

XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

HÁ CONEXÃO HIDRÁULICA ENTRE OS SISTEMAS AQUÍFEROS GUARANI E BAURU NA “JANELA” DE BASALTO, EM BAURU-SP?

Mateus Delatim Simonato¹; José Eduardo Campos²; Alexsandra Costa de Freitas Leitão³; Daniel Brandão³; Flávio de Paula e Silva⁴; Vanessa Faria de Paula¹

Resumo – O Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE contratou um diagnóstico hidrogeológico do município de Bauru, visando a proposição de medidas para gestão sustentável e proteção da qualidade das águas subterrâneas. Em grande parte da zona urbana de Bauru, um alto estrutural coloca o Sistema Aquífero Bauru (SAB) em contato direto com o Sistema Aquífero Guarani (SAG), sem a ocorrência dos basaltos da Formação Serra Geral. A elevada dependência das águas subterrâneas do SAG e a contaminação por nitrato do SAB levaram à importante questão sobre a conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos. A caracterização da hidroestratigrafia, das potenciometrias, da hidrogeoquímica e da assinatura isotópica evidenciaram o isolamento hidráulico entre o SAB e o SAG na área da janela de basalto.

Abstract – The DAEE, state department of water management of Sao Paulo - Brazil, contracted a hydrogeological study aiming to propose measures for sustainable management and protection of groundwater quality in Bauru city. A particular stratigraphic assemble, located bellow urban area of Bauru, sets the Bauru Aquifer System (BAS) in contact with the Guarani Aquifer System (GAS). Normally, the Serra Geral basalt formation takes place between those aquifers. In order to understand the vulnerability of the GAS to be contaminated by nitrate from the BAS, it was evaluated the water circulation between them. The characterization of stratigraphy, potentiometric surfaces, analyses of water chemistry and environmental isotopes allowed concluding that the SAB and the SAG are not hydraulically connected.

Palavras-Chave – Sistema Aquífero Guarani, Sistema Aquífero Bauru, isolamento hidráulico.

¹SIGAGEO Consultoria, São Paulo, SP. Cel.: 11 99266-9331. E-mail: msimonato@sigageo.com.br / yfpaula@sigageo.com.br; ²Departamento de Água e Energia Elétrica - DAEE. Rua Boa Vista, 175, São Paulo, SP. Fone: 11 3293-3742. Email: jose.campos@daee.sp.gov.br; ³RHiGeMA - Recursos Hídricos, Geologia e Meio Ambiente, Rua Benedito Hilarião de Souza, 80. Ilhabela/SP. Fone. 11 98238-3083. Email: daniel.brandao@rhigema.com.br / alexandrleitao@rhigema.com.br; ⁴GEODATA Consultoria e Projetos Hidrogeológicos. Rua Dr. Aldo Lupo, 562, Araraquara-SP. Fone: 16 3397-1931. Email: geodata@fpsgeodata.com.br

A região onde está situado o perímetro urbano de Bauru, também, possui uma condição geológica peculiar da estratigrafia da sequência vulcano-sedimentar do Grupo São Bento, na qual as rochas sedimentares das formações Botucatu e Pirambóia estão em contato direto com a sequência sedimentar do Grupo Bauru. Nessa região, conhecida como “janela” de basalto, o SAB recobre diretamente o SAG sem a presença dos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Desse modo, além das influências antrópicas com efeitos indesejáveis à quantidade do SAG e à qualidade do SAB, essa hidroestratigrafia peculiar acentuou a preocupação, levantando dúvidas sobre a proteção do SAG à contaminação proveniente das águas do SAB já impactadas por nitrato.

Os fatores citados acima levaram a Câmara Técnica de Águas Subterrâneas – CTAS do Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CRH a incluir o município de Bauru em uma lista de áreas prioritárias para a avaliação da necessidade de implementar medidas de restrição e controle ao uso das águas subterrâneas. Recomendação ratificada na “Regionalização de diretrizes de utilização e proteção das águas subterrâneas” (SÃO PAULO, 2013), estudo conduzido pela Universidade Estadual Paulista – UNESP para o Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE.

As diretrizes e os procedimentos estabelecidos pela Deliberação CRH nº 52, de 15 de abril de 2005, determinam a necessidade de estudos hidrogeológicos para a delimitação de “Área de Restrição e Controle do Uso das Águas Subterrâneas”. Assim, o DAEE contratou o diagnóstico hidrogeológico do município de Bauru com foco na avaliação da necessidade de estabelecer área de restrição e controle. O diagnóstico foi financiado com recursos provenientes do Fundo Estadual de Recursos Hídricos – FEHIDRO e executado pela empresa C3 Planejamento Consultoria e Projeto Ltda., no período de 15 de março de 2014 a 25 de junho de 2015.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar a síntese de resultados específicos do diagnóstico hidrogeológico do município de Bauru (DAEE, 2015), visando responder a questão: Existe conexão hidráulica entre o SAB e o SAG na área de ocorrência da “janela” de basalto?

Destaca-se que nas áreas de ocorrência dos basaltos da formação Serra Geral, o isolamento hidráulico entre o SAB e o SAG e o confinamento do SAG representam comportamentos já consagrados nos estudos hidrogeológicos e caracterizados regionalmente na Bacia do Paraná.

2. GEOLOGIA

A área de estudo está inserida, regionalmente, no contexto geológico da bacia intracratônica do Paraná, que é caracterizada por sequências sedimentares que se depositaram a partir do Devoniano Superior/Siluriano intercaladas por importante episódio vulcanogênico, no Cretáceo Inferior, responsável pela geração dos derrames basálticos da Formação Serra Geral (IPT, 1981), e

que constituem o embasamento da seqüência sedimentar do Grupo Bauru (SOARES et al., 1980), aflorante em toda a extensão da área (figura 2).

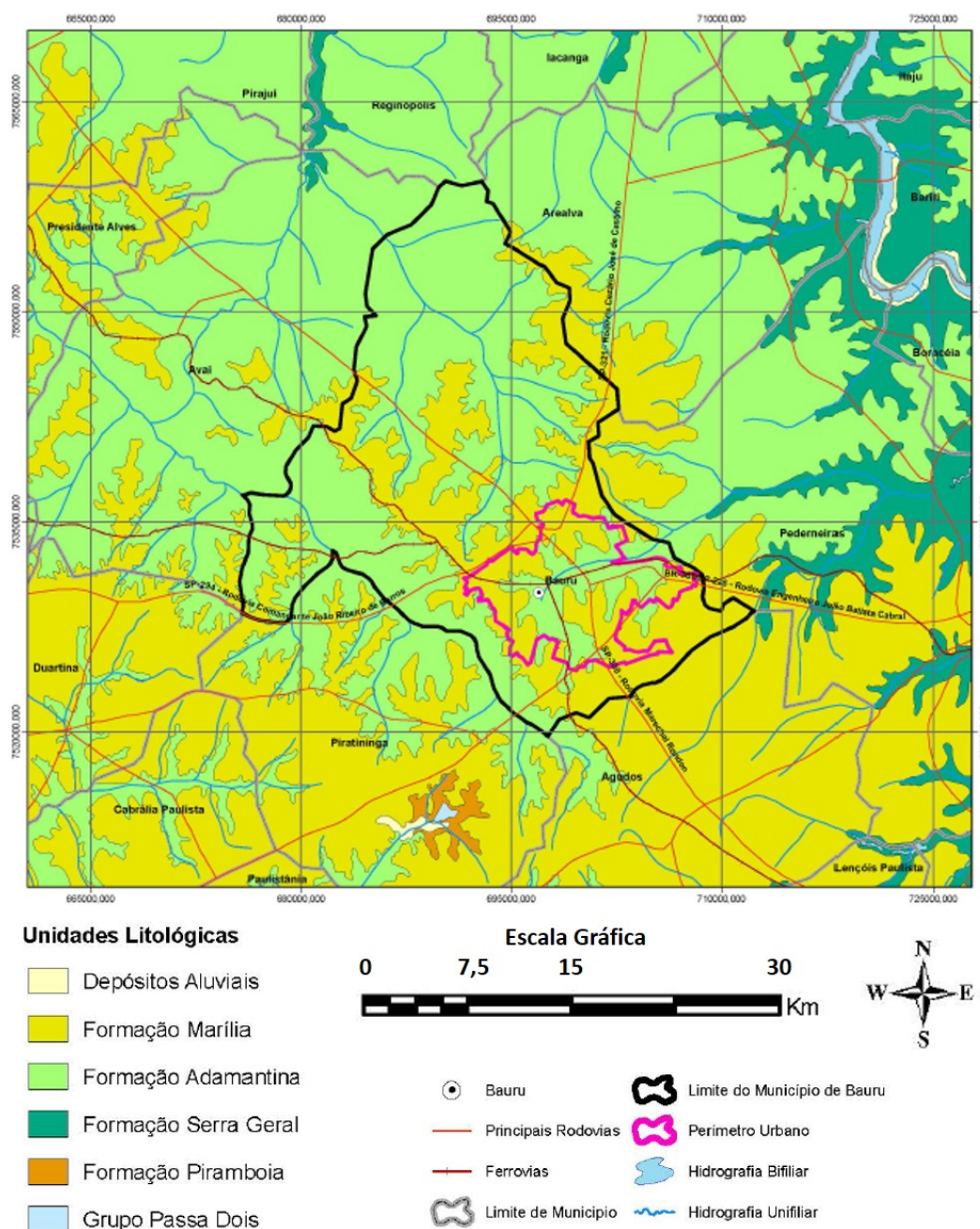


Figura 2. Mapa geológico do município de Bauru e arredores (adaptado de DAEE, 2015)

Em subsuperfície, sotoposto ao Grupo Bauru por contato erosivo (PAULA E SILVA, 2003), ocorre o Grupo São Bento que, conforme Paula e Silva et al (2008), foi depositado entre o Eotriássico e o Eocretáceo (Mesozóico), em uma ampla superfície sob ação de processos eólicos com a predominância de ambiente desértico (Formação Piramboia e Botucatu), até a ruptura do Gondwana, quando os derrames basálticos da Formação Serra Geral se instalaram sob a forma de diques e soleiras entre as rochas sedimentares ou extravasaram para a superfície.

O tectonismo atuante ao longo de toda evolução da Bacia do Paraná fica evidenciado também pelos lineamentos regionais e, em especial, pela descontinuidade lateral de seqüências estratigráficas regionais observada no município de Bauru e arredores. A cerca de 30 km a sudoeste da sede municipal de Bauru, situa-se o Alto de Piratininga (PAULIPETRO, 1980; PAULA E SILVA; CAVAGUTI, 1994), um alto estrutural que expõe rochas dos grupos Passa Dois e São Bento (figura 2), em meio ao domínio de afloramento do Grupo Bauru. Essa estrutura também recebeu a denominação de Domo de Piratininga (CAMPOS et al., 2008).

A descoberta do alto estrutural se deu no final da década de 70 (DAEE, 1976) e seguiu com mapeamentos de detalhe que se desdobraram no início dos Anos 80, motivados por investigações de prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. Paula e Silva (1988), utilizando pela primeira vez 26 perfis geofísicos convencionais de poços profundos perfurados para extração de água subterrânea, subdividiu a área urbana de Bauru em três faixas com diferenciação geológico-estratigráfica (figura 3) e, de forma inédita, delimitou a janela da Formação Serra Geral em Bauru.

Paula e Silva & Cavaguti (1994) mostraram como a evolução geológica da área, sob efeito da Reativação Wealdeniana, afetou a estratigrafia e geometria da seqüência vulcano-sedimentar do Grupo São Bento. Os autores detalharam as ocorrências das formações do Grupo São Bento em subsuperfície, sob a cobertura dos sedimentos do Grupo Bauru. Também interpretaram que, como consequência do tectonismo, as rochas componentes do Grupo São Bento foram expostas à erosão pré-Bauru, situação que gerou variações notáveis de espessura no pacote Botucatu/Pirambóia, além da exclusão total dos basaltos da formação Serra Geral em parte da cidade (figura 4).

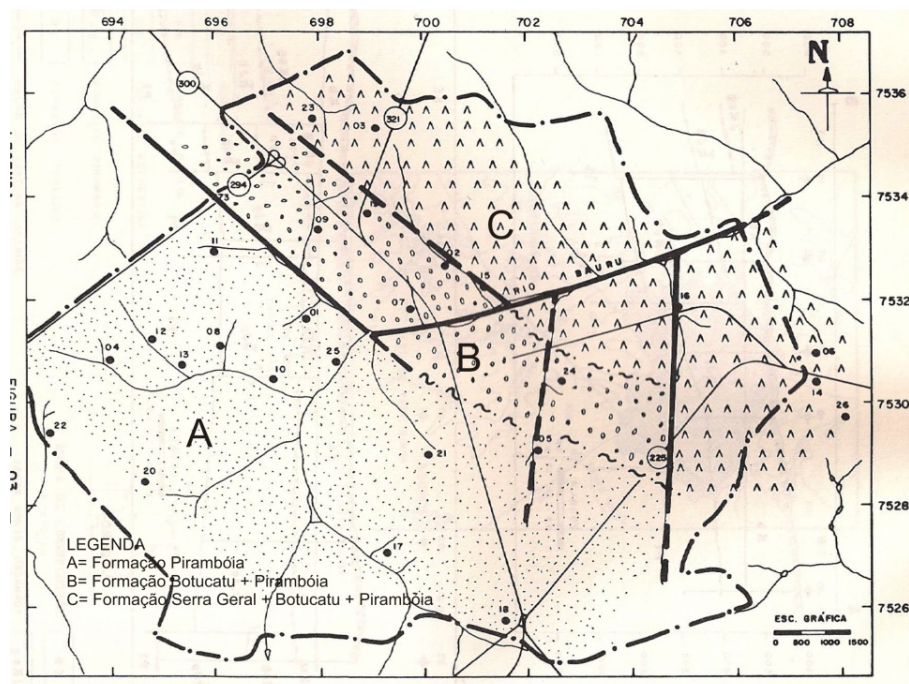


Figura 3. Limites de ocorrência das rochas mesozóicas em subsuperfície (PAULA E SILVA, 1988)

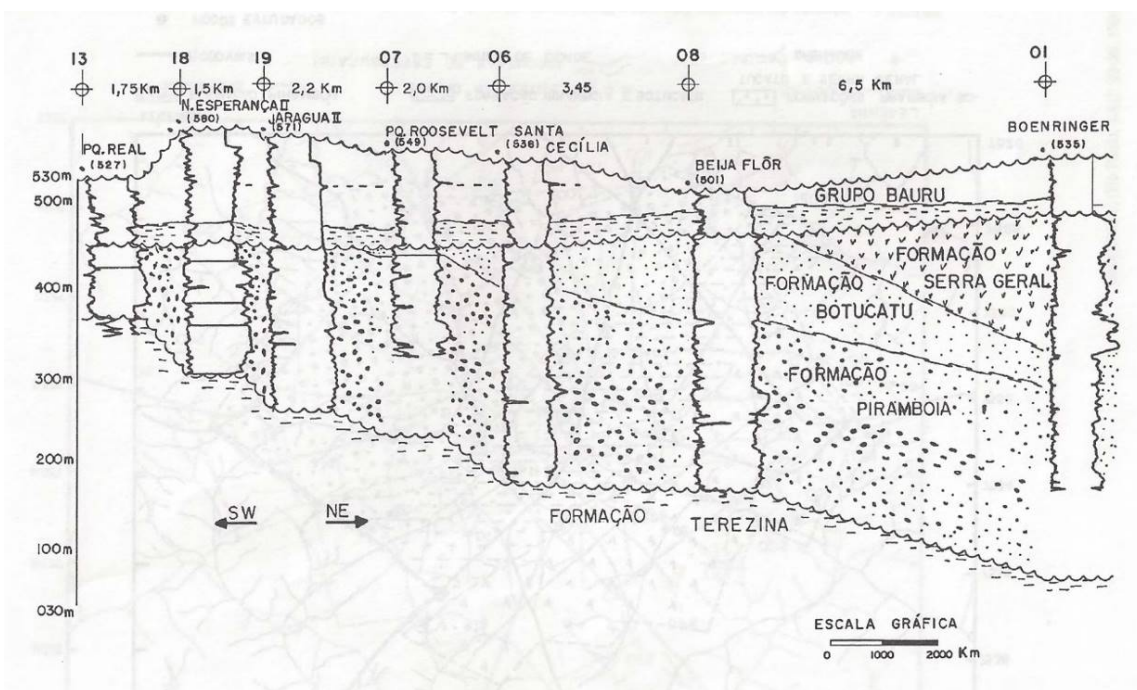


Figura 4. Seção estrutural esquemática SW-NE (PAULA E SILVA; CAVAGUTI, 1994)

Diante da contextualização geológica apresentada pode-se sintetizar que a sequência estratigráfica no município de Bauru é constituída pelos grupos Bauru e São Bento, tendo como limite basal o Grupo Passa Dois, especificamente a Formação Teresina. A sequência litoestratigráfica da área de estudo, definida nos trabalhos de Paula e Silva e Cavaguti (1994) e Silva (2009), está representada na figura 5.

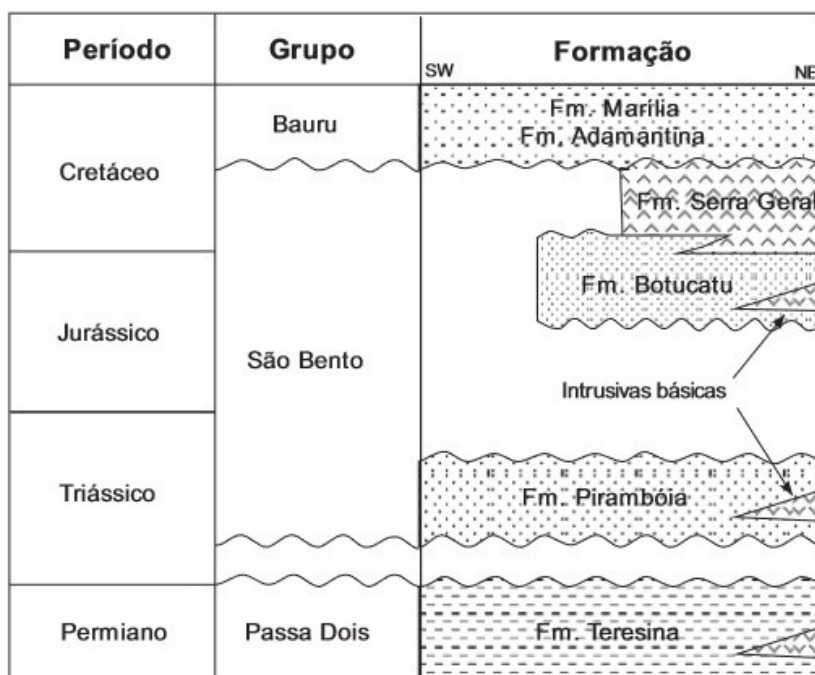


Figura 5. Sequência estratigráfica vulcano-sedimentar no município de Bauru (Silva, 2009)

3. HIDROESTRATIGRAFIA

A hidroestratigrafia do município de Bauru, estabelecida com base na sequência estratigráfica caracterizada anteriormente, compreende o Sistema Aquífero Bauru (SAB), o Aquífero Serra Geral (ASG) e o Sistema Aquífero Guarani (SAG), tendo como limite basal dessa sequência, o Aquicludo Passa Dois (APD).

O Sistema Aquífero Bauru (SAB), de natureza granular, estende-se por todo o município de Bauru onde ocupa área de 667 km² e alcança espessuras máximas da ordem de 200 metros nas regiões topográficas mais elevadas. Este sistema está representado, do topo para a base, pelas unidades hidroestratigráficas Marília, Adamantina e Araçatuba. O contato inferior do SAB é feito com o ASG ou com o SAG, dependendo do posicionamento geográfico no município.

O Aquífero Serra Geral (ASG) constitui o substrato do Sistema Aquífero Bauru em praticamente todo o estado de São Paulo, ressalvada a área de ocorrência da janela dada pela estrutura do Alto de Piratininga. Esse aquífero é formado predominantemente por rochas vulcânicas basálticas, conferindo um comportamento de aquífero fissural.

O Sistema Aquífero Guarani (SAG), de natureza granular, é formado pelas unidades hidroestratigráficas Botucatu, superior, e Pirambóia, inferior. Encontra-se estruturalmente confinado no topo pelos basaltos do Sistema Aquífero Serra Geral e, na área da janela de basalto, está sotoposto ao SAB. O limite basal do SAG é formado pelo Aquicludo Passa Dois (SÃO PAULO, 2005), que constitui unidade de extensão regional. O SAG tem ocorrência generalizada em todo o município de Bauru e, como resultado do soerguimento provocado pelo Alto de Piratininga, apresenta espessuras variando desde pouco mais de 20 metros, na porção sudoeste, até 320 metros na porção nordeste do município.

O principal avanço no conhecimento da hidroestratigrafia do município de Bauru, com influência no entendimento sobre a conexão hidráulica entre o SAB e o SAG na área da janela de basalto, foi relacionado à caracterização da unidade hidroestratigráfica basal do SAB na área de estudo. A interpretação de 44 perfis geofísicos de poços localizados no perímetro urbano de Bauru permitiu detalhar os limites da janela e, principalmente, caracterizar a ocorrência do Aquitardo Araçatuba, por correlação à unidade litoestratigráfica homônima que, embora apresente extensão regional no Grupo Bauru, só foi definida, no município de Bauru, pelo diagnóstico hidrogeológico do DAEE (2015).

A sequência hidroestratigráfica nos diferentes setores do município de Bauru pode ser observado na figura 6, indicando a ocorrência da janela de basalto no sul do município, mais especificamente no setor sudoeste.

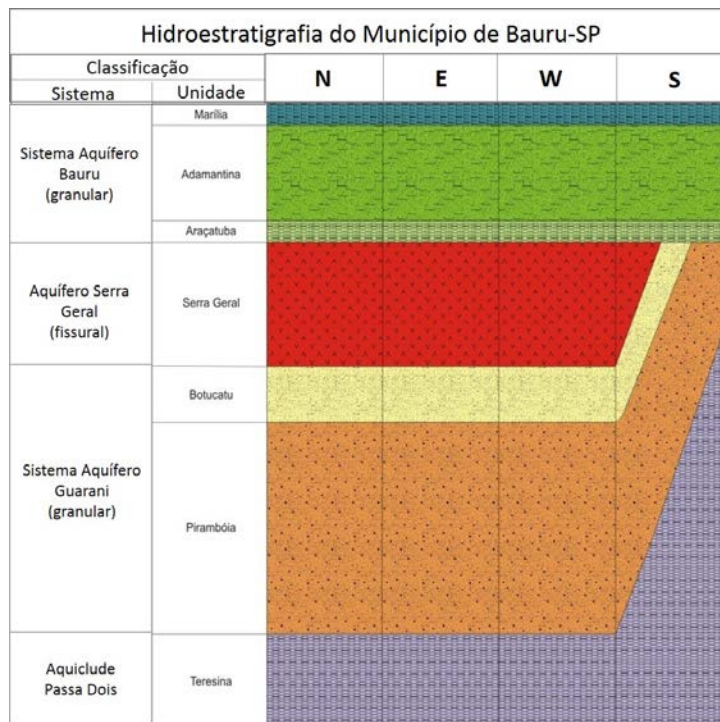


Figura 6. Coluna hidroestratigráfica esquemática do município de Bauru (DAEE, 2015)

As interpretações dos perfis geofísicos de poços foram realizadas seguindo métodos empregados em estudos anteriores (PAULA E SILVA, 2003; PAULA E SILVA et al, 2005a; 2005b; 2006, 2008) voltados à caracterização, em escala regional, da hidroestratigrafia de subsuperfície. A figura 7 exemplifica uma seção que demonstra a ocorrência da janela e o Aquitardo Araçatuba.

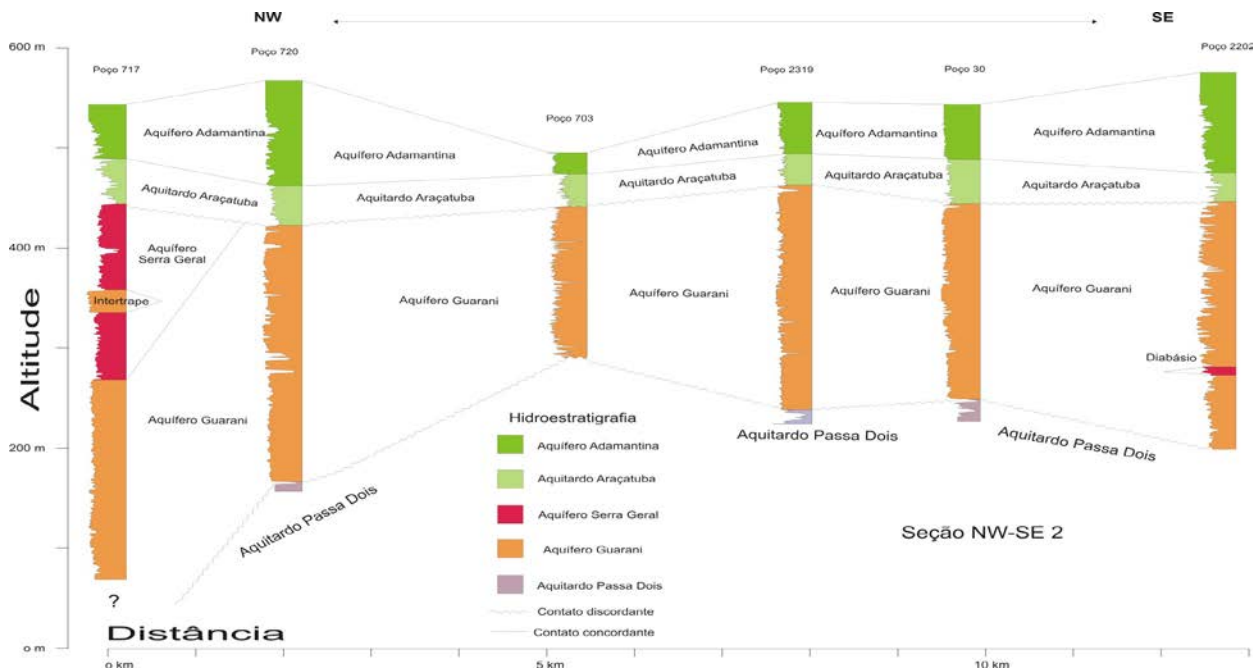


Figura 7. Seção hidroestratigráfica “NW-SE 2” interpretada a partir de perfis geofísicos de poços evidenciando o limite da janela de basalto entre os poços 717 e 720 e a ocorrência do Aquitardo Araçatuba em toda a extensão da seção (DAEE, 2015)

Destaca-se que no diagnóstico hidrogeológico (DAEE, 2015) foram elaboradas 10 seções hidrogeológicas cortando o perímetro urbano (figura 8) e, em todos os perfis, foi verificada a ocorrência do Aquitardo Araçatuba na base do SAB. Essa unidade hidroestratigráfica constitui uma barreira hidráulica praticamente impermeável que isola e imprime características de confinamento do SAG na área da janela de basalto, conforme apresentado neste trabalho.

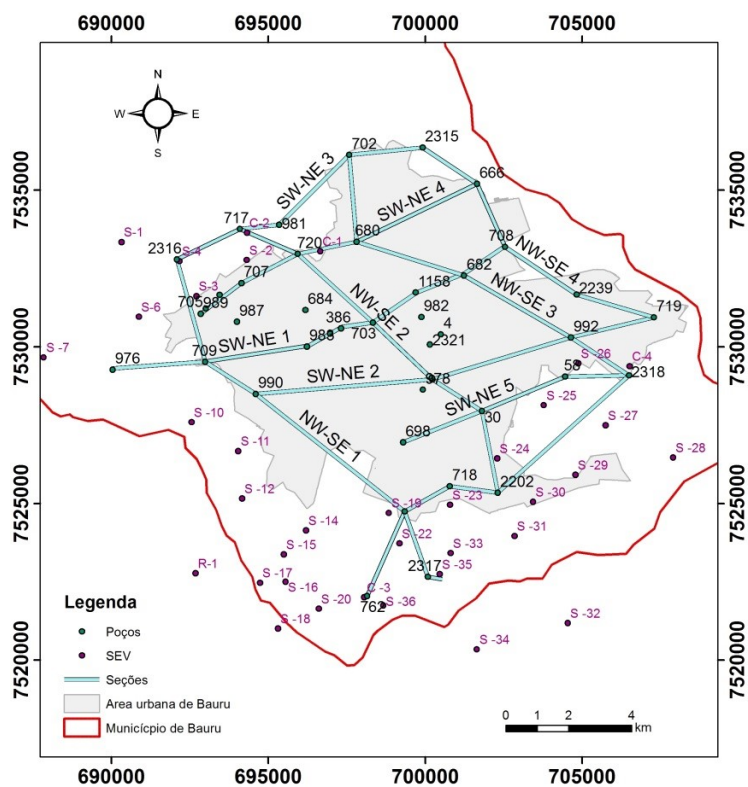


Figura 8. Localização dos poços com interpretação dos perfis geofísicos e das seções hidroestratigráficas elaboradas no diagnóstico hidrogeológico (DAEE, 2015)

4. POTENCIOMETRIA DOS SISTEMAS AQUÍFEROS

No diagnóstico hidrogeológico de Bauru (DAEE, 2015) foram elaborados mapas potenciométricos dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani, a partir de dados de nível estático medidos na data de construção dos poços, por vezes, permitindo a confecção de mapas de diferentes períodos. Os dados de nível estático foram obtidos do cadastro de poços consistido a partir de banco de dados, principalmente, do DAEE, CPRM – Serviço Geológico do Brasil e do DAE-Bauru.

As cargas hidráulicas dos poços foram obtidas com uso de ferramenta do aplicativo do Sistema de Informações Georreferenciadas – SIG, por meio da subtração da profundidade do nível de água com a cota altimétrica obtida com o modelo digital de elevação – MDE.

O mapa potenciométrico do SAB na zona urbana de Bauru demonstrou que as maiores cargas hidráulicas são verificadas nos divisores de águas entre as microbacias hidrográficas, sendo que a

maior piezometria (592 m) foi verificada no divisor entre as bacias dos Rio Bauru e o Ribeirão Água Parada, no limite noroeste do perímetro urbano, e a menor carga hidráulica (458 m) foi encontrada às margens do Rio Bauru, nas proximidades com o limite leste do perímetro urbano.

O mapa potenciométrico do SAG no perímetro urbano de Bauru, construído com dados de nível estático posterior a 1990, apresentou intervalo de equipotenciais variando de 525, no limite oeste do perímetro urbano, e 395 m, no limite norte. Na região central da cidade, as cargas hidráulicas variaram entre 424 e 458 m. Não foram observadas correlações da potenciometria com os corpos hídricos superficiais e/ou com o fluxo subterrâneo do SAB.

Os resultados obtidos com a determinação das cargas hidráulicas dos poços e elaboração dos mapas potenciométricos do SAB e do SAG mostraram comportamentos bastantes distintos das potenciometrias, na comparação entre os dois sistemas aquíferos. Além disso, ensaios de bombeamento com avaliação da interferência entre poços demonstraram que não há influência nos níveis de água de poço do SAB por bombeamento realizado do SAG.

A figura 9, por meio da relação entre a topografia e a carga hidráulica dos poços do cadastro, demonstra a diferença de potencial hidráulico existentes entre o SAB e o SAG. No SAB, as cargas hidráulicas variam predominantemente de 480 a 580 m em forte correlação com a topografia, ressaltando o comportamento livre desse sistema aquífero, no qual os níveis piezométricos acompanham o relevo. No SAG, as cargas hidráulicas apresentam predominantemente valores entre 400 e 500 m, em fraca correlação com a topografia, evidenciando um comportamento confinado.

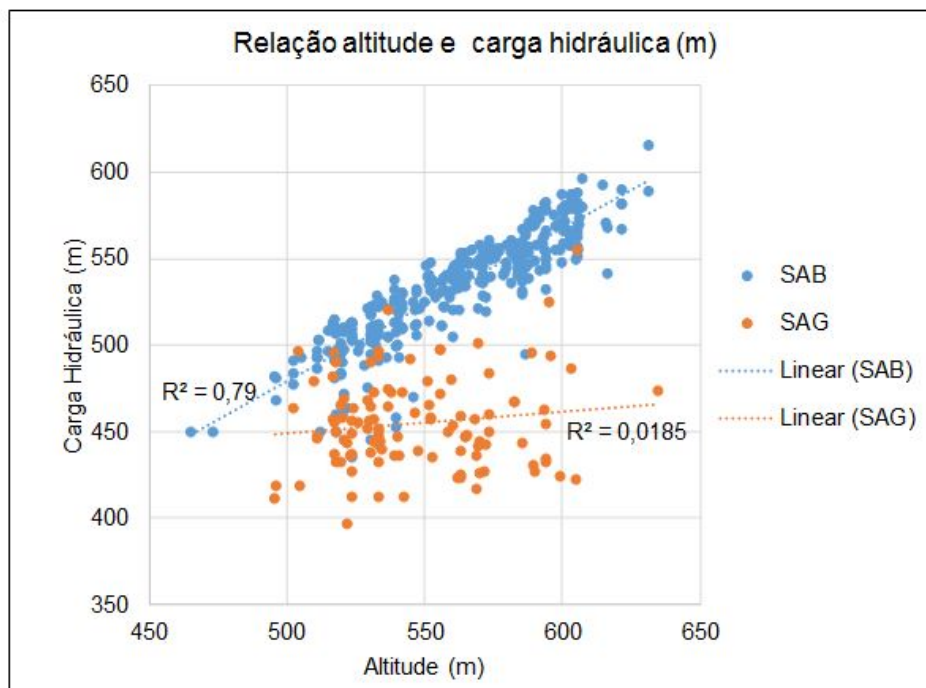


Figura 9. Gráfico da relação entre a topografia e a carga hidráulica de poços do SAB e SAG evidenciando distintas piezometrias e diferentes comportamentos hidráulicos (DAEE, 2015)

A diferença de potencial hidráulico entre o SAB e o SAG (figura 9) corrobora também com o modelo hidrogeológico conceitual de isolamento hidráulico entre esses sistemas aquíferos. A regionalização da diferença de potencial hidráulico foi avaliada pela superposição dos dois mapas potenciométrico (figura 10). Essa atividade foi desenvolvida utilizando o ferramental de álgebra do SIG, por meio da subtração entre os mapas potenciométricos do SAB e do SAG e, desse modo, resultando no mapa da diferença de potencial hidráulico existente entre esses dois sistemas aquíferos no perímetro urbano de Bauru. A figura 10 demonstra que em toda a área avaliada há gradiente hidráulico elevado do SAB em relação ao SAG. Assim, se houvesse conexão hidráulica entre o SAB e o SAG, o fluxo subterrâneo teria sentido vertical descendente, ou seja, migrando do SAB em direção ao SAG. A escala de coloração da figura 10 indica a variação do gradiente hidráulico vertical de 42 a 168 m.

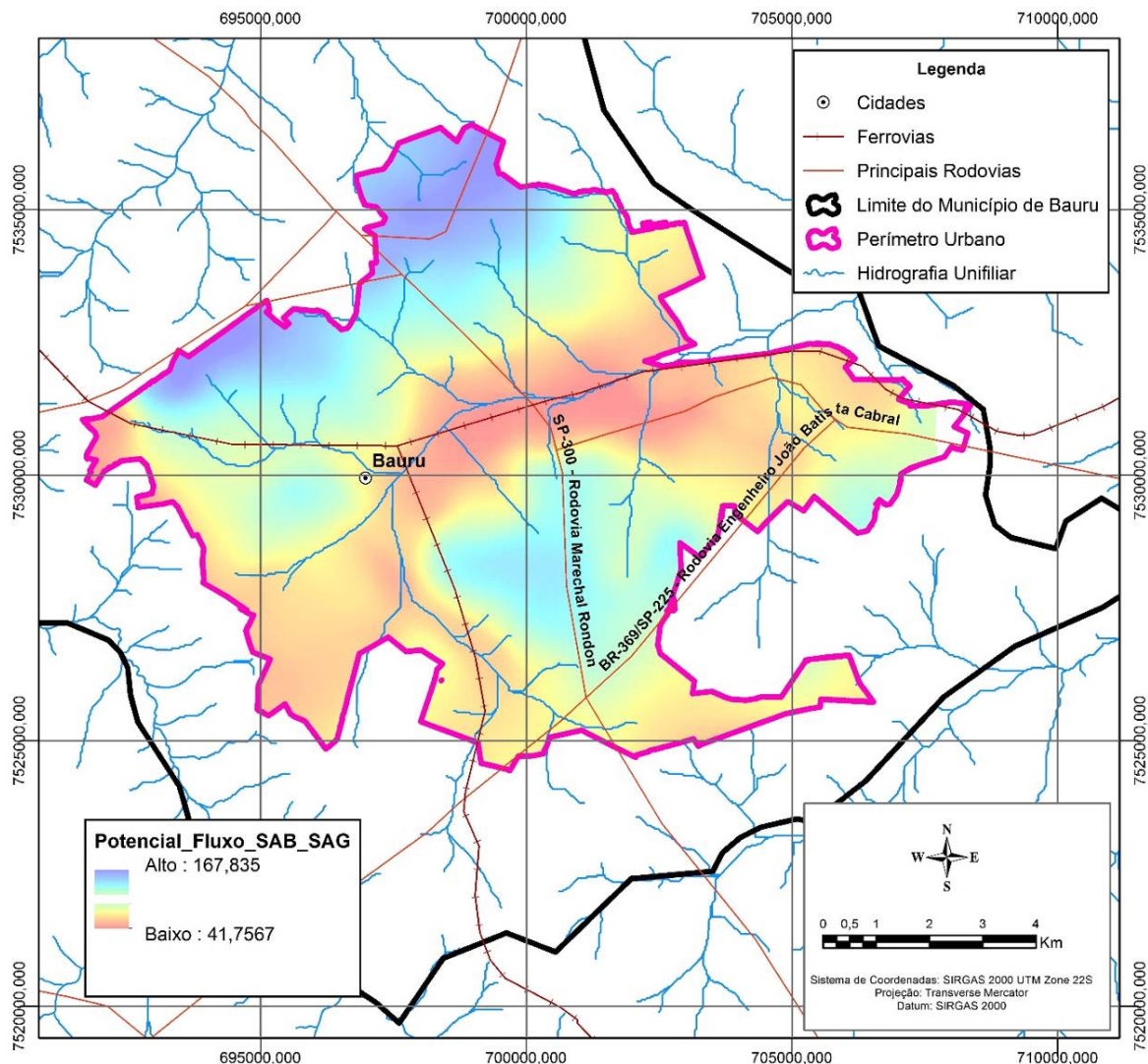


Figura 10. Distribuição da diferença da piezometria do SAB e do SAG evidenciando gradiente hidráulico vertical do SAB sobrelevado em relação ao SAG, sustentado pelo isolamento hidráulico conferido pela Formação Araçatuba e/ou pelo basalto da Formação Serra Geral (DAEE, 2015)

Os resultados do comportamento hidráulico dos sistemas aquíferos somam-se ao conhecimento da hidroestratigrafia de subsuperfície que indicou isolamento físico entre os sistemas aquíferos devido à presença da camada de lamito (Formação Araçatuba) na base do SAB e, desse modo, reiteram a interpretação de ausência de conexão hidráulica entre o SAB e o SAG.

Deve-se destacar que a construção de poços no SAG, sem o devido isolamento do SAB, pode propiciar a conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos e possibilita a migração de fluxos do SAB para o SAG. Esse tipo de situação altera completamente o padrão de invulnerabilidade à contaminação do SAG que, em condições naturais, é protegido de contaminações antrópicas.

5. HIDROGEOQUÍMICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A caracterização hidrogeoquímica das águas subterrâneas do SAB e do SAG no perímetro urbano de Bauru foi realizada por meio de um elenco de análises químicas de 128 amostras, localizadas conforme figura 11, sendo 38 amostras coletadas no diagnóstico hidrogeológico (DAEE, 2015), identificadas como C3, e o restante provenientes de estudos anteriores (SILVA, 1983; PSAG, 2008; SILVA, 2009; IG, 2012) e do relatório de qualidade ambiental da CETESB (CETESB, 2013).

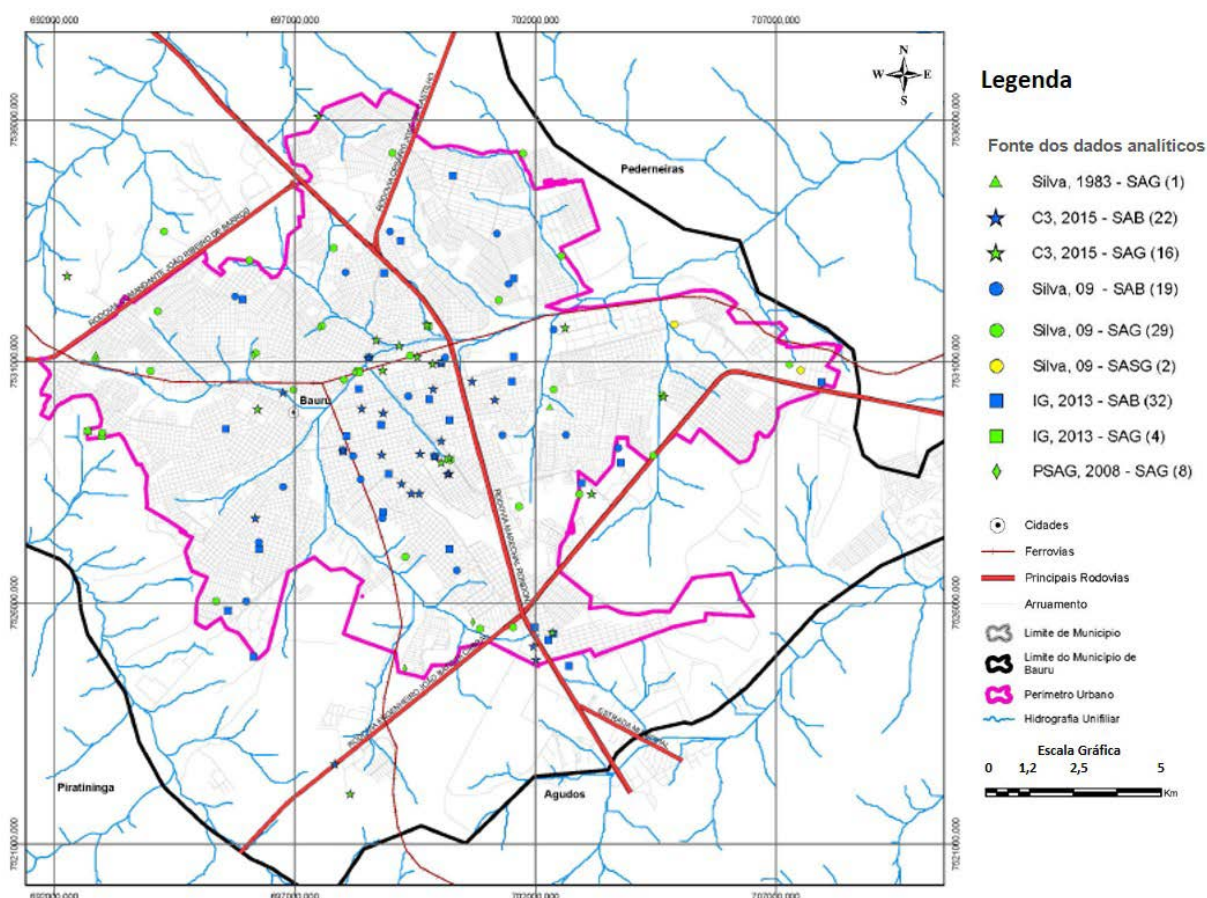


Figura 11. Localização dos dados analíticos adotados na avaliação hidroquímica das águas subterrâneas no perímetro urbano de Bauru

A análise estatística dos parâmetros hidroquímicos das amostras do SAG está apresentada na Tabela 1 e, das amostras do SAB, está apresentada na Tabela 2.

Parâmetro	Contagem	Unidade	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	Varição (%)
pH	52	-	8,71	9,07	9,82	5,88	1,00	11,49
CE	52	μS/cm	167,92	155,40	374,00	115,00	51,34	30,58
TDS	19	mg/L	143,32	134,00	248,00	58,00	43,64	30,45
Dureza	16	mg/L	31,18	11,00	149,00	2,03	43,08	138,18
Na ⁺	52	mg/L	30,07	30,55	60,00	6,33	9,30	30,94
K ⁺	52	mg/L	0,55	0,35	2,35	0,09	0,52	94,94
Ca ⁺²	52	mg/L	5,64	2,72	41,90	0,12	8,58	152,17
Mg ⁺²	52	mg/L	0,94	0,21	10,70	0,00	2,18	231,92
Cl ⁻	52	mg/L	2,26	0,55	27,30	0,11	5,22	230,85
HCO ₃ ⁻	52	mg/L	72,06	71,40	90,40	8,78	14,05	19,49
SO ₄ ⁻²	52	mg/L	3,93	0,70	129,00	0,02	18,37	467,59
N-NO ₃ ⁻	52	mg/L	1,42	0,13	16,55	0,00	3,45	243,33

Parâmetro	Contagem	Unidade	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	Varição (%)
pH	71	-	6,10	6,05	8,46	4,99	0,66	10,85
CE	71	μS/cm	129,59	127,00	393,00	16,00	81,90	63,20
TDS	51	mg/L	138,41	138,50	276,00	55,50	48,51	35,05
Dureza	51	mg/L	58,69	55,05	152,00	11,80	31,59	53,83
Na ⁺	71	mg/L	5,01	1,92	24,20	0,16	5,67	113,19
K ⁺	71	mg/L	2,52	2,21	7,23	0,59	1,06	42,19
Ca ⁺²	71	mg/L	12,16	9,76	44,30	0,57	9,50	78,17
Mg ⁺²	71	mg/L	2,99	2,67	9,97	0,40	2,03	67,76
Cl ⁻	71	mg/L	7,40	4,83	52,70	0,01	8,56	115,65
HCO ₃ ⁻	71	mg/L	32,47	25,90	110,00	0,00	27,69	85,28
SO ₄ ⁻²	71	mg/L	0,96	0,02	23,80	0,01	3,72	388,93
N-NO ₃ ⁻	71	mg/L	5,45	3,75	21,38	0,01	4,94	90,75

A comparação da análise estatística dos parâmetros hidroquímicos dos sistemas aquíferos ressalta diferenças marcantes entre os padrões físico-químicos das águas. Destacam-se os parâmetros pH, dureza, sódio, bicarbonato e o nitrato, como sendo os mais representativos da diferenciação das águas do SAB e o SAG.

As comparações da qualidade das águas considerando a proporcionalidade dos íons na constituição das amostras foi realizada por meio de método gráfico, demonstrado pelo Diagrama Trilinear de Piper (figura 12). A avaliação hidrogeoquímica adotou também a classificação das amostras em função da profundidade de ocorrência, visando avaliar eventual estratificação das águas no interior do sistema aquífero e possíveis misturas de águas nas porções próximas ao contato. Desse modo, as amostras foram classificadas da seguinte maneira:

- SAB raso - amostras coletadas em poços de até 50 m de profundidade;
- SAB intermediário – amostras coletadas em poços de 51 a 100 m de profundidade;
- SAB profundo – amostras coletadas em poços de 101 a 180 m de profundidade;
- SAG raso – amostras coletadas em poços com até 250m de profundidade;
- SAG profundo – amostras coletadas em poços acima de 250 m de profundidade.

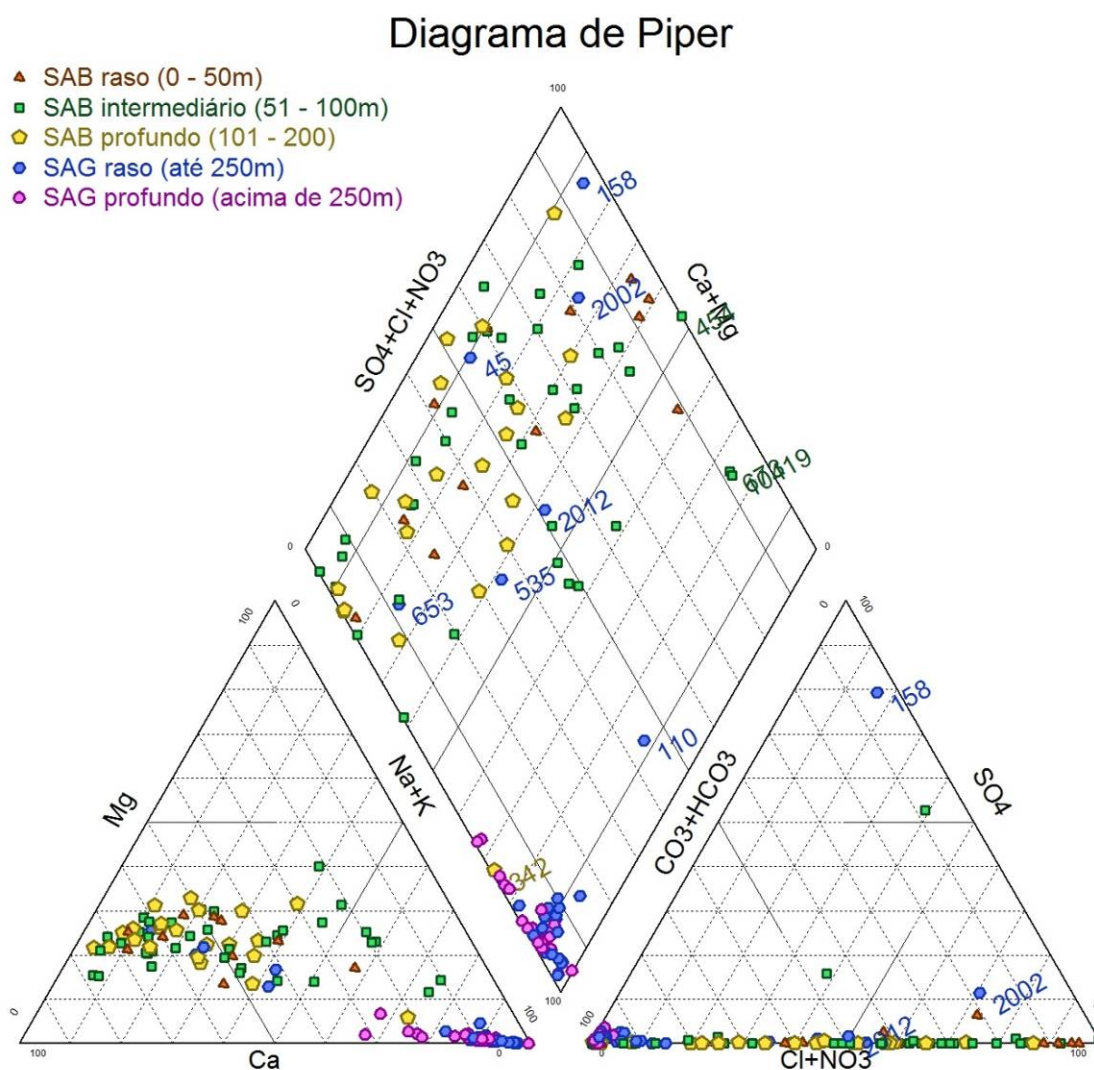


Figura 12. Diagrama de Piper do conjunto de todas amostras do SAB e do SAG identificadas pelo sistema aquífero e pela profundidade do poço (DAEE, 2015)

A principal interpretação obtida com esta análise integrada é que os sistemas aquíferos avaliados, claramente, possuem tipos hidroquímicos distintos das águas subterrâneas. Destaca-se também que o SAG possui uma maior homogeneidade dos tipos hidroquímicos, predominantemente bicarbonatada-sódica. Já o SAB, possui grande variação dos hidrotipos, predominando variações de bicarbonatada-cálcio-magnesianas a cloretada-cálcio-magnesianas.

Existem tipos intermediários e/ou amostras que são atribuídas a um poço de um dado sistema aquífero, mas que possui tipo hidroquímico característico do outro. Essas exceções foram interpretadas como provenientes de poços que possibilitaram a mistura de água. Não foi possível confirmar as razões das misturas de águas, porém, acredita-se que sejam provocadas por problemas de rompimento do revestimento dos poços e/ou por interpretação equivocada do local de contato entre os sistemas aquíferos, levando à instalação de seções filtrantes nos dois sistemas aquíferos.

Embora tenham sido identificadas situações anômalas aos padrões de água de cada sistema aquífero, esses casos são exceções. De um universo amostral de 128 amostras, apenas 7 amostras apresentaram tipos hidrogeoquímicos anômalos.

A evidente diferença entre os tipos hidroquímicos do SAB e do SAG ratifica inequivocamente a tese do isolamento hidráulico entre o SAB e o SAG, mesmo na região da janela de basalto. De outro modo, seriam esperadas características hidrogeoquímicas semelhantes ou, com fortes influências dos tipos hidroquímicos de um sistema aquífero sobre o outro.

6. AVALIAÇÃO ISOTÓPICA

Os isótopos ambientais de hidrogênio e oxigênio são amplamente utilizados nos estudos hidrogeológicos como ferramenta complementar na avaliação dos fluxos subterrâneos, investigação sobre a origem das águas e interpretações sobre mecanismos de contaminação em muitas partes do mundo (CLARK; FRITZ, 1997).

A interpretação dos resultados é obtida pela relação $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$, em comparação com as retas meteóricas que, neste caso, foram adotadas a Reta Meteórica Mundial – RMM ($\sigma^2\text{H} = 8 \sigma^{18}\text{O} + 10$) e uma reta meteórica elaborada por Silva (1983), denominada de Reta Meteórica Regional – RMR ($\sigma^2\text{H} = 7,7 \sigma^{18}\text{O} + 7,3$), obtida a partir da amostragem de chuvas semanais em São Carlos e Ribeirão Preto, no ano hidrológicos 1981-1982. O procedimento em adotar uma reta meteórica regional é bastante usual nas avaliações isotópicas, devido à escassez de dados dessa natureza.

A rede de monitoramento dos isótopos ambientais foi a mesma adotada para a avaliação hidroquímica com amostras da C3 (Figura 11), ou seja, contemplou os 38 poços amostrados, sendo 22 no SAB e 16 no SAG.

A interpretação dos resultados isotópicos de oxigênio e deutério foram realizados a partir do gráfico da relação “ $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ VSMOW” demonstrado na figura 13, no qual se observa a dispersão dos resultados isotópicos das amostras do SAB e do SAG em relação às retas RMM e RMR. Os resultados variaram em um intervalo de $\delta^{18}\text{O}$ de -6,00‰ a -9,86‰ e de $\delta^2\text{H}$ de 39,00‰ a -64,10‰. A distribuição dos valores ocorreu ao longo das retas meteóricas. Apesar da grande amplitude dos valores foi possível identificar dois principais agrupamentos, com assinatura isotópica distintas, permitindo assim traçar algumas considerações acerca do entendimento do fluxo subterrâneo e interpretações sobre a conectividade entre os sistemas aquíferos.

Os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ no SAB variaram de -8,69‰ a -6,0‰ com valor médio e mediana de -7,2‰ e os resultados de $\delta^2\text{H}$ variaram de -57,90‰ a -39,00‰ com média de -46,0‰ e mediana de 46,4‰. No SAB, os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ variaram entre -7,10‰ e -9,86‰ com média e mediana de -8,4‰ e os resultados de $\delta^2\text{H}$ variaram de -64,10‰ a -44,90‰ com média de -55,91‰ e mediana de 57,20‰. As assinaturas isotópicas também demonstram claramente a distinção entre as águas do SAB, relativamente mais enriquecidas em ^{18}O que as águas do SAG.

A figura 13 destaca o agrupamento dos resultados isotópicos das águas dos sistemas aquíferos, bem como permite observar as amostras com assinaturas isotópicas anômalas, as mesmas identificadas na avaliação hidrogeoquímica. As amostras do SAG C3-03, 10 e 29 apresentam assinatura isotópica compatíveis aos valores das águas do SAB e a amostra do SAB, C3-13, por sua vez, apresenta padrão típico do SAG.

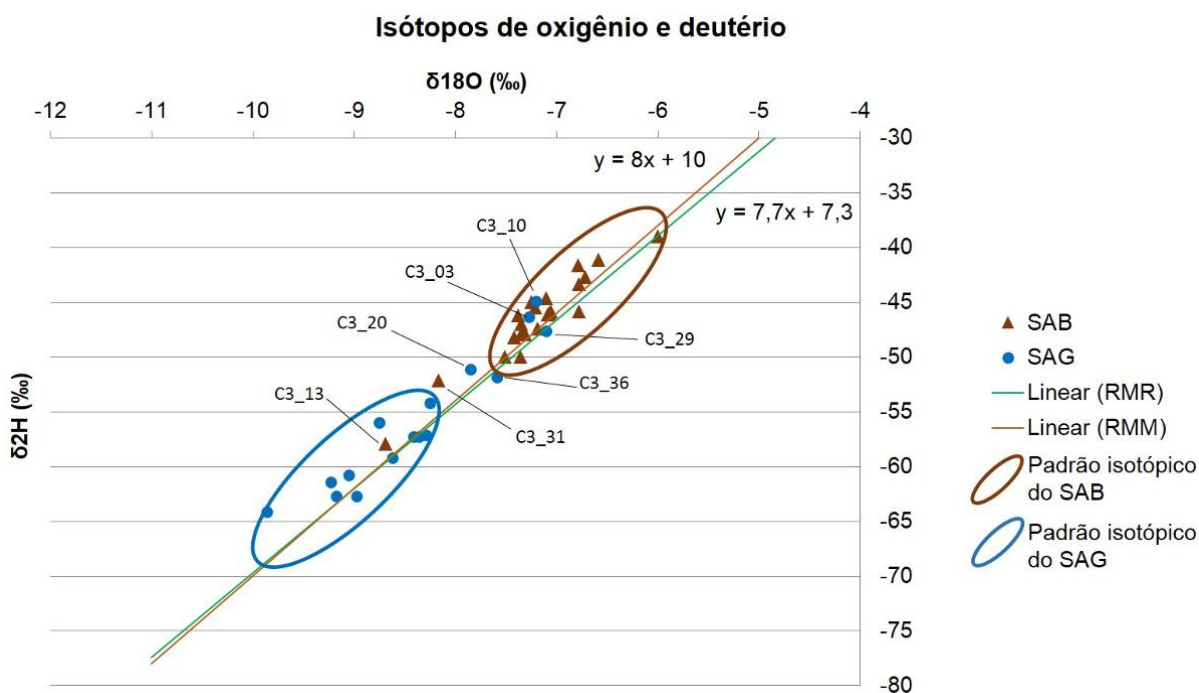


Figura 13. Gráfico dos resultados de $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ VSMOW para as amostras do SAG e do SAB no perímetro urbano de Bauru

Os resultados das amostras do SAG são compatíveis com valores obtidos em estudos regionais desse sistema aquífero, confirmando o contexto evolutivo compatível com os fluxos regionais e confinados do SAG, mesmo nas áreas de ocorrência da janela dos basaltos. Os resultados obtidos nos trabalhos de avaliação regional do SAG são: $\delta^{18}\text{O}$ de $-8,2\%$ e $\delta^2\text{H}$ de -58% (SILVA, 1983) e $\delta^{18}\text{O}$ de $-8,95\%$ (PSAG, 2012).

O agrupamento das amostras, a evidente distinção entre as assinaturas isotópicas e as ocorrências pontuais de anomalias (figura 13), reiteram as interpretações acerca do isolamento hidráulico entre o SAB e o SAG e as condições específicas de misturas das águas.

7. CONCLUSÕES

Os resultados alcançados com o diagnóstico hidrogeológico realizado no município de Bauru permitiu responder à questão postulada de que não há conexão hidráulica entre o SAB e o SAG na área de ocorrência da janela do basalto da Formação Serra Geral.

A caracterização da hidroestratigrafia, da potenciometria, da hidrogeoquímica e da assinatura isotópica dos sistemas aquíferos em questão evidenciaram, de forma cabal, o isolamento hidráulico entre o SAB e o SAG. A síntese dos fatores que evidenciam o isolamento hidráulico desses sistemas aquíferos são:

- a ocorrência dos lamitos da Formação Araçatuba na base do Grupo Bauru, em toda a extensão da área de ocorrência da janela, constitui a unidade hidroestratigráfica do Aquitardo Araçatuba e confere o isolamento físico entre os dois sistemas aquíferos e o confinamento do SAG;
- o gradiente hidráulico entre as superfícies potenciométricas do SAB e do SAG demonstra que os fluxos subterrâneos são independentes, de caráter livre no SAB e confinado no SAG;
- a qualidade das águas e a tipificação hidrogeoquímica que demonstram a completa distinção das águas do SAB e do SAG;
- a avaliação isotópica que destacou o agrupamento das amostras no gráfico de dispersão e comparação com as retas meteóricas e demonstra distintas assinaturas isotópicas das águas do SAG e do SAB, indicando diferentes origens e diferenciações isotópicas das águas.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O diagnóstico hidrogeológico do município de Bauru foi inspirado na necessidade de entender o modelo conceitual hidrogeológico e o grau de influência das atividades antrópicas na quantidade e qualidade das águas subterrâneas, visando o fornecimento ao poder público de ferramental técnico e a proposição de medidas para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos e a proteção da qualidade das águas subterrâneas.

A compreensão sobre o isolamento hidráulico entre o SAB e o SAG representou um avanço significativo no conhecimento hidrogeológico dessa anomalia estratigráfica da Bacia do Paraná e forneceu subsídios técnicos para o planejamento e para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. A seguir, serão discutidos os principais aspectos dirigidos à gestão dos recursos hídricos subterrâneos, resultantes dessa compreensão.

Em condições naturais, o SAG não é vulnerável à contaminação das águas do SAB impactadas por nitrato. Entretanto, a existência de poços com perfil construtivo que favoreça a conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos pode, localmente, provocar a contaminação das águas do SAG, pois, o gradiente hidráulico condiciona fluxos descendentes do SAB para o SAG. Desse modo, devem ser tomadas precauções na construção de poços do SAG no sentido manter o isolamento hidráulico existentes entre o SAB e o SAG.

A gestão da quantidade das águas subterrâneas, sobretudo pelo instrumento da outorga de uso das águas, poderá ser aplicada, fiscalizada e controlada de maneira independente para o SAB e o SAG, pois, não há necessidade em contabilizar de forma integrada as demandas provenientes das vazões de exploração, já que as reservas, mecanismos de recarga e fluxos subterrâneos ocorrem de maneira distinta. Do mesmo modo, o monitoramento para a avaliação sobre existência de superexploração, devido à concentração de poços em operação, uso intensivo das águas subterrâneas e eventuais indícios de rebaixamentos, deve ser conduzido, também de maneira independente, para cada sistema aquífero.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMPOS, A. F. DE; ROSTIROLLA, S. P.; BARTOSZECK, M. K; ROMEIRO, M. A. T.; FERREIRA, F. J. F.; CHANG, H. K. **Correlação de dados sísmicos multiescala e integração com arcabouço tectônico regional: exemplo da área do Domo de Piratininga, SP.** Revista Brasileira de Geologia, São Paulo, v. 38, n.2, p. 18-28, 2008.
- CAVALIN, M.V. **Relação entre urbanização e contaminação por nitrato no sistema Aquífero Bauru, Município de Bauru, SP.** Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário Senac, São Paulo, 87 p. 2011.

- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Relação de Áreas Contaminadas e Reabilitadas do Estado de São Paulo** – Texto Explicativo. CETESB, São Paulo, 2013, 14 p.
- CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. New York, Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. 328 p.
- DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Estudo de Águas Subterrâneas: região administrativa 7 – Bauru; 8 – São José do Rio Preto; e 9 – Araçatuba. 4 volumes. DAEE / ENCO, São Paulo, 1976.
- DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP**. Relatório Técnico Final. Simonato, M. D.; Campos, J. E [coord.]. DAEE / C3 Consultoria, São Paulo. 2015.
- GIAFFERIS, G.P.; OLIVEIRA, E.L. **Investigação da Qualidade das Águas Subterrâneas do Município de Bauru**. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, n. 14, Curitiba, 2006. Anais. Curitiba: ABRH, 2006.
- GIAFFERIS, G. P.; OLIVEIRA, E.L. **Gestão da Qualidade das Águas Subterrâneas pela Autarquia Municipal de Água no Município de Bauru – SP**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. n. 17. São Paulo, 2007, Anais...São Paulo: ABRH, 2007.
- HIRATA, R. **Estudo da contaminação por nitrato no Distrito de Tibiriçá, Bauru**. Relatório Técnico. DAE/ IGc-USP, São Paulo, 2 v. 2000.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010: Características da população por município**. Rio de Janeiro, 2010a. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/caracteristicas_da_populacao/caracteristicas_da_populacao_tab_municipios_zip_xls.shtm>. Acesso em: 21/05/2014.
- IG. Instituto Geológico. **Padrões de ocupação urbana e contaminação por nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, Centro-Oeste do Estado de São Paulo**. Varnier, C. [Coord.]. Relatório Final. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo / Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. São Paulo, 2012. 39 p.
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapa geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000**. Vol. 1 e 2: Texto e Mapa. IPT, São Paulo. 1981.
- PAULA E SILVA F. **Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 166 p. 2003.
- PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na Cidade de Bauru, SP. In: SIMPÓSIO SOBRE BACIAS CRETÁCEAS BRASILEIRAS, 2. Boletim de resumos, p. 141-144. 1994.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M.R. **Perfis de referência do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo**. Geociências, Rio Claro, v.especial, p. 21-32, 2003.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M.R. **Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 77-88, mar, 2005a.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M.R. **Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no estado de São Paulo**. Águas Subterrâneas, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 19-36, 2005b.

- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M. R. & STRADIOTO, M. R. **Sucessão Sedimentar do Grupo Bauru na Região de Pirapozinho (SP)**. Revista Geociências. Rio Claro. v.25 (n.1), p.17-26, 2006.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R.; SINELLI, O. **Arcabouço geológico e hidrofacies do sistema aquífero Guarani, no município de Ribeirão Preto (SP)**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, no prelo, 2008.
- PAULIPETRO. 1980. **Geologia do bloco 45, balizado pelas cidades de Bauru, Marília, Ourinhos e Águas de Santa Bárbara**. Silva, R.B. da, Couto E.A. do, [Exec.] (Relatório Interno BP-01/80). Mapa. São Paulo, 1980.
- PSAG. Projeto de Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani: **Avanços no Conhecimento do Sistema Aquífero Guarani**. Relatório Técnico, tomo 4, v.4. UNESP, Rio Claro, 2008. CD-ROM. ANA, Brasília, 2012.
- SÃO PAULO (Estado). Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000**. São Paulo: DAEE, IG, IPT, CPRM, 2005. Texto v. 1, mapa v.2 + CD-ROM.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos. Universidade Estadual Paulista. **Águas subterrâneas no Estado de São Paulo. Diretrizes de Utilização e Proteção**. Departamento de Águas e Energia Elétrica / Laboratório de Estudo de Bacias do Instituto Geociências e Ciências Exatas. São Paulo, 2013. 44p + DVD-ROM
- SILVA, R. B. G. **Estudo hidroquímico e isotópico das águas subterrâneas do Aquífero Botucatu no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1983. 133 p.
- SILVA, S. R. **Caracterização Hidrogeoquímica dos Sistemas Aquíferos Bauru e Guarani no município de Bauru**. Tese (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009. 101 p.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; AMARAL, G.; SUGUIO, K.; COIMBRA, A. M.; SOBREIRO NETO, A. F.; GIANCURSI, F.; CORREA, W. A. G.; CASTRO, C. G. J. Geologia da região sudoeste do Estado de São Paulo. *In*: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2. Rio Claro. Boletim de Resumos, p. 307-319. 1979.
- VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; VIOTTI, M.; ODA, G. H.; FERREIRA, L. M. R. Relación entre la urbanización y la contaminación por nitrato en el Sistema Acuífero Bauru (Ciudad de Bauru, Brasil). *In*: XI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDROGEOLOGÍA Y IV CONGRESO COLOMBIANO DE HIDROGEOLOGÍA, Cartagena de Índias, 2012. Anais, ALHSUD, 05p.