

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Geociências

**FILTRAÇÃO EM MARGEM DE RIO PARA AUMENTAR A DISPONIBILIDADE HÍDRICA
DA CIDADE DE BAURU (SP): UM ESTUDO DA INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO**

Maria Luisa Moreira dos Santos

Monografia
(TF – 21/30)

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Hirata (GSA/IGc)

Coorientador: Carlos Henrique Gil Marques

São Paulo
2021

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, Maria Helena e Osvaldo, que me guiaram desde os meus primeiros passos e permitiram que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho e, principalmente, a minha jornada na graduação, somente foram possíveis através do apoio, incentivo e inspiração de pessoas especiais em minha vida. É com prazer e muita emoção que escrevo estes agradecimentos a vocês.

Gostaria de agradecer aos meus pais, Maria Helena e Osvaldo, por todos os ensinamentos, suporte e amor incondicional, sem eles eu não estaria aqui! Em meio a dificuldades, desconstruções e tantos recomeços, nunca me deixaram faltar nada, apenas me ensinaram a ter força e fé. À minha mãe, por me inspirar e ser exemplo de coragem, agradeço por sempre me apoiar e incentivar a seguir em frente. Ao meu pai, pelos conselhos e por ter me ensinado a ser batalhadora, a distância não impede que o seu amor chegue até mim.

Agradeço ao Leo, meu irmão querido, por toda a irmandade e poder contar com o seu apoio. Estaremos sempre cuidando um do outro, o nosso laço é eterno!

Luiz, eterno cateto, tenho muita gratidão por poder compartilhar a vida com você. O seu carinho me recarrega e me motiva. Sou grata pela paciência que tem tido neste ano difícil e por me ajudar em tudo (até nas tarefas de casa!), trilhar ao seu lado me faz feliz.

Gostaria de agradecer a Nena, minha cunhadis e também irmã, sei que posso sempre contar com você. A nossa família paulistana é muito importante para mim e sentirei falta disso.

Ao restante da minha família, meus avós e cada um dos tios e primos, mesmo afastados e espalhados por esse Brasil, são parte de mim. Agradeço também a minha família agregada, ao Ludo e a Dani, por me acolherem como parte da família e serem sempre muito queridos comigo.

Aos amigos que a geologia me deu, sou muito grata. À turma 59, por todos os momentos. Trevinhas e Gabi, agradeço pela parceria desde o início e por sempre poder contar com vocês, vocês são maravilhosas! À turminha do B&G, os nossos bares online de toda sexta me ajudaram a fugir da pandemia. Aos amigos viajeiros que levarei para a vida: Kiwi, Bibifa, Waze, Nit, Miss, Sizu, Rico, vocês são muito especiais. Caio, adoro ter você na minha vida! Agradeço aos times de handebol (Pedra no Rim) e basquete (Geopsicovet) e ao GGEO.

Meus agradecimentos especiais ao professor Hirata, pela orientação e por compartilhar do seu amplo conhecimento, enriquecendo a minha jornada de formação, e ao Carlos, pela coorientação, pela paciência em me mostrar o mundo da modelagem e por todo o apoio. Não posso deixar de agradecer de forma geral aos professores da Geologia por todo o aprendizado transmitido. Por fim, agradeço ao Instituto de Geociências e Universidade de São Paulo, por registrarem uma etapa importante na minha vida.

“No water, no life. No blue, no green.”

(Sylvia Earle).

RESUMO

A Filtração em Margem de Rio (FMR) consiste em poços instalados junto a rios, que extraem uma mistura de água subterrânea e superficial, sendo utilizada como alternativa para o abastecimento público. Durante a infiltração da água superficial ocorrem processos físicos, químicos e biológicos que melhoram a sua qualidade, havendo atenuação natural de poluentes e microrganismos. Em uma FMR há uma maior disponibilidade hídrica, visto que permite o uso conjunto do sistema rio-aquífero. A cidade de Bauru (SP) se enquadra em um contexto de estresse hídrico, dado que a demanda por água não é suprida pelos recursos durante a estiagem. Fundamentado em uma avaliação bibliográfica extensiva e na simulação numérica de fluxo (MODFLOW), o presente trabalho avaliou a possibilidade do uso da FMR na porção alta do rio Batalha, junto à captação de água superficial de Bauru. Foram simulados cenários considerando a variação dos arranjos de poços e parâmetros hidráulicos, buscando a otimização da FMR. Os resultados apontam que a distância entre poços e rio influencia na proporção de água infiltrada, sendo a taxa de água superficial maior para as configurações mais próximas do rio, assim como arranjos lineares obtiveram resultados mais promissores. Além disso, as características da área convergem para uma vazão ideal de poço de 10 m³/h, com profundidade de filtro em torno de 45 metros e distância de 50 metros entre o arranjo de poços e o rio. Ademais, a eficiência da FMR só é endossada através do conhecimento hidrogeológico local, em que o aumento da condutividade hidráulica e da condutância garante o melhor cenário, permitindo uma contribuição do rio para o sistema hipotético de até 70%, em relação a água subterrânea, e recuperação próxima a 90%. Este trabalho avaliou a interação hidráulica do sistema rio-aquífero e os pontos sensíveis associados a aplicação da FMR na área estudada.

Palavras-chave: interação rio-aquífero; filtração em margem de rio; modelagem numérica de fluxo; Sistema Aquífero Bauru; rio Batalha.

ABSTRACT

Riverbank Filtration (RBF) consists in wells placed in river banks, which extract a mixture of groundwater and surface water, being used as an alternative of public water supply. During the surface water infiltration, physical, chemical, and biological processes occur that improve its quality, which help the natural attenuation of pollutants and microorganisms. There is more water availability in RBF, once it allows the integrated use of river-aquifer system. The city of Bauru (SP) is in a context of hydric stress, as the water demand is not supplied by resources during the drought. Based on an extensive bibliographic evaluation and on numerical flow simulation (MODFLOW), the present work aimed to investigate the potential of the application of RBF in the upper portion of the Batalha river, near the surface water catchment of Bauru. Different scenarios were simulated considering the variation of well arrangements and hydraulic parameters for RBF optimization. The results show that the distance between the wells and the river influences the proportion of river water infiltrated in the system, which the surface water rate is higher in settings where the wells are closer to the river, as the linear arrangements obtained preliminarily more promising results. Furthermore, the area characteristics converge into an ideal flow rate of well about 10 m³/h, with a screen depth of around 45 meters and a distance of 50 meters between the wells arrangement and the river. Thus, the efficiency of RBF is only endorsed through local hydrogeological knowledge, with the increase in hydraulic conductivity and conductance being relevant factors that ensure the best scenario, achieving a contribution of the river to the hypothetical system up to 70%, in relation to groundwater, and drawdown recovery close to 90%. This work evaluated the hydraulic interaction of the river-aquifer system and the sensitive factors associated with the application of RBF in the studied area.

Key words: river-aquifer interaction; riverbank filtration; Bauru Aquifer System; Batalha river.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Esquema do sistema de Filtração em Margem e processos atuantes (Romero-Esquivel et al., 2016) 11
- Figura 2: Diagrama esquemático indicando a evolução química de alguns compostos durante o caminho de infiltração na FMR (Modificado de Tufenkji et al., 2002). 15
- Figura 3: Rio meandrante e características do leito no corte transversal de um meandro (Modificado de Schubert, 2002). 16
- Figura 4: a) Poço coletor horizontal (radial); b) galeria de poços, poços com filtros verticais conectados por tubos de sifão (Modificado de Hunt et al., 2002). 17
- Figura 5: Representação dos tipos de poços. a) Poços verticais paralelos à margem do rio; b) poço horizontal radial, construído mais distante da margem do rio; c) poço horizontal direcional, com laterais se estendendo para baixo do leito; d) galeria de poços paralela a margem; e) galeria de poços direcional, se estendendo para baixo do leito (Modificado de Hu et al., 2016)..... 17
- Figura 6: Arranjos de poços utilizados em sistemas de FMR na China (Modificado de Hu et al., 2016)..... 18
- Figura 7: Exemplos de aplicação da FMR selecionados da bibliografia: A) Tempo de viagem em dias da água do rio até o poço, durante a infiltração; B) Distância em metros entre os poços da FMR e o corpo d'água; C) Condutividade hidráulica em m/s; D) Capacidade máxima em m³/d dos poços. 19
- Figura 8: Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Batalha com a área de estudo destacada em retângulo preto..... 21
- Figura 9: Localização da área de estudo delimitada pelo retângulo em vermelho..... 21
- Figura 10: Dados médios climáticos (temperatura e precipitação), da estação A705 de Bauru (SP), entre os anos 2002-2020 (Fonte: inmet.gov.br). 22
- Figura 11: Unidades hidrogeológicas aflorantes na região de estudo e localização dos poços tubulares em que foram analisados os dados e perfis construtivos..... 23
- Figura 12: Domínio numérico em planta representando a malha regular horizontal com células 10x10 metros..... 27
- Figura 13: Domínio numérico com as condições de contorno (rio Batalha em azul e córrego em verde). 27
- Figura 14: Dados construtivos dos poços considerando a posição da seção filtrante nas camadas 3 e 5 do modelo numérico. Representação aproximada de poços mais próximos ao rio, em cotas topográficas mais baixas. 29
- Figura 15: Representação de alguns arranjos de poços utilizados nas simulações. D = Distância entre o arranjo e o rio; E = Espaçamento entre os poços; E' = Espaçamento entre os grupos de poços. O agrupamento de poços em 5 apresenta a seguinte configuração:

distância entre rio e poço central = 145 m, distância entre poço central e poços laterais = 40 m, distância entre poços laterais = 55 m, distância entre grupos de poços = 350 m.	30
Figura 16: Modelo digital de elevação do domínio.	33
Figura 17: A) Potenciometria e B) seção hidrogeológica do modelo estacionário com a representação do sentido de fluxo da água subterrânea em direção ao rio.	34
Figura 18: Potenciometrias relativas aos melhores cenários da 2ª etapa de otimização dos arranjos, no instante $t = 540$ dias. A) D50E100 na camada 1; B) D50E100 na camada 5; C) D50E150 na camada 1; D) D50E150 na camada 5.	37
Figura 19: Rebaixamentos das cargas hidráulicas na camada 1 após 2 anos, para configurações com filtro posicionado na camada 5. O resultado é referente as simulações da segunda etapa de otimização dos arranjos.	38
Figura 20: Fluxograma representando as principais etapas de simulação numérica, objetivando a otimização do arranjo de poços para a FMR na área estudada.	39
Figura 21: Contribuição para o rebaixamento das cargas hidráulicas, com o cenário base delimitado pelo retângulo, após 2 anos de recarga e bombeamento transientes. A) Análise de sensibilidade de S_y ; B) Análise de sensibilidade de condutância.	40
Figura 22: Rebaixamentos das cargas hidráulicas estimadas a partir dos balanços hídricos para cenários com ou sem a presença de aluvião, considerando variação no coeficiente de escoamento (consequentemente recarga) e condutância (c), após 5 anos de recarga e bombeamento transientes.	41
Figura 23: Rebaixamento das cargas hidráulicas entre períodos de bombeamento e recuperação para cenário com 10% de escoamento. A) e B) Com presença de aluvião; e C) e D) Sem presença de aluvião.	42
Figura 24: Potenciometria do aquífero no instante $t = 1620$ dias, do cenário com coeficiente de escoamento de 20% sem pacote aluvionar, arranjo D50E150, com condutância de $10 \text{ m}^2/\text{d}/\text{m}$ e 5 anos de bombeamento transiente: A) Visão da camada 1; B) Visão da camada 5; C) Seção hidrogeológica durante bombeamento na camada 5.	42
Figura 25: Potenciometria no instante $t = 1620$ dias, do cenário com coeficiente de escoamento de 10% com pacote aluvionar, arranjo D50E150, com condutância de $10 \text{ m}^2/\text{d}/\text{m}$ e 5 anos de bombeamento transiente: A) Visão da camada 1; B) Visão da camada 5; C) Seção hidrogeológica durante bombeamento na camada 5.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das unidades geológicas e hidrogeológicas correspondentes, aflorantes na região de Bauru (Bristrichi et al., 1981).....	23
Tabela 2: Parâmetros hidrogeológicos da Unidade Aquífera Adamantina.....	24
Tabela 3: Parâmetros do modelo da área de estudo.....	28
Tabela 4: Variação dos parâmetros para os arranjos de poços modelados.	29
Tabela 5: Parâmetros considerados para a 2º etapa de simulação.....	31
Tabela 6: Parâmetros considerados para a 3º etapa de simulação.....	31
Tabela 7: Fatores influenciadores nos sistemas de FMR operantes na China (Modificado de Hu et al. (2016)).....	20
Tabela 8: Resumo dos resultados da primeira etapa de otimização dos arranjos de poços através da simulação numérica com bombeamento e recarga (200 mm/ano) constantes durante 5 anos.....	35
Tabela 9: Resumo dos resultados da segunda etapa de otimização dos arranjos de poços através da simulação numérica com bombeamento e recarga transientes durante 2 anos..	36
Tabela 10: Taxas de fluxo de entrada de água do rio e do aquífero no sistema, estimadas a partir dos balanços hídricos das simulações para configurações com filtro posicionado na camada 5, após 2 anos de recarga e bombeamento transientes.	38
Tabela 11: Valores considerados para a variação da condutância e da componente de armazenamento S_y nas simulações numéricas, com os cenários base em negrito.	39
Tabela 12: Taxas de fluxo de entrada de água do rio e do aquífero no sistema resultantes da análise de sensibilidade da condutância e da vazão específica (S_y), após 2 anos de recarga e bombeamento transientes.....	40
Tabela 13: Taxas de fluxo de entrada de água do rio e do aquífero no sistema, estimadas a partir dos balanços hídricos para cenários com ou sem a presença de aluvião, considerando variação no coeficiente de escoamento (consequentemente recarga) e condutância, após 5 anos de recarga e bombeamento transientes.	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS	12
3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	13
3.1. Filtração em margem	13
3.1.1. Premissas associadas a técnica	13
a) Características do aquífero	13
b) Qualidade da água	13
c) Colmatação e ciclos de inundação/seca	15
d) Morfologia do rio	15
3.1.2. Tipos de poços	16
3.1.3. Filtração em margem em outros países	18
3.1.4. Filtração em margem no Brasil	20
3.2. Área de estudo	20
3.2.1. Localização e caracterização da região	20
3.2.2. Clima	22
3.2.3. Contexto hidrogeológico	22
4. MATERIAIS E MÉTODOS	24
4.1. Revisão bibliográfica	24
4.2. Levantamento de dados	24
4.3. Tratamento de dados	25
4.4. Modelo conceitual	25
4.5. Modelo numérico	26
4.5.1. Definição do domínio e malha do modelo	26
4.5.2. Simulações numéricas	27
5. RESULTADOS OBTIDOS	32
5.1. Modelo conceitual	32
5.2. Modelo numérico	33
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
7. CONCLUSÕES	45
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXO A - Aplicação de filtração em margem em diferentes locais	54

1. INTRODUÇÃO

O ciclo da água afeta tanto a superfície quanto a subsuperfície, pois as águas subterrâneas e superficiais estão interconectadas. O estudo dessa interação auxilia na compreensão da dinâmica espaço temporal de trocas entre esses meios, favorecendo uma gestão hídrica eficiente e possibilitando uma melhor proteção dos ecossistemas (Winter et al., 1999; Sophocleous, 2002; Lewandowski et al., 2020). Neste contexto, diversas pesquisas vêm sendo realizadas sobre o sistema de Filtração em Margem de Rio (FMR), ou Riverbank Filtration (RBF), que objetivam tratar e/ou aumentar a disponibilidade de água para o abastecimento (Ahmed e Marhaba, 2017).

A FMR consiste na instalação de poços ao longo da margem de um rio, que extraem uma mistura de água subterrânea e superficial, sendo utilizada no tratamento de água a partir de sua filtração através dos sedimentos junto à margem e ao leito do rio (Figura 1). Apesar de ser uma técnica antiga, empregada na Europa desde o século XIX e nos Estados Unidos há mais de 80 anos, a FMR vem sendo adotada há menos de 20 anos em outros países (Ray et al., 2002; Hu et al., 2016). No Brasil, a aplicação da FMR restringe-se praticamente a alguns projetos pilotos (Freitas et al., 2018), embora com grande potencial pois: (1) o seu uso pode contornar problemas relacionados com limitações e/ou exploração excessiva de águas subterrâneas; (2) a técnica pode ser utilizada como alternativa de tratamento, ou no mínimo, pré-tratamento de água, sendo associada à remoção de impurezas como contaminantes, microrganismos, turbidez etc.; e (3) o custo-benefício deste processo de atenuação natural pode ser significativo (Freitas, 2010).

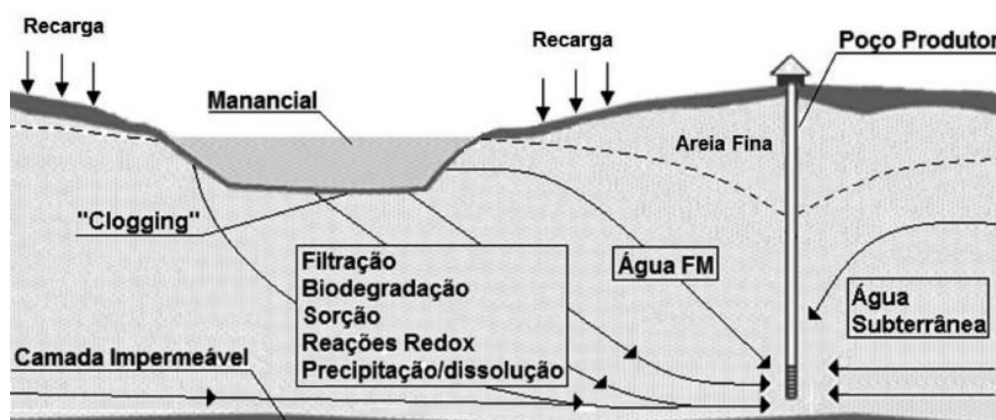


Figura 1: Esquema do sistema de Filtração em Margem e processos atuantes (Romero-Esquivel et al., 2016)

O sistema de FMR é uma técnica de captação de água que se beneficia das características de vazão instantânea do rio e do armazenamento aquífero, possibilitando um uso conjunto desses recursos. Desta forma, a redução da disponibilidade de água do rio

durante os períodos de seca é compensada pelo armazenamento de água subterrânea, e na época chuvosa, ocorre a recuperação do sistema através da recarga do aquífero.

A região de Bauru, no Estado de São Paulo, se enquadra em um contexto de estresse hídrico, visto que a demanda por água supera a disponibilidade atual de recursos (SigRH, 2014). Desde o século passado, Bauru (SP) necessita de estudos para desenvolver uma gestão hídrica mais rigorosa, devido ao grande desenvolvimento urbano da região e consequente aumento da demanda por água (Paula e Silva & Cavaguti, 1992). O município enfrenta recorrentes crises de falta de água em decorrência da diminuição da vazão do Rio Batalha durante períodos de seca. Os recursos hídricos de Bauru são provenientes tanto de água superficial como subterrânea, em que 42% provêm do Rio Batalha e 58% é captada de poços profundos do Sistema Aquífero Guarani (SAG). Quanto ao Sistema Aquífero Bauru (SAB), existe extração de água a partir de poços particulares (Stradioto et al., 2011).

Apesar de Bauru (SP) captar água tanto do sistema subterrâneo quanto superficial, o uso desses recursos não ocorre de forma integrada, não havendo o melhor aproveitamento das características de cada meio. Assim, entende-se que a FMR pode auxiliar no aumento da disponibilidade de água na região, sendo uma ótima opção na otimização do sistema de captação. O presente trabalho buscou avaliar o emprego da FMR junto à captação de água superficial da cidade de Bauru, no Rio Batalha, a partir de uma revisão bibliográfica que subsidiou a criação de cenários em modelo numérico de fluxo de água subterrânea. Espera-se que os resultados deste trabalho tragam subsídios para a futura instalação de um FMR no Rio Batalha.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar, através de simulação em modelo numérico de fluxo, o potencial da aplicação da técnica de FMR para a obtenção e tratamento de água na bacia do Rio Batalha, região de Bauru (SP), e entender a melhor forma de aproveitar a interação rio-aquífero para o abastecimento hídrico da população.

Tendo como ponto de partida uma ampla revisão bibliográfica, que permite o entendimento das premissas relativas a FMR e a criação de alternativas para a sua aplicação na área, a simulação de cenários busca compreender a dinâmica de fluxo hídrico sob diferentes condições de locação de poços, proximidade da drenagem e sua relação com a produtividade do sistema. Deste modo, torna-se possível avaliar a disponibilidade e a proporção de água superficial e subterrânea extraída pela FMR.

3. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

3.1. Filtração em margem

A Filtração em Margem fundamenta-se na captação de água por meio de poços construídos ao longo de margens de rios ou lagos, no qual utilizam-se os materiais sedimentares do leito e margem como meio filtrante (Ray et al., 2002; Shamrukh e Abdel-Wahab, 2008; Hu et al., 2016; Ahmed e Marhaba, 2017). O bombeamento do poço gera uma diferença de cargas hidráulicas, criando um cone de depressão, que resulta na indução da água superficial em direção ao poço, infiltrando pelo leito e margem do rio. A grande vantagem da técnica é a compensação que ocorre entre os sistemas superficial-subterrâneo, aproveitando-se do armazenamento do aquífero e disponibilidade instantânea de água superficial, e garantindo o uso conjunto desses recursos (Tufenkji et al., 2002; Sens et al., 2006).

3.1.1. *Premissas associadas a técnica*

Existem fatores que influenciam na eficiência da FMR, devendo ser considerados para o estudo de viabilidade de implantação, sendo os mais relevantes: disponibilidade hídrica do rio que será induzida no aquífero, qualidade da água, velocidade e caminho do fluxo, características do leito, sazonalidade do fluxo do rio, perenidade dos sistemas e estabilidade do canal. O tipo de poço a ser construído precisa ser ponderado, bem como a geometria, arranjos e distância com a margem do corpo d'água (Hiscock e Grischek, 2002; Ray et al., 2002).

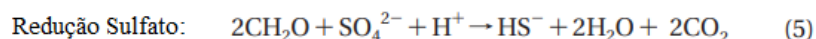
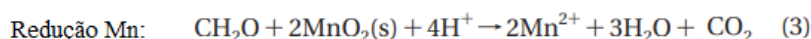
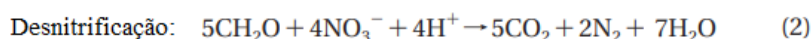
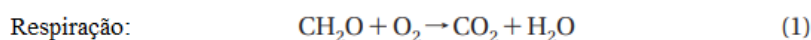
a) Características do aquífero

As condições ideais incluem aquíferos aluvionares de granulação grossa, permeáveis e com conexão hidráulica com os materiais do leito do rio. A necessidade de um ambiente não confinado é um reflexo da recarga natural do aquífero pelo manancial, sendo uma das vantagens da FMR (Paiva, 2009). Além disso, o tempo de viagem da água influencia na qualidade do tratamento, em que a granulometria do sistema e a distância entre o rio e poço são fatores determinantes nesse quesito. O tempo curto de viagem pode diminuir a eficiência do tratamento, enquanto uma longa distância do poço e/ou existência de um pacote sedimentar muito fino podem restringir a coleta de água para o sistema subterrâneo (Sens et al., 2006; Freitas et al., 2018). Entretanto, a FMR também pode ser construída em zonas de baixa permeabilidade, como em camadas de silte e argila, a depender do arranjo do poço (Hunt et al., 2002).

b) Qualidade da água

A qualidade da água extraída a partir da FMR depende das condições existentes previamente no sistema. O nível de poluição do corpo d'água superficial e a existência de contaminação na água subterrânea influenciam na possível necessidade de tratamento adicional subsequente (Kuehn e Mueller, 2000; Kim et al., 2003). A FMR é considerada, no mínimo, como um pré-tratamento na produção de água para abastecimento público, em alguns casos a FMR pode funcionar como o tratamento final antes da desinfecção (Ray et al., 2002; Freitas, 2010; Grischek e Bartak, 2016). Os processos naturais, físico-químicos, hidrodinâmicos e biológicos, atuantes durante o processo, são capazes de atenuar compostos indesejáveis de forma sustentável. Dentre os efeitos positivos da FMR, estão a eliminação de sólidos suspensos e partículas; compostos biodegradáveis, orgânicos e inorgânicos; bactérias, vírus e parasitas; eliminação parcial de compostos adsorvíveis; e equilíbrio na mudança de temperatura e concentração de compostos dissolvidos (Kuehn e Mueller, 2000; Hiscock e Grischek, 2002; Sahoo et al., 2005; Weiss et al., 2006; Pan et al., 2018).

Por outro lado, a FMR pode ter alguns efeitos indesejados dependendo de condições no meio e mudanças redox, como aumento da dureza da água, além das concentrações de ferro e manganês (Hiscock e Grischek, 2002). Durante a FMR ocorrem reações redox resultantes de atividade microbiana (1-5), que acontecem nos estágios iniciais da infiltração, podendo criar uma zona redutora quando o consumo de oxigênio é intenso (Figura 2). Nessa condição anóxica, as reações de desnitrificação (2) e redução (3, 4 e 5) resultam em mudanças químicas no meio, havendo diminuição desses efeitos com a distância da margem e redução da atividade microbiana (Tufenkji et al., 2002; Kedziorek et al., 2008). Assim, é crucial que a posição dos poços a serem instalados respeitem a existência da zona redutora, sendo posicionados fora dessa região. Entretanto, prever a extensão e localização da zona redutora é complexo, visto que depende da hidráulica, do oxigênio dissolvido e das condições de equilíbrio das reações biogeoquímicas envolvidas (Bourg e Berlin, 1993).



As condições que favorecem os processos biogeoquímicos associados a zona anaeróbica são: rios que apresentam uma grande carga de carbono orgânico; rios represados, visto que há aumento da deposição de matéria orgânica e diminuição de oxigênio dissolvido; e em poços instalados em contextos hidrogeológicos com cobertura de solo impermeável ou semipermeável (Kedziorek et al., 2008).

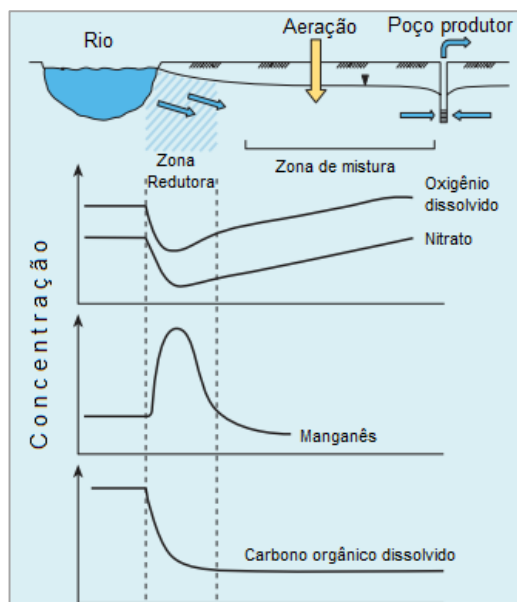


Figura 2: Diagrama esquemático indicando a evolução química de alguns compostos durante o caminho de infiltração na FMR (Modificado de Tufenkji et al., 2002).

c) Colmatação e ciclos de inundação/seca

A atividade microbiana e a retenção de partículas finas (<2 mm) nos interstícios, assim como a deposição e precipitação química, podem diminuir a permeabilidade do meio e limitar a infiltração da água superficial em direção ao poço (Hiscock e Grischek, 2002; Tufenkji et al., 2002; Hutchison et al., 2013). Este processo é conhecido como colmatação, sendo responsável pela redução da condutividade hidráulica do leito do rio, podendo ser um problema para a FMR (Sprenger et al., 2011; Pholkern et al., 2015; Ulrich et al., 2015; Grischek e Bartak, 2016; Przybyłek et al., 2017). Existem algumas vantagens associadas a colmatação, como o aumento da eficiência de filtração natural e biodegradação de contaminantes, entretanto, a perda da permeabilidade pode diminuir de forma significativa a produtividade do poço (Hiscock e Grischek, 2002). Schubert (2002) descreve que a permeabilidade das camadas colmatadas é um fator dinâmico que varia conforme a hidrologia. Os ciclos de inundação podem limitar a formação de camadas colmatadas, por outro lado, períodos de seca podem auxiliar na colmatação através da deposição de sólidos suspensos. Apesar disso, inundações também possuem efeito negativo na FMR, a destruição da camada colmatada, mudanças na pressão dos poros e aumento da velocidade de fluxo, causados por esta condição, podem aumentar o transporte de contaminantes e penetração de micropoluentes indesejados no sistema (Hiscock e Grischek, 2002; Sprenger et al., 2011; Ahmed e Marhaba, 2017).

d) Morfologia do rio

A existência de margens estáveis e um leito arenoso no manancial são fatores necessários para a FMR. Além disso, a morfologia do rio e a declividade superficial são

determinantes na eficiência da técnica, visto que a alteração da velocidade de fluxo, o transporte de sedimentos e nível de erosão controlam a formação de camadas colmatadas ao longo do rio. Em rios meandrantés, o corte transversal de um meandro pode apresentar zonas em que ocorre leito móvel ou estável (Figura 3). A eficiência da FMR na parte interna da curva costuma ser maior devido ao leito móvel e ao fluxo natural gerado pelo gradiente do rio, que limitam o processo de colmatção (Schubert, 2002). Em relação a declividade superficial, valores entre 0,2 e 0,8 m/km são encontrados em aplicações da técnica nos EUA e Europa (Romero-Esquível et al., 2016).

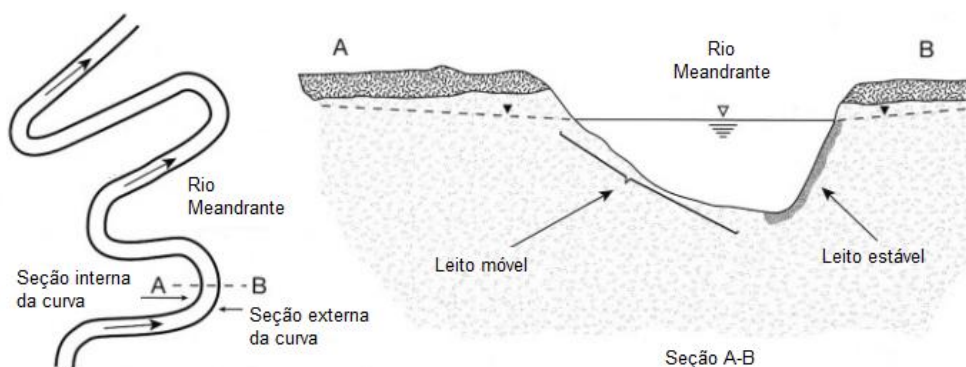


Figura 3: Rio meandrante e características do leito no corte transversal de um meandro (Modificado de Schubert, 2002).

3.1.2. Tipos de poços

Poços verticais e poços com coletores horizontais são os principais tipos usualmente empregados na FMR. O poço coletor horizontal apresenta uma estrutura circular com filtros laterais horizontais (Figura 4a), que geralmente capturam água em aquíferos rasos, com pequena espessura saturada e valores baixos de condutividade hidráulica (Ray et al., 2002; Feitosa et al., 2008; Hu et al., 2016). O uso desses poços para a FMR tem sido implementado em vários países, mais de 50 poços estão em operação no rio Reno e mais de 200 na região do Danúbio. Os coletores horizontais também vêm sendo preferencialmente utilizados nos Estados Unidos, havendo variação no design do poço, no qual em muitos casos as laterais são direcionadas para o rio, chegando até a serem posicionadas abaixo do leito. Essa alternativa pode aumentar a eficiência e capacidade de produção dos poços, comumente utilizados em formações menos permeáveis (Grischek et al., 2002; Hunt et al., 2002).

Outra possibilidade é a implementação de uma galeria de poços tubulares (verticais) com tubos sifão (Figura 4b). Os sistemas de poços sifão são geralmente conectados, por um coletor de descarga, a uma ou mais bombas de sucção. Esses sistemas conseguem suportar a construção de galerias paralelas à margem do rio, com até 100 filtros de poços verticais interligados (Hunt et al., 2002).

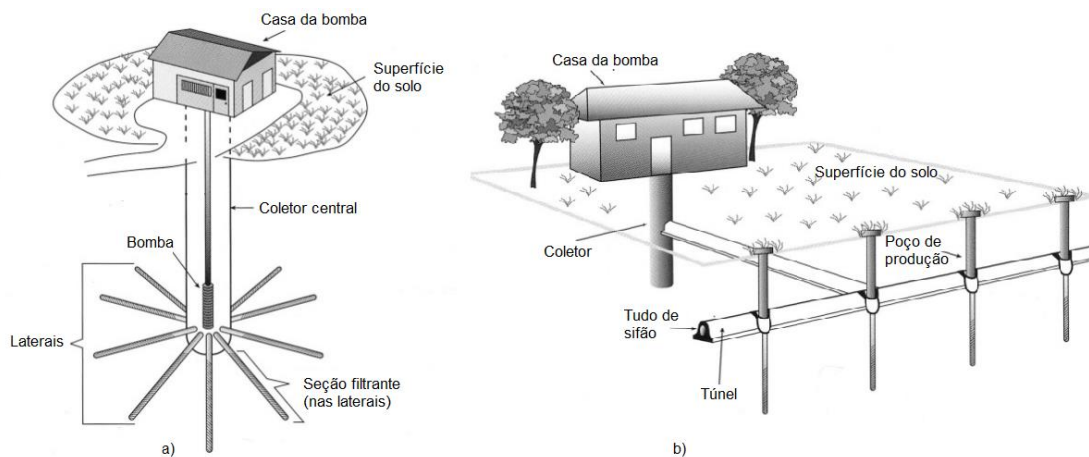


Figura 4: a) Poço coletor horizontal (radial); b) galeria de poços, poços com filtros verticais conectados por tubos de sifão (Modificado de Hunt et al., 2002).

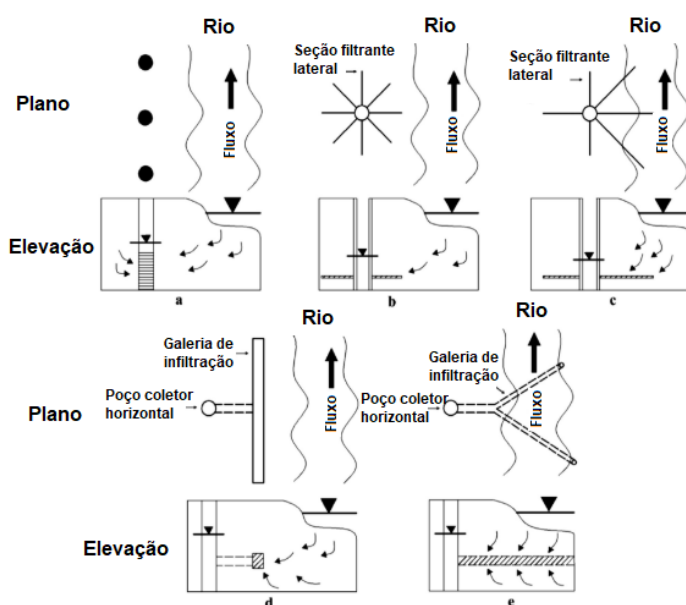


Figura 5: Representação dos tipos de poços. a) Poços verticais paralelos à margem do rio; b) poço horizontal radial, construído mais distante da margem do rio; c) poço horizontal direcional, com laterais se estendendo para baixo do leito; d) galeria de poços paralela a margem; e) galeria de poços direcional, se estendendo para baixo do leito (Modificado de Hu et al., 2016).

O arranjo de poços mais comumente utilizado é o lineamento paralelo à margem do rio, com distâncias que geralmente variam em uma média de 50 a 250 m do manancial (Ray et al., 2002). Na China, Hu et al. (2016) relata que localmente são aplicados agrupamentos de poços em cinco, com um poço central (Figura 6). Entretanto, o alto custo e complexidade técnica o torna um arranjo pouco utilizado. O autor ainda relata que a distância entre os poços nos casos estudados é sempre maior que 50 metros. Um dos motivos dessa distância mínima, associada ao emprego da técnica do Rio Wei, é a proteção da estrutura de captação durante inundações.

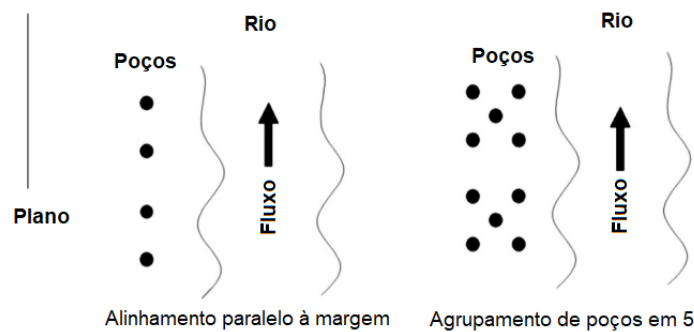


Figura 6: Arranjos de poços utilizados em sistemas de FMR na China (Modificado de Hu et al., 2016).

3.1.3. Filtração em margem em outros países

A FMR é empregada na Europa desde o século XIX e nos Estados Unidos há mais de 80 anos, entretanto, vem sendo empregada há menos de 20 anos em outros países (Ray et al., 2002; Hu et al., 2016). Em publicação recente, Freitas (2018) descreve o histórico da aplicação da técnica no mundo e experiências brasileiras. Atualmente, cerca de 16% da água potável captada na Alemanha é proveniente de FMR ou infiltração. Em Berlim, este número sobe para 70%, dividido entre FMR e recarga artificial de águas subterrâneas. As porcentagens do uso da FMR para outros países europeus são: 80% - Suíça, 7% - Países Baixos, 50% - Eslováquia; 40% - Hungria, 48% - Finlândia, e 50% - França (Hiscock e Grischek, 2002; Freitas et al., 2018).

Nas últimas décadas, a técnica também ganhou visibilidade para países emergentes, que buscam expandir o acesso a água potável para a população e podem se beneficiar do baixo custo, associado a diminuição da necessidade de outros tratamentos de água (Hu et al., 2016; Ahmed e Marhaba, 2017; Freitas et al., 2018). China (Hu et al., 2016), Egito (Shamrukh e Abdel-Wahab, 2008; Hamdan et al., 2013), Coreia do Sul (Lee et al., 2009), Índia (Sandhu et al., 2011), Tailândia (Pholkern et al., 2015) e Malásia (Mustafa et al., 2016) são alguns dos países que iniciaram a utilização da FMR ou, ao menos, pesquisas associadas a sua implantação.

O anexo A, ao final deste relatório, apresenta uma tabela com a compilação de parâmetros hidráulicos de 17 aplicações da FMR nos Estados Unidos (EUA), Alemanha e Índia (Grischek et al. 2002; Sandhu et al. 2011). Os tempos de trânsito da água até os poços nos casos dos EUA e Índia são menores que 50 dias, enquanto na Alemanha o tempo se mantém acima de 50 dias (Figura 7a). Tais resultados podem estar associados com o uso de poços horizontais no primeiro caso e aos poços verticais ao segundo. Outra tendência é a distância dos poços até o rio, que na maioria dos casos ocorre a partir de 50 metros, com a exceção de alguns poços nos EUA e Índia (Figura 7b), novamente podendo ser explicado pelo uso de coletores horizontais. Os exemplos compilados estão majoritariamente localizados em aquíferos aluvionares constituídos de areia e cascalho, com condutividades hidráulicas acima

de 1×10^{-4} m/s (Figura 7c). As capacidades máximas dos poços estão representadas no gráfico da Figura 7d.

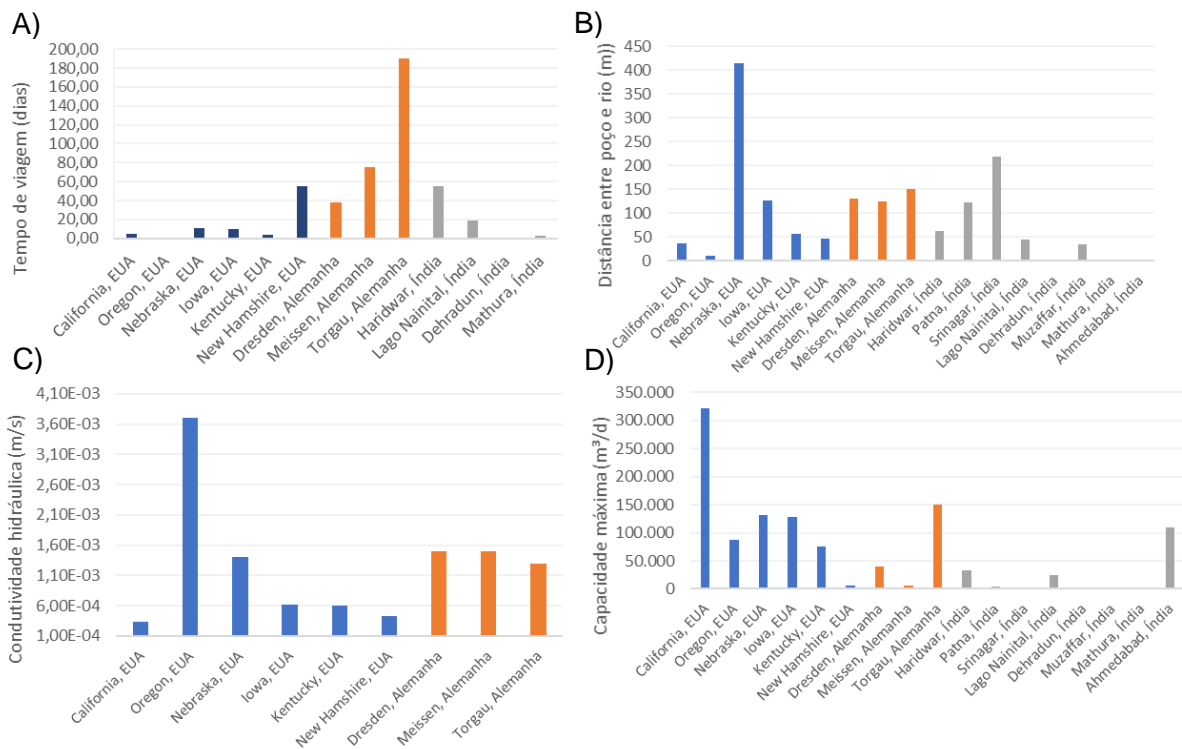


Figura 7: Exemplos de aplicação da FMR selecionados da bibliografia: A) Tempo de viagem em dias da água do rio até o poço, durante a infiltração; B) Distância em metros entre os poços da FMR e o corpo d'água; C) Condutividade hidráulica em m/s; D) Capacidade máxima em m³/d dos poços.

De forma complementar, a Tabela 1 traz as informações de aplicação da FMR em sistemas em operação na China, segundo trabalho de Hu et al. (2016). Nestas aplicações, a contribuição de água do rio está entre 60-96%, com uma taxa média de 75%. Assim como os outros trabalhos consultados, a distância entre rio e poço mínima na FMR é de 50 metros e os tipos de poços variam entre vertical e horizontal, em arranjos lineares e agrupamentos, com diferencial para o agrupamento de 5 poços com um central.

Tabela 1: Fatores influenciadores nos sistemas de FMR operantes na China (Modificado de Hu et al. (2016)).

Sistemas FMR em operação	Distância entre rio e poço	Distância entre poços	Arranjos de poços	Tipos de poços	Porcentagem de água proveniente do rio (%)
Shanxi (Wei river)	200		Linear	Vertical	>75,99
Hubei (Xishui River)	96		Linear	Vertical	>65,34
Lanzhou (Matan)	50, 100, 150	100-500	Linear	Vertical	96,00
Zhengzhou (Jiuwutan)	300-800	>500	Linear	Vertical	82,60
Xi'an (Ba river)			Linear/agrupamento	Vertical	73,39
Zhengzhou (North suburbs)	Primeira linha: 250, Segunda linha: 750	>500	Linear/grupo de 5	Vertical	70,18
Shanxi (Puzhou)	250	275	Linear/grupo de 5	Vertical	76,00
Shanxi (Qi River)	150-850	800-1000	Linear	Vertical	78,81
Shanxi (Fen River)	750-2150		Linear	Vertical	>60,00
Hejin (Yellow River, Fen River, Shushui River, Shanxi)	300-3000		Linear	Vertical	>70,00
Nanyang (Tang River, Henan)	320	50	Agrupamento	Vertical/horizontal	>60,00
Douluo (Muma River, Shanxi)	100-600	500	Linear	Vertical	82,56
Chengde (Luan River, Hebei)	80	120	Linear	Vertical	76,00
Heilongjiang (Songhua River)	500	50	Linear/agrupamento	Vertical	74,42
Chengdu (Yinma River)	300		Linear	Vertical	80,00
Qingpu (Taipu River, Shanghai)	200	300	Linear	Vertical	70,00-80,00
Binzhou (Yellow River)	50		Linear	Horizontal	>80,00
Jilin (Di'er Songhua River)	2000			Vertical	>70,00
Fujian (Futun Stream)			Único	Horizontal	74,40
Shanxi (Yellow River)	0-1000	250	Linear	Vertical	>80,00

3.1.4. Filtração em margem no Brasil

No Brasil, a aplicação da FMR restringe-se praticamente a alguns projetos pilotos, não sendo ainda utilizada para o abastecimento público (Freitas et al., 2018). Os projetos pioneiros foram frutos de pesquisas das universidades federais de Santa Catarina (UFSC) e Pernambuco (UFPE), localizados na Lagoa do Peri, Florianópolis, e no Rio Beberibe, em Olinda, respectivamente (Sens et al., 2006; Paiva, 2009; Romero-Esquivel et al., 2016). Um projeto piloto de Filtração em Margem de Lago (FML) também foi instalado às margens da Barragem da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Minas Gerais (Rocha e Marques, 2016). Outros estudos brasileiros preliminares abrangem: estudo em um lago de aquicultura e no rio Itajaí do Sul, em Itaporanga (SC) (Romero et al., 2010); avaliação da técnica para abastecimento de comunidades isoladas no rio Belo, em Orleans (SC) (Guedes et al., 2019), e no Reservatório de Mundaú, Garanhuns (PE) (Santos et al., 2014); em Rio Grande do Sul para análise de viabilidade de implantação em diferentes mananciais (Emmendoerfer, 2020); e no Rio Capibaribe, em Recife (PE) (Cruz, 2019).

3.2. Área de estudo

3.2.1. Localização e caracterização da região

A região de estudo insere-se na Bacia Hidrográfica do Alto Batalha (Figura 8), que possui uma drenagem de 125 km² e abrange os municípios de Bauru, Piratininga e Agudos no centro-norte do Estado de São Paulo. O Rio Batalha faz parte da Unidade 16 de Gerenciamento de Recursos Hídricos, relativa a Bacia Hidrográfica Tietê-Batalha (UGRHI 16 - Tietê-Batalha), sendo um de seus principais corpos d'água, com 2.416,32 km² de área de drenagem (CBH-TB, 2016). Este manancial nasce na Serra da Jacutinga, em Agudos (SP), com altitude acima de 700 metros, percorre 167 km de extensão e deságua no Rio Tietê, em

uma altitude próxima de 380 metros. Particularmente, o interesse na pesquisa restringe-se a área à montante da captação de água da cidade de Bauru, junto a sua Estação de Tratamento de Água (ETA). A porção do Rio Batalha em estudo situa-se entre os afluentes Córrego São José e Água do Ventura, compreendendo a margem direita do manancial, em uma extensão de aproximadamente 1 km (Figura 9).

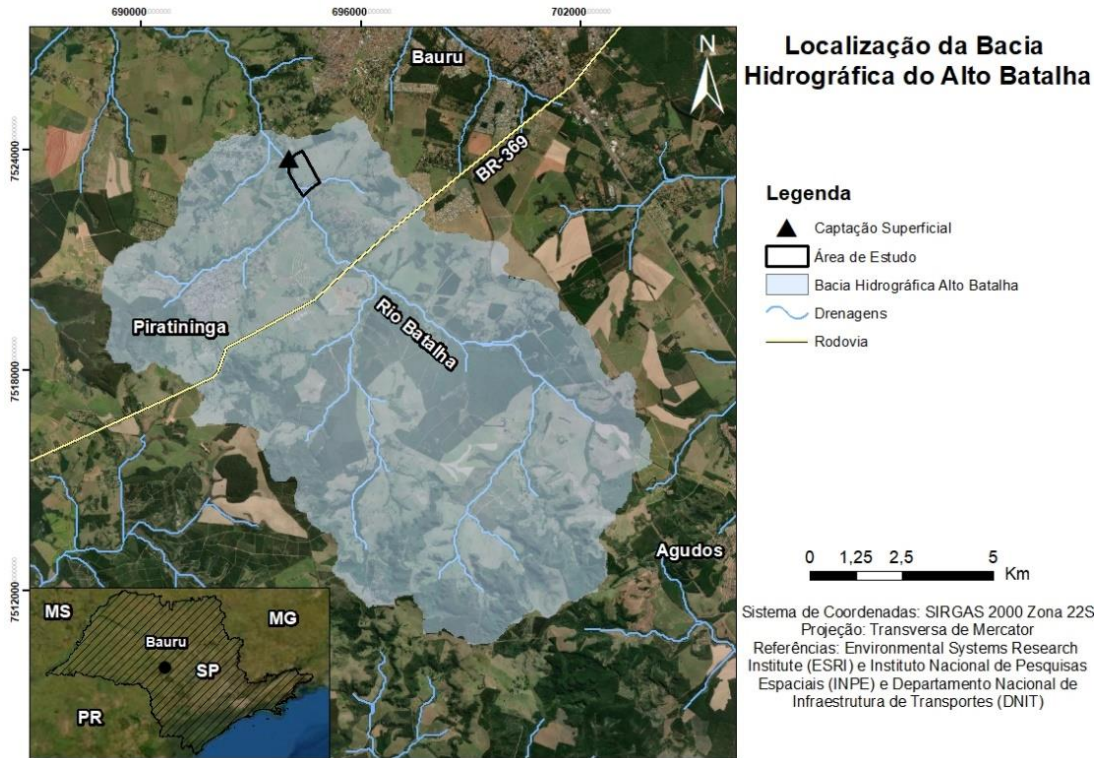


Figura 8: Localização da Bacia Hidrográfica do Alto Batalha com a área de estudo destacada em retângulo preto.

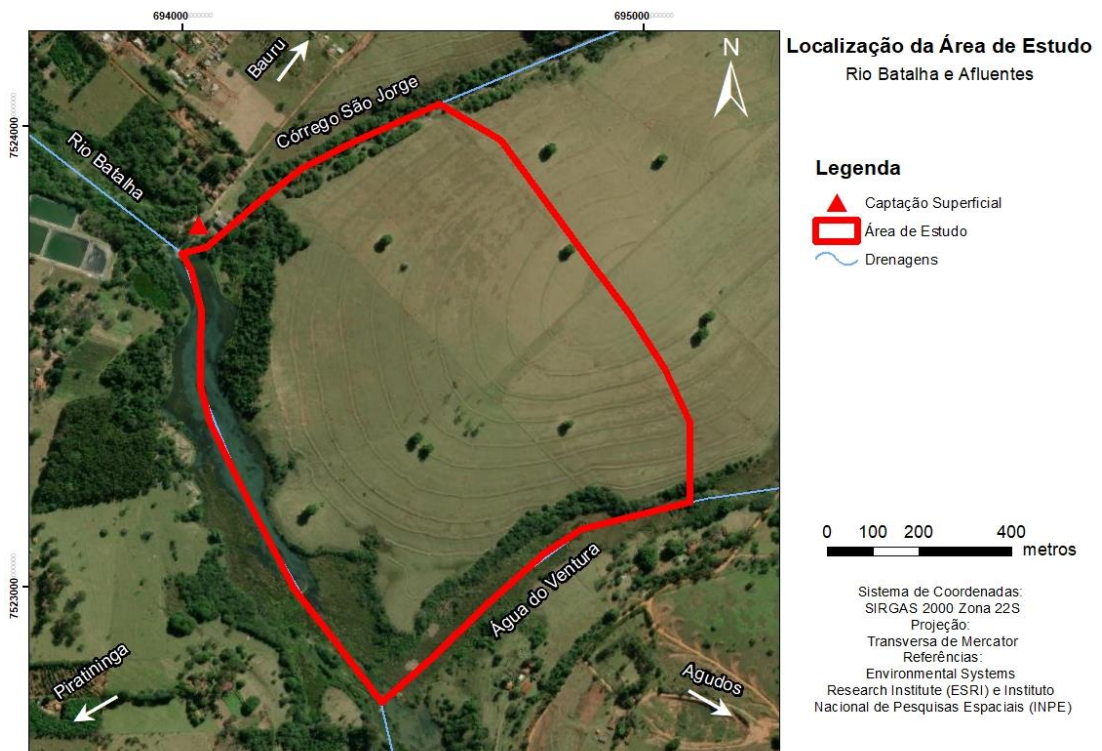


Figura 9: Localização da área de estudo delimitada pelo retângulo em vermelho.

3.2.2. Clima

De acordo com o sistema de Köppen-Geiger, o clima em Bauru é classificado como tropical (Aw), a pluviosidade é maior no verão que no inverno, com valores médios de 256 mm em janeiro (verão) e 39 mm em julho (inverno). No mês de fevereiro, o mês mais quente do ano, a temperatura média é de 23,9 °C, enquanto em julho a temperatura média é de 18,4 °C, sendo a mais baixa de todo o ano. A temperatura média é de 21,7 °C, com uma pluviosidade média anual de 1219 mm.

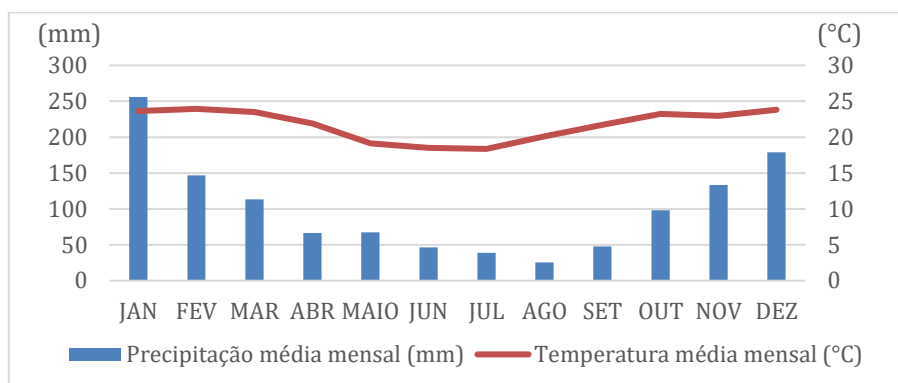


Figura 10: Dados médios climáticos (temperatura e precipitação), da estação A705 de Bauru (SP), entre os anos 2002-2020 (Fonte: inmet.gov.br).

3.2.3. Contexto hidrogeológico

As características da hidrogeologia local são consequentes das falhas pré-cambrianas da Reativação Wealdoniana. Essa tectônica resultou no soerguimento do Grupo São Bento, expondo rochas mesozoicas à erosão pré-Bauru e gerando irregularidades na espessura dos aquíferos da região, e consequentemente, nos seus parâmetros hidráulicos (Paula e Silva & Cavaguti, 1992). Ocorre um predomínio de afloramentos dos aquíferos do Grupo Bauru (Adamantina e Marília) na área de estudo (Figura 11), que se apresentam assentados sobre o Sistema Aquífero Guarani (SAG), apesar de não serem hidráulicamente conectados. A Formação Marília ocorre em áreas topograficamente mais elevadas, enquanto a Formação Adamantina aflora nos vales do Rio Batalha e seus afluentes. O pacote de basaltos da Formação Serra Geral separa o SAG e o SAB regionalmente, entretanto, a erosão pré-Bauru resultou em uma janela geológica e a consequente ausência desta unidade e do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) em grande parte da região de Bauru (Campos et al., 2008).

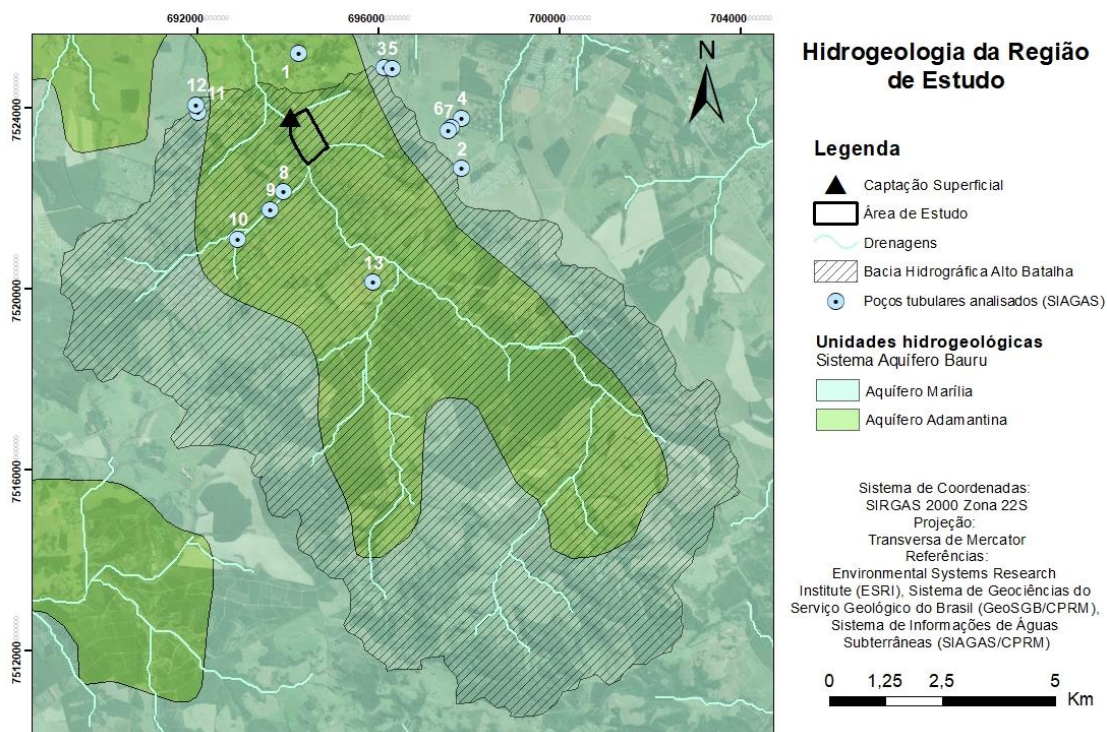


Figura 11: Unidades hidrogeológicas aflorantes na região de estudo e localização dos poços tubulares em que foram analisados os dados e perfis construtivos.

Tabela 2: Resumo das unidades geológicas e hidrogeológicas correspondentes, aflorantes na região de Bauru (Bristrichi et al., 1981).

ERA (IDADE)	SÍMBOLO/FORMAÇÃO GEOLÓGICA	LITOLÓGIAS
Cenozóico	Qa - Depósitos aluviais	Areias e argilas com conglomerados na base.
Mesozóico	Km - Formação Marília (Unidade Aquífera Bauru)	Arenitos de granulação fina a grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte, incluindo lentes e intercalações subordinadas de siltitos e arenitos muito finos com estratificação plano-paralela. Presença comum de nódulos carbonáticos.
	Ka - Formação Adamantina (Unidade Aquífera Bauru)	Arenitos finos a muito finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltitos argilosos e argilitos, ocorrendo em bancos maciços.

No diagnóstico hidrogeológico do DAEE (2015), foi verificada a ocorrência do aquífero Araçatuba na base do SAB. Este, por sua vez, delimita uma barreira hidráulica praticamente impermeável, definindo características de confinamento do SAG na área da janela do basalto. A Formação Araçatuba encontra-se na base do Grupo Bauru, sendo caracterizada por Batezelli et al. (1999) como pacotes de siltitos arenosos cinza-esverdeados, maciços e com intercalações de siltitos argilosos e arenitos muito finos. O ambiente deposicional é descrito como lacustre (Suguio et al., 1977; Batezelli et al., 1999; Paula e Silva et al., 2003), sendo verificado por Paula e Silva (2003), através de perfis geofísicos indicativos de elevada radioatividade e baixa resistividade. Essas características litológicas justificam a ausência de conexão hidráulica entre o SAB e o SAG (Simonato et al., 2016).

O SAB possui comportamento livre e ocorre totalmente aflorante na região de estudo, apresentando características locais de aquífero semiconfinado a confinado, apresentando ampla distribuição e facilidade de ser acessado por poços pouco profundos, que atingem

profundidades de 75 a 125 m (Prefeitura Municipal de Bauru, 2008). A espessura média do SAB na região é de 80 m, sendo que a Formação Marília aparece acima da Formação Adamantina, variando na espessura em dezenas de metros (Varnier et al., 2010). A Formação Adamantina (Tabela 3) ocupa a porção central da área de estudo, seu comportamento hidráulico anisotrópico, semiconfinado e heterogêneo se dá pela presença de siltito e laminações intercaladas (Paula e Silva et al., 2003). A zona de recarga na área de estudo ocorre no Rio Batalha (Santos et al., 2021).

Tabela 3: Parâmetros hidrogeológicos da Unidade Aquífera Adamantina (Mancuso e Campos, 2005; Prefeitura Municipal de Bauru, 2008; Varnier et al., 2010; CPRM, 2012; Rosenberger et al., 2013; DAEE, 2015).

Parâmetro	Valor
Tipo de aquífero	Livre a semiconfinado e heterogêneo
Porosidade	Granular primária
Permeabilidade	Moderada
Porosidade específica (%)	5 a 15
Espessura média (m)	100,00
Vazão média (m ³ /h)	5 a 10
Condutividade hidráulica (m/dia)	0,03 a 0,6
Transmissividade (m ² /dia)	30 a 50
Capacidade específica (m ³ /h/m)	<1,0
Gradiente hidráulico	0,031 a 0,044
Velocidade de fluxo (m/dia)	2,2 a 3,1

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Revisão bibliográfica

O trabalho contemplou uma ampla pesquisa bibliográfica que foi realizada durante todo o seu desenvolvimento, abrangendo consulta de teses e artigos. Esta etapa centrou-se em dois escopos: a pesquisa sobre a técnica de FMR e o estudo da área de interesse. Foram estudados trabalhos mundiais abordando a técnica, objetivando o melhor entendimento das premissas relacionadas à esta e os possíveis cenários simulados na etapa de construção do modelo numérico.

4.2. Levantamento de dados

Foram consultados bancos de dados e publicações para a compilação das informações necessárias para o desenvolvimento do modelo conceitual e caracterização da área estudada, conforme abaixo:

- Hidrogeologia e hidrologia: parâmetros e características do Aquífero Adamantina e do rio Batalha foram compilados principalmente da bibliografia. As informações de nível d'água do rio foram coletados da estação fluviométrica 6C-001 (DAEE) e comparados

com valores divulgados pelo Departamento de Água e Esgoto (DAE) da cidade de Bauru. Os valores de recarga utilizados no modelo da área de estudo correspondem ao cenário com coeficiente de escoamento de 20% calculado por Santos et al. (2021), referente a declividade de terreno suavemente ondulado (6%), aplicável às características da região;

- Geologia: dados de bibliografia e consulta de poços cadastrados no Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), situados no entorno da área (Figura 11), permitiram a caracterização litológica preliminar da área;
- Clima: valores de pluviosidade e temperatura foram extraídos da estação automática A705, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- Geoprocessamento em GIS: para esta etapa foi coletada imagem de satélite da topografia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e arquivos *shapefile* da geologia local do portal GEOSGB do Serviço Geológico Brasileiro (CPRM). Por fim, também se utilizou mapa base de satélite da área de estudo da ESRI (Environmental Systems Research Institute).

4.3. Tratamento de dados

Todas as informações coletadas foram integradas em uma base de dados. Após análise crítica, os dados mais relevantes foram utilizados como parâmetros de entrada para o GMS (Groundwater Modeling System), na modelagem numérica de fluxo de água subterrânea. Também foram compiladas as informações sobre a aplicação da FMR em outros países (anexo A), para entender e estabelecer cenários para o emprego da técnica na área. Em relação ao geoprocessamento em Sistema de Informações Geográficas (SIG, ou GIS do inglês), foram reunidos arquivos georreferenciados, como modelo digital de terreno e *shapefiles*, para a confecção de mapas no ArcGIS e produtos que foram trabalhados nos modelos da área. Por fim, os resultados obtidos através da construção dos modelos foram tratados na forma de gráficos, tabelas e mapas.

4.4. Modelo conceitual

A partir da combinação de todas as informações reunidas nas etapas anteriores, foi possível elaborar o modelo conceitual do sistema rio-aquífero na área de captação de água do município de Bauru, almejando a caracterização de maior detalhe da região de estudo. O estabelecimento do modelo conceitual é uma etapa importante que precedeu a modelagem numérica e norteou o modelo de fluxo da área de estudo.

4.5. Modelo numérico

Partindo do modelo conceitual, foi confeccionado o modelo numérico de fluxo da zona saturada, simplificado e não calibrado para condições reais, no entanto, preciso o suficiente (respeitando a equação geral de fluxo de água subterrânea) para descrever um cenário hidrogeológico plausível da microbacia do Alto Batalha. A precisão foi garantida considerando o balanço de água para todas as células, atingindo um erro menor que 1%. Imagens e vetores georreferenciados, da área de estudo e drenagens associadas, foram tratados em GIS para serem trabalhados no modelo numérico, além disso, os parâmetros de entrada foram compilados a partir da consulta bibliográfica e de banco de dados.

O código de modelagem hidrogeológica empregado neste projeto foi o MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988), contido no pacote de modelagem de águas subterrâneas GMS 10.0 (Groundwater Modeling System – Aquaveo). Este pacote é um pré e pós-processador, permitindo a entrada de dados e executando uma interface gráfica para visualização dos resultados, facilitando as simulações numéricas. O solver utilizado foi o Newtoniano (MODFLOW-NWT), com o pacote de fluxo em zona saturada UPW.

O software simula o fluxo tridimensional em meios porosos por aproximação por diferenças finitas, atribuindo a variável no centro do bloco, podendo considerar simulações em aquíferos confinados, não confinados, ou uma combinação de confinados e não confinados. O modelo simula o fluxo através da solução da equação geral de fluxo de águas subterrâneas em condições estacionárias ou transientes em meio anisotrópico ou isotrópico e heterogêneo ou homogêneo.

4.5.1. Definição do domínio e malha do modelo

Anteriormente as simulações numéricas, foi mapeada a elevação do terreno e traçados os principais corpos superficiais, a fim de se delimitar um domínio com condições de contorno naturais. As informações dos corpos superficiais foram introduzidas em seus respectivos arcos como *rasters* gerados com a ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS, a partir da topografia da área, seguindo as informações dos níveis d'água já compilados da estação fluviométrica 6C-001 (DAEE) e comparando com valores divulgados pelo Departamento de Água e Esgoto (DAE) da cidade de Bauru.

Em relação a malha do modelo, células regulares de 10x10 metros definem o domínio horizontalmente (Figura 12), enquanto em profundidade o modelo é subdividido em 10 camadas (Figura 13). Desta forma, ocorre variação da espessura das camadas no eixo Z em um intervalo de 8 a 14 metros, para adequação da malha em relação ao domínio considerando a base definida na cota de 400 metros e a variação da topografia de 480 a 540 metros. Sendo assim, as camadas estão mais refinadas nas proximidades do rio Batalha, zona de descarga do modelo.

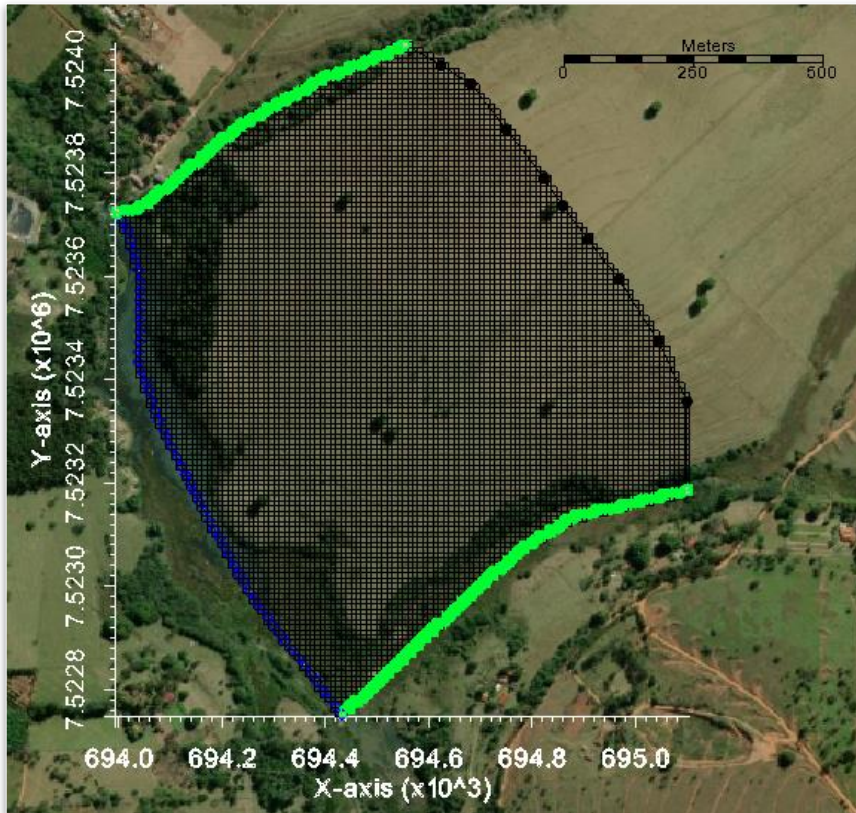


Figura 12: Domínio numérico em planta representando a malha regular horizontal com células 10x10 metros.

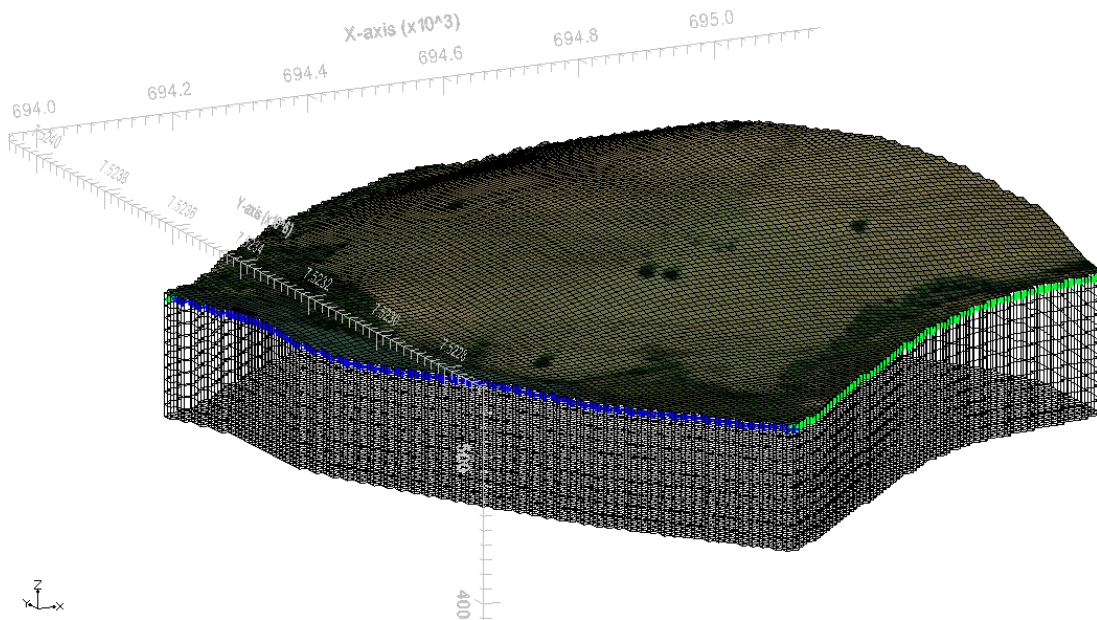


Figura 13: Domínio numérico com as condições de contorno (rio Batalha em azul e córrego em verde).

4.5.2. Simulações numéricas

A partir da modelação numérica, foram realizadas simulações estacionárias e transientes da aplicação do sistema FMR na planície junto à captação de água de Bauru. Os cenários foram avaliados a partir da variação de parâmetros (distância do poço até a margem,

arranjo e geometria dos poços, vazão dos poços, condutância, armazenamento, recarga e condutividade hidráulica) para compreender os diferentes aspectos associados à técnica e estabelecer possíveis alternativas de implantação. Os parâmetros hidráulicos e hidrogeológicos do cenário base, alinhado com a bibliografia e mais próximo da realidade, estão apresentados na Tabela 4. A partir desta etapa, foi possível definir a capacidade de produção do sistema de FMR, a porcentagem de água proveniente do rio e do aquífero, além de outros aspectos relativos às condições do meio.

Tabela 4: Parâmetros do modelo da área de estudo.

Parâmetro	Valor
Tipo de aquífero	Livre
Elevação da área	480 a 540 metros
Base do domínio	400 metros
Espessura do aquífero	80 a 140 metros
Número de camadas	10 camadas
Condutividade hidráulica horizontal (Kh)	0,5 m/d ($5,8 \times 10^{-6}$ m/s)
Heterogeneidade	Anisotropia vertical (Kh/Kv = 10)
Armazenamento	Sy = 0,15 e Ss = 0,00015
Condutância	1,0 m ² /d/m
Fluxo subterrâneo	Perpendicular em direção ao rio
Condições de contorno	Rio: carga fixa e cota de fundo; Drenos: cota de fundo; Alto topográfico: fluxo nulo
Recarga anual	131,9 mm

*Kh = Condutividade hidráulica horizontal; Kv = Condutividade hidráulica vertical; Sy = Vazão específica; Ss = Armazenamento específico.

Inicialmente, gerou-se o modelo estacionário representando a microbacia na área de estudo, com recarga fixa e sem o bombeamento dos poços, com o intuito de obter uma visualização inicial e entender as condições de fluxo da área. Todas as simulações subsequentes foram transientes (partindo do estado estacionário inicial), visto que assim foi possível levar em conta a variação do armazenamento aquífero no sistema e avaliar a sua contribuição, além de analisar o efeito da variação das vazões dos poços ao longo do tempo, o impacto no aquífero em comparação ao cenário anterior sem bombeamento e a interação superficial-subterrânea.

Nas simulações em modo transiente, o período inicial ($t=0$) compreendeu uma condição estacionária (variação do armazenamento igual a zero), em que se inseriu o valor anual de recarga visando definir uma condição pretérita de água no modelo, antes do início do bombeamento, que ocorre a partir do instante subsequente. Ademais, foi definido que os poços bombeariam na estiagem, sendo mais interessante para a gestão hídrica e possibilitando a alteração do regime de fluxo do rio, para que ocorra entrada de água superficial no aquífero através do rebaixamento das cargas hidráulicas na região de bombeamento. Deste modo, no período chuvoso ocorre a recuperação dos níveis d'água a

partir da recarga e do armazenamento.

Os primeiros cenários modelados tiveram como objetivo a compreensão das trocas entre os sistemas rio-aquífero e, principalmente, a avaliação da influência dos diferentes arranjos de poços para o modelo. Para tal, as configurações de poços analisadas diferenciaram-se com base em quatro fatores: distância entre o arranjo e o rio, espaçamento entre poços, posição da seção filtrante e geometria de poços (Tabela 5). A posição da seção filtrante nas simulações foi o principal fator que influenciou os dados construtivos dos poços nos modelos numéricos, definindo a profundidade dos mesmos (Figura 14). A extensão da seção filtrante (espessura da camada) e a profundidade variam conforme a cota topográfica nos cenários simulados, visto que a base do domínio está fixa em 400 metros e os arranjos de poços apresentam cotas distintas. A espessura total do domínio na região dos arranjos está entre 82-90 metros, o que reflete em camadas e filtros com espessuras aproximadas entre 8 a 9 metros, além de uma faixa de profundidade das seções filtrantes entre 24-27 metros, na camada 3, e 40-45 metros na camada 5.

Tabela 5: Variação dos parâmetros para os arranjos de poços modelados.

Parâmetro	Valor
Distância entre arranjo e rio (D)	50, 100, 150 e 200 metros
Espaçamento entre poços (E)	40*, 50, 100, 150 metros
Posição da seção filtrante	3° camada (entre ~24-27 metros) e 5° camada (entre ~40-45 metros)
Geometria	Lineamento paralelo à margem, agrupamento linear paralelo à margem, agrupamento de 5 poços

*Espaçamento entre poços nos agrupamentos, definido com base no trabalho de Grischek et al., (2002)

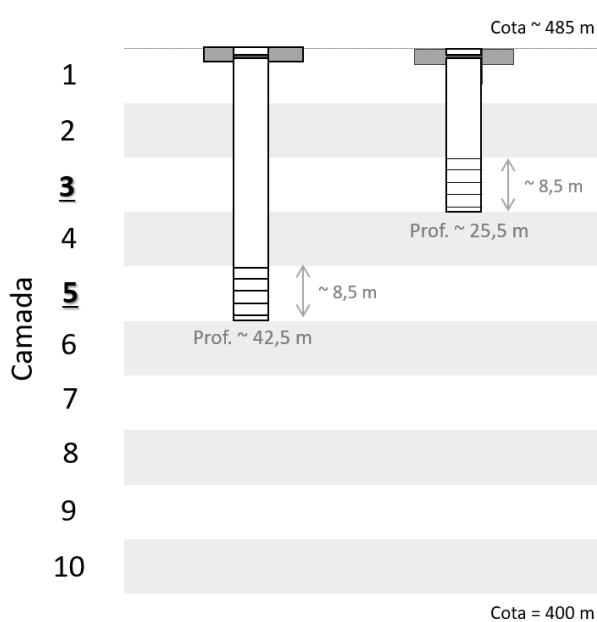


Figura 14: Dados construtivos dos poços considerando a posição da seção filtrante nas camadas 3 e 5 do modelo numérico. Representação aproximada de poços mais próximos ao rio, em cotas topográficas mais baixas.

As configurações de poços definidas para a modelação numérica foram classificadas

em arranjos lineares paralelos à margem (com espaçamento constante entre poços) e agrupamentos de poços. No total, 15 arranjos foram trabalhados no modelo: 12 lineares e 3 agrupamentos. As configurações lineares foram nomeadas levando em consideração a distância entre os poços e rio (D) e o espaçamento entre poços (E). Os agrupamentos localizam-se a uma distância de 100 metros do rio e se subdividem em: 1 arranjo formado por 5 poços, sendo um deles central, e 2 agrupamentos lineares com grupos espaçados em 520 e 200 metros, respectivamente, e com espaçamento de 40 metros entre poços (Figura 15).



Figura 15: Representação de alguns arranjos de poços utilizados nas simulações. D = Distância entre o arranjo e o rio; E = Espaçamento entre os poços; E' = Espaçamento entre os grupos de poços. O agrupamento de poços em 5 apresenta a seguinte configuração: distância entre rio e poço central = 145 m, distância entre poço central e poços laterais = 40 m, distância entre poços laterais = 55 m, distância entre grupos de poços = 350 m.

As etapas de simulação e condições consideradas para a otimização do modelo foram:

- **1º Etapa** – Recarga e bombeamento constantes durante 5 anos:

Anteriormente a utilização dos valores mensais de recarga calculados pelo balanço hídrico, estabeleceu-se uma recarga fixa de 200 mm/ano (compatível com a área de estudo) e a vazão de poços (Q) foi variada com o objetivo de analisar as respostas dos arranjos. Também se investigou o efeito da alteração da profundidade da seção filtrante na capacidade do sistema. Para esta etapa de otimização, os balanços hídricos e a eficiência da produção dos arranjos de poços foram avaliados.

- **2º Etapa** – Recarga e bombeamento transientes durante 2 anos:

Esta simulação considerou um cenário próximo da distribuição das precipitações anuais, sendo utilizados valores de recarga mensais calculados por Santos et al. (2021) na região referentes ao ano de 2018 (Tabela 6). Para esta etapa, foi observada a influência dos períodos de recuperação (sem bombeamento) para o armazenamento aquífero e investigado as respostas de cenários com valores de vazão mais elevados, sempre operando os poços nos períodos de estiagem. A otimização se deu através das análises da contribuição de fluxo de entrada do rio e do aquífero para o sistema e valores de rebaixamento das cargas hidráulicas resultantes do bombeamento.

Tabela 6: Parâmetros considerados para a 2° etapa de simulação.

Cenário de 20% de coeficiente de escoamento na área	
Recarga = 131,9 mm/ano	
<u>Ciclo anual da simulação:</u>	Vazões de poços:
<u>Período de recuperação:</u>	Q = 5 m ³ /h
30 dias: recarga de 85,7 mm/ano	Q = 10 m ³ /h
30 dias: recarga de 17,8 mm/ano	Q = 15 m ³ /h
30 dias: recarga de 28,4 mm/ano	
90 dias: sem recarga	
<u>Período de bombeamento:</u>	
180 dias: sem recarga	

- **3° Etapa – Recarga e bombeamento transientes durante 5 anos:**

Por fim, foram simulados cenários adicionais para os arranjos que obtiveram os melhores resultados ao final da otimização, abrangendo análises simples de sensibilidade e avaliação da contribuição dos parâmetros hidráulicos no sistema. Ademais, também foi modelado um cenário mais vantajoso considerando a existência de um aluvião no domínio e um aumento na recarga, ainda seguindo valores próximos a realidade local estimados por Santos et al. (2021) (Tabela 7). Foi delimitado um polígono que abrange uma extensão de um pouco mais de 50 metros ao entorno do rio e uma profundidade que inclui a primeira camada da malha do modelo, que na região do rio possui uma espessura aproximada de 8 metros.

Tabela 7: Parâmetros considerados para a 3° etapa de simulação.

Cenário de 10% de coeficiente de escoamento na área	
Recarga = 173,8 mm/ano	
<u>Ciclo anual da simulação:</u>	Vazões de poços:
<u>Período de recuperação:</u>	Q = 10 m ³ /h
30 dias: recarga de 130,6 mm/ano	
30 dias: recarga de 38,1 mm/ano	Condutividade hidráulica do pacote aluvionar = 8,5 m/dia (10 ⁻⁴ m/s)
30 dias: recarga de 5,1 mm/ano	
90 dias: sem recarga	Condutâncias = 1 e 10 m ² /d/m
<u>Período de bombeamento:</u>	
180 dias: sem recarga	

Os balanços hídricos gerados nas simulações foram compilados em uma base de dados. Os resultados mais expressivos foram tratados na forma de gráficos, tabelas, mapas potenciométricos e seções hidrogeológicas, que se encontram no decorrer do texto ou em forma de anexo.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1. Modelo conceitual

O modelo conceitual da área é constituído pela Formação Adamantina, com espessura média de 100 metros, delimitada na base pelo Aquitarde Araçatuba. O Aquífero Adamantina é constituído majoritariamente por arenitos finos a muito finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos, com lentes de siltitos argilosos e argilitos, ocorrendo em bancos maciços. Essa litologia caracteriza um pacote heterogêneo expresso por elevada anisotropia vertical, decorrente da deposição dos estratos sedimentares, com baixa condutividade hidráulica. No entanto, para a modelagem numérica, por conta da escassez de dados litoestratigráficos na área, fez que o aquífero fosse simplificado como homogêneo, empregando as condutividades hidráulicas esperadas para sua porção mais superficial.

A área do modelo conta com a presença do rio Batalha a sudoeste, que delimitou todo o fluxo subterrâneo, os afluentes Córrego São José e Água do Ventura e um divisor topográfico a nordeste (Figura 16). O aquitarde Araçatuba define a base do domínio, visto que as suas características hidrogeológicas o tornam uma barreira hidráulica entre o Adamantina e o SAG, na janela do Serra Geral existente na região. A cota de contato foi estabelecida em 400 m, o que garante uma espessura do Adamantina para a área modelada de 80 a 140 m, condizentes com a revisão bibliográfica. O trecho do rio Batalha na região apresenta uma extensão aproximada de 1 km e largura do corpo d'água média de 100 metros, além disso, a distância deste manancial até o alto topográfico a nordeste da área é de aproximadamente 900 metros.

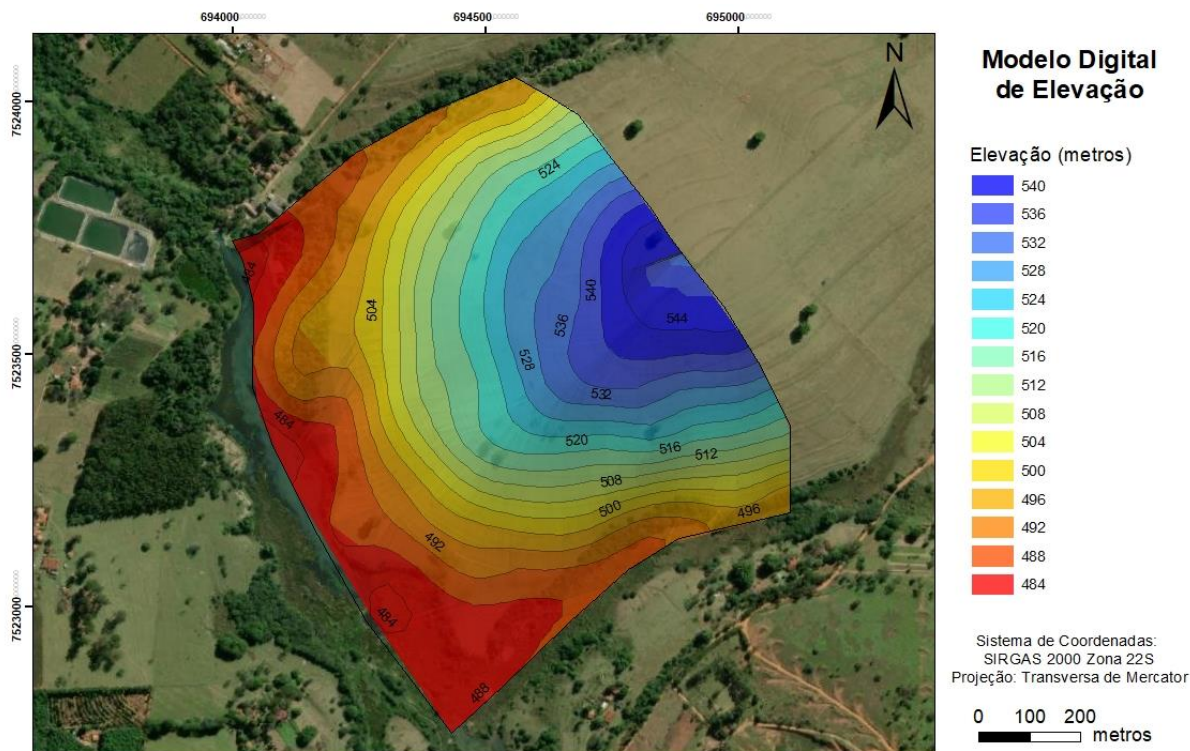


Figura 16: Modelo digital de elevação do domínio.

A declividade do terreno é de 6% e tem característica suavemente ondulada, o que reflete na determinação de um coeficiente de escoamento de 20%, plausível para a região, garantindo uma recarga anual de cerca de 130 mm, conforme os resultados do trabalho de Santos et al. (2021). Em relação ao nível d'água dos corpos superficiais, estimou-se o valor de 3 metros para o rio Batalha, enquanto a lâmina d'água definida para o modelo foi de 2 metros, o que resulta em uma cota de fundo do rio de 5 metros de profundidade.

5.2. Modelo numérico

As simulações numéricas possibilitaram a compreensão da dinâmica de fluxo no sistema rio-aquífero e a avaliação do efeito de diferentes parâmetros na eficiência da FMR. A simulação do modelo em modo estacionário permitiu visualizar o fluxo subterrâneo através da potenciometria gerada (Figura 17a), caracterizando um fluxo perpendicular em direção ao manancial e definindo o rio Batalha como efluente. Foi possível delimitar a região não saturada a partir da visualização de células secas na malha do modelo, abrangendo o alto topográfico a nordeste da área, sendo que em profundidade essas células chegaram até a camada 3. Assim, o nível d'água estimado para o alto topográfico foi de pelo menos 40 metros, considerando que a camada nesta região é mais espessa, com células apresentando aproximadamente 14 metros de comprimento. Por outro lado, ter definido valores de condutividade hidráulica inicialmente constantes para todo o domínio resultou em um gradiente hidráulico pouco expressivo na área (Figura 17b).

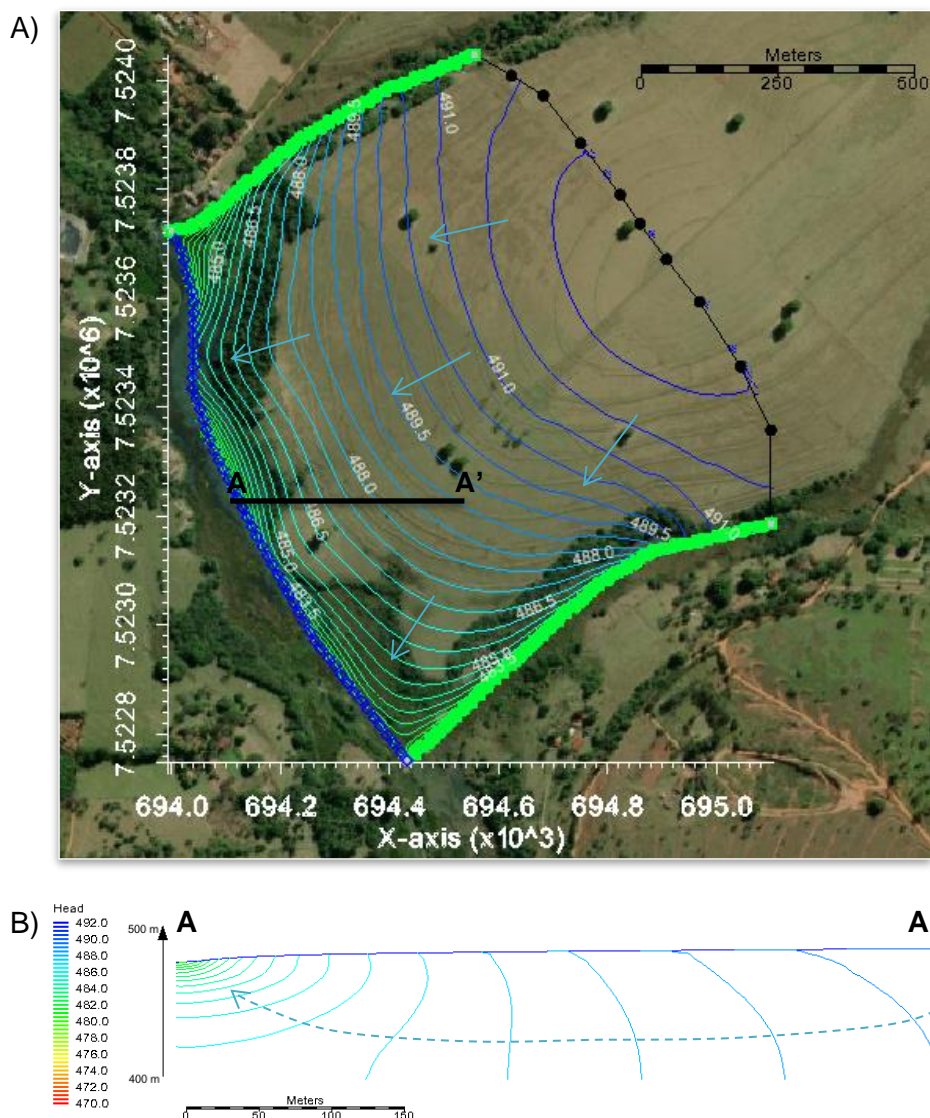


Figura 17: A) Potenciometria e B) seção hidrogeológica do modelo estacionário com a representação do sentido de fluxo da água subterrânea em direção ao rio.

Nas primeiras simulações transientes, com bombeamento e recarga constantes durante 5 anos, foram simulados cenários iniciais com vazões mais baixas, de 2,5 e 5 m³/h por poço. No cenário com vazão igual a 2,5 m³/dia, os arranjos com distância de 200 metros em relação ao rio – D200E50, D200E100, D200E150 – e posição de filtro na camada 3 (poços em torno de 25 m de profundidade), apresentaram dificuldade para convergir, indicando secamento da camada 3. Além disso, a configuração nesta distância se aproxima de células secas do alto topográfico. Neste mesmo cenário, a maioria dos arranjos com espaçamento entre poços de 50 metros (E50) e posição de filtro também na camada 3, perderam a capacidade de produção (secamento de filtros) ao decorrer do tempo simulado. Em relação aos arranjos de poços simulados com a posição do filtro na camada 5 (poços mais profundos), todos mantiveram a sua capacidade de produção máxima no cenário com vazão de 2,5 m³/dia (Tabela 8).

Ainda na primeira etapa de otimização dos arranjos de poços, mas com vazão de 5 m³/dia, praticamente todas as configurações com seção filtrante na camada 3 apresentaram dificuldade para convergir ou tiveram perda na capacidade de produção. Os agrupamentos de poços apresentaram balanços hídricos similares, principalmente os lineares. Não houve perda da eficiência desses arranjos para vazões baixas ou maior profundidade do filtro, entretanto, foi verificado possível risco de interferência entre os poços através das feições das linhas equipotenciais no modelo.

Tabela 8: Resumo dos resultados da primeira etapa de otimização dos arranjos de poços através da simulação numérica com bombeamento e recarga (200 mm/ano) constantes durante 5 anos.

1° Etapa de otimização dos arranjos de poços				
Arranjo	Q = 2,5 m ³ /h		Q = 5 m ³ /h	
	Filtro camada 3	Filtro camada 5	Filtro camada 3	Filtro camada 5
D50E50				
D50E100				
D50E150				
D100E50				
D100E100				
D100E150				
D150E50				
D150E100				
D150E150				
D200E50				
D200E100				
D200E150				
Agrupamento linear (E'520)				
Agrupamento linear (E'200)				
Agrupamento com 5 poços				

 Arranjos que apresentaram decréscimo na capacidade de produção ou não convergiram.

Devido aos resultados das primeiras simulações, os arranjos que apresentaram menor eficiência foram descartados para os cenários subsequentes, o que inclui as configurações com distância de 200 metros do rio e com espaçamento de 50 metros entre os poços. O agrupamento linear com espaçamento de 200 metros entre os grupos também foi desconsiderado para os próximos cenários, visto a similaridade dos resultados com o agrupamento linear espaçado em 520 metros, assim, optou-se pelo arranjo com maior distância entre os grupos de poços para evitar riscos de interferência.

Após o primeiro refinamento, iniciou-se as simulações com recarga e bombeamento transientes ao longo de 2 anos, abrangendo circunstâncias mais realistas a partir do emprego de valores de recarga estimados na região por Santos et al. (2021). Para este cenário, as vazões consideradas foram de 5, 10 e 15 m³/h, sendo que não foram simulados arranjos com profundidade de filtro na camada 3 para a vazão mais alta, visto que na última etapa essa configuração já não apresentou bons resultados do balanço de água para 10 m³/h. Além disso, os agrupamentos foram simulados apenas para cenários com filtro na camada 5. Nestas situações mais próximas à realidade local, os arranjos com poços mais rasos não tiveram

bons resultados para vazões mais altas, ainda, a vazão de 15 m³/h foi muito elevada até mesmo para poços mais profundos, que também não conseguiram manter a máxima produtividade durante o período de 2 anos (Tabela 9). Os agrupamentos se mantiveram sustentáveis, isto é, o aquífero obteve certo grau de recuperação entre os períodos de bombeamento, apenas com poços profundos, com filtro na camada 5, e com vazões mais baixas. Em relação a capacidade de manter a produção máxima nestes cenários, os arranjos com melhores resultados foram os que apresentam 50 metros de distância com o rio, ou seja, o D50E100 e o D50E150, sendo ainda mais eficientes com filtro na camada 5 (Figura 18).

Tabela 9: Resumo dos resultados da segunda etapa de otimização dos arranjos de poços através da simulação numérica com bombeamento e recarga transientes durante 2 anos.

2º Etapa de otimização dos arranjos de poços						
Arranjos	Q = 5 m ³ /h		Q = 10 m ³ /h		Q = 15 m ³ /h	
	Filtro camada 3	Filtro camada 5	Filtro camada 3	Filtro camada 5	Filtro camada 3	Filtro camada 5
D50E100					X	
D50E150					X	
D100E100					X	
D100E150					X	
D150E100					X	
D150E150					X	
Agrupamento linear (E'520)	X		X		X	
Agrupamento com 5 poços	X		X		X	

	Arranjos que apresentaram decréscimo na capacidade de produção
X	Arranjos não simulados nos referidos cenários

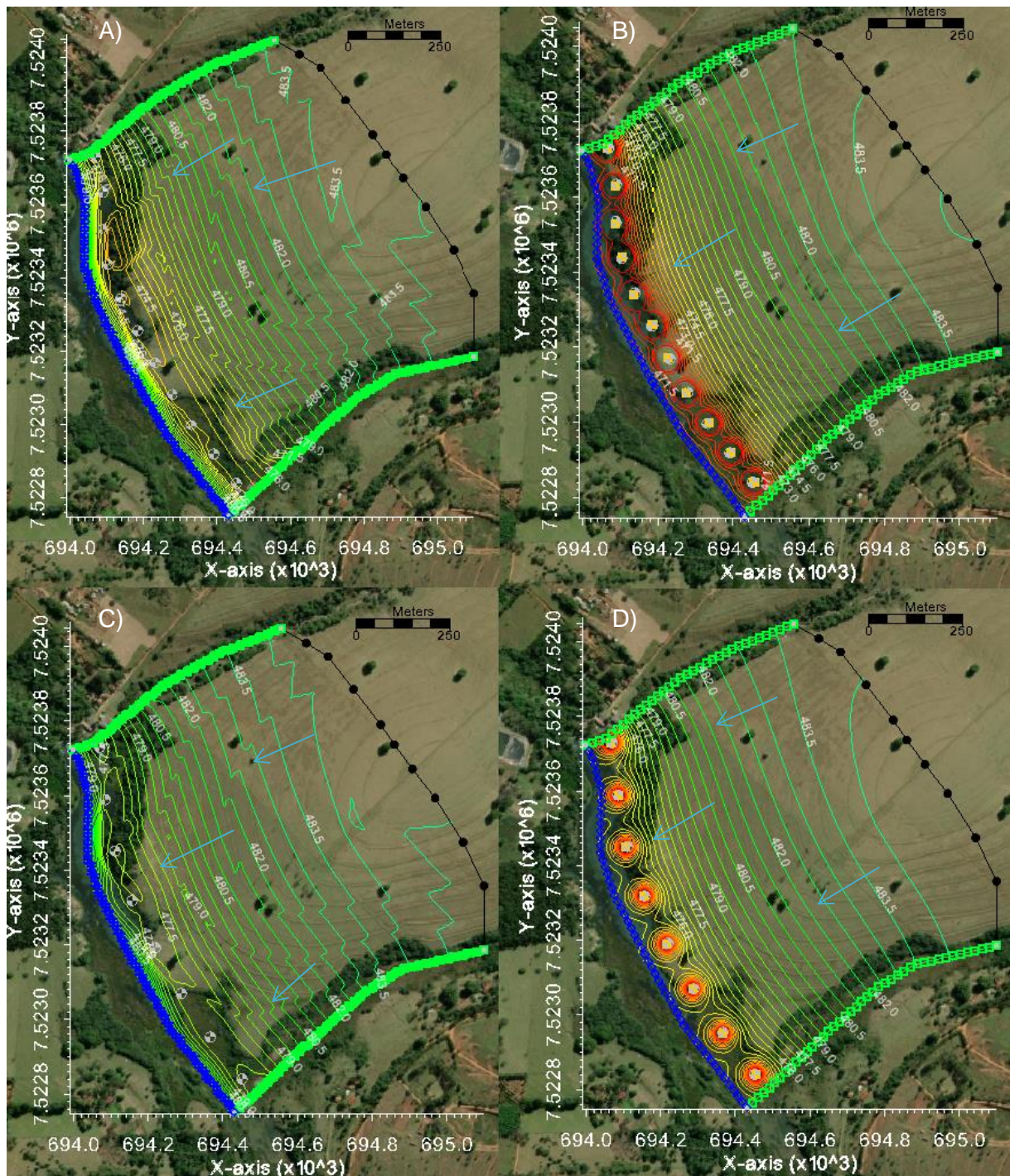


Figura 18: Potenciometrias relativas aos melhores cenários da 2ª etapa de otimização dos arranjos, no instante $t = 540$ dias. A) D50E100 na camada 1; B) D50E100 na camada 5; C) D50E150 na camada 1; D) D50E150 na camada 5.

A partir da análise dos rebaixamentos de carga hidráulica no sistema e da interação rio-aquífero para o período considerado, foi observado que os arranjos distantes em 150 metros do rio apresentaram valores elevados de rebaixamento do nível d'água em relação à condição inicial (Figura 19) e menor contribuição superficial (Tabela 10). Em contrapartida, os melhores resultados para esses fatores foram atingidos pelos arranjos D50.

Outro ponto importante é que, para aferir a contribuição de água superficial a partir de um código de modelagem de águas subterrâneas, foi utilizado o aporte de água calculado do

rio em direção ao aquífero, considerando que o bombeamento modificou o regime de fluxo anteriormente visto em estado estacionário.

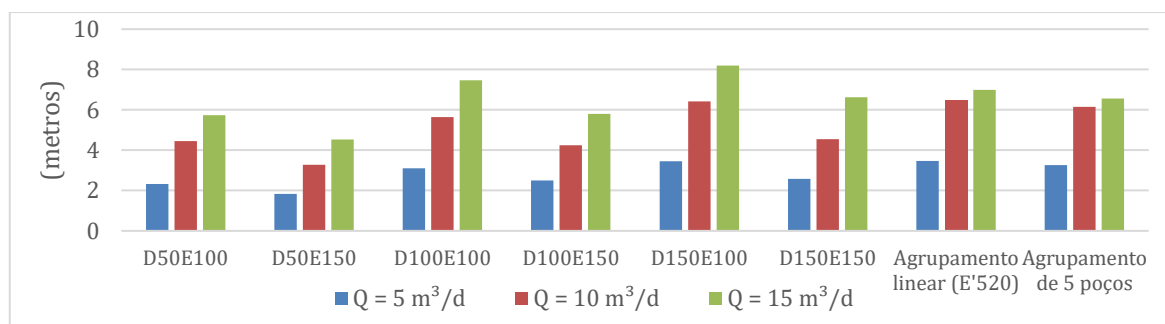


Figura 19: Rebaixamentos das cargas hidráulicas na camada 1 após 2 anos, para configurações com filtro posicionado na camada 5. O resultado é referente às simulações da segunda etapa de otimização dos arranjos.

Tabela 10: Taxas de fluxo de entrada de água do rio e do aquífero no sistema, estimadas a partir dos balanços hídricos das simulações para configurações com filtro posicionado na camada 5, após 2 anos de recarga e bombeamento transientes.

Contribuições de água superficial e subterrânea para o sistema modelado						
Arranjos	Q = 5 m³/d		Q = 10 m³/d		Q = 15 m³/d	
	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero
D50E100	25%	75%	28%	72%	29%	71%
D50E150	21%	79%	27%	73%	29%	71%
D100E100	18%	82%	21%	79%	23%	77%
D100E150	15%	85%	20%	80%	23%	77%
D150E100	12%	88%	16%	84%	18%	82%
D150E150	11%	89%	15%	85%	17%	83%
Agrupamento linear (E'520)	19%	81%	21%	79%	23%	77%
Agrupamento de 5 poços	18%	82%	22%	78%	23%	77%

Considerando todas as análises no processo de otimização dos arranjos, as configurações que apresentaram os melhores resultados foram as com distância de 50 metros do rio, D50E100 e D50E150, com capacidade máxima de produção de 2.640 e 1.920 m³/d respectivamente. Além disso, levando em conta a eficiência do sistema, o cenário com posição de filtro na camada 5 e vazão de 10 m³/h atingiram os melhores valores. O fluxograma da Figura 20 resume os principais pontos das etapas de otimização dos poços.

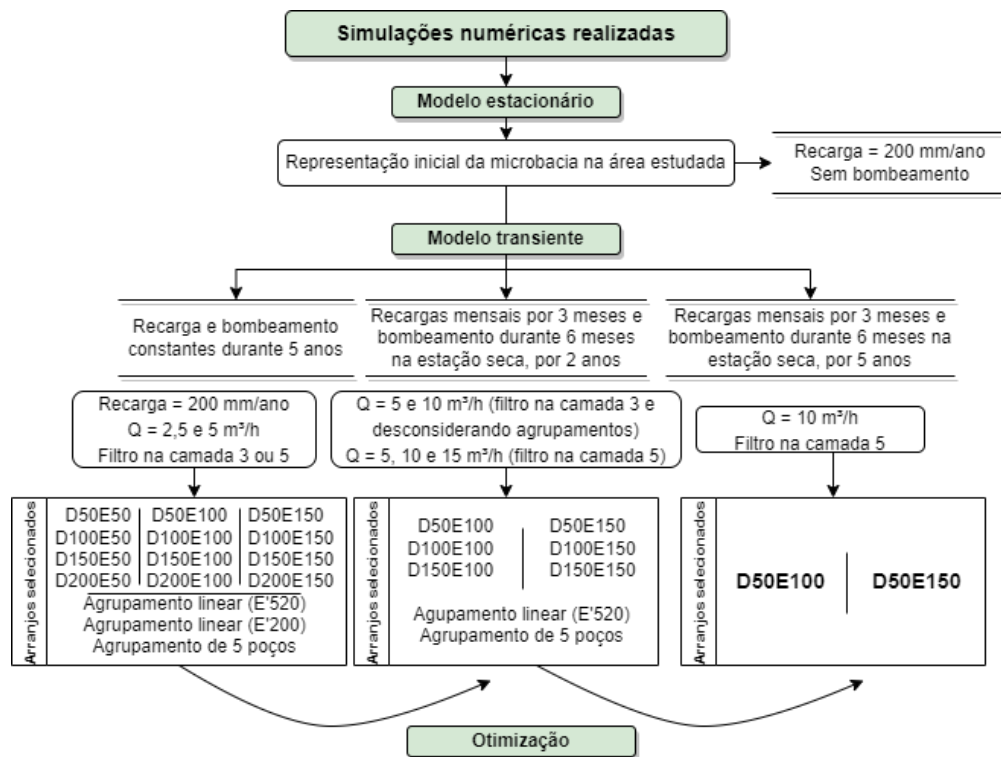


Figura 20: Fluxograma representando as principais etapas de simulação numérica, objetivando a otimização do arranjo de poços para a FMR na área estudada.

Com a definição das configurações que apresentaram os melhores resultados, também foram realizadas análises de sensibilidade dos parâmetros hidráulicos, com a variação da condutância e componente de vazão específica do armazenamento (S_y) (Tabela 11). Foi definido que o coeficiente armazenamento específico (S_s) no modelo iria variar conforme $S_s = S_y/10^3$, visto que este parâmetro é de menor importância para um aquífero livre em termos de contribuição para seu armazenamento, já que o volume fornecido de água sob influência da gravidade, representado pela vazão específica, é muito superior ao volume obtido da compressão do material geológico sob as condições de um aquífero não confinado. Todos os cenários simulados levaram em conta a otimização dos arranjos, ou seja, tiveram como base as configurações D50E100 e D50E150, com a posição da seção filtrante na camada 5 e vazão 10 m³/h.

Tabela 11: Valores considerados para a variação da condutância e da componente de armazenamento S_y nas simulações numéricas, com os cenários base em negrito.

Condutância (m ² /d/m)	0,10	1,00	10,00
S_y (%)	0,075	0,15	0,30

O aumento da condutância resultou em uma maior influência do fluxo do rio no sistema, enquanto o aumento de S_y auxiliou para o armazenamento (Tabela 12). Em relação ao rebaixamento das cargas hidráulicas, ambos auxiliaram na diminuição dos valores de rebaixamento (Figura 21).

Tabela 12: Taxas de fluxo de entrada de água do rio e do aquífero no sistema resultantes da análise de sensibilidade da condutância e da vazão específica (S_y), após 2 anos de recarga e bombeamento transientes.

Contribuições de água superficial e subterrânea para o sistema modelado						
Arranjos	Condutância = 1 m ² /d/m; $S_y = 0,075$		Condutância = 1 m ² /d/m; $S_y = 0,15$		Condutância = 1 m ² /d/m; $S_y = 0,3$	
	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero
D50E100	37%	63%	28%	72%	21%	79%
D50E150	38%	62%	28%	72%	19%	81%
Arranjos	Condutância = 0,1 m ² /d/m; $S_y = 0,15$		Condutância = 1 m ² /d/m; $S_y = 0,15$		Condutância = 10 m ² /d/m; $S_y = 0,15$	
	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero
D50E100	12%	88%	28%	72%	33%	67%
D50E150	14%	86%	28%	72%	33%	67%

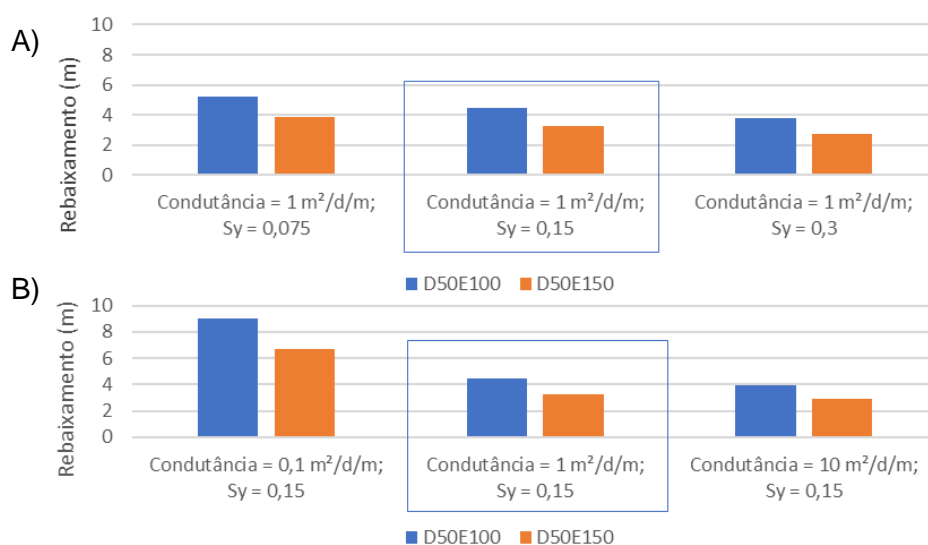


Figura 21: Contribuição para o rebaixamento das cargas hidráulicas, com o cenário base delimitado pelo retângulo, após 2 anos de recarga e bombeamento transientes. A) Análise de sensibilidade de S_y ; B) Análise de sensibilidade de condutância.

Partindo-se do pressuposto que existe um material aluvionar na área, com uma espessura mínima compatível com o modelo (1^o camada) e extensão que atinge a região de bombeamento, o cenário geológico tornou-se um pouco mais heterogêneo. A condutividade hidráulica definida para esta região foi de 8,5 m/dia (10^{-4} m/s), contrastando com o valor de 0,5 m/dia (6×10^{-6} m/s), presente no restante do modelo. O aumento da condutividade hidráulica afetou de forma significativa o balanço hídrico, no qual, atingiu-se cenários com as maiores contribuições de água superficial para o sistema (Tabela 13) e com os menores valores de rebaixamento (Figura 22). Observou-se novamente a influência do aumento da condutância para a entrada de água superficial no sistema, havendo um acréscimo considerável da taxa de água do rio no cenário com condutância de 10 m²/d/m. O aumento da recarga resultou em um acréscimo suave na contribuição do armazenamento aquífero. O melhor cenário definido apresenta pacote aluvionar, condutância de 10 m²/dia/m e com recarga que atinge aproximadamente 170 mm/ano, equivalente ao coeficiente de escoamento de 10% na área.

Tabela 13: Taxas de fluxo de entrada de água do rio e do aquífero no sistema, estimadas a partir dos balanços hídricos para cenários com ou sem a presença de aluvião, considerando variação no coeficiente de escoamento (consequentemente recarga) e condutância, após 5 anos de recarga e bombeamento transientes.

Contribuições de água superficial e subterrânea para o sistema modelado										
Arranjos	Escoamento = 20%; Condutância = 1 m ² /d/m; Sem presença de aluvião		Escoamento = 10%; Condutância = 1 m ² /d/m; Sem presença de aluvião		Escoamento = 20%; Condutância = 1 m ² /d/m; Presença de aluvião		Escoamento = 10%; Condutância = 1 m ² /d/m; Presença de aluvião		Escoamento = 10%; Condutância = 10 m ² /d/m; Presença de aluvião	
	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero	% Rio	% Aquífero
D50E100	36%	64%	35%	65%	57%	43%	56%	44%	67%	33%
D50E150	37%	63%	36%	64%	59%	41%	57%	43%	69%	31%

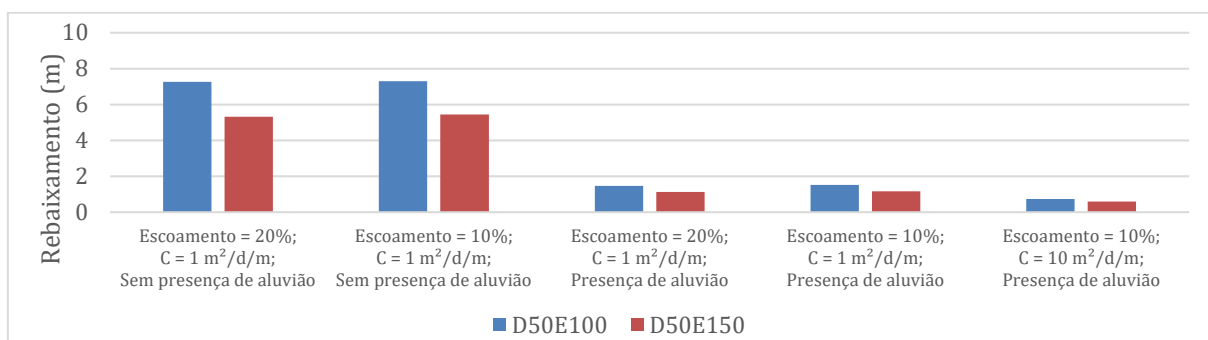


Figura 22: Rebaixamentos das cargas hidráulicas estimadas a partir dos balanços hídricos para cenários com ou sem a presença de aluvião, considerando variação no coeficiente de escoamento (consequentemente recarga) e condutância (c), após 5 anos de recarga e bombeamento transientes.

Em relação a recuperação do armazenamento aquífero entre os períodos de bombeamento, durante a estação chuvosa e com o suporte da recarga, nota-se o grande potencial de recuperação do cenário com presença de aluvião (Figura 23a e b), no qual recupera quase que totalmente após 5 anos de operação. O rebaixamento atinge praticamente 30 metros na camada 5 (onde ocorre o bombeamento), durante o funcionamento dos poços, sendo menos expressivo superficialmente, no qual não chega em 2 metros. Apesar disso, após os períodos de recuperação, tem-se um valor de rebaixamento na camada 1 do modelo de 1 metro, enquanto na camada 5 o valor está próximo de 2 metros. Por outro lado, no cenário sem aluvião (Figura 23c e d) a capacidade de recuperação diminui, de forma comparativa, sendo que o rebaixamento após 5 anos atinge entre 5 e 7 metros no nível d'água, para as configurações D50E150 e D50E100, respectivamente. Nota-se a influência da presença do aluvião principalmente na diminuição dos valores de rebaixamento da primeira camada do modelo.

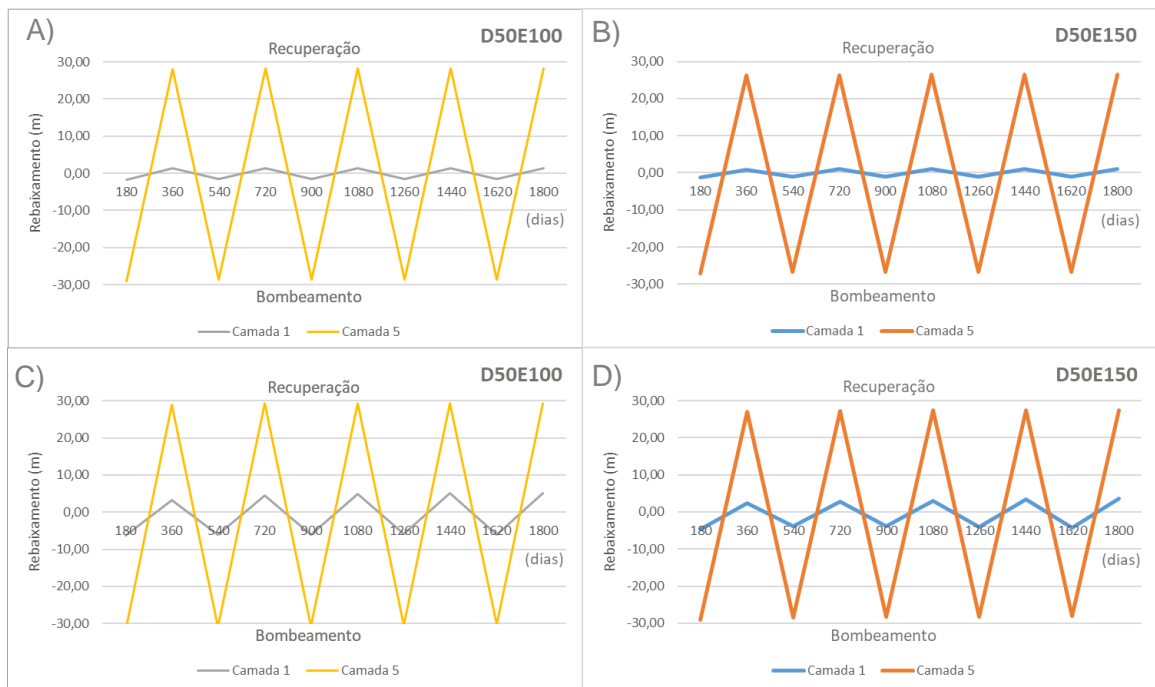


Figura 23: Rebaixamento das cargas hidráulicas entre períodos de bombeamento e recuperação para cenário com 10% de escoamento. A) e B) Com presença de aluvião; e C) e D) Sem presença de aluvião.

Os mapas potenciométricos e seções hidrogeológicas das Figuras 24 e 25 mostram o efeito dos rebaixamentos das cargas hidráulicas na potenciométrica das simulações sem e com pacote aluvionar, notando-se o efeito mais acentuado do cone de depressão provocado pelo bombeamento no cenário sem o aluvião (Figura 24).

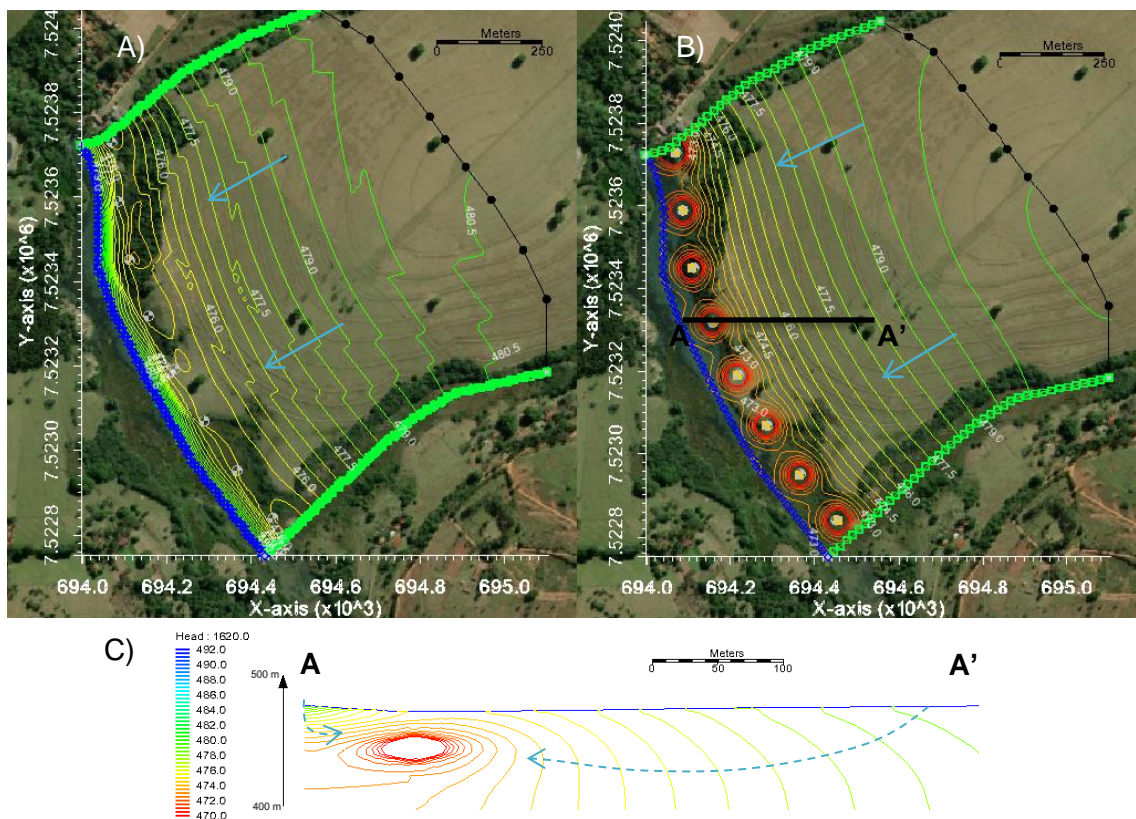


Figura 24: Potenciométrica do aquífero no instante $t = 1620$ dias, do cenário com coeficiente de escoamento de 20% sem pacote aluvionar, arranjo D50E150, com condutância de $10 \text{ m}^2/\text{d}/\text{m}$ e 5 anos de bombeamento

transiente: A) Visão da camada 1; B) Visão da camada 5; C) Seção hidrogeológica durante bombeamento na camada 5

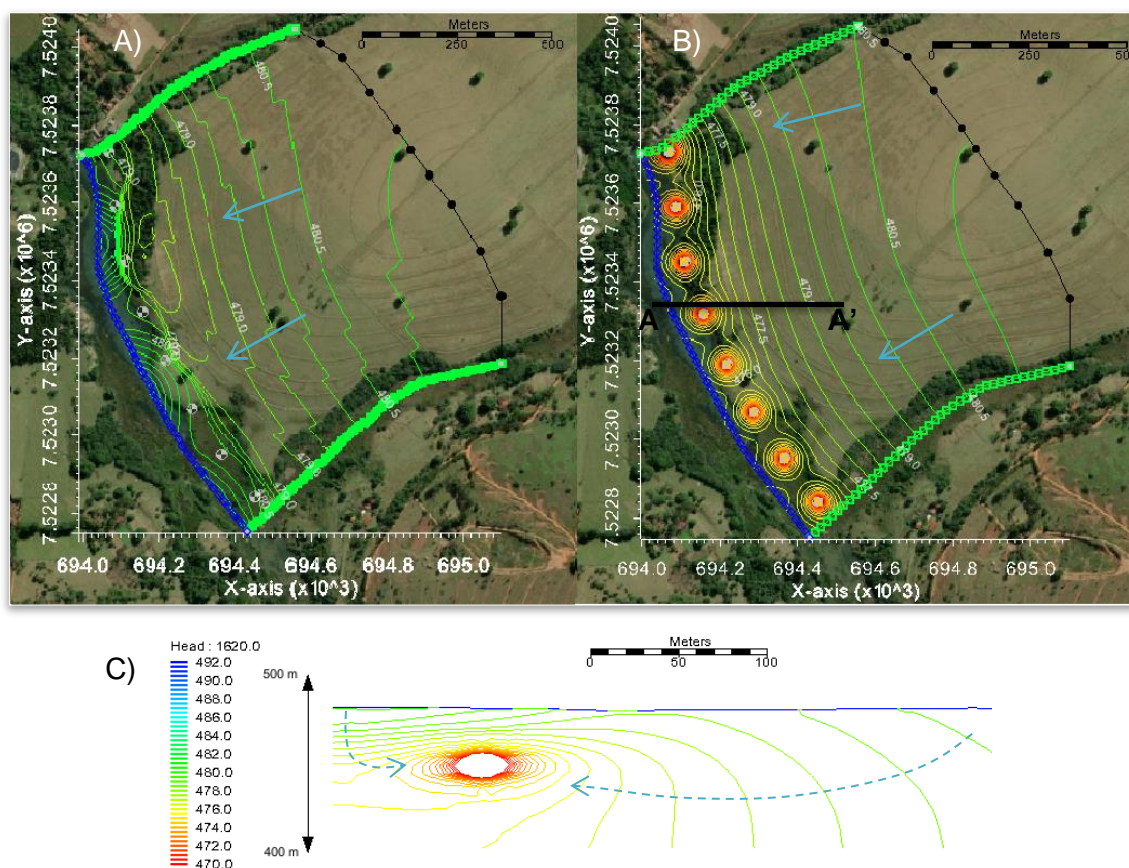


Figura 25: Potenciometria no instante $t = 1620$ dias, do cenário com coeficiente de escoamento de 10% com pacote aluvionar, arranjo D50E150, com condutância de $10 \text{ m}^2/\text{d}/\text{m}$ e 5 anos de bombeamento transiente: A) Visão da camada 1; B) Visão da camada 5; C) Seção hidrogeológica durante bombeamento na camada 5.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em comparação com a área de estudo, tem-se que as características da hidrogeologia local (litologia, heterogeneidade e baixa condutividade) contrapõem a tendência do cenário ideal para a FMR observada nas aplicações mundiais. As condutividades hidráulicas observadas no emprego da FMR em outros países geralmente se encontram acima da ordem de 10^{-3} e 10^{-4} m/s, enquanto na Formação Adamantina encontramos valores em 10^{-6} m/s. A consideração de um pacote aluvionar nas proximidades do rio Batalha demonstrou a grande influência da condutividade hidráulica, sendo o cenário mais vantajoso para a FMR. Mesmo que seja uma camada de pequena espessura, o aumento da condutividade hidráulica na região do rio intensifica as trocas com o aquífero e diminui sensivelmente o rebaixamento das cargas hidráulicas.

Ainda em relação a avaliação bibliográfica, destaca-se o grande risco de colmatção que a área pode estar sujeita, considerando os ciclos intensos de seca que vêm ocorrendo na região, de forma conjunta com a característica de represamento da porção do rio Batalha

estudada. Tais fatores potencializam o risco de colmatção, o que pode vir a ser um problema em relação a perda de eficiência de infiltração com o passar do tempo, o que é ainda mais intensificado pela baixa condutividade hidráulica encontrada no Aquífero Adamantina. Uma limitação do presente trabalho é que o modelo numérico não retrata cenários com colmatção no sistema, não sendo possível avaliar o seu impacto na FMR na área. No entanto, estima-se que a colmatção poderia retardar o aumento da contribuição de água superficial que ocorre ao longo do tempo, retratado no modelo numérico.

Na etapa de modelação numérica, a otimização dos cenários se baseou na análise dos balanços hídricos, rebaixamento das cargas hidráulicas e capacidade máxima do sistema. O rebaixamento anual é um dado hipotético, visto que o armazenamento está limitado a porção da microbacia estudada, não representando a dinâmica regional do aquífero, no qual não possui limites fixos, em oposição a definição do modelo.

Deste modo, as simulações foram refinadas a partir dos cenários mais sustentáveis, com o melhor aproveitamento de água infiltrada do rio, menor rebaixamento e que não perdessem a capacidade de produção dos poços no tempo simulado. Os resultados indicam que a distância entre os poços e rio influencia na proporção de água de rio infiltrada no sistema, sendo que a taxa de água superficial é maior para as configurações de poços mais próximas do rio, a partir de uma vazão mínima dos poços que seja suficiente para modificar o regime de fluxo inicial (5 m³/h nas condições modeladas). Houve um acréscimo de aproximadamente 50 a 100% na contribuição de água do rio através da diminuição da distância dos poços em relação à margem, observado entre os arranjos D150 e D50.

Nas primeiras simulações de otimização das configurações de poços para a FMR na área, os arranjos com espaçamento entre poços de 50 metros (E50) e os com distância de 200 metros do rio (D200) foram os menos sustentáveis dos cenários simulados. As configurações E50 começaram a secar camadas mesmo para vazões mais baixas, enquanto as D200 encontram-se muito afastadas do rio, chegando próximas a regiões com células secas no alto topográfico. Além disso, a baixa condutividade hidráulica do Aquífero Adamantina resulta em um maior tempo de infiltração de água no sistema, o que reforça a necessidade de aplicação de menores distâncias em relação ao rio.

Em relação as simulações com vazões mais elevadas, os poços rasos, com posição da seção filtrante na camada 3, perdem a capacidade de produção ao longo do tempo. Por outro lado, a vazão de 15 m³/h na região não é sustentável nem mesmo para arranjos com poços mais profundos, visto que ocorre secamento das camadas. O cenário ideal foi estabelecido em $Q = 10$ m³/h para poços com filtro na camada 5 (aproximadamente 50 metros). No mais, a distância de 50 metros do rio tem a maior contribuição de água superficial (sendo vantajoso para a FMR), menor rebaixamento e boa eficiência produtiva, o que garante que, para uma modelagem inicial, seja a melhor configuração para os arranjos de poços. As

capacidades máximas de produção para os arranjos D50E100 e D50E150 estabeleceram-se em 2.640 e 1.920 m³/d, respectivamente.

A partir da análise de sensibilidade dos parâmetros, observou-se que o aumento da condutância é interessante para intensificar a contribuição de água do rio no sistema, enquanto o aumento da vazão específica diminui o rebaixamento das cargas hidráulicas, intensificando a contribuição do aquífero nos meses de bombeamento. A mudança adotada do valor de recarga foi pouco expressiva, visto que se considerou cenários realistas nas simulações, assim, a influência da alteração nos balanços hídricos foi pouco notável. Observou-se que o aumento da recarga no cenário de escoamento de 10% refletiu em uma maior disponibilidade de armazenamento aquífero.

De forma complementar, o cenário que mais impactou positivamente os resultados de fato foi a delimitação do pacote aluvionar no modelo, alinhando-se com o esperado para o método de FMR, sustentado pela bibliografia e modelação, mas sem suporte de dados locais reais. A contribuição do rio para o sistema passou de aproximadamente 30%, nos cenários simulados inicialmente, para cerca de 60-70% com a presença do aluvião, atingindo seu maior valor com o aumento da condutância e situando-se na faixa esperada segundo a bibliografia, que se encontra entre 60-90% conforme trabalho de Hu et al. (2016). Além disso, o rebaixamento das cargas hidráulicas diminuiu substancialmente, ficando em torno de 1 a 2 metros após 5 anos de operação do sistema, atingindo valores próximos de 90% de recuperação das quedas de níveis d'água entre os bombeamentos.

Os resultados ressaltaram a importância do conhecimento da hidrogeologia local e a influência do design dos poços no aumento da eficiência do sistema. Tais fatores impactam a capacidade máxima de produção, sustentabilidade da técnica, potencial de recuperação do aquífero entre períodos de bombeamento e a troca entre os sistemas superficial-subterrâneo.

7. CONCLUSÕES

Este trabalho estudou a interação hidráulica entre o sistema rio-aquífero, associado à simulação numérica da FMR na área de captação do Rio Batalha, em Bauru (SP), após uma ampla revisão bibliográfica que possibilitou o entendimento das premissas relacionadas à técnica. Foram avaliados os balanços hídricos e realizadas análises de sensibilidade de parâmetros, para entender o impacto de diferentes cenários de bombeamento na eficiência do sistema. Modelos estacionários e transientes foram simulados para estimar a produção dos poços, as misturas de água e investigar as respostas do aquífero e do rio. Deste modo, conclui-se que:

- Segundo o estudo de casos de aplicações mundiais, as condições que favorecem o sistema de FMR incluem a existência de um aquífero livre, com conexão hidráulica com o corpo d'água superficial; presença de um leito arenoso móvel, que auxilie na diminuição do risco de colmatção; e preferencialmente, com granulação grossa, garantindo valores altos de condutividade hidráulica. Além disso, o posicionamento dos poços influencia diretamente na produtividade do sistema, no qual as galerias de poços lineares à margem e os coletores horizontais tem sido os mais utilizados. Em relação a simulação da FMR na área estudada, a conexão hidráulica entre o rio Batalha e o Aquífero Adamantina foi suportada pelos balanços hídricos das simulações, no qual verificou-se as proporções de misturas entre as águas superficial e subterrânea. No mais, comprovou-se a grande influência de altos valores de condutividade hidráulica e condutância para a FMR, sendo que os melhores resultados foram para os cenários com a presença do pacote aluvionar, com condutividade hidráulica de 10^{-4} m/s, no qual se atingiu 70% de contribuição de água superficial, em oposição as taxas de aproximadamente 30% dos cenários sem aluvião. Deste modo, o diferencial para a implementação da FMR na área de estudo é: a busca de valores altos de condutividade hidráulica em pacotes sedimentares nas proximidades do rio, mesmo que de pequena espessura, maior condutância de leito de rio e profundidade de poços suficientes para quedas de nível d'água de até 8 metros durante o período de bombeamento na estiagem, para a condição modelada. No entanto, necessita-se de estudos locais para a caracterização detalhada da área;

- Acerca da otimização dos arranjos de poços para a FMR, as configurações lineares paralelas à margem se mostraram promissoras, sendo necessário um espaçamento mínimo de 100 metros entre os poços para o aumento da eficiência e diminuição do risco de interferência entre eles. Além disso, a distância de 50 metros em relação ao rio foi considerada ideal para a aplicação da técnica na área estudada, visto a maior contribuição de água superficial infiltrada e boa capacidade de produção, levando em conta as características hidrogeológicas locais. Ainda, considerando tais características, a otimização do sistema incluiu profundidade da seção filtrante em torno de 45 metros e vazão dos poços de 10 m³/h. O aumento da condutância influenciou positivamente a FMR, refletindo em uma maior contribuição de água superficial, por outro lado, o aumento da vazão específica auxiliou em uma maior contribuição do armazenamento aquífero no sistema;

- Ademais, a avaliação dos balanços hídricos possibilitou o entendimento da interação rio-aquífero, no qual o rio Batalha recebeu água do aquífero em situação natural, com exceção dos períodos de bombeamento, quando ocorreu a inversão do regime de fluxo no sistema a partir da indução do rebaixamento das cargas hidráulicas. Além disso, o ciclo de bombeamento e recuperação definido para o funcionamento da FMR na área se mostrou efetivo, visto que a operação dos poços na estiagem foi favorecida pelo uso do armazenamento aquífero, que recuperou praticamente 90% no período chuvoso através da

recarga pluvial, em um período de 180 dias sem bombeamento dos poços. Nos 5 anos simulados, houve um rebaixamento de cargas hidráulicas de menos de 2 metros na camada superficial, no cenário otimizado com presença de aluvião, em comparação à condição inicial sem bombeamento.

Por fim, a aplicação da FMR na área estudada se mostrou possível, considerando as otimizações definidas a partir das simulações. Entende-se que os resultados deste trabalho podem auxiliar no planejamento de possíveis implantações de sistemas de FMR, tanto na área estudada, como em outras regiões com características hidrogeológicas e hidráulicas semelhantes. No entanto, trabalhos complementares são necessários anteriormente a instalação de um projeto piloto, sugere-se os seguintes tópicos para aprofundamento:

- Investigação com o objetivo de delimitar com mais detalhe as características locais: realização de ensaios de permeabilidade no aquífero por testes de bombeamento, análises geofísicas, sondagens investigativas, coleta e análises granulométricas dos sedimentos do leito do rio etc.;
- Estudos biogeoquímicos visando a caracterização dos recursos hídricos locais, avaliação das reações redox e processos atuantes na zona redutora, assim como o risco de colmatação (mecânica, química e biológica);
- Caracterização da viabilidade econômica associada a implantação da FMR;
- Estudo da possibilidade de uso de poços coletores horizontais como alternativa adicional.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, A.K.A., e Marhaba, T.F., 2017, Review on river bank filtration as an in situ water treatment process: *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 19, p. 349–359, doi:10.1007/s10098-016-1266-0.
- Batezelli, A., Perinotto, J.A.J., Etchebehere, M.L. de C., Fulfaro, V.J., e Saad, A., 1999, Redefinição litoestratigráfica da Unidade Araçatuba e da sua extensão regional na Bacia Bauru, Estado de São Paulo, Brasil: In: *Simpósio sobre o Cretáceo do Brasil -Simpósio sobre El Cretacico de America del Sur*, p. 195–200.
- Bourg, A.C.M., e Berlin, C., 1993, Biogeochemical Processes during the Infiltration of River Water into an Alluvial Aquifer: *Environmental Science and Technology*, v. 27, p. 661–666, doi:10.1021/es00041a009.
- Bistrichi, C.A., Campanha, G.A.C., Almeida, F.F.M., Yamamoto, J.K., e Coutinho, J.M. V, 1981, Mapa geológico do Estado de São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (DMGA), p. 126.
- Campos, A.F. de, Rostirolla, S.P., Bartoszeck, M.K., Romeiro, M.A.T., Ferreira, F.J.F., e Kiang, C.H., 2008, Correlação de dados sísmicos multiescala e integração com arcabouço tectônico regional: exemplo da área do Domo de Piratininga, SP: *Revista Brasileira de Geociências*, v. 38, p. 18–28, doi:10.25249/0375-7536.20083821828.
- Cavaguti, N., e Paula e Silva, F., 1992, Gestão dos recursos hídricos subterrâneos na cidade de Bauru - SP, face às características hidrogeológicas especiais da região: VII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas,.
- CBH-TB, 2016, Plano da bacia hidrográfica tietê-batalha 2016 a 2027: Relatório Síntese, p. 56.
- CPRM, 2012, Sistema Aquífero Bauru - Caíua nos estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Paraná: Serviço Geológico do Brasil. Relatório - Brasil: CPRM, v. 12.
- Cruz, H.M. da, 2019, Avaliação da eficiência da filtração em margem na remoção de resíduos farmacêuticos potencialmente ativos em um trecho do Rio Capibaribe: Universidade Federal de Pernambuco. Dissertação de Mestrado, <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/34493>.
- DAEE, 2015, Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP. Relatório Final C3 – Planejamento Consultoria e Projeto Ltda.:

- Emmendoerfer, M.L., 2020, Avaliação da filtração em margem de lago como pré-tratamento para uma ETA convencional em operação: procedimentos para escolha do local, implantação e operação do sistema: Tese de doutorado - Programa de Pós-graduação em Eng. Ambiental - UFSC, <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/219568>.
- Feitosa, F.A.C., Manoel Filho, J., Feitosa, E.C., e Demetrio, J.G.A., 2008, Hidrogeologia: conceitos e aplicações: 812 p.
- Freitas, D.A. de, 2010, O emprego da técnica de Filtração em Margem para tratamento de água no Rio Beberibe, região metropolitana do Recife: Universidade Federal de Pernambuco. Dissertação de Mestrado, <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/5259>.
- Freitas, J.B. de A., Cabral, J.J. da S.P., Ribeiro, A.L. de P., Santos, S.N. dos, e Silva, N.B. do N., 2018, A técnica de Filtração em Margem: histórico de aplicação no mundo e experiências brasileiras: Revista Brasileira de Meio Ambiente, v. 175, p. 165–175.
- Grisczek, T., e Bartak, R., 2016, Riverbed clogging and sustainability of riverbank filtration: Water (Switzerland), v. 8, doi:10.3390/w8120604.
- Grisczek, T., Schoenheinz, D., e Ray, C., 2002, Siting and Design Issues for Riverbank Filtration Schemes: Riverbank Filtration, p. 291–302, doi:10.1007/0-306-48154-5_15.
- Guedes, T.L., Souza, F.H. de, Ghisi, D.B., Perez, A.B.A., Dalsasso, R.L., e Sens, M.L., 2019, Aplicação da filtração em margem de rio como alternativa de tratamento de água para comunidades isoladas: Revista DAE, v. 67, p. 84–94, doi:10.4322/dae.2019.007.
- Hamdan, A.M., Sensoy, M.M., e Mansour, M.S., 2013, Evaluating the effectiveness of bank infiltration process in new Aswan City, Egypt: Arabian Journal of Geosciences, v. 6, p. 4155–4165, doi:10.1007/s12517-012-0682-7.
- Hiscock, K.M., e Grisczek, T., 2002, Attenuation of groundwater pollution by bank filtration: Journal of Hydrology, v. 266, p. 139–144, doi:10.1016/S0022-1694(02)00158-0.
- Hu, B., Teng, Y., Zhai, Y., Zuo, R., Li, J., e Chen, H., 2016, Riverbank filtration in China: A review and perspective: Journal of Hydrology, v. 541, p. 914–927, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.08.004.
- Hunt, H., Schubert, J., e Ray, C., 2002, Conceptual Design of Riverbank Filtration Systems. Riverbank Filtration – Improving Source-Water Quality.: v. 43, 19–27 p.
- Hutchison, A., Milczarek, M., e Anerjee, M., 2013, Clogging Phenomena Related to Surface Water Recharge Facilities: Clogging issues associated with managed aquifer recharge

methods, p. 95–106.

- Kedziorek, M.A.M., Geoffriau, S., e Bourg, A.C.M., 2008, Organic matter and modeling redox reactions during river bank filtration in an alluvial aquifer of the Lot River, France: *Environmental Science and Technology*, v. 42, p. 2793–2798, doi:10.1021/es702411t.
- Kim, S.B., Yavuz Corapcioglu, M., e Kim, D.J., 2003, Effect of dissolved organic matter and bacteria on contaminant transport in riverbank filtration: *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 66, p. 1–23, doi:10.1016/S0169-7722(03)00025-1.
- Kuehn, W., e Mueller, U., 2000, Riverbank filtration: An overview: *Journal / American Water Works Association*, v. 92, p. 60–69, doi:10.1002/j.1551-8833.2000.tb09071.x.
- Lee, J.H., Hamm, S.Y., Cheong, J.Y., Kim, H.S., Ko, E.J., Lee, K.S., e Lee, S. II, 2009, Characterizing riverbank-filtered water and river water qualities at a site in the lower Nakdong River basin, Republic of Korea: *Journal of Hydrology*, v. 376, p. 209–220, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.07.030.
- Lewandowski, J., Meinikmann, K., e Krause, S., 2020, Groundwater – Surface Water Interactions : Recent Advances and Interdisciplinary Challenges: *Water Research*, v. 12, 296, p. 1–7.
- Mancuso, M.A., e Campos, J.E., 2005, Aquífero Bauru. In: G. Rocha (coord.) *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*: , p. 30- 38.
- McDonald, M.G., e Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model, *Techniques of Water-Resources Investigations Report, 06-A1: Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey*, p. 588.
- Mustafa, S., Bahar, A., Aziz, Z.A., e Suratman, S., 2016, Modelling contaminant transport for pumping wells in riverbank filtration systems: *Journal of Environmental Management*, v. 165, p. 159–166, doi:10.1016/j.jenvman.2015.09.026.
- Paiva, A.L.R. de, 2009, O processo de Filtração em Margem e um estudo de caso no Rio Beberibe: Universidade Federal de Pernambuco. Tese de Doutorado, <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/4948>.
- Pan, W., Huang, Q., e Huang, G., 2018, Nitrogen and organics removal during riverbank filtration along a reclaimed water restored river in Beijing, China: *Water (Switzerland)*, v. 10, doi:10.3390/w10040491.
- Paula e Silva, F., Hung Kiang, C., e Caetano Chang, M., 2003, Perfis de referênciado grupo

- Bauru (K) no estado de São Paulo: *Geociencias*, v. 22, p. 21–32.
- Pholkern, K., Srisuk, K., Grischek, T., Soares, M., Schäfer, S., Archwichai, L., Saraphirom, P., Pavelic, P., e Wirojanagud, W., 2015, Riverbed clogging experiments at potential river bank filtration sites along the Ping River, Chiang Mai, Thailand: *Environmental Earth Sciences*, v. 73, p. 7699–7709, doi:10.1007/s12665-015-4160-x.
- Prefeitura Municipal de Bauru, 2008, Diagnóstico ambiental e dos recursos hídricos do município de Bauru - SP: Volume de Texto., p. 488.
- Przybyłek, J., Dragon, K., e Kaczmarek, P.M.J., 2017, Hydrogeological investigations of river bed clogging at a river bank filtration site along the River Warta, Poland: *Geologos*, v. 23, p. 201–214, doi:10.1515/logos-2017-0021.
- Ray, C., Grischek, T., Schubert, J., Wang, J.Z., e Speth, T.F., 2002, A perspective of riverbank filtration: *Journal / American Water Works Association*, v. 94, p. 149–160, doi:10.1002/j.1551-8833.2002.tb09459.x.
- Rocha, S.F., e Marques, E.A.G., 2016, Hydrogeological Characterization of a Lake Bank Filtration System: *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 39, p. 133, doi:10.11137/2016_1_133_141.
- Romero-Esquivel, L.G., Pizzolatti, B.S., e Sens, M.L., 2016, Potencial de aplicação da Filtração em Margem em Santa Catarina, Brasil: *Interciencia - Revista de ciencia y tecnología de América*, v. 41, p. 740–747, <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33948191003%0AComo>.
- Romero, L.G., Pizzolatti, B.S., Soares, M.B.D., Michelan, D.C.G.S., e Sens, M.L., 2010, Bank filtration: Application in rural areas. Case studies in Santa Catarina, Brazil: *ASABE - 21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment 2010*, v. 2010, p. 378–384, doi:10.13031/2013.29439.
- Rosenberger, M., Varnier, C., Iritani, M.A., Ferreira, L.M.R., Oda, G.H., e Viotti, M., 2013, Vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru na área urbana do município de Bauru (SP): *Revista do Instituto Geológico*, v. 34, doi:10.5935/0100-929x.20130009.
- Sahoo, G.B., Ray, C., Wang, J.Z., Hubbs, S.A., Song, R., Jasperse, J., e Seymour, D., 2005, Use of artificial neural networks to evaluate the effectiveness of riverbank filtration: *Water Research*, v. 39, p. 2505–2516, doi:10.1016/j.watres.2005.04.020.
- Sandhu, C., Grischek, T., Kumar, P., e Ray, C., 2011, Potential for Riverbank filtration in India: *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 13, p. 295–316, doi:10.1007/s10098-

010-0298-0.

- Santos, L., Cabral, J., Cirilo, J., Freitas, D., Sens, M., Aragão, R., e Barros, T., 2014, Aplicação da tecnologia de filtração em margem para população difusa no Semiárido Pernambucano: *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, p. 49–58, doi:10.21168/rbrh.v19n4.p49-58.
- Santos, C.F., Hirata, R., Marcellini, S.S., e Barbati, D., 2021, Surface and groundwater relationship in an anthropically modified area: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 93, p. 1–16, doi:10.1590/0001-3765202120201257.
- Schubert, J., 2002, German Experience with Riverbank Filtration Systems, *in* Ray C., Melin G., L.R.B. (eds) . org., *Riverbank Filtration, Water Science and Technology Library*, Springer, Dordrecht., https://doi.org/10.1007/0-306-48154-5_4.
- Sens, M.L., Dalsasso, R.L., Mondardo, R.I., e Melo Filho, L.C., 2006, Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano, *in* ABES - Prosab 4, Rio de Janeiro, p. 173–236.
- Shamrukh, M., e Abdel-Wahab, A., 2008, Riverbank filtration for sustainable water supply: Application to a large-scale facility on the Nile River: *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 10, p. 351–358, doi:10.1007/s10098-007-0143-2.
- SigRH, 2014, Relatório de situação do recursos hídricos 2015: UGRHI 13 - Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré., <http://www.sigrh.sp.gov.br/cbhtj/apresentacao>.
- Simonato, M.D., Campos, J.E., Leitão, A.C. de F., Brandão, D., Paula e Silva. F., e Paula, V.F., 2016, Há conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos Guarani e Bauru na “janela” de basalto, em Bauru-SP? XIX Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, p. 1–20, <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28706%0A>.
- Sophocleous, M., 2002, Interactions between groundwater and surface water: The state of the science: *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 52–67, doi:10.1007/s10040-001-0170-8.
- Sprenger, C., Lorenzen, G., Hülshoff, I., Grützmacher, G., Ronghang, M., e Pekdeger, A., 2011, Vulnerability of bank filtration systems to climate change: *Science of the Total Environment*, v. 409, p. 655–663, doi:10.1016/j.scitotenv.2010.11.002.
- Stradioto, M.R., Kiang, C.H., Paula, F. De, e Roberta, S., 2011, Nitrato nas águas subterrâneas dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani, área urbana de Bauru-SP: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo, p. 1–4.

- Suguo, K., Fúlfaro, V.J., Amaral, G., e Guidorzi, L.A., 1977, Comportamentos estratigráficos e estrutural da formação Bauru nas regiões administrativas 7 (Bauru), 8 (São José do Rio Preto) e 9 (Araçatuba) no estado de São Paulo: In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA. Atas... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 231–247.
- Tufenkji, N., Ryan, J.N., e Elimelech, M., 2002, The promise of bank filtration.: *Environmental science & technology*, v. 36, p. 422A-428A, doi:10.1021/es022441j.
- Ulrich, C., Hubbard, S.S., Florsheim, J., Rosenberry, D., Borglin, S., Trotta, M., e Seymour, D., 2015, Riverbed clogging associated with a California riverbank filtration system: an assessment of mechanisms and monitoring approaches: *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 1740–1753, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.012.
- Varnier, C., Iritani, M.A., Viotti, M., Oda, G.H., e Ferreira, L.M.R., 2010, Nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP): v. 31, p. 1–21.
- Weiss, W.J., Bouwer, E.J., Ball, W.P., O'Melia, C.R., Arora, H., e Speth, T.F., 2006, Reduction in disinfection byproduct precursors and pathogens during riverbank filtration at three midwestern United States drinking-water utilities: *Riverbank Filtration*, p. 147–173, doi:10.1007/0-306-48154-5_9.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., e Alley, W.M., 1999, Ground water and surface water: a single resource: U.S. Geological Survey Circular 1139. Denver, CO, USA, p. 79.

ANEXO A: Aplicação de filtração em margem em diferentes locais (Estados Unidos, Alemanha e Índia) (Griseck et al., 2002; Sandhu et al., 2011)

Parâmetros	Estados Unidos						Alemanha		
	SWCA, California	Boardman, Oregon	Lincoln, Nebraska	Cedar Rapids, Iowa	Louisville, Kentucky	Somersworth, New Hampshire	Dresden-Tolkewitz	Meissen-Siebeneichen	Torgau-Ost
Poços									
Quantidade/Tipo	5H, 7V	2H	2H, 44V	2H, 53V	1H	2V+1V	71V	3V	42V
Capacidade máxima (m³/d)	322.000,00	87.000,00	132.000,00	128.500,00	76.000,00	5.300,00	40.000,00	6.000,00	150.000,00
Profundidade (m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Profundidade da seção filtrante (m)	24 a 30	15 a 15,6	12 a 18	18 a 24	24 a 30	12 a 16,5	15 a 19	12 a 17	32 a 52
Distância do rio (m)	0 a 75	3 a 18	<30 a >800	9 a 245	<30 a 84	46,00	80 a 180	100 a 150	300,00
Tempo de viagem (dias)	4,90	<1	<7 a >14	2 a 17	2 a 5	<55	25 a 50	25 a 100	80 a 300
Manancial									
	Russo	Columbia	Platte	Cedar	Ohio	Salmon Falls	Elba	Elba	Elba
Descarga (m³/s)	<2,8 a >1.400	6.370 a 7.080	<50 a 3.680	4 a 2.025	6.300 a >28.000	-	120 a 1.200	120 a 1.200	120 a 1.200
Largura/Profundidade (m)	15 a 90/-	4.000/3	300/1,5	225/2,5 a 3	600/10	12/-	120/2	140/2	130/2
Sedimento do leito	Areia	Areia/silte	Areia	Areia	Areia	Cascalho/areia	Cascalho grosso	Cascalho	Cascalho
Aquífero									
Tipo	Não confinado	Não confinado a semiconfinado	Não confinado a semiconfinado	Não confinado a confinado	Não confinado	semiconfinado	Não confinado	Não confinado	Não confinado
Condutividade hidráulica (m/s)	2,4E-04 a 4,3E-04	3,70E-03	1,40E-03	1,5E-4 a 1,1E-3	6,00E-04	4,30E-04	1E-3 a 2E-3	1E-3 a 2E-3	6E-4 a 2E-3
Espessura (m)	8 a 26	15	21 a 26	15 a 20	0 a 40	15	10 a 13	15 a 20	40 a 55
Produção específica (%)	-	-	15	10	-	-	20	20	20
Material	Areia e cascalho	Areia e cascalho	Areia e cascalho	Areia fina a média em cascalho grosso	Areia e cascalho com silte e argila	Areia com alguns cascalhos	Areia e cascalho	Areia média e grossa	Areia média e grossa
Heterogeneidade	-	Homogêneo	Algumas lentes de argila	Lentes de silte e argila	Cascalho grosso e seixos	Lentes finas de silte	Homogêneo	Poucas lentes finas de areia	Poucas lentes de silte

Parâmetros	Índia							
	Haridwar	Patna	Srinagar	Laço Nainital	Dehradun	Muzaffar	Mathura	Ahmedabad
Poços								
Quantidade/Tipo	X	V	V	V	H	V	H	H
Capacidade máxima (m³/d)	33.000,00	>3500	259-518	24.100,00	140-430	29-300	2.400,00	110.000,00
Profundidade (m)	7-10	150-300	32-86	22-37	1,5-2	8-15	15,5-18	10-11
Profundidade da seção filtrante (m)	-	-	-	-	-	-	-	-
Distância do rio (m)	15-110	9-236	47-390	5-84	Abaixo do leito	68,00	Abaixo do leito	Abaixo do leito
Tempo de viagem (dias)	2- >100	-	-	8-30	2-4 (minutos)	-	1,5-3	-
Manancial								
	Ganga	Ganga	Alaknanda	-	Bandal	Nagar Kali	Yamuna	Sabarmati

H: poço coletor horizontal; V - poço vertical; X - poço "caisson" de diâmetro de 10m; "-": sem informação