carga hidráulica em um ponto específico durante o intervalo considerado. Para quantificar essa variação na recarga, ou seja, o volume efetivo de água incorporado ou liberado do aquífero, é essencial determinar a porosidade efetiva do aquífero ( $S_y$ ).

A equação que permite a estimativa da variação de recarga no ponto monitorado é dada por:

$$R = S_y * \Delta h \quad \text{Equação 3}$$

Onde:  $R$ = recarga efetiva (m);  $S_y$ = porosidade efetiva (%); e  $\Delta h$ = variação da carga hidráulica (m).

Segundo Carnier Neto & Chang (2008), a precisão dos resultados é diretamente influenciada pela porosidade efetiva do solo; portanto, variações nesse parâmetro podem impactar significativamente as conclusões obtidas. Isso ressalta a necessidade de se determinar com exatidão a porosidade efetiva para garantir a confiabilidade das estimativas. Além disso, esses autores enfatizam que as estimativas de recarga obtidas em um local específico não devem ser generalizadas para toda a extensão do aquífero, alertando para a importância de considerar a heterogeneidade geológica e hidrológica ao aplicar esses resultados em análises mais amplas.

O monitoramento dos níveis de água em aquíferos profundos, muitas vezes confinados ou semiconfinados, é fundamental para avaliar o equilíbrio entre a recarga natural e a extração por bombeamento, especialmente em áreas urbanas onde a interação entre os poços é complexa. A observação das oscilações nos níveis de água dos aquíferos profundos em áreas urbanizadas é crucial para identificar regiões sujeitas a uma exploração intensiva e esgotamento, fornecendo dados essenciais para o planejamento de novos poços e a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

O monitoramento dos níveis de água dos poços permite detectar:

- Oscilações sazonais, correspondentes aos períodos de chuva e seca;
- Oscilações irregulares, indicando mudanças no regime de bombeamento ou interferências de outros poços;

- Declínio contínuo e progressivo do nível indicando uma extração maior que a capacidade de renovação do aquífero;
- Estabilidade do nível ou oscilação em torno de uma média constante, indicando que o volume que está sendo extraído é compensado pela recarga.

Considerando-se que os sensores hidrostáticos atualmente disponíveis no mercado são dispositivos eletrônicos programáveis, a frequência das medições de nível pode ser estabelecida a intervalos curtos de tempo, de modo a registrar variações rápidas de nível de água.

Para poços destinados a monitorar as variações naturais de nível, relacionadas aos efeitos de recarga, a frequência das medidas pode ser ajustada para intervalos de 30 minutos. Essa periodicidade possibilita a captura dos ciclos de maré terrestre, que ocorrem duas vezes ao dia, e, embora cause pequenas variações nos aquíferos livres, representa uma informação adicional importante que pode contribuir para a interpretação dos resultados.

Por outro lado, para poços que monitoram aquíferos sujeitos à interferência do bombeamento, com oscilações diárias de grande amplitude, recomenda-se uma frequência de medição ajustada para intervalos de 10 minutos, visando registrar todos os eventos relevantes.

#### **12.4. Monitoramento da qualidade**

O monitoramento da qualidade das águas subterrâneas tem por objetivos:

- Caracterizar a qualidade natural das águas dos diversos aquíferos;
- Estabelecer Valores de Referência de Qualidade – VRQ – para cada substância de interesse, por sistema aquífero;
- Avaliar as tendências das concentrações das substâncias monitoradas;
- Identificar áreas com alterações de qualidade;
- Subsidiar ações de prevenção e controle da poluição do solo e da água subterrânea;
- Subsidiar ações de gestão da qualidade do recurso hídrico subterrâneo;
- Subsidiar a classificação dos aquíferos, visando seu enquadramento de acordo com a Resolução CONAMA nº 396/2008.

Para aprimorar a definição dos parâmetros de monitoramento da qualidade dos sistemas aquíferos no município de Araraquara, é essencial obter um conhecimento mais aprofundado das características hidroquímicas naturais desses reservatórios subterrâneos. Embora este estudo tenha abordado essas características, uma análise mais detalhada se faz necessária para uma definição precisa da seleção dos parâmetros de monitoramento.

Para um monitoramento abrangente, é sugerido inicialmente que sejam incluídos os parâmetros hidroquímicos listados nas tabelas 12.1 a 12.5.

**Tabela 12.1 - Parâmetros químicos de monitoramento.**

Parâmetros químicos	Portaria	Parâmetros químicos	Portaria	Parâmetros químicos	Portaria
Alcal. carbonato		DQO		Potássio	
Alumínio	888/GMS	Dureza total	888/GMS	Rádio-226	
Antimônio	888/GMS	Estrôncio		Rádio-228	
Arsênio	888/GMS	Ferro	888/GMS	Selênio	888/GMS
Bário	888/GMS	Fluoreto	888/GMS	Silício	
Berilo		Fósforo		Sódio	888/GMS
Bicarbonato		Lítio		Sólidos dissolvidos a 180°C	
Boro		Magnésio		STD (campo)	888/GMS
Cádmio	888/GMS	Manganês	888/GMS	Sulfato	888/GMS
Cálcio		Mercúrio	888/GMS	Sulfeto	
Carbonato		Molibdênio		Sulfeto de hidrogênio	888/GMS
Chumbo	888/GMS	Níquel	888/GMS	Urânio	888/GMS
Cloreto	888/GMS	Nitrato	888/GMS	Vanádio	
Cobre	888/GMS	Nitrito	888/GMS	Zinco	888/GMS
Cromo	888/GMS	Nitrogênio amoniacal		Amônia	888/GMS

**Tabela 12.2 – Parâmetros físico-químicos de monitoramento.**

Parâmetros físico-químicos	
Condutividade elétrica - laboratório	pH (campo)
Condutividade elétrica (campo)	pH laboratório
Cor	Temperatura (campo)
Eh (campo)	Turbidez

**Tabela 12.3 – Parâmetros microbiológicos de monitoramento.**

Microbiológico	Portaria	Microbiológico	Portaria
Coliformes termotolerantes	888/GMS	Microcistinas	888/GMS
Coliformes totais	888/GMS	Saxitoxinas	888/GMS

**Tabela 12.4 - Parâmetros orgânicos de monitoramento.**

Orgânicos	Portaria	Orgânicos	Portaria	Orgânicos	Portaria
1,2 Diclorobenzeno	888/GMS	Cloraminas Total	888/GMS	Monoclorobenzeno	888/GMS
1,2 Dicloroetano	888/GMS	Clorato	888/GMS	N-nitrosodimetilamina	888/GMS
1,4 diclorobenzeno	888/GMS	Cloreto de Vinila	888/GMS	Pentaclorofenol	888/GMS
2,4,6 Triclorofenol	888/GMS	Clorito	888/GMS	Tetracloreto de Carbono	888/GMS
2,4-diclorofenol	888/GMS	Di(2-etilhexil) ftalato	888/GMS	Tetracloroetano	888/GMS
Ácidos haloacéticos total	888/GMS	Diclorometano	888/GMS	Tolueno	888/GMS
Acrilamida	888/GMS	Dioxano	888/GMS	Tricloroetano	888/GMS
Benzeno	888/GMS	Epicloridrina	888/GMS	Trihalometanos Total	888/GMS

Orgânicos	Portaria	Orgânicos	Portaria	Orgânicos	Portaria
Benzo[a]pireno	888/GMS	Etilbenzeno	888/GMS	Xilenos	888/GMS
Bromato	888/GMS				

**Tabela 12.5 – Parâmetros agroquímicos de monitoramento.**

Agrotóxicos	Portaria	Agrotóxicos	Portaria	Agrotóxicos	Portaria
2,4 D + 2,4,5 T	888/GMS	Dimetoato + ometoato	888/GMS	Molinato	888/GMS
Alacloro	888/GMS	Diuron	888/GMS	Paraquate	888/GMS
Aldicarbe + Aldicarbessulfona + Aldicarbessulfóxido	888/GMS	Epoxiconazol	888/GMS	Picloram	888/GMS
Aldrin + Dieldrin	888/GMS	Fipronil	888/GMS	Profenofós	888/GMS
Ametrina	888/GMS	Flutriafol	888/GMS	Propargito	888/GMS
Atrazina + S-Clorotriazinas (Deetil-Atrazina - Dea, Deisopropil-Atrazina - Dia e Diaminoclorotriazina - Dact)	888/GMS	Glifosato + AMPA	888/GMS	Protioconazol + ProticonazolDestio	888/GMS
Carbendazim	888/GMS	Hidroxi-Atrazina	888/GMS	Simazina	888/GMS
Carbofurano	888/GMS	Lindano (gama HCH)	888/GMS	Tebuconazol	888/GMS
Ciproconazol	888/GMS	Malationa	888/GMS	Terbufós	888/GMS
Clordano	888/GMS	Mancozebe + ETU	888/GMS	Tiametoxam	888/GMS
Clorotalonil	888/GMS	Metamidofós + Acefato	888/GMS	Tiodicarbe	888/GMS
Clorpirifós + clorpirifós-oxon	888/GMS	Metolacloro	888/GMS	Tiram	888/GMS
DDT+DDD+DDE	888/GMS	Metribuzim	888/GMS	Trifluralina	888/GMS
Difenoconazol	888/GMS				

A frequência recomendada para coleta e análise visando o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas é semestral. Entretanto, é essencial estar atento a indicadores de potenciais alterações na qualidade, o que pode exigir um aumento na frequência das análises. Durante a fase de planejamento da rede de monitoramento, é imprescindível investigar as variações sazonais nas características da água, visando determinar se essas flutuações são naturais ou decorrem de contaminações.

Finalmente, é preciso ter em conta que a água subterrânea para consumo humano deve atender aos parâmetros definidos na Portaria GM/MS nº 888/2021 e Resolução CONAMA 396. Essas normativas dispõem sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano, incluindo o seu padrão de potabilidade. É essencial garantir que a água disponibilizada para consumo atenda a esses padrões, a fim de proteger a saúde pública e assegurar a qualidade de vida da população.

### 13. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos hidrogeológicos realizados com o objetivo de avaliar o cenário atual e as implicações quanto à sustentabilidade da utilização, no longo prazo, das águas subterrâneas do município de Araraquara, em especial do SAG, trouxeram importantes contribuições para a gestão desses recursos. Dentre essas contribuições, destacam-se:

- Confirmação da existência de um alto estrutural na porção sudeste do município, com um desnível de cerca de 150 m entre o ápice (cota 690 m) e seu flanco no sentido do mergulho (cota 540 m), em distância aproximada de 5 km, gerado possivelmente por intrusões de diabásio na coluna sedimentar;
- Esse alto estrutural constitui região de recarga, direcionando o fluxo subterrâneo para noroeste, no sentido da área de confinamento do aquífero; na área de confinamento, o fluxo subterrâneo se dirige na direção oposta, para sudeste; a região de confluência entre esses fluxos subterrâneos é definida por um baixo potenciométrico, que coincide com a área de maior concentração de poços de abastecimento público;
- A avaliação do estresse hídrico do SAG, com emprego de ferramentas de geoprocessamento, a partir de dados cadastrais de outorga fornecidos pelo DAEE, identificou as áreas críticas nas quais a exploração é intensa e impactante nas reservas hídricas subterrâneas;
- O monitoramento de níveis de água feito em poços profundos que atravessam o SAG evidenciou oscilações de baixa amplitude, atribuídas às interferências de poços situados nas proximidades da área e/ou efeitos de recarga natural. Oscilações de maior amplitude foram registradas tanto em poços de produção como em poços de monitoramento muito próximos; os resultados do monitoramento de poços de produção mostram a importância da recuperação dos níveis de água para garantir a sustentabilidade na exploração do aquífero;
- Observou-se uma rápida diminuição da carga hidráulica do SAG na área urbana de Araraquara, no período de apenas duas décadas. Apesar desses indicativos, nenhuma medida de controle da exploração desse aquífero foi implementada.
- As simulações numéricas, fundamentadas em dados provenientes do monitoramento dos níveis de poços, demonstraram o progressivo descenso dos níveis de água do SAG, em maior ou menor taxa, independentemente dos cenários de exploração admitidos neste estudo, devido às características do sistema confinado.
- Os valores de recarga das áreas de afloramento do SAG, obtidos por simulação em regime permanente, foram estimados entre 140 mm/ano e 190 mm/ano; valores de recarga da ordem de 10 mm/ano a 15 mm/ano, obtidos na simulação para as áreas

de confinamento do aquífero, representam de 5% a 11% da recarga das áreas de afloramento; esses dados encontram respaldo em estudos previamente publicados, que demonstram que a recarga do SAG na zona de confinamento é extremamente baixa.

- A água proveniente da área de recarga do SAG, na região sudeste do município, apresenta concentrações de  $\text{NO}_3$  e  $\text{Cl}$ ; ainda que pequenas, essas concentrações são sugestivas de um processo de contaminação em andamento na área que abrange o Distrito Industrial II e se estende até a região do Bairro do Ouro; assim, é recomendável o monitoramento sistemático da qualidade da água subterrânea nas captações públicas e privadas dessa área.
- O zoneamento das áreas de extração de água subterrânea do SAG, com base nas densidades de vazão ou intensidade de exploração em  $\text{m}^3/\text{ano}/\text{km}^2$ , mostrou que as áreas potencialmente críticas têm seu limite inferior na faixa de ocorrência de densidade de vazão de  $0,14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}/\text{km}^2$ . As vazões extraídas nessa faixa são quase dez vezes maiores do que a recarga estimada para a zona confinada do aquífero e 74% da recarga direta estimada para a zona de afloramentos do SAG.
- Análises com base em dados de outorga mostraram que o consumo de água subterrânea do SAG, na área urbanizada, é da ordem de  $5,13 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ , enquanto o consumo na área total município é da ordem de  $5,67 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{ano}$ . Esses dados mostram que o uso da água subterrânea do SAG na zona urbana representa quase 91% do consumo total do município. Essa condição de exploração concentrada do SAG na área urbanizada do município é motivo de preocupação, uma vez que as águas subterrâneas representam cerca de 60% da água ofertada pelo DAAE à população de Araraquara.
- Devido a tal condição, foi delimitada uma Área Potencial de Restrição e Controle (ARC-PO) de acordo com a Deliberação CRH nº 052, envolvendo as zonas de maiores retiradas de água do SAG. Nessa área é necessária a implementação de medidas de proteção para garantir o uso contínuo e sustentável das águas subterrâneas do município, tais como:
  - ✓ Monitoramento sistemático dos níveis de água dos aquíferos, especialmente do SAG;
  - ✓ Monitoramento da qualidade da água subterrânea em todos os poços outorgados pelo DAAE;
  - ✓ Mapeamento de fontes potenciais de contaminação;
  - ✓ Disciplinamento do uso e ocupação das áreas de afloramento do SAG.

- Em relação à qualidade da água dos aquíferos, não foram identificadas contaminações acima do limite de potabilidade. No entanto, na região do Bairro do Ouro foram observados alguns parâmetros hidroquímicos do SAG que sugerem um início de contaminação por nitrato.

Para aprimorar a análise das características hidroquímicas dos sistemas aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani, é essencial ampliar o conjunto de amostras utilizado. Um número mais abrangente de amostras proporcionará uma visão mais representativa desses sistemas, possibilitando uma análise mais confiável. Isso permitirá a identificação de padrões e tendências mais robustos, como também detectar eventuais anomalias e variações espaciais nas características hidroquímicas. Além disso, uma maior quantidade de dados pode ajudar a detectar eventuais anomalias e variações espaciais nas características hidroquímicas, contribuindo para uma compreensão mais completa da dinâmica desses aquíferos. Dessa forma, é recomendável realizar coletas adicionais de amostras em diferentes pontos e em períodos distintos.

Por fim, recomenda-se a implementação de uma rede de monitoramento quali-quantitativa para os aquíferos de Araraquara, sugerindo-se, para tanto, a utilização dos poços já existentes. Estes poços deverão ser selecionados pelo órgão gestor após vistoria técnica detalhada para avaliar suas reais condições estruturais e identificar os serviços necessários para, sempre que viável, adaptar o poço à rede de monitoramento.

Com relação aos poços outorgados, sugere-se que o DAEE emita uma portaria exigindo que os usuários apresentem análises hidroquímicas e microbiológicas a cada 6 meses, contemplando parâmetros especificados pelo órgão gestor.

## 2. REFERÊNCIAS

**ALMEIDA, F. F. M.** 1967. Origem e Evolução da Plataforma Sul Americana. Rio de Janeiro, DNPM/DGM. Boletim, 241, 36 p.

**ALMEIDA, F.F.M.** 1980. Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A. 187p. (IPT. Relatório, 14.091).

**ALMEIDA, V.V., JANASI, V.A., HEAMAN, L.M., SHAULIS, B.J., HOLLANDA, M.H.B.M. & ASSINE, M.L.** 1993. O eólico e o fluvial na Formação Piramboia. *In*: SBG, 5º Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia. Resumos... Curitiba, SBG. p. 53-54.

**CAETANO-CHANG M.R.** 1997. A Formação Piramboia no centro-leste do Estado de São Paulo. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 196 p.

**CAETANO-CHANG, M. R. & WU, F. T.** 2006. Arenitos flúvio-eólicos da porção superior da Formação Piramboia, na porção centro-leste paulista. *Revista Brasileira de Geologia*, São Paulo. 36(2):296-304.

**CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T.** 1992. Bacia do Paraná: formações Piramboia e Botucatu. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37, 1992, São Paulo. Roteiro de Excursão... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. v. 2, p. 1-19.

**CAETANO-CHANG, M.R. & WU, F.T.** 1993. A composição faciológica das formações Piramboia e Botucatu no centro-leste paulista e a delimitação do contato entre as unidades. *In*: SIMPÓSIO CRONOESTRATIGRAFIA BACIA DO PARANÁ, 1, 1993, Rio Claro. Boletim de Resumos Expandidos... Rio Claro: Universidade Estadual Paulista. p. 93.

**CAMPOS, H.C.S.** 2004. Águas subterrâneas na Bacia do Paraná. *Geosul*, Florianópolis, v. 19, n. 37, p 47-65.

**CARNIER NETO, D. & CHANG, H. K.** 2008. Aplicação do método de flutuação de nível d'água para a estimativa de recarga - Exemplo do Aquífero Rio Claro. *Águas Subterrâneas*. 22. 10.14295/ras.v22i1.8177

**CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.** 1978. Água subterrânea e poços tubulares. Tradução da primeira edição do original norte-americano publicado pela Johnson Division. 3ed. rev. São Paulo.

**CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO.** 2022. Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo 2019-2021 [recurso eletrônico] / CETESB. Série Relatórios. ISSN 0103-4103. [https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2023/03/QualidadeAguasSubterraneas-2019-2021\\_F.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2023/03/QualidadeAguasSubterraneas-2019-2021_F.pdf).

**CLIMATEMPO.** Climatologia Araraquara. Disponível em:  
<https://www.climatempo.com.br/climatologia/397/araraquara-sp>. Acesso em 20 de junho de 2020.

**CONAMA – CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE.** 2008. Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.

**COOK, P.G.** 2003. A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers. National Library of Australia Cataloguing-in-Publication entry. ISBN 1 74008 233 8.

**CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M.R.** 1996. Hidrologia Subterrânea. Ed. Omega, vols. 1 e 2. 1996.

**DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.** 1974. Estudo de Águas Subterrâneas- Região Administrativa nº 6 – Ribeirão Preto. São Paulo: DAEE, v. 1 e 2.

**DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.** 1976. Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 6 - Ribeirão Preto. REVISTA DAE, nº 107. <http://revistadae.com.br/site/artigos/107>.

**DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.** Banco de Dados Hidrológicos. (<http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>). Acesso em 01 de dezembro de 2022.

**DAEE-UNESP.** 1980. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:250.000. Departamento de Águas e Energia Elétrica, Universidade Estadual Paulista. Arquivo shape.

**DAEE-UNESP.** 2013. Águas subterrâneas do Estado de São Paulo, diretrizes de utilização e proteção. Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Instituto Geociências e Ciências Exatas. Laboratório de Estudo de Bacias (UNESP-LEBAC). Governo do Estado de São Paulo. 44 p. illus.

**DELAUNAY, B. N.** 1934. Sur la sphère vide. Izvestia Akademii Nauk, SSSR, v. 7, p. 393-800.

**DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE.** 1977. Estudo de águas subterrâneas, regiões administrativas 7, 8 e 9: Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba. São Paulo: v.1 e v.2.

**DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE.** 2005. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. Nota explicativa. São Paulo. São Paulo: DAEE-Departamento de Águas e Energia Elétrica, IG- Instituto Geológico, IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 3 v. (mapa e CD-ROM).

**DIERSCH, H.-J.G.** 2014. FEFLOW Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer- Verlag Berlin Heidelberg ,996 p.

**EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA.** 1979. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

**EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.** Brasil em relevo: processamento de modelos digitais de elevação oriundos da Missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). [www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr](http://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr).

**FARJALLAT, J.E.S.** 1974. Comportamento da permeabilidade ao ar de alguns basaltos do sul do Brasil XXVIII Congr.Bras.Geol. 1. Resumo. p. 69-70 - Porto Alegre.

**FERNANDES, A. J. et al.** 2006. Modelo conceitual preliminar de circulação de água subterrânea do aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

**FERREIRA, F.J.F.** 1982. Alinhamentos estruturais-magnéticos da região centro-oriental da Bacia do Paraná e seu significado tectônico. In: Bacia do Paraná – Reavaliação da potencialidade e prospectividade em hidrocarbonetos. Consorcio CESP-IPT (Paulipetro), São Paulo, p. 143–16.

**FETTER, C. W.** 2001. Applied Hydrogeology. 4th ed. New York: Mcmillan Publishing Company.

**GASTMANS, D.; VEROSLAVSKY, G.; CHANG, H. K; CAETANO-CHANG, M. R.; PRESSINOTTI, M. M.N.** 2012. Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Aquífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. Boletín Geológico y Minero, 123 (3): 249-265.

**GEODATA – CONSULTORIA E PROJETOS HIDROGEOLÓGICOS.** 2007. Teste de aquífero em poços do SESC de Araraquara (SP). Autor: Flavio de Paula e Silva. Relatório interno. 5 p.

**GEODATA – CONSULTORIA E PROJETOS HIDROGEOLÓGICOS.** 2014. Estudo hidrogeológico com vistas à implantação de empreendimento imobiliário na Fazenda Tangará, município de São Carlos (SP). Autor: Flavio de Paula e Silva. Relatório interno. 25 p.

**GONÇALVES, R. D.; TERAMOTO, E. H.; CHANG, H. K.** 2020. Regional groundwater modeling of the Guarani aquifer system. Water 12(9):2323.

**GONÇALVES, R.D.; TERAMOTO, E.H.; CHANG, H.K.** 2020. Regional Groundwater Modeling of the Guarani Aquifer System. Water 2020, 12, 2323. <https://doi.org/10.3390/w12092323>.

**HIRATA, R.; SANGIORGE, M.; WAHNFRIED, I.; LIMA, J. B. V.** 2012. Exploração do Sistema Aquífero Guarani em Araraquara, Geologia Série Científica USP. Revista do Instituto de Geociências – USP, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 111-127.

**IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.** 2022. Censo Demográfico do Município de Araraquara. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/araraquara.html>.

**IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.** 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo. IPT, Divisão de Minas e Geologia Aplicada.

**LASTORIA, G.; SINELLI, O.; CHANG, H. K.; HUTCHEON, I.; PARANHOS FILHO, A.C.; GASTMANS, D.** 2006. Hidrogeologia da Formação Serra Geral no Estado de Mato Grosso do Sul. *Águas Subterrâneas*, v. 20, n. 1, p. 139–150.

**LEBAC.** 2008. Mapa hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani Escala 1:3.000.000. Coord.: Sinelli, O. Equipe: Chang, H.K.; Gastmans, D.; Paula e Silva, F.; Correa, S.F.; Pressinotti, M.M.N. 54p. e 8 mapas.

**MASSOLI, M.; CAETANO-CHANG, M.R.** 2007. O contato entre as formações Piramboia e Botucatu na área de Ribeirão Preto (SP). São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 26, n. 3, p. 263-270.

**MEAULO, F.J.** 2007. Caracterização geológica, hidrogeológica e mapeamento da vulnerabilidade natural à poluição dos aquíferos na escala 1:25.000, das áreas urbanas e de expansão do município de Araraquara SP. Tese (Doutorado em Geociências (Geociências e Meio-Ambiente) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho.

**MILANI, E.D., MELO, J. H.G., SOUZA, P.A., FERNANDES, L.A. FRANÇA, A.B.** 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras, Bacias Sedimentares Brasileiras*. Rio de Janeiro, 15(2): 265-287.

**MONTANHEIRO, F., HIDEO TERAMOTO, E., ZANON ENGELBRECH, B.; HUNG KIANG, C.** 2017. Testes de bombeamento como requisitos para elaboração de modelos hidrogeológicos conceituais: estudo de caso no aquífero Serra Geral. *Águas Subterrâneas*. <https://doi.org/10.14295/ras.v0i0.28845>.

**MORRIS, D.A.; JOHNSON, A.I.** 1967. Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-1960. USGS Water Supply Paper: 1839-D.

**MOURÃO, M.A.A.** 2009. Projeto Implantação de Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas. Proposta técnica. Divisão de Hidrogeologia – DIHEXP. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. 85 p.

**OEA – ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS.** 2009. Aquífero Guarani: Programa Estratégico de Ações (PEA). Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do

Sistema Aquífero Guarani. Série de manuais e documentos técnicos do PSAG. Edição bilíngue. Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. 424 p.

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

**PAULA E SILVA, F.; PAULA E SILVA FILHO, F.** 2018. Estruturas locais condicionantes das características geométricas e hidráulicas do sistema Aquífero Guarani (SAG): alto estrutural da Fazenda Santa Helena, município de Boa Esperança do Sul (SP). Águas Subterrâneas. Seção Estudos de Caso e Notas Técnicas. Nº 32. 7 p.

**PAULA E SILVA, F.** 1988. Exploração do Sistema Aquífero Botucatu na cidade de Bauru: o condicionamento tectônico na avaliação do potencial hídrico da área. Águas Subterrâneas. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22527>.

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

**PAULA e SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANOCHANG, M.R.** 2005a. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. Águas Subterrâneas, v.19, n.2, p.19-36.

**PAULA e SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANOCHANG, M.R.** 2005b. Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências. Volume 35, (1):77-88.

**PAULA E SILVA, F; CAETANO-CHANG, M.R. & CHANG, H.K.** 2023. Stratigraphy of the middle Triassic-lower Cretaceous succession in the Paraná and Uruguayan Chaco-Paraná Basins – An overview based on subsurface data, Journal of South American Earth Sciences, Volume 130. 104567, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104567>.

**PAULA E SILVA, F; FISCHER, T. V; EZAKI, S; GASTMANS, D; RODRIGUES, V.R; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. & NOALE, J. O.** 2021. Avaliação do estresse hídrico subterrâneo das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ). Derbyana, São Paulo, 42: e754.

**PAULA E SILVA, FLÁVIO., KIANG CHANG, H., CAETANO-CHANG, M.R., SINELLI, O.** 2008. Arcabouço geológico e hidrofácies do Sistema Aquífero Guarani, no município de Ribeirão Preto (SP). Rev. Bras. Geoc., 38(1):56-67.

**PAULIPETRO – CONSÓRCIO CESP/IPT.** 1980. A Estrutura de Piratininga: mapeamento geológico de detalhe. Autores: Santos, P.R.; Rodrigues, M.E.; Luz, O.T. São Paulo, 17p. (Relatório RT-021/80).

**PEATE, D.W., HAWKESWORTH, C.J., MANTOVANI, M.S.M.** 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas, South America: classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55:119-139.

**PEIXOTO, C. A. B.** 2010. Geodiversidade do estado de São Paulo/ Organização Carlos Augusto Brasil Peixoto. – São Paulo: CPRM, 176 p.

**POLAND, J. F., LOFGREN, B. E., RILEY, F. S.** 1972. Glossary of selected terms useful in studies in the mechanisms of the aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal. U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper 2025, 9 p.

**PÔSSA, E. M.** 2014. Análise da densidade de eventos de degradação florestal e desflorestamento e sua relação com os polos madeireiros no estado do Pará. Monografia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 15 p.

**QUAGGIO, C. S.; GASTMANS, D.; MARTINS, V. T. S.; GILMORE, T. E.** 2022. Combined use of statistical Bayesian model and strontium isotopes deciphering the high complexity groundwater flow in the Guarani Aquifer System (GAS), *Applied Geochemistry*, V.146. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105473>.

**ROSSI, M.** 2017. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal. São Paulo. 118 p.

**SCALVI, B. T.; GASTMANS, D.** 2016. Caracterização hidrofaciológica e monitoramento dos níveis d'água no Sistema Aquífero Guarani na cidade de Araraquara (SP). *Revista Águas Subterrâneas* 30 (3): 326-342.

**SCANLON, B.; HEALY, R.; COOK, P.** 2002. Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. *Hydrogeology Journal*. 10. 18-39. 10.1007/s10040-001-0176-2.

**SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A.** 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974, Porto Alegre. Anais do... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. v. 1, p. 41-6.

**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM.** Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. <http://siagasweb.cprm.gov.br>. Acesso em 22 de janeiro de 2023.

**SINELLI, O.** 1971. Considerações gerais sobre a tectônica no Município de Ribeirão Preto, SP. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, São Paulo, Anais, v.2, p.145-151.

**SOARES, P. C.** 1974. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação de gênese. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: SBG, v. 1, p. 107-121.

**SOARES, P. C.** 1975. Divisão estratigráfica do Mesozoico no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Geociências, 5: 229-251.

**SOARES, P. C.; SOARES, A. P.; BETTÚ, D. F.** 2014. Formação da Sequência Triássico-Jurássica na Bacia do Paraná. Boletim Geociências Petrobras, Rio de Janeiro, v. 22, n. 1, p. 135-160.

**SOARES, P.C., SINELLI O., PENALVA F., WERNICK E., SOUZA A., CASTRO P.R.M.** 1973. Geologia do nordeste do Estado de São Paulo. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 27, Aracaju, Anais, v.1, p. 209-236.

**STRUGALE, M.; ROSTIROLLA, S. P.; MANCINI, F.; PORTELA FILHO, C. V.** 2004. Compartimentação Estrutural das Formações Piramboia e Botucatu na Região de São Jerônimo da Serra - Estado do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, SBG- SP, v. 34, n.3, p. 303-316.

**TERAMOTO, E. H., GONÇALVES, R. D.; CHANG, H. K.** 2020. Hydrochemistry of the Guarani Aquifer System modulated by mixing with underlying and overlying hydrostratigraphic units. Journal of Hydrology: Regional Studies, 30, 100713.

**WAHNFRIED, I. D.** 2010. Modelo conceitual de fluxo do Aquitarde Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na região de Ribeirão Preto, SP. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

**WALM.** 2013. Plano Municipal de Saneamento Básico. Prefeitura de Araraquara.

**ZALÁN, P. V., WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.** 1987. Tectônica e sedimentação da Bacia Sedimentar do Paraná. In: SBG, Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 3, Curitiba, Atas, v.1, p.441-474.

### 3. ANEXOS

ANEXO I – Cadastro SIAGAS. [..\Planilhas\Anexo I - Cadastro Poços Siagas.xlsx](#)

ANEXO II – Cadastro de outorgas do DAEE. [..\Planilhas\Anexo II -Poços outorga DAEE.xlsx](#)

ANEXO III – Cadastro de poços do DAEE. [..\Planilhas\Anexo III - Poços DAEE Araraquara.xlsx](#)

ANEXO IV – Cadastro de poços do DAEE. [Planilhas\Anexo IV - Cadastro de poços do DAEE.xlsx](#)