

IV-1153 - ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DA BORDA LESTE DA BACIA SEDIMENTAR DO RECÔNCAVO, BAHIA

Matheus Lopes de Jesus ⁽¹⁾

Geólogo pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Hidrogeólogo da *Water Services and Technologies*.

Mauro C. C. Monnerat do Prado ⁽²⁾

Geólogo pela Universidade de São Paulo (USP). Mestre em Ciências Ambientais pela *University of East Anglia* (Inglaterra). Sócio-Diretor da *Water Services and Technologies*.

Maria Valeria Gaspar de Queiroz Ferreira ⁽³⁾

Engenheira sanitária e ambiental pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Mestre em Poluição e Controle Ambiental pela *Manchester University / UFBA*. Analista de Saneamento da Empresa Baiana de Águas e Saneamento (Embasa).

Ana Paula Leal Meira ⁽⁴⁾

Engenheira sanitária e ambiental pela Universidade Federal da Bahia (UFBA). Especialista em Planejamento e Gestão Ambiental pela Faculdade de Tecnologia e Ciências (FTC-Bahia). MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (FGV). Gerente de Mananciais e Segurança de Barragens da Embasa.

Lara de Lima Lange ⁽⁵⁾

Geóloga pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Mestre em Geologia Exploratória pela UFPR. Geoquímica na *Water Services and Technologies*.

Endereço ⁽¹⁾: Rua Herval, nº 481 - Serra - Belo Horizonte - MG - CEP: 30240-010 - Brasil - Tel: (71) 99102-3082 - e-mail: matheus.geologia@outlook.com

RESUMO

O Projeto foi desenvolvido visando aprofundar o entendimento da hidrogeologia na área de estudo, com foco no Sistema Aquífero Marizal São Sebastião, um importante reservatório de água subterrânea utilizado para o abastecimento hídrico dos municípios que integram a Região Metropolitana de Salvador, respondendo tanto pelo abastecimento público de água potável para as populações locais quanto pelo abastecimento industrial do Polo Industrial de Camaçari. Historicamente os recursos hídricos subterrâneos foram aproveitados de forma não planejada e sem um entendimento da real disponibilidade hídrica, o que ocasionou situações de escassez hídrica, principalmente na região de Camaçari. Nas últimas duas décadas esta situação foi amenizada por medidas de controle de captação que foram implantadas, principalmente na região do Polo. Em nível regional, no entanto, a captação de água subterrânea permaneceu carente de planejamento, principalmente por falta de conhecimento da capacidade de reposição natural, por meio da recarga, no Sistema Aquífero Marizal São Sebastião.

No trabalho realizado adotou-se a seguinte abordagem técnica: a) Compilação e análise dos dados técnicos disponíveis para a região, principalmente quanto à natureza do subsolo; b) Verificação dos cadastros públicos de poços tubulares, para avaliar o grau de correspondência entre estas bases de dados e os poços efetivamente existentes em campo, o que permitiu um refinamento considerável das estimativas de demanda de água subterrânea; c) Implantação de uma rede de monitoramento para a medição de parâmetros de interesse, como níveis de água subterrânea, vazão dos poços de bombeamento; d) Realização de campanhas de monitoramento hidrogeológico e hidroquímico; e) Construção de um modelo geológico 3D; g) Cálculo das reservas hídricas subterrâneas associadas ao Sistema Aquífero Marizal São Sebastião; h) Desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual e numérico da área de estudo; e i) Simulação numérica de cenários futuros de exploração, com base em projeções existentes de crescimento de consumo de água subterrânea na região. Como resultados principais, foi possível quantificar as reservas hídricas subterrâneas da área de estudo, identificar zonas de superexploração hídrica subterrânea e simular cenários futuros dos efeitos gerados nos aquíferos pelo aumento da demanda hídrica. Os resultados deste projeto incluem também a indicação das áreas mais favoráveis para a exploração futura de água subterrânea e um modelo hidrogeológico tridimensional, que constitui uma importante ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

PALAVRAS-CHAVE: Águas subterrâneas, Hidrogeologia, Estudo hidrogeológico, Gestão de Aquíferos, Aquífero São Sebastião.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas, embora relativamente pouco conhecidas da população em geral, por não estarem visíveis à superfície, constituem uma parte significativa do suprimento de água potável disponível para o abastecimento público e outras finalidades. No Brasil, as águas extraídas dos aquíferos correspondem a aproximadamente 18% do volume total consumido pela população atendida por rede de abastecimento (HIRATA *et al*, 2019), sendo utilizadas em uma escala ainda maior para outras finalidades, como a agropecuária. Ao mesmo tempo, as pressões geradas sobre os recursos hídricos superficiais em função do crescimento demográfico e contaminação antrópica dos mananciais tem avançado gradativamente sobre os recursos hídricos subterrâneos, havendo vários casos conhecidos de superexploração de aquíferos e contaminação do subsolo, principalmente nos grandes aglomerados urbanos.

O aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos no Brasil é feito, tipicamente, sem o conhecimento dos volumes de água disponíveis ou capacidade produtiva dos mananciais. A prática usual é realizar a captação, de forma pouco controlada, e se preocupar com a sustentabilidade do recurso somente quando começam a surgir situações indesejadas, como a perda de vazão em poços e/ou a perda de qualidade da água. Esta situação é bastante comum mesmo para usuários que submetem seus poços ao processo de outorga, promovido em nível estadual, uma vez que os órgãos responsáveis por avaliar as fontes de água e a viabilidade de se conceder a outorga de uso não tem acesso, em geral, a estudos ou ferramentas que permitam uma avaliação mais técnica dos mananciais subterrâneos, pelo simples fato de que na maioria dos casos tais estudos ou ferramentas não existem.

Com relação à borda leste da Bacia do Recôncavo, situada na Bahia, historicamente esses recursos hídricos subterrâneos foram aproveitados de forma não planejada e sem um entendimento da sua real disponibilidade hídrica, o que ocasionou situações de escassez hídrica, principalmente na região de Camaçari. Nas últimas duas décadas esta situação foi amenizada por medidas de controle de captação que foram implantadas, principalmente na região do Polo Industrial de Camaçari (PIC). Em nível regional, no entanto, a captação de água subterrânea permaneceu carente de planejamento, principalmente por falta de conhecimento da capacidade de reposição natural, por meio da recarga, no Sistema Aquífero Marizal São Sebastião.

Importante mencionar que os aquíferos da Bacia Sedimentar do Recôncavo são considerados como Áreas de Proteção dos Mananciais (APMs) com influência na Região Metropolitana de Salvador (RMS), conforme o artigo 94 da Política Estadual de Meio Ambiente e Proteção à Biodiversidade (BAHIA, 2006) na busca de proteger e disciplinar o uso dos mananciais que abastecem essa região. Entretanto, como até o momento este artigo não foi regulamentado, não foram estabelecidos ainda seus limites, critérios e usos.

No intuito de conhecer melhor os aquíferos acima referidos, o estudo hidrogeológico apresentado neste trabalho foi desenvolvido na borda leste da Bacia do Recôncavo, na Bahia (Figura 1). Teve por foco a investigação do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião, que constitui um importante reservatório de água subterrânea para o abastecimento público dos municípios que integram a RMS e para o abastecimento industrial do PIC. Este sistema aquífero, composto principalmente por sedimentos arenosos consolidados, é assim denominado por considerar como um reservatório único a coalescência entre a Formação Marizal, mais superficial, e a Formação São Sebastião, que atinge espessuras superiores a 1.000 metros no depocentro da bacia sedimentar.

Este trabalho está inserido no âmbito do Projeto de Cooperação Técnica “Universalização e aperfeiçoamento da prestação dos serviços de abastecimento de água e esgotamento sanitário em áreas prioritárias do Estado da Bahia” firmado entre a Agência Brasileira de Cooperação (ABC/MRE), a Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. (Embasa) e o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). Para a realização do Estudo foi contratada a empresa de consultoria *Water Services and Technologies*.

O artigo apresenta os objetivos, metodologia, resultados e conclusões obtidas com a realização do estudo, dando-se ênfase às etapas de implantação da rede de monitoramento, monitoramento de campo e modelagem geológica e hidrogeológica.

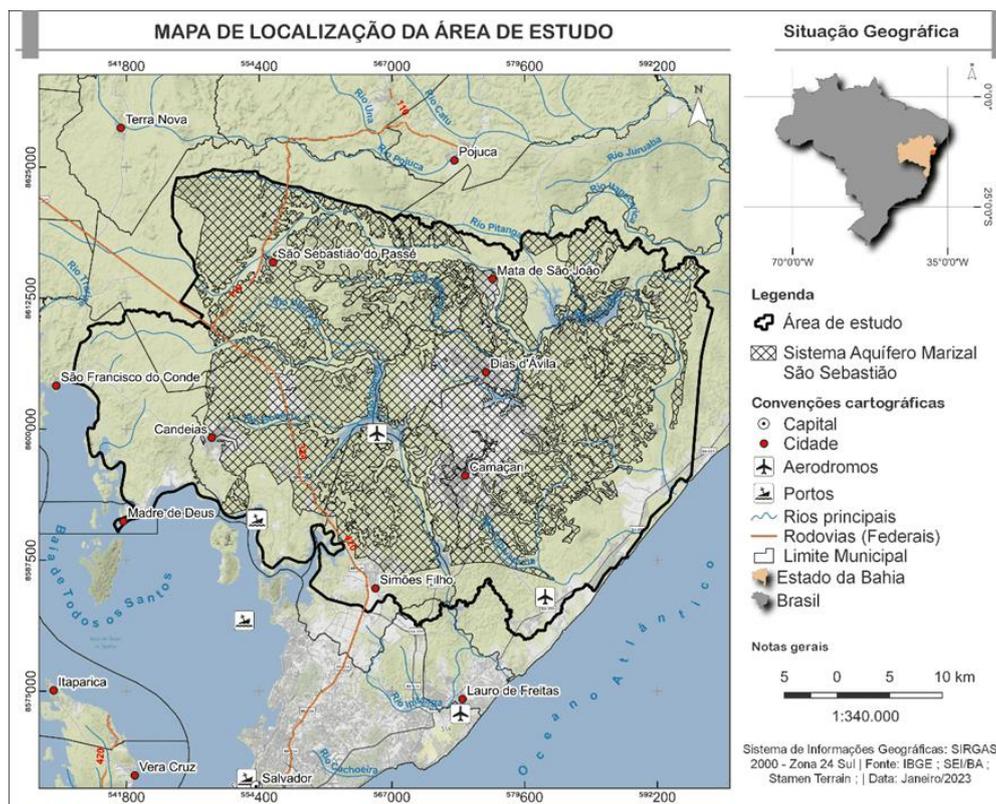


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

OBJETIVO GERAL

O estudo realizado teve por objetivo principal aprofundar o entendimento sobre a hidrogeologia do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião de forma a possibilitar o aprimoramento da gestão do principal reservatório regional de água subterrânea e importante fonte de água para a Região Metropolitana de Salvador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste projeto incluíram: a) Entender a hidrogeologia regional; b) Realizar uma estimativa do nível de exploração do aquífero de interesse; c) Coletar e interpretar dados hidrogeológicos; d) Identificar as unidades hidroestratigráficas na área de estudo; e) Realizar uma estimativa das reservas hídricas subterrâneas renováveis e permanente associadas ao Sistema Aquífero Marizal São Sebastião; f) Entender as principais direções do fluxo hídrico subterrâneo; g) Realizar estimativas de cenários futuros de exploração; i) Obter subsídios técnicos e ferramentas de apoio ao aprimoramento da gestão dos recursos hídricos.

MATERIAIS E MÉTODOS

De forma sintética, pode-se mencionar que a abordagem técnica adotada no estudo realizado foi a seguinte:

- Compilação e análise dos dados técnicos disponíveis para a região, principalmente quanto à natureza do subsolo;
- Verificação dos cadastros públicos de poços tubulares para avaliar o grau de correspondência entre estas bases de dados e os poços efetivamente existentes em campo, o que permitiu um refinamento considerável das estimativas de demanda de água subterrânea;
- Implantação de uma rede de monitoramento para a medição de parâmetros de interesse, como níveis de água subterrânea, vazão dos poços de bombeamento e parâmetros climáticos;
- Realização de campanhas de monitoramento hidrogeológico e hidroquímico;
- Construção de um modelo geológico tridimensional da área de estudo;
- Cálculo das reservas hídricas subterrâneas associadas ao Sistema Aquífero Marizal São Sebastião;
- Desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual e numérico da área de estudo;

- h. Simulação numérica de cenários futuros de exploração, com base em projeções existentes de crescimento de consumo de água subterrânea na região.

O primeiro aspecto considerado na elaboração do estudo hidrogeológico foi realizado amplo levantamento de dados secundários existentes em instituições que já haviam dedicado esforços à investigação do subsolo na região. As bases de dados indicaram a perfuração e/ou operação, ao longo de mais de 50 anos, de aproximadamente 600 poços tubulares, sendo obtidos perfis geológicos e construtivos para cerca de metade destes. Outra fonte de informação importante foram seções hidrogeológicas regionais disponíveis na literatura, construídas com dados de poços exploratórios de petróleo. O conjunto destes dados foi fundamental para a construção do modelo geológico tridimensional da área de estudo, permitindo, assim, calcular as reservas hídricas associadas ao Sistema Aquífero Marizal São Sebastião.

Foi também elaborado um plano de monitoramento hidrogeológico e hidroquímico e implantada uma rede de monitoramento, utilizando 30 poços tubulares existentes e instalados no Sistema Aquífero Marizal São Sebastião. Adicionalmente foram instaladas 6 estações fluviométricas para monitoramento de vazão nos três principais rios que cortam a região (Rio Joanes, Rio Jacuípe e Rio Pojuca) e realizadas 12 campanhas mensais de medições de vazão. Foi instalada também, na região central da área de estudo, uma estação climática para obtenção de dados de pluviometria e evapotranspiração.

A segunda etapa do estudo foi a coleta de dados hidrogeológicos em campo, na qual foram realizadas: a) 3 campanhas de medição de nível d'água e vazão nos poços selecionados; b) 2 campanhas de coleta de amostras de água subterrânea para análises químicas; c) 3 ensaios de aquífero para obtenção de parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, e; d) 12 campanhas mensais de medição de vazão nos rios monitorados.

A etapa subsequente deste estudo foi o desenvolvimento do geológico 3D utilizando 12 seções hidrogeológicas regionais elaboradas por Valadão Neto (2006), que utilizou perfis elétricos de poços profundos de exploração de óleo e gás para interpretar a geologia da bacia sedimentar combinados com outras informações como topografia e mapas geológico-estruturais no desenvolvimento de um modelo geológico tridimensional.

A última etapa do estudo foi composta pela elaboração do modelo hidrogeológico conceitual e o modelo numérico de fluxo, incluindo o processo de simulações de cenários futuros de exploração do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião.

PRIMEIRA ETAPA: IMPLANTAÇÃO DA REDE DE MONITORAMENTO

Como parte do estudo hidrogeológico, foi implementada uma rede de monitoramento para obtenção dos parâmetros de interesse composta de: a) Instalação de 6 estações fluviométricas nos rios Joanes, Jacuípe e Pojuca; b) Instrumentação das 6 estações fluviométricas com transdutores de pressão; c) Instalação de uma estação climática; d) Instalação de um pluviômetro; e) Seleção de trinta poços tubulares para compor a rede de monitoramento; e e) Instrumentação de 11 poços tubulares com transdutores de pressão. A seguir serão descritos os principais aspectos desta fase.

Com o objetivo de estabelecer a relação hidrodinâmica entre os rios e o aquífero subjacente (Sistema Aquífero Marizal São Sebastião), no sentido de determinar se no trecho selecionado em cada curso d'água o rio recebe contribuição de fluxo oriundo do aquífero (fluxo de base para o rio) ou se, ao contrário, o rio contribui fluxo para o aquífero (mecanismo de recarga do aquífero) foram instaladas 6 estações fluviométricas nos rios Joanes, Jacuípe e Pojuca. Foram selecionados seis pontos de monitoramento de vazão (estações fluviométricas), os quais receberam a seguinte identificação:

- Rio Joanes:
 - Ponto JO-01: ponto de monitoramento de montante; e
 - Ponto JO-02: ponto de monitoramento de jusante.
- Rio Jacuípe:
 - Ponto JAC-01: ponto de monitoramento de montante; e
 - Ponto JAC-02: ponto de monitoramento de jusante.
- Rio Pojuca:
 - Ponto POJ-01: ponto de monitoramento de montante; e
 - Ponto POJ-02: ponto de monitoramento de jusante.

As estações fluviométricas instaladas foram equipadas com medidores de nível d'água automatizados e, foram realizadas 12 campanhas mensais de medições de vazão com o objetivo de obter a curva-chave de cada estação e converter os dados de nível d'água obtidos de forma automatizada em vazão.

Para que fosse possível o monitoramento dos níveis d'água nos poços tubulares, foram selecionados 30 poços tubulares para compor a rede de monitoramento hidrogeológico e hidroquímico, sendo 11 instrumentado com medidores de nível d'água automatizados. Por fim, para a obtenção dos parâmetros climáticos (precipitação, evaporação e evapotranspiração) foram instalados um pluviômetro e uma estação climática na porção central da área de estudo. A Figura 2 mostra a localização dos pontos de monitoramento na área de estudo.

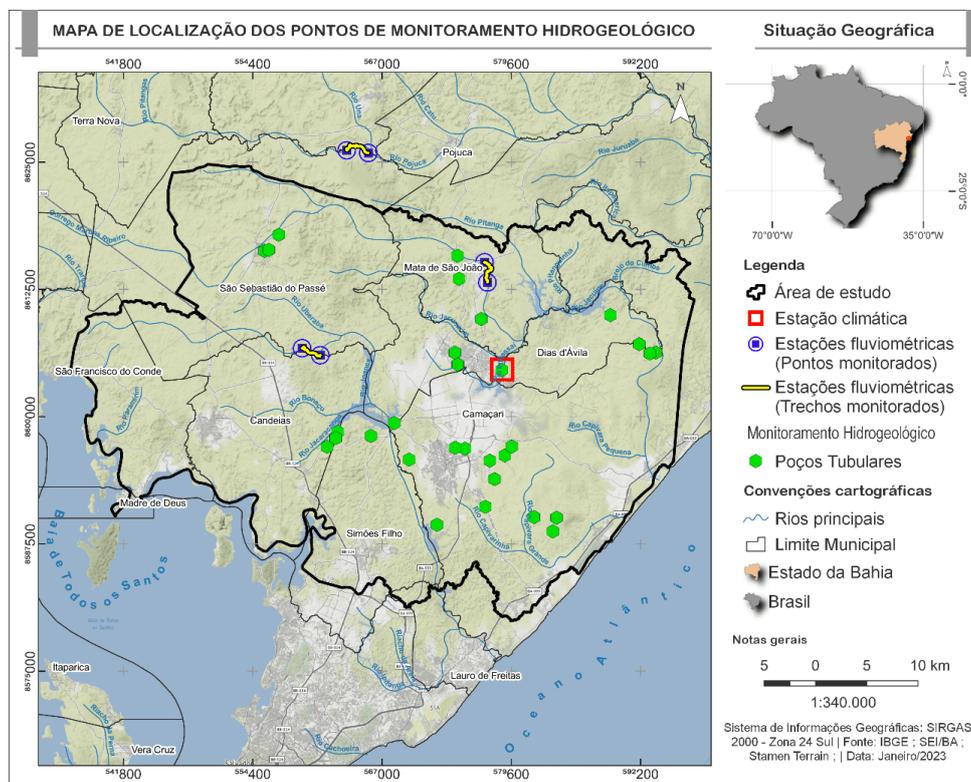


Figura 2: Mapa de localização dos pontos de monitoramento implantados na área de estudo.

SEGUNDA ETAPA: MONITORAMENTO *IN SITU*

O monitoramento foi subdividido em quatro etapas: 1) Monitoramento de vazão dos rios; 2) Monitoramento hidrogeológico; e 3) Monitoramento hidroquímico. Os resultados de cada etapa serão descritos a seguir.

- 1) Monitoramento de vazão dos rios: Foram realizadas 12 campanhas mensais de medição de vazão dos rios. Cada medição foi realizada utilizando-se o método da meia seção, em que a seção transversal do rio em um ponto escolhido é subdividida em múltiplas subseções, para as quais se calcula a área (área da subseção transversal) e a velocidade de fluxo, utilizando-se um instrumento chamado molinete. Multiplicando-se para cada subseção a área pela velocidade obtém-se o fluxo e, somando-se os fluxos para cada subseção obtém-se uma medição de vazão para a seção transversal do rio. Ao final, foi possível estabelecer a relação hidrodinâmica entre rio e aquífero em cada trecho monitorado (isto é, se o rio recebe água do aquífero ou cede água para o aquífero) e a curva-chave de cada estação, possibilitando converter os dados de nível d'água em vazão. A seguir é apresentado os resultados desta etapa do monitoramento.
 - a. Rio Joanes: O trecho avaliado do Rio Joanes possui uma extensão de 2,69 km ao longo do canal entre as estações de montante e jusante. As medições manuais realizadas mostraram um incremento de vazão entre as estações em 10 das 12 medições realizadas, com um ganho de vazão variando de 18 m³/h (dezembro de 2021) a 2.620 m³/h (março de 2022). O rio perdeu vazão neste trecho, isto é, contribuiu fluxo para o aquífero, unicamente nas medições manuais realizadas em junho e julho de 2021, porém com uma magnitude pequena, entre 32 m³/h e 43 m³/h. Considerando-se as medições manuais feitas em ambas as estações fluviométricas, o rio apresentou, no trecho avaliado, uma vazão média de 1,13 m³/s, equivalente a aproximadamente 4070 m³/h.

O comportamento efluente do Rio Joanes neste trecho é também evidenciado pela série de dados de vazão obtidos de forma automatizada para as duas estações fluviométricas (montante e jusante), apresentada na Figura 4b, e pelo registro da relação hidrodinâmica entre rio e aquífero no período de monitoramento automatizado.

- b. Rio Jacuípe: O trecho avaliado do rio Jacuípe possui uma extensão de 3,27 km ao longo do canal do rio. No período de monitoramento, o rio mostrou um ganho de vazão entre as estações de montante e jusante em todas as medições manuais feitas, isto é, trata-se de um trecho efluente, onde o rio recebe água do aquífero. De acordo com as medições manuais a contribuição do aquífero para este trecho do rio variou entre 65 m³/h (janeiro de 2022) e 14.130 m³/h (abril de 2022). Considerando-se as medições feitas em ambas as estações fluviométricas, o rio apresentou, no trecho avaliado, uma vazão média de 5,8 m³/s (aproximadamente 20.900 m³/h).

O comportamento efluente do Rio Jacuípe neste trecho é também evidenciado pela série de dados de vazão obtidos de forma automatizada para as duas estações fluviométricas (montante e jusante), apresentada na Figura 41. Uma análise adicional que se pôde fazer a partir dos dados obtidos com o monitoramento automatizado diz respeito à influência das chuvas no comportamento hidrodinâmico do rio e do aquífero. Em períodos com maior incidência de precipitação, quando há um aumento significativo no nível d'água do rio (e consequentemente na sua vazão), essa carga adicional acaba fazendo com que o rio ceda volumes de água significativos para o aquífero, o que não se verifica nos períodos com menos precipitação (Figura 4b). Essa situação se repete no Rio Pojuca.

- c. Rio Pojuca: O trecho avaliado do rio Pojuca possui uma extensão de 3,46 km de extensão ao longo do canal do rio. O comportamento do rio neste trecho se mostrou bastante variável no período monitorado, com uma resposta efluente entre as estações de montante e jusante (recebeu água do aquífero) em 6 das 12 campanhas de medição manual de vazão e com uma resposta influente (cedeu água para o aquífero) nas demais 6 campanhas. O rio registrou aumento de vazão nos meses de julho, agosto, novembro e dezembro de 2021, bem como em janeiro e abril de 2022. Perdeu vazão nos meses de maio, junho, setembro e outubro de 2021, assim como em março e maio de 2022. Considerando-se as medições manuais feitas em ambas as estações fluviométricas, o rio apresentou, no trecho avaliado, uma vazão média de 8,6 m³/s (30.960 m³/h). A Figura 3 ilustra a relação hidrodinâmica entre rio e aquífero dos três trechos dos rios monitorados.

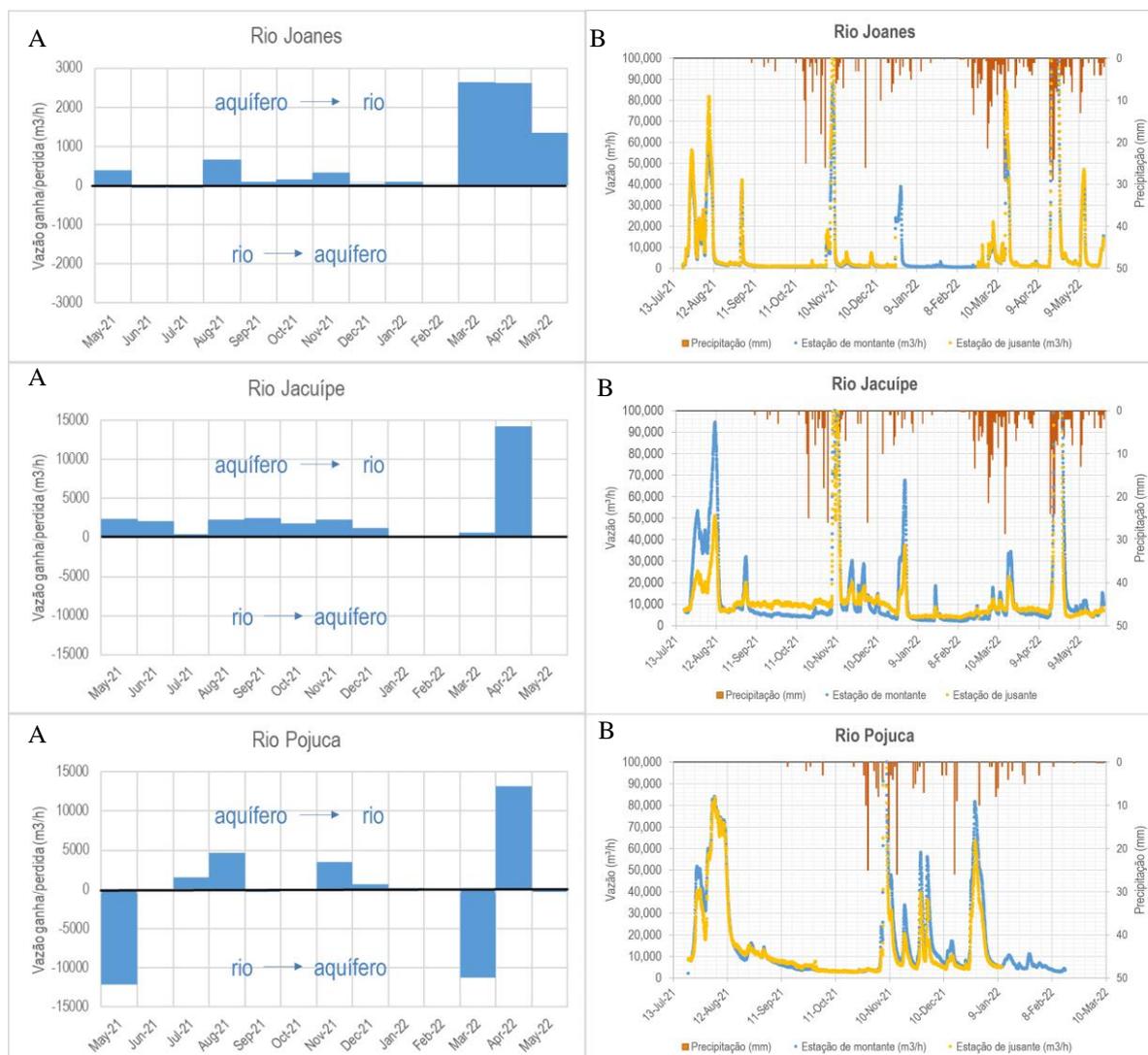


Figura 3: a) Relação hidrodinâmica entre os três rios monitorados e o aquífero subjacente; b) Gráfico mostrando as medições de vazão obtidas no Rio Joanes a partir do monitoramento automatizado de nível d'água realizado nas estações de montante (em azul) e jusante (em amarelo)

- 2) Monitoramento hidrogeológico: Conforme indicado, foram selecionados 30 poços tubulares (Tabela 1) com o objetivo de coletar dados de nível d'água subterrânea (estático e/ou dinâmico) em cada poço e vazão (para poços ativos), utilizando o macro medidor do poço ou um medidor portátil ultrassônico. Destaca-se que dos 30 poços tubulares, 11 foram instrumentados com sensores de medição nível d'água automatizado. Foram realizadas 3 campanhas de coleta de dados, realizadas entre dezembro de 2021 e abril de 2022 e os resultados serão apresentados a seguir (Tabela 2).

Como resultado do monitoramento hidrogeológico, foi possível observar duas zonas com um rebaixamento do nível d'água pronunciado no Sistema Aquífero Marizal São Sebastião. A primeira está localizada na região do município de Camaçari/BA, nesta região está concentrada aproximadamente 100 poços de bombeamento.

A segunda zona está localizada a região de São Sebastião do Passé. Neste setor, entretanto, além da exploração contínua de água subterrânea, verifica-se uma menor capacidade produtiva do aquífero, devido à sua menor espessura e maior proporção de sedimentos finos, o que prejudica a transmissão de água pelo reservatório subterrâneo.

Os dados de nível d'água foram convertidos em carga hidráulica e estão apresentados na Tabela 2. Observa-se que não houve grandes variações nos valores de carga hidráulica dos poços tubulares em relação aos resultados das três campanhas, além disso, as pequenas variações observadas estão

diretamente ligadas ao regime de precipitação que recarrega o aquífero, ocasionando a subida do nível d'água como ilustrado na Figura 4.

Tabela 1: Status operacional dos poços tubulares selecionados para o monitoramento hidrogeológico.

Município	Total de poços monitorados	Poços ativos	Poços parados
Camaçari	15	8	7
Dias D'Ávila	5	4	1
Mata de São João	3	3	0
Candeias	3	0	3
Simões Filho	1	0	1
São Sebastião do Passé	3	3	0
Total	30	18	12

Tabela 2: Resultados das campanhas de monitoramento hidrogeológico.

ID- POÇO	Município	Carga hidráulica (m)		
		1º Campanha	2º Campanha	3º Campanha
Poço Bairro Novo*	Camaçari	-31.79	-30.62	-31.32
Poço 17	Camaçari	-15.42	-14.69	-15.6
Poço 4A Jordão	Camaçari	-13.41	-14.82	2.41
Poço 07 Morro da Manteiga	Camaçari	-47.36	-47.36	-47.84
Poço Pião Manso	Camaçari	-3.00	-4.18	-5.43
Poço 1 Jordão*	Camaçari	-15.56	-18.68	-17.27
Poço 6 Machadinho Norte	Camaçari	-2.47	-2.78	-2.47
Poço 1 Machadinho Norte*	Camaçari	2.65	3.1	4.50
Poço 10 Machadinho norte	Camaçari	-17.84	-16.2	-
Poço 05 Machadinho Sul	Camaçari	-47.87	-47.23	-45.12
Poço 16	Camaçari	-18.47	-17.82	-18.51
Poço 4 Parafuso	Camaçari	7.73	7.52	7.81
Poço 6*	Camaçari	-47.59	-50.56	-52.07
PA – 08	Camaçari	-54.1	-35.5	-
Poço 2A Jordão	Camaçari	-19.89	-20.42	-20.74
Poço 5*	Candeias	22.86	22.94	22.77
Poço 2*	Candeias	16.41	15.48	18.13
Poço 3	Candeias	17.46	17.6	17.19
Poço 10*	Dias d'Ávila	-29.51	-28.07	-27.68
Biribeira II	Dias d'Ávila	2.46	0.96	0.43
Poço 6*	Dias d'Ávila	-14.12	-21.63	-22.07
Poço 8	Dias d'Ávila	-5.14	-3.79	-1.44
Futurama I*	Dias d'Ávila	-2.3	-7.27	-6.45
Poço 6	Mata de São João	15.95	15.91	15.93
Amado Bahia*	Mata de São João	8.90	-21.44	-12.76
Monte Líbano	Mata de São João	-2.84	-3.29	-3.38
Poço 14*	São Sebastião do Passé	-71.48	-71.60	-71.05
Poço 16	São Sebastião do Passé	-47.04	-46.47	-45.67
Poço 18	São Sebastião do Passé	-69.35	-68.91	-62.78

*Poços com monitoramento automatizado de nível d'água.

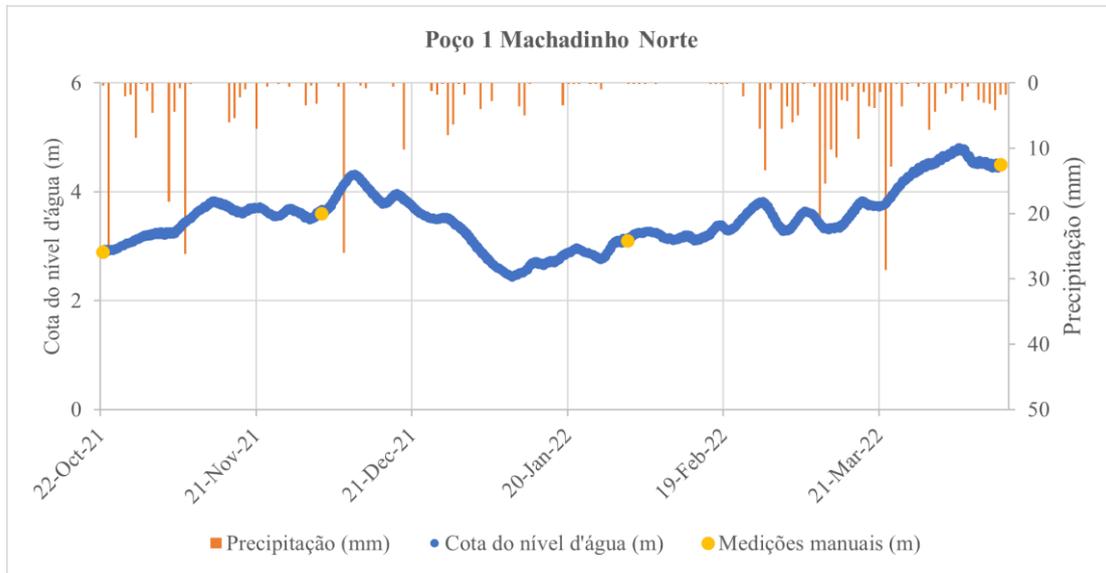


Figura 4: Série histórica de monitoramento automatizado de carga hidráulica no Poço 1 Machado Norte.

3. Monitoramento hidroquímico: Esta etapa do monitoramento envolveu a realização de duas campanhas de coleta de amostras de água subterrânea de 15 poços tubulares selecionados e análise destas amostras em laboratório para todos os parâmetros de potabilidade de acordo com a Resolução N. 396 (CONAMA, 2008), com o objetivo de caracterizar a hidroquímica do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião na área de estudo. A primeira campanha de monitoramento hidroquímico foi realizada no final período chuvoso e a segunda campanha foi realizada no final do período seco. Todo o processo de coleta e análise das amostras para parâmetros físico-químicos foi realizado em conformidade com as normas técnicas especificadas em USEPA (2017), enquanto o acondicionamento e transporte das amostras coletadas seguiram procedimentos da NBR 9898/ (ABNT, 1987). Com o resultado das análises das duas campanhas, foi possível concluir que: a) Não houve diferenças significativas nos resultados entre as duas campanhas de monitoramento hidroquímico; b) Todas as concentrações detectadas nas amostras analisadas, nas duas campanhas hidroquímicas conduzidas, encontram-se abaixo dos limites estabelecidos pela Resolução N. 396 (CONAMA, 2008), para consumo humano; c) As águas subterrâneas na área de estudo apresentam baixas concentrações de sólidos dissolvidos, podendo ser classificadas como águas doces; e d) As águas subterrâneas associadas ao Sistema Aquífero Marizal São Sebastião são predominantemente sódicas-cloretadas, com ocorrências pontuais de águas sódicas-bicarbonatadas. Todos os poços apresentaram a mesma classificação nas duas campanhas conduzidas, não apresentando diferenças significativas na relação entre ânions e cátions (Figura 5).

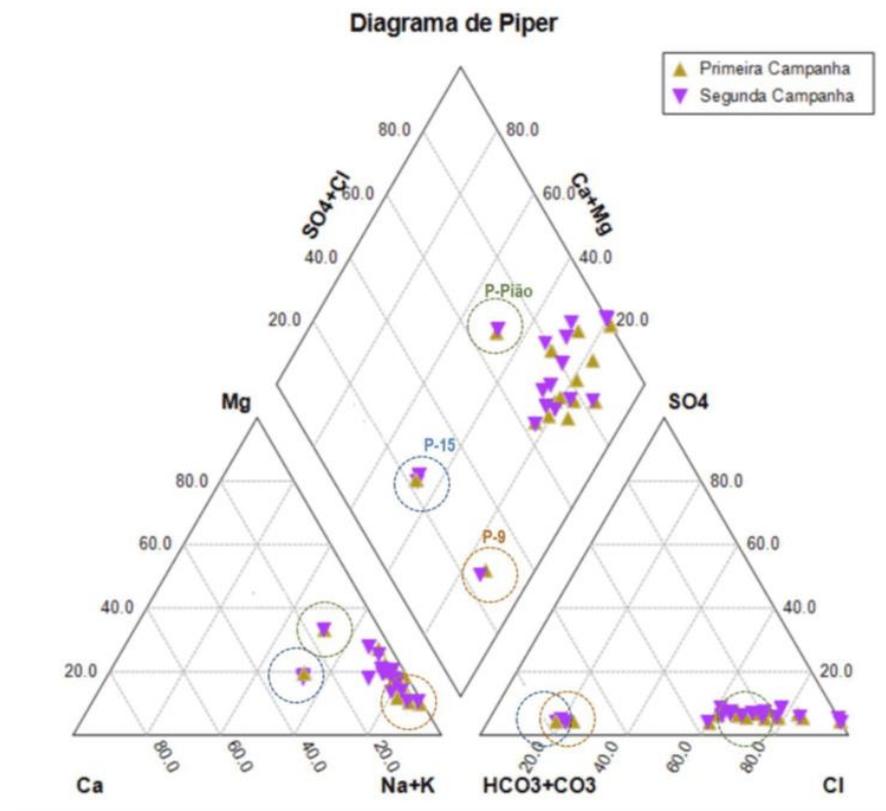


Figura 5: Diagrama de Piper para classificação de águas subterrâneas.

TERCEIRA ETAPA: MODELAGEM GEOLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA

A fase de modelagem foi subdividida em três etapas: 1) Desenvolvimento do modelo geológico 3D; 2) Desenvolvimento do modelo hidrogeológico conceitual; e 3) Desenvolvimento do modelo numérico de fluxo. Os resultados de cada etapa serão descritos a seguir.

1. Desenvolvimento do modelo geológico 3D: O modelo geológico foi construído utilizando o *software* Geomodeller, desenvolvido originalmente pelo serviço geológico francês. O modelo compreende uma área retangular com cerca de 52 km x 64 km (3.328 km²), a qual circunscreve a área de estudo definida para o projeto. Verticalmente, a base do modelo foi definida considerando uma profundidade máxima de 2 km abaixo da superfície topográfica, o que coincide com o alcance vertical das seções hidrogeológicas regionais obtidas para a região de interesse, que constituíram a principal fonte de informação utilizada no desenvolvimento do modelo geológico 3D. O principal dado utilizado na construção do modelo geológico foram as seção geológicas regionais desenvolvidas por Valadão Neto (2006) ilustradas na Figura 6, associada a mapas geológicos locais e regionais da Bacia do Recôncavo propostos por Magnavita, Silva e Sanches (2005) e por Gonçalves, Moreira e Borges (2008). Adicionalmente, foram compilados os dados de perfis geológicos de 84 poços exploratórios profundos e 108 poços tubulares rasos.

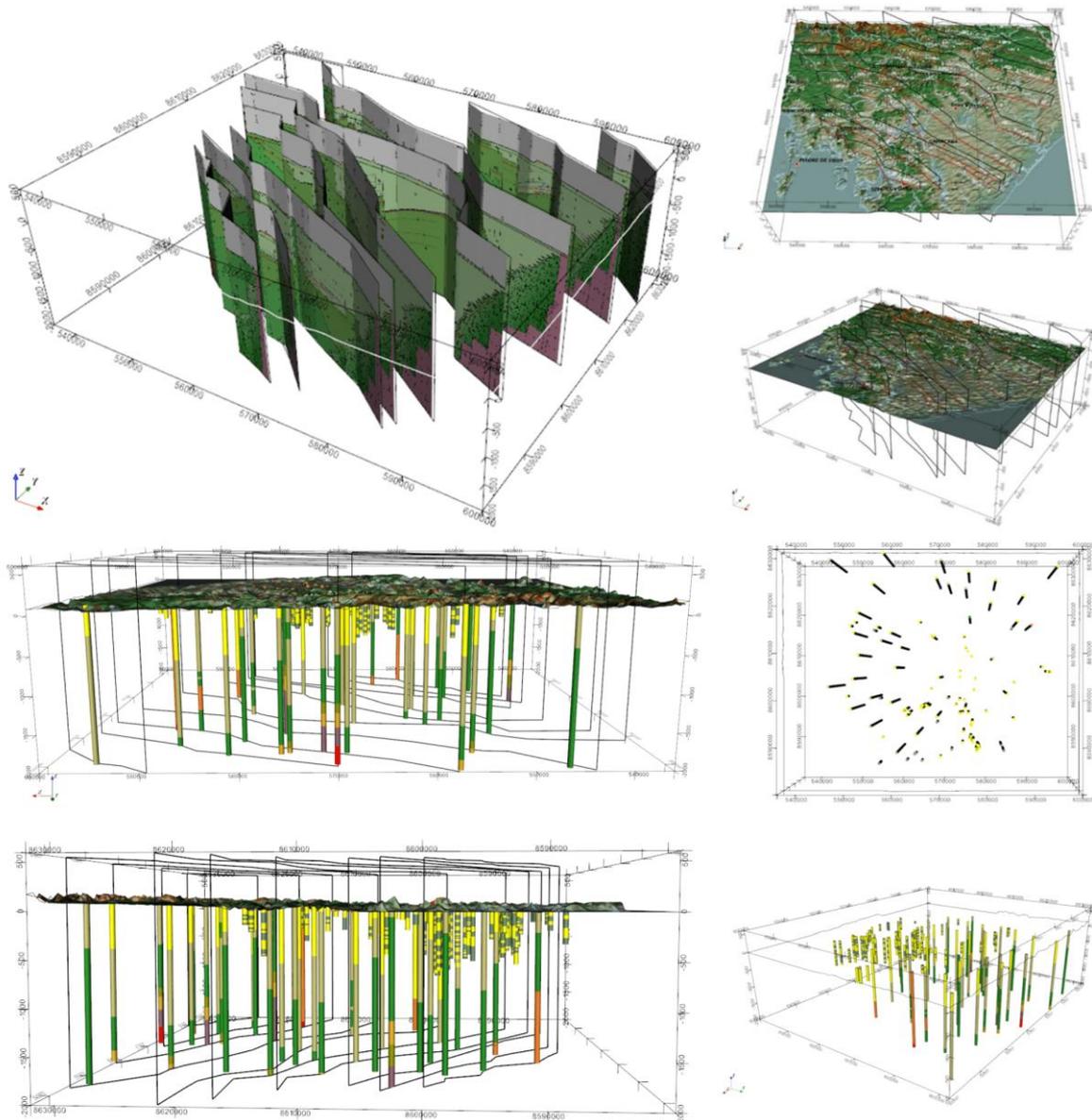


Figura 6: Seções geológicas regionais e poços tubulares utilizados na construção do modelo geológico 3D (Fonte: Adaptado de PETROBRAS/UFBA, 2013).

Como resultado foram discretizadas 10 unidades litoestratigráficas no domínio do modelo, tendo as mesmas sido individualizadas com base em suas propriedades físicas diferentes entre si. A ordem estratigráfica das unidades foi respeitada seguindo a carta estratigráfica da bacia de Silva *et al.* (2007). A base do modelo geológico é constituída pelo embasamento cristalino na região representada pelo Complexo Salvador, seguido das formações Salvador, Aliança e Sergi e Itaparica. A Formação Candeias e o Grupo Ilhas foram mantidos indivisos pela falta de dados consistentes de sua ocorrência na bacia. A Formação São Sebastião, por sua vez, foi subdividida em níveis arenosos e argilosos, principal característica desta unidade que, juntamente com os basculamentos causados pelas falhas de alto ângulo, imprimem a característica de semi-confinamento a confinamento deste sistema aquífero. As formações Marizal e Barreiras também foram consideradas no modelo geológico, o empilhamento definido para as unidades geológicas no modelo é apresentado abaixo na Figura 7, junto com o modelo geológico finalizado.

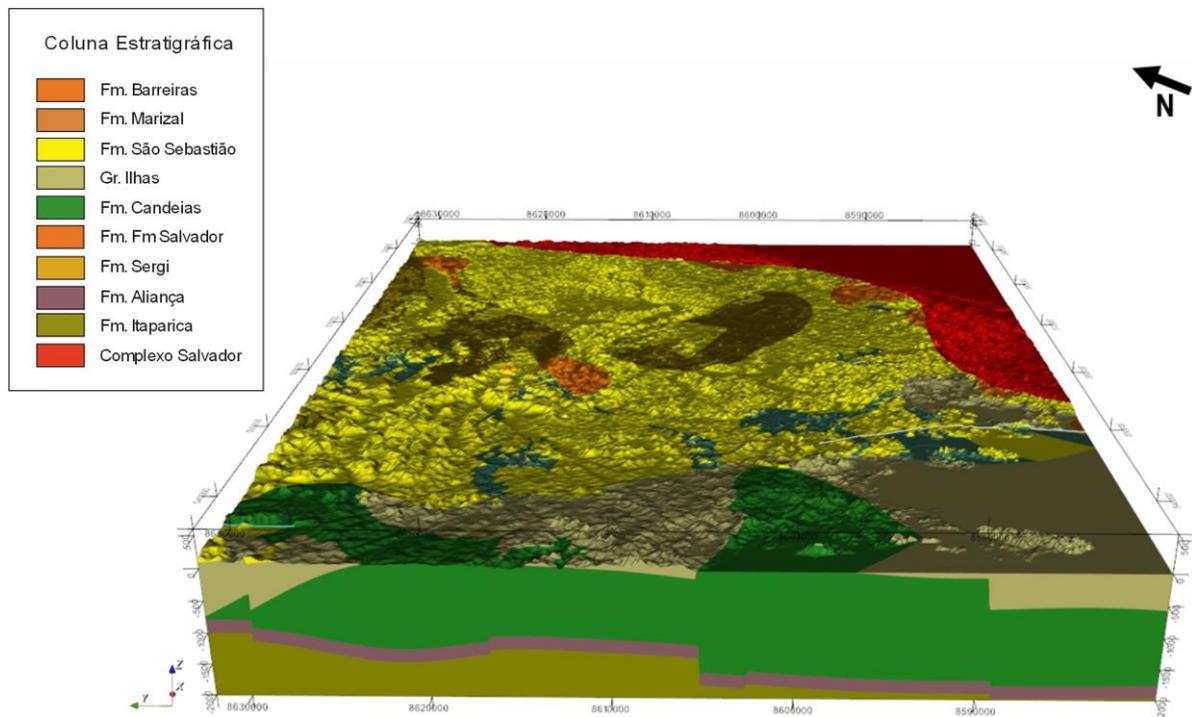


Figura 7: Modelo geológico 3D da área de estudo.

2. Modelo hidrogeológico conceitual: O modelo conceitual proposto é contemplou os seguintes aspectos: a) definição das unidades hidroestratigráficas; b) obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos; c) avaliação do regime de fluxo subterrâneo; e d) cálculo do balanço hídrico. Todos os aspectos serão descritos a seguir.

- a. Definição das unidades hidroestratigráficas: Foram definidas 6 unidades hidroestratigráficas com base no modelo geológico 3D. A seguir é feita uma breve descrição das unidades.

Os Depósitos Quaternários correspondem a pacotes de sedimentos inconsolidados associados a fenômenos policíclicos climáticos e de variações do nível do mar nos últimos 2,58 milhões de anos (do Pleistoceno até os dias de hoje). Geologicamente, consistem em depósitos sedimentares de origens diversas, incluindo: i) flúvio-lagunar, ii) aluvionar; ii) leques aluviais coalescentes; iv) depósitos marinhos pleistocênicos e holocênicos; e v) campos de dunas.

Ocorrem na área de estudo três formações sedimentares de idade Terciária e de composição predominantemente arenosa, as formações Barreiras, Marizal e São Sebastião. Estas formações constituem aquíferos, uma vez que apresentam elevada porosidade efetiva e elevada condutividade hidráulica. Na área de estudo, a quase totalidade dos poços tubulares utilizados para captação de água subterrânea estão instalados nestas formações, principalmente nos arenitos da Formação São Sebastião. As formações Marizal e Barreiras, embora constituam aquíferos, apresentam pouca expressão na área de estudo, tanto em termos de cobertura espacial quanto de espessura, que atinge no máximo 100m, considerando as zonas não-saturada e saturada. Cálculos volumétricos realizados a partir do modelo geológico indicaram que o volume da Formação Marizal na área de estudo corresponde a aproximadamente 2% do volume ocupado pela Formação São Sebastião. O volume relativo à Formação Barreiras é estimado em apenas 0,3% do volume ocupado pela Formação São Sebastião. Nesse sentido, no contexto do estudo hidrogeológico desenvolvido, estas três formações foram agrupadas em um único aquífero, denominado **Sistema Aquífero Marizal São Sebastião**.

O Sistema Aquífero Marizal São Sebastião é caracterizado por uma intercalação de camadas de arenitos porosos, que correspondem ao aquífero propriamente dito, com múltiplas camadas de folhelhos, que separam fisicamente as camadas de arenito. A depender da continuidade lateral das camadas de folhelho, os arenitos deste sistema aquífero podem se apresentar como aquíferos livres, semiconfinados ou confinados.

O **Aquífero Ilhas** é subjacente ao Sistema Aquífero Marizal São Sebastião. Ela aflora principalmente no limite oeste da área de estudo, em uma área de 271 km², atingindo uma profundidade de até 1.100 metros. No que diz respeito à geologia do Grupo Ilhas (indiviso), segundo Magnavita, Silva e Sanches (2005) a diminuição da taxa de subsidência, possibilitou a progradação (avanço) de frentes deltaicas, preenchendo os 13epocentro (ponto de máxima deposição em uma bacia sedimentar) com arenitos, siltitos, folhelhos e, raramente, carbonatos. Ainda segundo esses autores os arenitos finos a muito finos do Grupo Ilhas correspondem a barras de frentes deltaicas com geometria sigmoidal, formadas por laminações cavalgantes.

O comportamento hidrogeológico do aquífero Ilhas é fortemente controlado pela geologia, sendo possível explorar água subterrânea somente em regiões onde ocorrem os arenitos deltaicos, o que faz com que esta unidade seja pouco produtiva e aproveitável apenas localmente.

O **Aquífero Candeias** aflora em uma área bastante restrita na área de estudo, localizada em sua porção W-NW e ocupando aproximadamente 15 km², ou 1% da área total. De maneira geral, a Formação Candeias é a principal rocha geradora da Bacia do Recôncavo, constituída por folhelhos lacustres, intercalados por calcários de pequena espessura e, raramente, arenitos. Esta unidade é interpretada como um aquífero. Dado seu posicionamento estratigráfico abaixo dos sedimentos do Grupo Ilhas, esta unidade não foi considerada no modelo hidrogeológico conceitual ou numérico, exceto para definir o seu limite vertical inferior.

O **Aquífero Salvador** não aflora na área de estudo, porém em escala regional possui papel importante na dinâmica hídrica subterrânea. Geologicamente é composta por conglomerados polimíticos, clastos sustentados, com fragmentos angulosos e esfericidade baixa. Localmente os conglomerados podem ser monomíticos ou sustentados por matriz. Ocorrem arenitos líticos de coloração verde a rósea subordinados, assim como folhelhos e argilitos de tons cinza amarelados, esverdeados e/ou róseos.

O **Aquífero Fissural** corresponde a rochas metamórficas estabilizadas em médio a alto grau, que afloram em aproximadamente 79 km² ou 5% da área de estudo. Segundo Nascimento (2008), no Alto Cristalino de Salvador as águas subterrâneas são armazenadas em aquíferos do tipo granular e fissural, representado pelas coberturas do regolito (e.g. manto de alteração das rochas metamórfica) e rochas cristalinas. Em decorrência do caráter textural dessas coberturas ser predominantemente areno-argiloso e principalmente devido a sua pouca espessura, formam aquíferos limitados do ponto de vista do armazenamento e da capacidade de produção de seus poços, podendo alcançar vazões máximas da ordem 4 m³/h.

- b. Parâmetros hidrodinâmicos: No presente estudo foram compilados dados de parâmetros hidrodinâmicos obtidos a partir de ensaios realizados em 307 poços tubulares ou de monitoramento, distribuídos em três unidades hidroestratigráficas: Aquífero Depósitos Quaternários, Sistema Aquífero Marizal São Sebastião e Aquífero Fissural (Complexo Granulítico). A Tabela 3 a seguir detalha os valores de transmissividade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento dos principais aquíferos na área de estudo.

Tabela 3: Compilação dos parâmetros hidrodinâmicos na área de estudo.

Unidade geológica	Condutividade hidráulica (m/s)	Transmissividade (m ² /s)	Coefficiente de armazenamento	Referência
Depósitos Quaternários	$3,0 \times 10^{-4}$	-	-	SWS (2014)
Aquífero Barreiras	$1,9 \times 10^{-6}$ a $6,2 \times 10^{-6}$	-	-	Nascimento (2008)
Sistema Aquífero Marizal	1×10^{-5} a $2,1 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-2}$ a $2,8 \times 10^{-5}$	-	Peixinho (2016)
Sistema Aquífero São Sebastião	$9,21 \times 10^{-7}$ a $6,2 \times 10^{-5}$	$1,9 \times 10^{-2}$ a $1,4 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^{-4}$ a $1,5 \times 10^{-3}$	Peixinho (2016)
	$5,0 \times 10^{-5}$	-	-	SWS (2014)
	$6,8 \times 10^{-7}$ a $2,0 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-5}$ a $3,8 \times 10^{-2}$	-	WST (2019)
	$1,1 \times 10^{-5}$ a $2,0 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-4}$ a $7,5 \times 10^{-3}$	$6,2 \times 10^{-3}$	WST (2022)
Sistema Aquífero Ilhas	$2,0 \times 10^{-6}$ a $3,0 \times 10^{-6}$	-	-	SWS (2014)
Aquífero Fissural	$4,7 \times 10^{-6}$ a $4,6 \times 10^{-8}$	$2,5 \times 10^{-4}$	-	Nascimento (2008)

- c. Avaliação do regime de fluxo subterrâneo: Para a avaliação do regime de fluxo subterrâneo foi desenvolvido um mapa potenciométrico para a área de estudo. Este mapa foi elaborado a partir de dados de medição de nível d'água em poços tubulares existentes na região, tendo sido considerados também os principais rios da área de estudo que, conforme verificado durante o monitoramento de vazão realizado nas etapas anteriores, constituem zonas de descarga do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião.

Neste mapa se verifica que há uma direção principal de fluxo da água subterrânea, de NW para SE, em sentido à linha de costa. O gradiente hidráulico médio ao longo da principal direção de fluxo é bastante suave, da ordem de 0,0011 (~0,1%). Verifica-se também uma área com rebaixamento mais pronunciado, no município de Camaçari/BA, que abrange principalmente a zona urbana do município. A Figura 8 ilustra o mapa potenciométrico da área de estudo.



Figura 8: Mapa potenciométrico da área de estudo.

- d. Cálculo do balanço hídrico: O balanço hídrico é um método analítico que visa equalizar o fluxo total de entrada de água em uma bacia hidrográfica ou aquífero com o fluxo total de saída em condições estacionárias (sistema em equilíbrio). A seguir é apresentado os mecanismos de entrada e saída de água do Sistema aquífero São Sebastião. O principal mecanismo de entrada de água é a recarga do aquífero. A principal forma de **recarga** dos aquíferos na área de estudo se origina da precipitação direta sobre o solo. O cálculo da recarga total na área de estudo foi feito a partir de parâmetros climáticos como de precipitação, evapotranspiração e temperatura, além de características do meio físico como litologia, solo e declividade. A partir desta etapa, chegou-se a um valor de recarga total na área de estudo de 190 mm/ano (38.735 m³/h). Esta vazão de recarga total corresponde à reserva hídrica renovável, ou seja, a vazão média que sustenta os níveis d'água no aquífero e permite que sua exploração ocorra sem que haja um rebaixamento mais pronunciado. A Figura 9 mostra a recarga média mensal na área de estudo.

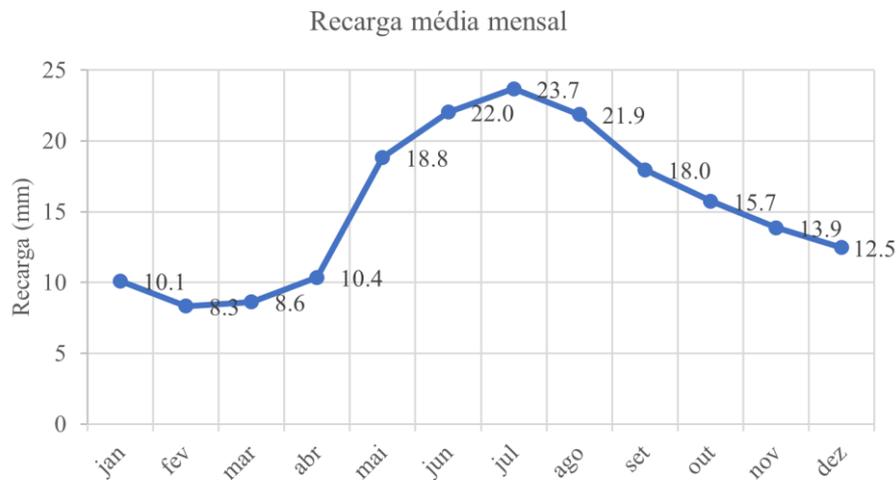


Figura 9: Recarga média mensal na área de estudo.

Um segundo mecanismo de entrada de água na área de estudo se origina do **fluxo lateral** proveniente, principalmente, do próprio aquífero São Sebastião, pelo limite norte da área de estudo, e pelos sedimentos do Grupo Ilhas, pelo limite oeste da área de estudo. Esta contribuição foi estimada utilizando-se a Lei de Darcy, dada pela equação $Q = K \cdot i \cdot A$, onde Q é a vazão de entrada, “ K ” é a condutividade hidráulica do aquífero, “ i ” é o gradiente hidráulico e “ A ” é área da seção por onde ocorre a passagem da água subterrânea (extensão do limite lateral da área de estudo multiplicado pela espessura do aquífero). Os parâmetros utilizados para realizar esta estimativa são resumidos a seguir na Tabela 4.

Tabela 4: Resumo da estimativa de entrada de água na área de estudo por fluxo lateral.

Unidade hidrogeológica	Condutividade hidráulica (m/s)	Gradiente hidráulico (m/m)	Área da seção transversal (m ²)	Vazão (m ³ /dia)
Aquífero São Sebastião (limite norte da área de estudo)	$5,5 \times 10^{-5}$	0,0011	55km x 500m = 27.500.000 m ²	143.748
Grupo Ilhas (limite oeste da área de estudo)	$1,0 \times 10^{-6}$	0,0011	25km x 500m = 12.500.000 m ²	1.188
Total				144.936

Conforme indicado acima, assumiu-se uma espessura total para os aquíferos de 500 metros, o que leva em consideração o fato de que há múltiplas camadas de folhelhos, no caso do aquífero São Sebastião. Os valores de condutividade hidráulica são estimativas do valor médio para as duas unidades hidrogeológicas. Naturalmente trata-se de uma estimativa com uma margem de incerteza significativa, mas ao mesmo tempo fornece uma ordem de magnitude para estas entradas de água subterrânea na área de estudo por fluxo lateral.

Há dois mecanismos principais pelos quais ocorre a saída de água subterrânea do meio hidrogeológico na área de estudo: a captação de água por meio de poços tubulares e a descarga dos aquíferos superficiais para os principais rios da região. Em relação ao primeiro mecanismo, este é representado na sua quase totalidade por poços tubulares que captam água do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião. A vazão total captada dos poços tubulares que se encontram em operação pode ser entendida como a demanda total de água subterrânea na área de estudo. A partir dos levantamentos e análises realizadas, chegou-se a um total estimado de 356 poços em operação dentro da área de estudo. Com base neste total e levando-se em consideração a vazão e o regime de operação obtidos para cada poço, foi calculada a exploração total, dentro da área de estudo, equivalente a 423.323 m³/d ou aproximadamente 17.640 m³/h. A Tabela 5 detalha o balanço hídrico conceitual da área de estudo.

Tabela 5: Balanço hídrico conceitual da área de estudo.

Componente	Entrada		Saída	
	m ³ /d	m ³ /h	m ³ /d	m ³ /h
Recarga	929.640	38.735	-	-
Fluxo lateral	144.936	6.039	-	-
Poços tubulares	-	-	423.363	17.640
Fluxo de base para rios	-	-	651.213	27.134
TOTAL	1.074.576	44.774	1.074.576	44.774

3. Modelo numérico de fluxo: O trabalho de modelagem numérica deve seguir algumas etapas, que fazem parte do protocolo padrão de modelagem numérica. Estas etapas são: a) Seleção do código numérico; b) Construção do modelo e da malha numérica; c) Definição das propriedades e condições de contorno; d) Calibração do modelo; e e) Simulações de cenários futuros. Todas as etapas serão detalhadas a seguir.

a) Seleção do código numérico: O modelo numérico de fluxo de que trata este relatório foi desenvolvido utilizando-se o *software* Feflow (Finite Element FLOW), que utiliza a análise de elementos finitos para resolver numericamente a equação do fluxo subterrâneo.

b) Construção do modelo e da malha numérica e a área de abrangência: A área de abrangência (domínio) do modelo hidrogeológico numérico é geralmente definido com base nas barreiras naturais do fluxo das águas subterrâneas, como os divisores de águas subterrâneas, o mar (exutório do sistema) ou barreiras impermeáveis ou semipermeáveis. Os limites do modelo numérico são representados, a sudeste, pelo Oceano Atlântico, e a sudoeste, pela Baía de Todos os Santos. A oeste, o modelo é limitado pelo contato da Formação São Sebastião com o Grupo Ilhas, embora a porção sudoeste do modelo inclua os sedimentos do Grupo Ilhas. A norte há uma continuidade do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião, enquanto o limite leste coincide parcialmente com o contato entre a Formação São Sebastião e o Complexo Granulítico.

Já os limites verticais do modelo foram definidos entre a superfície topográfica (topo do modelo) e o contato das rochas do Grupo Ilhas com o topo da Formação Candeias (base do modelo). Com isso, o modelo numérico desenvolvido apresenta uma espessura variável, que pode chegar a 2.000 metros no setor oriental da área modelada.

As rochas ígneas (Complexo Granulítico) que ocorrem na faixa litorânea correspondente à borda leste da área de estudo foram representadas no modelo numérico, porém definidas como uma área inativa, devido ao contraste de condutividade hidráulica entre estas rochas e os arenitos da Formação São Sebastião.

Uma vez definido o domínio do modelo, foi aplicada uma malha numérica, cujo desenho considerou maior refinamento (discretização) ao longo dos corpos hídricos superficiais e no entorno dos poços tubulares conhecidos. Após sua construção, o modelo numérico ficou representado com 44 camadas numéricas, 2,5 milhões de elementos, aproximadamente 1.800 km² de área modelada e profundidade máxima de 2.000 metros. A Figura 10 ilustra a discretização da malha numérica.

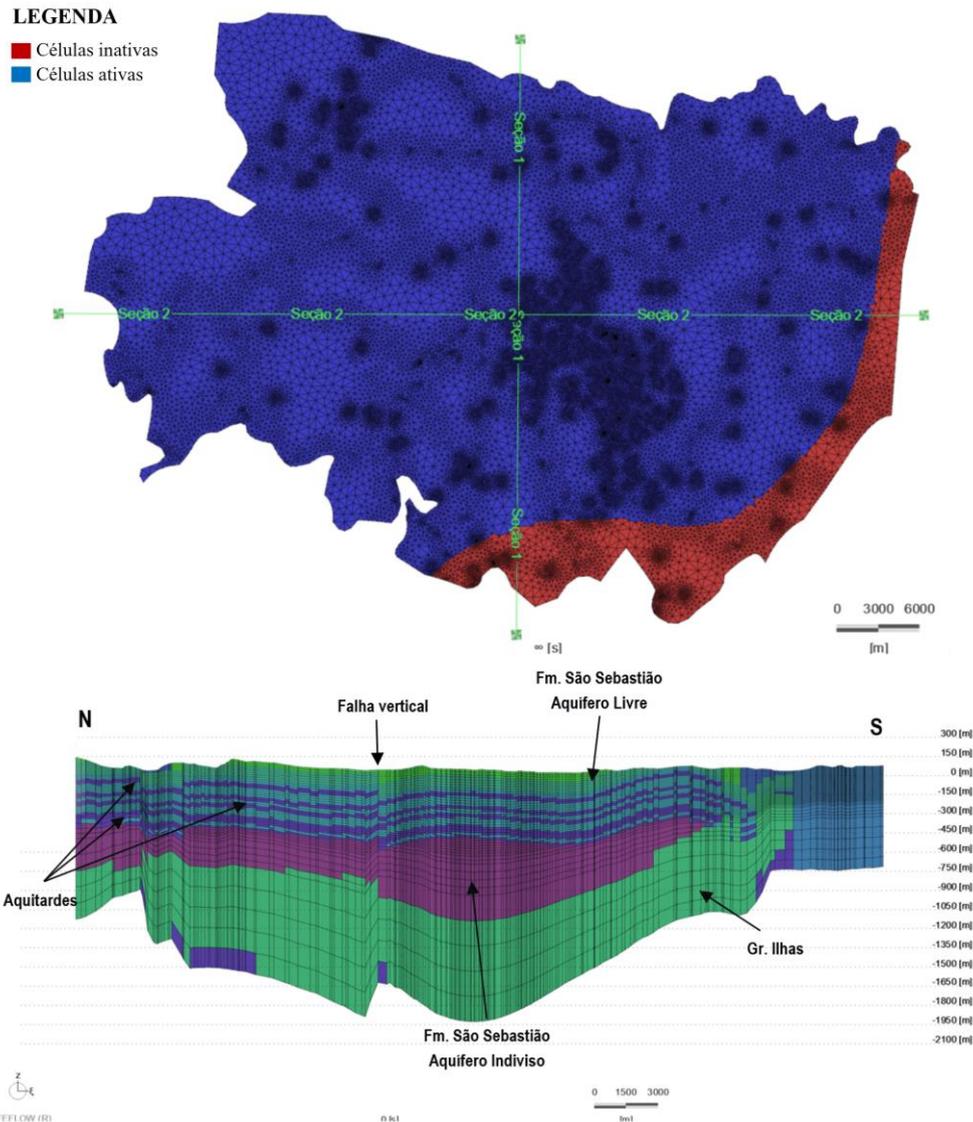


Figura 10: Discretização horizontal da malha numérica, indicando os elementos inativos do modelo e Seção transversal norte-sul gerada a partir do modelo numérico de fluxo (exagero vertical de 6 vezes).

- c) Definição das propriedades e condições de contorno: As propriedades e as condições de contorno representam os parâmetros de entrada do modelo numérico como: Condutividade hidráulica (Definido a partir de ensaios de aquífero e teste de vazão em poços tubulares na área de estudo), recarga (calculada a partir de parâmetros climáticos e características físicas na área de estudo, foi estimada em 189 mm/ano), rios e córregos (representados pela condição de contorno do Tipo 1, isto é, com carga hidráulica especificada ou carga constante (*Hydraulic-head-BC*, com restrição de fluxo), represas e linha de costa (foram atribuídas as represas e linha de costa cargas constantes, com restrições de fluxo, de modo que elas podem se comportar como zonas de recarga do aquífero e ceder água para o Sistema Aquífero Marizal São Sebastião conforme a demanda em seu entorno, porém sem se tornar uma fonte infinita de água), poços de bombeamento (representada como condição de contorno Tipo II Neumann - fluxo especificado com elementos discretos altamente condutivos), transferência de fluido (aplicada especificamente: nos limites norte e noroeste do modelo, com cargas hidráulicas estimadas com base no mapa potenciométrico desenvolvido para a área de estudo; e nos limites nordeste e sul) e condição de fluxo zero (aplicada em contatos litológicos entre aquíferos e unidades pouco permeáveis e/ou divisores de água superficial).
- d) Calibração: A calibração do modelo numérico é um processo de ajuste gradual dos parâmetros de entrada, visando obter a melhor correspondência possível entre as condições hidrogeológicas

simuladas numericamente (cargas hidráulicas e fluxos) e aquelas observadas no sistema hidrogeológico real. A premissa por trás do processo de calibração consiste no entendimento de que, se o modelo é capaz de reproduzir condições hidrogeológicas observadas historicamente em uma determinada área, então ele será capaz de projetar adequadamente as condições futuras de fluxo nesta mesma área.

O modelo numérico de fluxo é considerado calibrado quando este reproduz, dentro de uma margem de erro aceitável, as cargas hidráulicas, gradientes hidráulicos e direções de fluxo do sistema natural. Ao mesmo tempo, os parâmetros hidrodinâmicos calibrados e as condições de contorno utilizadas devem ser consistentes com o modelo conceitual previamente estabelecido.

A calibração do modelo numérico de fluxo em regime permanente foi realizada considerando principalmente as taxas de recarga e os valores de carga hidráulica medidos em 87 poços. A média quadrática dos erros (RMS) obtidas foi de 11,2 metros, enquanto a média quadrática dos erros normalizada obtida, que leva em consideração a variação entre a maior e a menor carga medidas, foi de 9,6%. De maneira geral, um valor de NRMS próximo ou abaixo de 10% é considerado adequado no que diz respeito à calibração das cargas hidráulicas em um modelo numérico de fluxo. A Figura 11 mostra o gráfico de calibração do modelo numérico e a Figura 12 ilustra a distribuição das cargas hidráulicas no modelo calibrado.

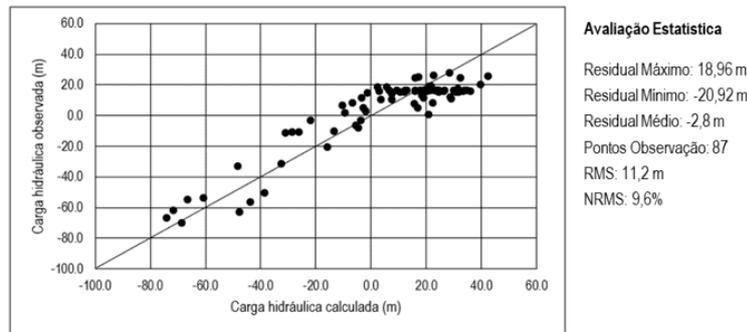


Figura 11: Cargas hidráulicas observadas versus calculadas no processo de calibração

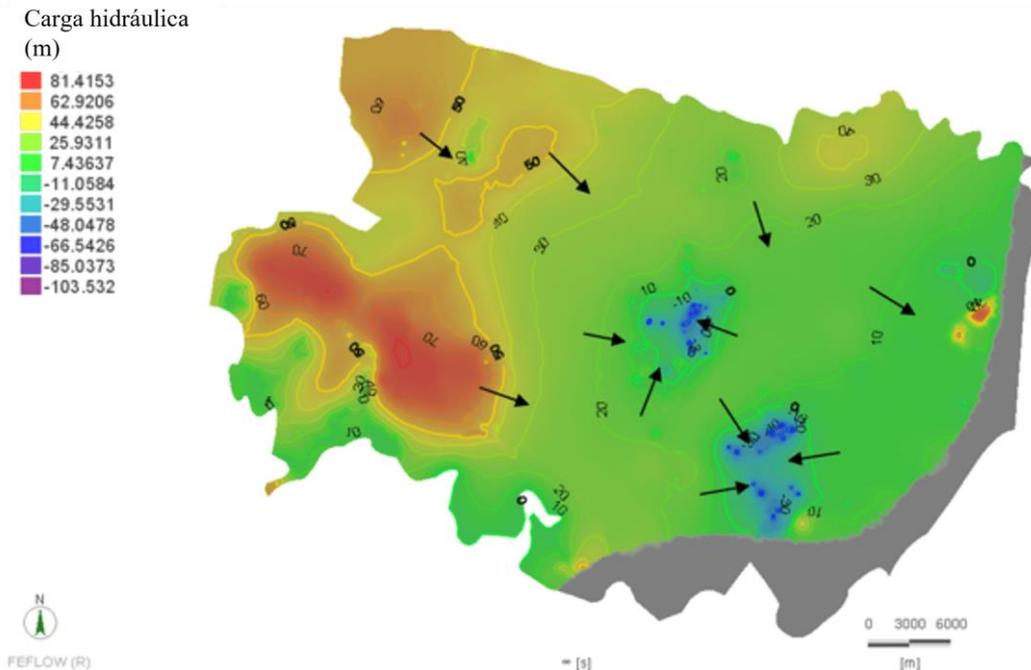


Figura 12: Distribuição das cargas hidráulicas e linhas de fluxo do modelo calibrado (equipotenciais em metros)

- e) Simulações de cenários futuros: Essa etapa teve por objetivo avaliar a resposta dos aquíferos de interesse a um aumento na captação de água subterrânea em função do aumento de demanda projetado no Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara (PARMS). Este plano (BAHIA, 2015) teve por objetivo geral apresentar a situação do abastecimento de água e realizar projeções de consumo quinquenais até 2040, propondo ações com viabilidade técnica, econômica e social, de modo a assegurar o suprimento de água neste período de 25 anos. Nessa etapa, foram consideradas as demandas hídricas projetadas para os anos de 2030 e 2040.

Para o cálculo da demanda hídrica no ano de **2030**, foi considerado um aumento de aproximadamente 60% em relação à vazão de exploração calculada para 2022, conforme previsto no PARMS. Para atender a vazão de exploração prevista para 2030, foram simulados 422 poços (isto é, 66 poços adicionais em relação ao cenário atual), sendo 168 para uso humano e 254 para uso industrial, cuja somatória de vazões é equivalente a 29.300 m³/h ou aproximadamente 8,1 m³/s. Este cenário resultou principalmente em um incremento, em relação ao cenário atual, na área afetada pelo bombeamento de água subterrânea no município de Camaçari/BA, conforme mostra a distribuição de cargas hidráulicas simuladas para o ano de 2030. Esta intensificação do rebaixamento pode ser verificada também em termos do rebaixamento adicional gerado pelo bombeamento adicional.

Para o cálculo da demanda hídrica em **2040**, foi considerado o aumento previsto no PARMS, de aproximadamente 78% em relação à vazão de exploração calculada para 2022. Em relação ao cenário de 2030, esse incremento é da ordem de 12%. Para atender a vazão de exploração prevista para 2040 foram simulados no total 439 poços (17 a mais do que no cenário 2030), sendo 181 para uso humano e 258 para uso industrial. A vazão total de exploração simulada foi de aproximadamente 32.000 m³/h.

Em comparação aos resultados obtidos para o cenário 2030, verifica-se uma diferença relativamente pequena, que consiste na expansão dos cones de rebaixamento simulados, principalmente no município de Camaçari/BA. Este resultado pode ser verificado também sob a forma de rebaixamento adicional gerado em relação ao cenário atual.

CONCLUSÕES

O estudo descrito neste artigo atendeu aos objetivos propostos, uma vez que aprofundou o entendimento sobre a hidrogeologia na região da borda leste da Bacia do Recôncavo, em especial sobre o Sistema Aquífero Marizal São Sebastião. A geração dos novos conhecimentos permitirá o aprimoramento da gestão sustentável deste importante manancial, em especial para a empresa responsável pelo abastecimento regional público de água potável (a Embasa) que obteve subsídios técnicos e ferramentas de apoio para um melhor gerenciamento do uso deste recurso hídrico.

As conclusões mais relevantes do recorte do estudo, feito neste artigo, estão destacadas a seguir.

O principal reservatório de águas subterrâneas apropriadas ao consumo humano na área de estudo é o Sistema Aquífero Marizal São Sebastião, composto pela coalescência dos sedimentos da Formação São Sebastião, da Formação Marizal e do Grupo Barreiras, destacando-se que os arenitos pertencentes à Formação São Sebastião armazenam mais de 95% dos recursos hídricos subterrâneos disponíveis. De forma periférica, os sedimentos do Grupo Ilhas e as rochas fraturadas do Complexo Granulítico, ambos aflorantes na área de estudo, podem constituir localmente aquíferos aproveitáveis por poços tubulares, porém com vazões entre uma e duas ordens de magnitude abaixo das vazões obtidas por poços instalados no Sistema Aquífero Marizal São Sebastião.

Em termos de reservas hídricas subterrâneas associadas à área de estudo, a reserva renovável calculada é da ordem de 392.500.000 m³/ano, equivalente a uma vazão de 44.800 m³/h, enquanto a reserva explorável é equivalente a 75% da reserva renovável ou 33.800 m³/h. Já a reserva permanente, calculada unicamente para o Sistema Aquífero Marizal São Sebastião, foi calculada em 1,28 x 10¹¹ m³ ou aproximadamente 12.800 km³ de água subterrânea. Esta reserva permanente, que constitui a totalidade de água doce armazenada no Sistema Aquífero Marizal São Sebastião, é equivalente a aproximadamente 326 vezes a reserva renovável anual calculada para a área de estudo.

A melhor estimativa obtida quanto ao número de poços tubulares em operação na área de estudo para o ano de 2022 é de 356, com uma exploração total da ordem de 17.700 m³/h, o que resulta em uma vazão média por poço de aproximadamente 50 m³/h. Destes 356 poços então em operação, 56 poços são de propriedade da Embasa e utilizados para abastecimento público, apresentando uma vazão conjunta de aproximadamente 5.800 m³/h, o que resulta em uma vazão média por poço ligeiramente acima de 100 m³/h.

A demanda total conhecida atualmente representa 52,4% da reserva explorável calculada, de modo que a disponibilidade hídrica subterrânea para a implantação de novas captações seria, em princípio, de aproximadamente 16.100 m³/h. Esta análise indica que, em escala regional, os aquíferos se encontram em um nível de exploração sustentável. No entanto, deve-se considerar a distribuição espacial desta demanda, que se encontra atualmente bastante concentrada no município de Camaçari, que responde por 70% da vazão total explorada na área de estudo.

O trabalho de monitoramento de vazão dos principais rios que cortam a região mostrou que, tanto no caso do Rio Joanes quanto do Rio Jacuípe os trechos monitorados são efluentes na maior parte do ano hidrológico, isto é, os rios recebem água do aquífero como fluxo de base. As exceções correspondem, em geral, a períodos de maior precipitação, em que a relação hidrodinâmica entre rio e aquífero, devido à maior carga hidráulica no primeiro, em função das chuvas. A implicação desta observação é que estes dois rios correspondem a zonas de descarga do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião, algo que foi considerado tanto no modelo hidrogeológico conceitual quanto numérico. Já o terceiro rio monitorado, o Rio Pojuca, se mostrou influente (contribuiu fluxo para o aquífero) em aproximadamente metade do período de monitoramento, no trecho considerado. Por se situar ligeiramente a norte da área de estudo, este rio não foi representado no modelo hidrogeológico.

Em relação à potenciometria, os dados obtidos permitiram validar a principal direção de fluxo da água subterrânea, que ocorre predominantemente de noroeste para sudeste, em sentido ao Oceano Atlântico. O gradiente hidráulico regional é da ordem de 0,1%. A combinação dos dados obtidos com a rede de monitoramento implementada permitiu a caracterização das zonas que apresentam rebaixamento pronunciado (região da cidade de Camaçari/BA).

As águas subterrâneas associadas ao Sistema Aquífero Marizal São Sebastião na área de estudo são apropriadas ao consumo humano, apresentando baixas concentrações de sólidos dissolvidos e classificadas como águas doces, conforme Resolução CONAMA N. 357/2005. Adicionalmente, do ponto de vista de sua composição hidroquímica, estas águas são classificadas predominantemente como sódicas-cloretadas. Destaca-se que estas conclusões se aplicam fundamentalmente às porções superiores do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião. Os poços monitorados possuem uma profundidade média de 240m (que corresponde também à profundidade média dos poços tubulares na área de estudo para os quais esta informação está disponível), enquanto o poço mais profundo amostrado tem uma profundidade de 400m.

Os resultados obtidos com o modelo numérico de fluxo desenvolvido mostram que o nível de exploração atual do Sistema Aquífero Marizal São Sebastião é sustentável em longo prazo, embora haja uma concentração da exploração deste aquífero no município de Camaçari, tanto na zona urbana de Camaçari quanto no setor oeste do Polo Industrial. Projeta-se uma ampliação do rebaixamento do aquífero nestas regiões, com o aumento da exploração.

Com o aumento da captação de água subterrânea nos cenários futuros (2030 e 2040) definidos pelo PARMS, acentua-se nos aquíferos confinados o rebaixamento atualmente verificado na região de Camaçari. Destaca-se, no entanto, que este acentuamento depende da localização escolhida para a instalação de novos poços. Os resultados obtidos indicam que o aumento na exploração de água subterrânea em regiões de alta demanda poderá provocar situações de superexploração conforme já verificado historicamente.

Pelo exposto acima, pode-se concluir que os resultados obtidos representam um avanço significativo para o aperfeiçoamento da gestão e conservação dos recursos hídricos subterrâneos na região avaliada. Destaca-se que o poder público (a exemplo do órgão ambiental estadual, da Embasa e das prefeituras municipais) terá ferramentas para aprimorar as práticas de aproveitamento sustentável das águas subterrâneas. Nesse sentido, o estudo trouxe recomendações, dentre as quais ressalta-se:

- A operação, manutenção e ampliação gradual da rede de monitoramento hidrogeológico dos poços de propriedade da Embasa, incluindo a aquisição de novos transdutores de pressão visando o monitoramento automatizado de nível d'água. A ampliação deve abranger os poços em operação e ainda os parados e inativos porque desta forma será possível monitorar a variação do nível d'água estático em escala regional, levando em consideração a exploração do sistema aquífero por outros usuários;
- A compilação e análise periódica (com frequência mínima anual) dos dados atualizados de monitoramento gerados, que possibilitará o acompanhamento, de forma sistemática, da variação das condições hidrogeológicas dos sistemas aquíferos;
- A implantação de sistema digital de gerenciamento de dados com base de dados atualizada sobre a exploração de água subterrânea na região, que inclua no mínimo dados hidrológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos. Este sistema deve ter a capacidade de permitir o fácil acesso e a preservação digital dos dados, bem como de realizar checagens de qualidade no momento da

importação dos dados, e de definição de consultas para análises específicas, a exemplo da quantificação da vazão total explorada em determinado período;

- A locação de novos poços tubulares na área de estudo deve estar baseada nas zonas mais favoráveis à implantação de novas captações, do ponto de vista tanto do uso racional da quantidade quanto da manutenção da qualidade da água disponível para os usuários;
- A atualização periódica do modelo hidrogeológico conceitual e numérico desenvolvido no estudo, considerando eventuais alterações no entendimento hidrogeológico local ou regional e visando o aprimoramento da sua capacidade preditiva, a partir da comparação dos resultados projetados com as medições de nível d'água e vazão realizadas em campo. Essa atualização deve ter periodicidade bial, com usos dos novos dados gerados no monitoramento e atualizando os cenários regionais de exploração dos aquíferos.

Ao finalizar este artigo, recomenda-se ainda que os dados, informações e resultados obtidos no estudo possam subsidiar a implementação do instrumento das Área de Proteção de Mananciais com influência na RMS, contribuindo para o estabelecimento dos seus limites, critérios e usos em relação aos aquíferos da Bacia Sedimentar do Recôncavo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9898: preservação e técnicas de amostragem de afluentes líquidos e corpos receptores - procedimento. Rio de Janeiro, 1987. 22 p.
2. BAHIA. Lei Estadual N. 10.431, de 20 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a Política de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade do Estado da Bahia e dá outras providências.
3. BAHIA. Secretaria de Infraestrutura Hídrica e Saneamento (SIHS). Plano de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de Salvador, Santo Amaro e Saubara (PARMS). Salvador: SIHS, 2015. Disponível em: <http://www.sih.ba.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=14>.
4. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA N. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.
5. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA N. 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
6. GONÇALVES, J. C. V.; MOREIRA, M. D.; BORGES, V. P.. Materiais de construção civil na região metropolitana de Salvador. 2008.
7. HIRATA, R. *et al.*. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconômica para o Brasil. Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo. 2019.
8. MAGNAVITA, L. P.; SILVA, R. R. da; SANCHES, C. P. Guia de campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil. Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 13, n. 2, p. 301-334, 2005.
9. NASCIMENTO, S. A. de M. Diagnóstico Hidrogeológico, Hidroquímico e da Qualidade da Água do Aquífero Freático do Alto Cristalino de Salvador – Bahia. Salvador, 2008. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia. 214 p.
10. PEIXINHO, M. A. L. 2016. Hidrogeologia do Sistema Aquífero Marizal/São Sebastião na Sub-Bacia do Tucano Central, Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, 377 p.
11. PETROBRAS / UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA. Estudo da Disponibilidade Hídrica e Projeção de Cenários Futuros nas Bacias Hidrográficas do Recôncavo Norte e Inhambupe e seus Domínios Aquíferos (Estado da Bahia). Contrato: 4600305124 – PETROBRAS / NEHMA-IGEO-UFBA. Relatório inédito. 2013. 171 p.
12. SILVA, O. B. *et al.*. Bacia do Recôncavo. In: Milani, E. J. (Coord). Bacia Sedimentares Brasileiras – Cartas Estratigráficas. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, nº 2, p. 423-431. 2007.
13. SCHLUMBERGER WATER SERVICES (SWS). Relatório Técnico. Modelagem de Aquíferos da Bacia de Tucano - Modelo Hidrogeológico Conceitual e Numérico. Relatório Técnico. 2014. 190 p.
14. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 2017. 1546p.

15. VALADÃO NETO, O.. Mapeamento da interface água doce – água salgada no aquífero São Sebastião e apresentação de mapas com zoneamento para orientar o uso racional da água pela PETROBRAS. Relatório do Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA). CD-ROM, Salvador, 2006.
16. WATER SERVICES AND TECHNOLOGIES (WST). Relatório do Modelo Hidrogeológico Conceitual – Estudo Hidrogeológico da Borda Leste da Bacia do Recôncavo – Produto 3. Relatório técnico. [Estudo desenvolvido no âmbito do Projeto de Cooperação Técnica PCT BRA/IICA/16/003]. Empresa Baiana de Águas e Saneamento do Estado da Bahia (Embasa) e Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). Salvador, 2019. 101 pp e anexos.
17. WATER SERVICES AND TECHNOLOGIES (WST). Relatório Final do Monitoramento Hidrogeológico – Estudo Hidrogeológico da Borda Leste da Bacia do Recôncavo, Fase 2 – Produto 3b. Relatório técnico. [Estudo desenvolvido no âmbito do Projeto de Cooperação Técnica PCT BRA/IICA/16/003]. Empresa Baiana de Águas e Saneamento do Estado da Bahia (Embasa) e Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA). Salvador, 2022. 107pp e anexos.