

METODOLOGIAS DE INVESTIGAÇÃO DE ÁREAS PARA A IMPLANTAÇÃO DE POÇOS DE FILTRAÇÃO EM MARGEM DE RIO E RESULTADOS PARCIAIS DOS ESTUDOS PRELIMINARES DA SABESP

Eloisa Helena Cherbakian

Graduada em Engenharia Química pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI), MBA em Administração pelo Instituto Mauá, Especialista em Engenharia de Petróleo e Gás pela UNISANTA e Mestre em Engenharia Sanitária pela Escola Politécnica da USP. Em sua trajetória profissional destaca-se a atuação como Gerente de Controle Sanitário, Gerente de Operação nas Estações de Tratamento de Esgotos Suzano e ABC, Coordenadora de Riscos Ambientais e Engenheira na área de Pesquisa e Inovação da Cia de Saneamento - Sabesp.

Endereço: Rua Nicolau Gagliardi, 313 – Pinheiros – São Paulo / SP – CEP: 05429-010 – Brasil – Tel: +55 (11) 3388-8080 – e-mail: ehcherbakian@sabesp.com.br.

RESUMO

A tecnologia de filtração em margem (FM) de rio ou lago é bastante conhecida em países europeus e também nos EUA dados os benefícios identificados reduzindo ou praticamente eliminando o uso da maioria dos produtos químicos, como coagulantes, no tratamento de água. Funciona como pré-tratamento da água superficial para ETAs, ou mesmo até como tratamento principal, complementado pela desinfecção. Nas últimas décadas, a técnica tem se expandido para países como Índia, Malásia, Egito e também China, Korea e Vietnã, entre outros. A principal motivação para sua aplicação é a remoção de partículas, compostos orgânicos e patógenos com menor custo em comparação com o tratamento convencional de águas ou mesmo com técnicas mais sofisticadas, como processos oxidativos avançados e processos de separação por membranas. Embora usualmente vantajosa em termos de qualidade e custo, a técnica não é aplicável a todos os locais devendo seu potencial ser previamente avaliado (investigação hidrogeológica, hidrogeoquímica etc). No presente estudo, serão abordadas algumas das técnicas de investigação de áreas para a implantação da Filtração em Margem, bem como o andamento e resultados parciais alcançados pela SABESP em sua avaliação preliminar para implantação de dois pilotos na região do Vale do Paraíba.

PALAVRAS-CHAVE: Filtração em Margem de Rio, Investigação de áreas, Avaliação Preliminar.

INTRODUÇÃO

A crescente degradação da qualidade das águas superficiais desafia as companhias de saneamento a buscarem alternativas para o tratamento e abastecimento público de água. Além de poluentes emergentes, outros desafios residem na necessidade de redução no consumo de recursos finitos e na busca pela implantação da economia circular em todo o processo de saneamento, eliminando ou ao menos reduzindo a geração de resíduos.

A Filtração em Margem (FM) de Rio ou de Lago tem se mostrado um processo promissor para a remoção de turbidez, patógenos, microcontaminantes, alguns compostos odoríferos e matéria orgânica, apresentando ainda, fácil aplicabilidade e custo de implantação relativamente baixo em comparação com outras tecnologias (WAHAAB and AFIFI, 2023). Trata-se de uma técnica de captação e tratamento de água, que consiste na construção de poços próximos às margens de mananciais (rios ou lagos), localizados em aquíferos aluviais ou formações geológicas não consolidadas, e no bombeamento da água a partir dos mesmos. O bombeamento provoca o rebaixamento no nível freático, induzindo a migração da água do manancial até o poço passando por um processo de purificação natural durante o percurso devido a processos como filtração física, sorção, troca iônica e degradação microbiana.

Como principais benefícios, a Filtração em Margem de rio usualmente permite redução no consumo de produtos químicos e na geração de lodo (Emmendoerfer et al., 2021), aumento nas carreiras de filtração em ETAs e redução nos custos com limpeza de captações convencionais entre outros benefícios em consonância com os princípios da economia circular (CHERBAKIAN, 2022). Há países como o Vietnã, onde o uso visa principalmente, evitar a superexploração em poços artesianos (HOANG, COVATTI and GRISCHEK, 2022).

OBJETIVO

Abordar em linhas gerais, as principais metodologias de investigação de sites para a implantação de poços de filtração em Margem de Rio, além de apresentar os resultados preliminares do estudo e investigação de áreas em execução pela Sabesp, para posterior implantação de dois pilotos da tecnologia no estado de São Paulo.

METODOLOGIA UTILIZADA

A metodologia utilizada no presente artigo compreendeu o levantamento bibliográfico (fontes secundárias, como artigos, periódicos, jornais, revistas, sites oficiais, monografias, dissertações e teses) referentes:

1. Aos critérios de escolha de sites para aplicação da filtração em margem de rio ou lago em escala real.
2. À qualidade da água do processo de filtração em margem de rio ou lago.
3. Aos benefícios técnico e econômicos esperados com o uso da tecnologia, assim como os principais fatores que normalmente afetam a eficiência da tecnologia.

Além disso, são apresentados os resultados preliminares do estudo em execução pela Sabesp, visando a implantação de processo piloto na região do Paraíba do Sul, através de levantamentos de campo, bases de dados e imageamento.

A INVESTIGAÇÃO DE ÁREAS

Existem diferentes metodologias adotadas por pesquisadores em suas investigações de sites adequados para a implantação de sistemas de Filtração em Margem de Rio ou Lago, porém, basicamente em todas são consideradas a avaliação das áreas quanto às características hidráulicas do manancial e lençol freático, a formação geológica do leito do corpo d'água assim como dos arredores, ou seja, a hidrologia e a hidrogeologia do local, a geoquímica da água superficial e subterrânea (FETTER, 2001 apud SÁNCHEZ, 2019).

Embora existam diferentes metodologias que possam ser utilizadas, é sempre recomendada sua adaptação à região investigada com base em objetivos específicos relacionados com a aplicação da FM, tendo em conta também a disponibilidade de dados. Antes do estabelecimento de um local de FM, uma investigação individual do local que pode incluir, como no estudo da Sabesp, a adoção de ensaios geofísicos, sondagem investigativa, perfuração, perfilagem de poços, testes de bombeamento e amostragem, análise hidroquímica e modelagem, são considerados ideais para a obtenção de resultados mais confiáveis.

De uma forma geral, são levantados dados sobre a hidrogeologia e topografia local, características e dinâmica fluvial, eventuais estudos de sondagens pré-existentes, em bibliografias temáticas, artigos científicos, estudos técnicos e banco de dados públicos.

Assim, conforme FUNASA (2018), devem ser levantadas informações para as áreas candidatas, como:

- Condições ambientais das bacias hidrográficas onde as pesquisas serão desenvolvidas.
- Descrição das condições climáticas, da cobertura vegetal, da geologia e geomorfologia, uso e ocupação do solo, aspectos hidrográficos, assim como qualidade das águas superficiais e subterrâneas, além de eventual presença de áreas contaminadas no entorno.
- Solo do entorno (litologia, espessura da camada sedimentar, classificação do material sedimentar etc.).
- Caracterização das águas superficiais e subterrâneas (qualidade inicial da água superficial e qualidade da água subterrânea nos poços/piezômetros construídos para os estudos).
- Caracterização dos aquíferos (os perfis dos solos, as condutividades hidráulicas teóricas por camada e a condutividade hidráulica computada do teste de bombeamento, granulometria, permeabilidade, porosidade efetiva, transmissividade).

Os aspectos qualitativos estão relacionados aos fatores que influenciam a qualidade da água durante o processo de tratamento por FM. A qualidade da água proveniente dos poços de FM depende do nível de poluição em que se encontra o manancial superficial (KIM, et al., 2003 apud FUNASA, 2018) e também da composição química do aquífero. Além disso, a intensidade do processo de purificação da água depende das características

do material granular que compõe o aquífero e das interações biogeoquímicas e físico-químicas que ocorrem no meio filtrante. Por estes motivos é necessário realizar uma investigação hidrogeológica dos locais onde se pretende implantar os poços de FM para se avaliar as características hidráulicas do manancial e do lençol freático, e avaliar a formação geológica do leito do corpo d'água assim como dos arredores (MONDARDO, 2009; MICHELAN, 2010 apud FUNASA, 2018).

Buscando principalmente trazer à luz, a importância de determinados fatores na avaliação de áreas para essa finalidade, a presente revisão buscou enfatizar a metodologia proposta por Hoang, Covatti and Grischek (2022), já que ela oferece alguns “valores referenciais”, lembrando entretanto, que isto não esgota o assunto mas traz informações e elementos importantes para o entendimento de quem pretende iniciar um estudo de áreas para a implantação da Filtração em Margem, cujos princípios são utilizados em praticamente todas as técnicas.

Assim, iniciando a escolha e definição de áreas visando a implantação da tecnologia de filtração em margem de rio, Hoang, Covatti and Grischek (2022) adotam os seguintes critérios, que também são recomendados em FUNASA (2018):

1. Critério essencial: existência de ligação hidráulica entre rio e aquífero.
2. Critérios de quantidade: transmissividade do aquífero (condutividade hidráulica e espessura), gradiente entre o aquífero e o rio, largura do rio (área de infiltração) e tensão de cisalhamento do rio (relevante para a questão da colmatação do leito do rio).
3. Critérios de qualidade: qualidade das águas superficiais e subterrâneas além do solo (eventual presença de contaminantes naturais ou antrópicos).

CRITÉRIO ESSENCIAL

No estudo proposto por Hoang, Covatti and Grischek (2022), assim como em DALSSASSO e GUEDES (2018); UMAR et al. (2017) e FUNASA (2018), o critério essencial é decisivo pois se não for cumprido, a FM não é viável e a área é considerada inadequada.

Os demais locais são classificados de acordo com os demais critérios e recebem um índice de adequação do local (SSI). O SSI varia de 0 a 1, com pontuações mais altas representando adequação.

CRITÉRIO QUANTITATIVO

Os critérios quantitativos definem se o aquífero tem capacidade suficiente para uma captação em grande escala com boa relação custo-benefício. A transmissividade (T) é um produto da espessura do aquífero (D) e da condutividade hidráulica do aquífero (K). Juntos, esses fatores são os melhores indicadores da capacidade de captação do aquífero e formam a base do índice de quantidade (I_Q). Segundo Hoang, Covatti and Grischek (2022), para aquíferos com espessuras baixas (<10 m) podem ser encontrados problemas de projeto, diminuindo a captação potencial, de modo que o fator de espessura (f_D) é aplicado para corrigir condições específicas.

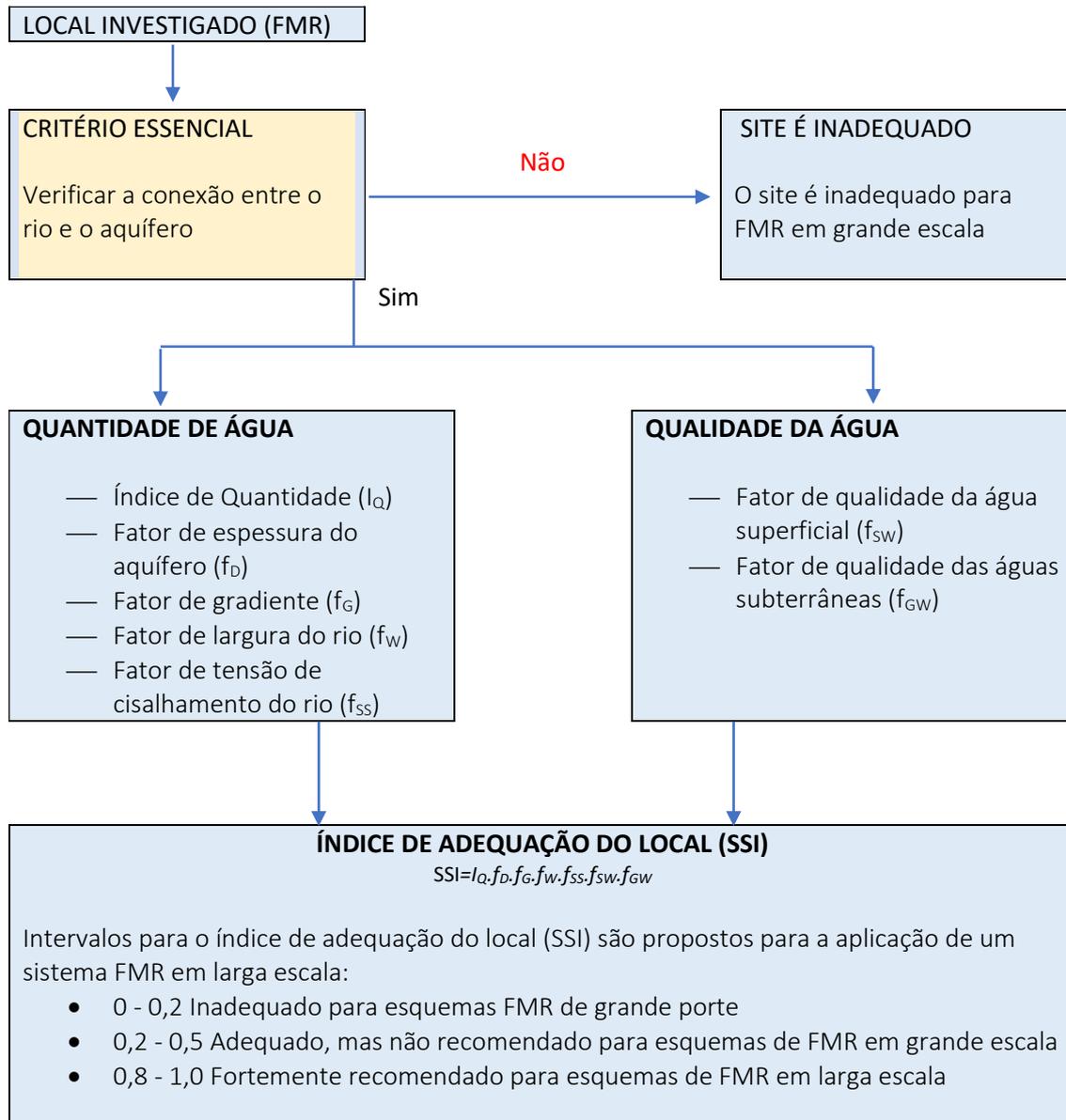
Os outros critérios quantitativos podem ter efeitos positivos ou negativos na aplicação da FM, embora o seu impacto geralmente não seja tão expressivo como a transmissividade do local. Assim, para Hoang, Covatti and Grischek (2022), os demais critérios quantitativos são aplicados como fatores multiplicadores (Tabela 1). Estes incluem a largura do rio (f_W), o gradiente do fluxo das águas subterrâneas em direção ao rio (f_G) e a tensão de cisalhamento do rio (f_{SS}).

CRITÉRIO QUALITATIVO

Os critérios de qualidade, nesta fase, também não são fatores decisivos para a aplicação da FMR, mas tem algum peso na adequação do local (HOANG, COVATTI and GRISCHEK, 2022). Portanto, também são utilizados como fatores multiplicadores, que incluem a qualidade das águas superficiais (f_{sw}) e a qualidade das

águas subterrâneas (f_{GW}). O SSI é calculado multiplicando-se o índice de quantidade pelos fatores dos critérios quantitativos e qualitativos (Figura 1).

Figura 1: Fluxograma de aplicação da metodologia de Hoang, Covatti and Grischek.



Fonte: HOANG, COVATTI AND GRISCHEK (2022)

TABELA 1: Índice de quantidade e fatores multiplicadores para o índice de adequação do local (SSI).

CRITÉRIO	SÍMBOLO	FAIXA	OBSERVAÇÕES
Índice de quantidade	I_Q	0–1	Baseado na transmissividade, espessura e condutividade hidráulica do aquífero. Quanto maior a transmissividade, espessura e condutividade hidráulica, maior será o índice.
Fator de espessura do aquífero	f_D	0–1	Fator usado para corrigir locais com baixa espessura do aquífero (<10 m).
Fator de gradiente	f_G	0,8–1	Um <u>baixo gradiente de fluxo de água subterrânea em direção ao rio</u> seria vantajoso para receber uma maior porção de FM. Quanto menor o gradiente, maior o fator relacionado.
Fator de largura do rio	f_W	0 – 1,0	Uma largura baixa do rio diminui a quantidade de FM captado e aumenta a taxa de infiltração em leito do rio (aumento de velocidade), o que aumenta o potencial de entupimento. Quanto maior a largura, maior o fator.
Fator de tensão de cisalhamento do rio	f_{SS}	0,8–1,0	Uma tensão de cisalhamento baixa aumenta os sedimentos finos e a deposição de material orgânico no leito do rio, aumentando o potencial de entupimento (colmatação). Quanto maior a tensão de cisalhamento, maior o fator.
Fator de qualidade da água superficial	f_{SW}	0,7–1,0	A presença de grandes quantidades de carbono orgânico biodegradável e amônio na superfície água leva ao aumento das condições redutoras no aquífero, o que diminui a qualidade da água FM , recebendo assim um fator menor.
Fator de qualidade das águas subterrâneas	f_{GW}	0,7–1,0	A mistura com águas subterrâneas altamente poluídas diminui a qualidade da água captada. Porções do aquífero com alto teor (concentrações) de arsênio, amônio, manganês, ferro, carbono orgânico dissolvido (DOC) etc., recebem um fator menor.

Fonte: HOANG, COVATTI AND GRISCHEK (2022)

CRITÉRIOS DE QUANTIDADE

Índice de quantidade (I_Q) e fator de espessura do aquífero (f_D)

O índice de quantidade foi estimado como inversamente proporcional aos custos para construir e operar um esquema FM em grande escala. Segundo Hoang, Covatti and Grischek (2022), um local com baixa transmissividade (por exemplo, 200 m²/d) exigiria pelo menos 20 poços para extrair ≥10.000 m³/d, levando a elevados custos de construção e operação. Enquanto num local com alta transmissividade (por exemplo, 1.000 m²/d), três ou menos poços podem extrair mais de 10.000 m³/d, reduzindo significativamente os custos.

Uma espessura de aquífero muito baixa (<10 m) é desfavorável para aplicação de FM utilizando poços verticais, pois alguns metros de rebaixamento podem tornar-se críticos. Além disso, a baixa espessura limita o comprimento da tela do filtro, levando potencialmente a altas velocidades na tela do filtro, o que pode causar problemas de operação a longo prazo (Hoang, Covatti and Grischek, 2022). Uma solução seria a utilização de poços coletores horizontais, porém muito mais caros. Isto posto, uma alternativa a ser avaliada para um aquífero inferior a 5 m, seria a adoção de galerias de infiltração (GRISCHEK et al., 2007), mesmo que possam apresentar menor eficiência em termos de qualidade.

Um limite de rebaixamento adotado na metodologia proposta por Bezelgues et al. (2010) apud Hoang, Covatti and Grischek (2022), é um terço da espessura do aquífero saturado como limite técnico para a operação sustentável do poço, até um máximo de 5 m.

Fator de gradiente de fluxo de água subterrânea ambiental (f_G)

Conforme Hoang, Covatti and Grischek (2022), o gradiente natural entre as águas subterrâneas e o rio é importante para avaliação da fração potencial da água filtrada em margem na água captada sendo que um elevado gradiente pode resultar em grandes porções de água subterrânea na água captada, enquanto gradientes próximos de zero ou negativos (rio com perda permanente para o aquífero) resultariam em uma porção muito alta ou mesmo 100% de FM, razão pela qual são preferidos locais com gradientes mais baixos. Ainda segundo os autores, o gradiente frequentemente não é um fator decisivo para a aplicação de FM em larga escala. Além disso, o gradiente entre o rio e o(s) poço(s) é variável ao longo do tempo, podendo variar significativamente de acordo com as estações e os períodos recentes.

Fator de largura do rio (f_w)

Na metodologia proposta por Hoang, Covatti and Grischek (2022), o fator largura é adicionado para corrigir menor percentual de FM e aumento do potencial de colmatção, penalizando rios com baixa largura. Em rios largos, explicam que existe uma grande área de infiltração disponível e espera-se uma baixa taxa de infiltração por metro quadrado. Se uma grande quantidade de água for bombeada perto de um rio com pouca largura, sendo a área de infiltração baixa em comparação com o volume de água infiltrada do rio, há um aumento no risco de entupimento (colmatção) e redução na quantidade de água de FM captada.

Fator de tensão de cisalhamento (f_{ss})

A tensão de cisalhamento suficiente no rio é um parâmetro que indica a capacidade de remover essa camada de entupimento, tornando o local menos suscetível à colmatção. A tensão de cisalhamento como fator inclui a velocidade do fluxo do rio e a profundidade do rio (HOANG, COVATTI and GRISCHEK, 2022). A velocidade do fluxo do rio se correlaciona com o gradiente do rio, raio hidráulico e coeficiente de rugosidade e a profundidade do rio (hR), segundo os mesmos autores, também pode ser obtida a partir de seções transversais, a largura do rio a partir de fotografias aéreas, imagens de satélite e mapas Landsat.

A norma DIN 19961 (2000) utilizada na Alemanha, por exemplo, fornece dados que indicam o limite de tensão de cisalhamento (tensão de cisalhamento crítica, τ_{cr}) necessária para mover sedimentos de diferentes tamanhos no leito do rio.

Locais com fluxos médios suficientes para movimentar sedimentos mais grossos (rios mais íngremes) são teoricamente menos predispostos a efeitos de colmatção. Assim, locais com tensão de cisalhamento incapazes de movimentar areias finas ($\tau \leq 1 \text{ N/m}^2$) recebem o menor fator (f_{ss}) de 0,8, enquanto locais capazes de movimentar misturas cascalho-areia e sedimentos fortemente coloidais ($\tau \leq 12 \text{ N/m}^2$) ou mostram uma variação frequente de vazão com pelo menos 12 N/m^2 durante fluxos de cheia (efeito de limpeza que limita a obstrução ou colmatção do leito do rio), recebe o fator máximo de 1 (HOANG, COVATTI and GRISCHEK, 2022). Entretanto, ressaltam os autores que os leitos dos rios constituídos por cascalho correm maior risco de entupimento do que os leitos arenosos, apesar destes últimos terem menor condutividade hidráulica, pois nos leitos de cascalho dos rios uma camada de obstrução pode formar-se abaixo dos sedimentos mais grossos e, por sua vez, esses sedimentos servem como escudo para a camada de obstrução, bloqueando eficazmente a sua remoção.

Qualidade das águas superficiais (f_{sw}) e fatores de qualidade das águas subterrâneas (f_{gw})

Devido às muitas variáveis e particularidades presentes em cada região, uma metodologia única e uniforme provavelmente não será viável (EPA, 2006). Se houver dados disponíveis, é construtivo introduzir um fator para a qualidade das águas subterrâneas, devendo-se, entretanto, levar em conta quais poluentes estão presentes, em que faixas se encontram, alternativas viáveis de abastecimento de água, opções de pós-tratamento e a importância relativa da quantidade e qualidade da água para os objetivos da FM. A relevância de cada parâmetro varia de acordo com a região e os objetivos da aplicação da FM (HOANG, COVATTI and GRISCHEK, 2022).

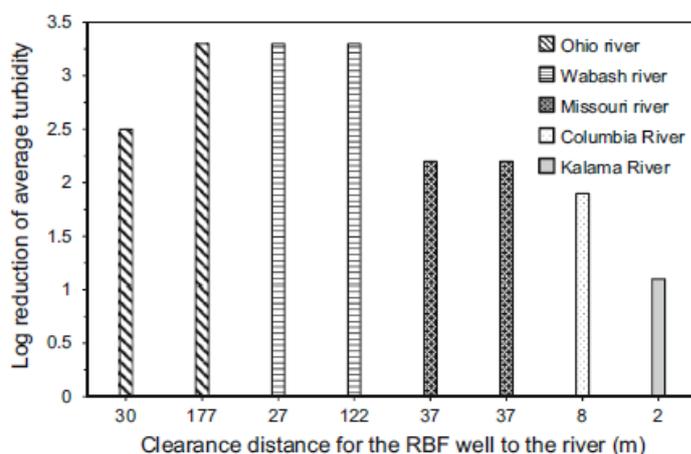
Segundo esses mesmos autores, fortes condições redutoras no aquífero podem levar a concentrações elevadas de manganês, ferro, amônio e arsênio (em regiões que possuam elevadas concentrações de arsênio, o que não é esperado no estudo da Sabesp na região do Vale do Paraíba), enquanto concentrações elevadas de COD, cloreto, nitrato, pesticidas, halogênios orgânicos, fenóis, entre outros, podem levar a elevados custos de pós-tratamento.

A poluição dos aquíferos também pode ser bastante heterogênea, o que significa que as concentrações de amônio, manganês, ferro e arsênio podem variar significativamente em pequenas distâncias espaciais, de modo que os autores recomendam cautela ao aplicar um fator baseado em alguns pontos de dados a uma grande área. Se houver fortes evidências de significativa poluição em uma área (por exemplo, fonte de poluição antropogênica), fatores mais baixos podem ser aplicados, o mesmo valendo para diferentes trechos de rios. No caso do estudo da Sabesp, veremos mais adiante que foram previamente identificadas áreas consideradas contaminadas no cadastro Cetesb, adotando-se um raio de 500m em seu entorno, visando maior segurança na avaliação preliminar de áreas para Filtração em Margem.

Uma análise mais detalhada do processo FM in situ avalia a eficácia da FM e os benefícios subsequentes, incluindo a remoção de partículas, patógenos, matéria orgânica dissolvida (MOD) e precursores de subprodutos de desinfecção (PSD) (AHMED and MARHABA, 2016).

A turbidez da água é geralmente um bom indicador de matéria em suspensão, que por sua vez é um hospedeiro válido de micróbios e patógenos. Diversas pesquisas comprovaram que a FMR é um processo eficiente para remoção de turbidez (DASH et al. 2008, 2010; DILLON et al. 2002 apud AHMED and MARHABA, 2016) e as partículas são removidas através dos esforços combinados de retenção, adsorção e biodegradação (figura 2).

Figura 2: Logs de redução média de turbidez em diferentes sistemas de FM.



Fonte: (MIKELS 1992; WEISS et al. 2005 apud AHMED and MARHABA, 2016).

O Oxigênio Dissolvido (OD), é um importante indicador da qualidade da água, já que a taxa de infiltração tem uma influência considerável no OD. Através da filtração da água nos sedimentos das margens e leitos dos rios, o OD diminui frequentemente ao longo de uma distância de alguns metros (DIEM et al. 2013 apud AHMED and MARHABA, 2016; TUFENKJI, RYAN, and ELIMELECH, 2002). Por exemplo, baixas taxas de

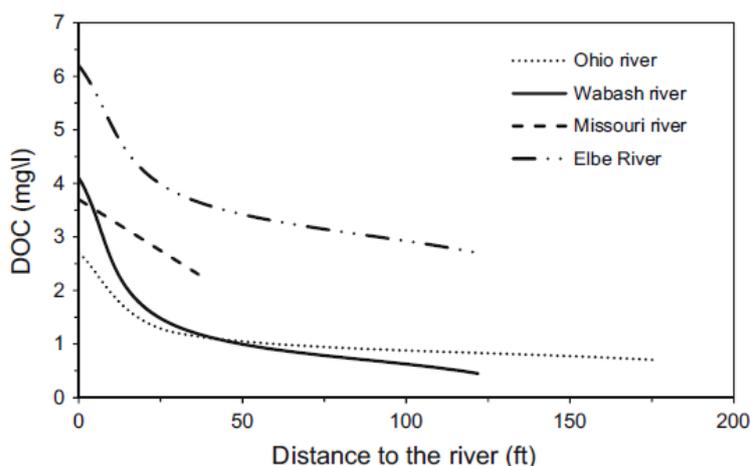
infiltração podem causar alto esgotamento de oxigênio e, consequentemente, condições anóxicas, o que pode levar à desnitrificação e à redução de sulfato, Ferro (III) e Manganês (VI) (TUFENKJI, RYAN and ELIMELECH, 2002; GRISCHEK et al. 2007; Ahmed and Marhaba, 2016). Isso causa indesejáveis matérias dissolvidas, incluindo nitrito, sulfeto, ferro (II), e Manganês (II) (Massmann et al. 2008 apud Ahmed and Marhaba, 2016). Segundo Hoang, Covatti and Grischek (2022), 1,0 mg/L de amônio leva ao consumo de cerca de 3,6 mg/L de oxigênio dissolvido (OD), enquanto 1,0 mg/L de Carbono Orgânico Dissolvido Biodegradável (BDOC) consome cerca de 4,5 mg/L de OD. Hoang, Covatti and Grischek (2022) destacam ainda que se houver uma elevada concentração de algas, espera-se que ocorra um maior risco de obstrução (colmatação) e redução das condições no leito do rio e no aquífero, mas isto ainda não exclui a aplicabilidade da FM.

A presença de micropoluentes orgânicos (MPOs) na água potável pode impactar a saúde pública e ambiental. Desta forma, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA dos EUA) e as diretivas europeias colocam vários MPOs na lista prioritária de contaminantes (AHMED and MARHABA, 2016).

Em estudos realizados por Sudhakaran et al. (2013) apud Ahmed and Marhaba, (2016) ponderando as considerações técnicas, tratabilidade, custos, sustentabilidade e tempo, foram comparados diferentes métodos de remoção de MPOs como FM, nanofiltração, osmose reversa, adsorção, oxidação avançada e ozonização, concluindo que o processo FM foi superior na remoção de MPOs em relação aos processos de membrana e adsorção.

A figura 3 a seguir, apresenta o efeito da FM na concentração de Carbono Orgânico Dissolvido (COD) em diferentes rios e segundo as distâncias dos poços de FM a esses rios.

Figura 3: Efeito da Filtração em Margem na concentração de COD em diferentes rios e conforme distância dos poços aos rios.



Fonte: (CLAYTON 1995; WEISS 2005 apud AHMED and MARHABA, 2016).

Entretanto, os autores reforçam que por exemplo, parâmetros de qualidade das águas superficiais que são relevantes para a água potável, tais como agentes patogênicos e nitratos, frequentemente não são relevantes para a FM, uma vez que serão parcial ou totalmente removidos durante o fluxo até o poço produtor, portanto, os índices gerais de qualidade da água podem não ser os mais relevantes na aplicação da FM. Ressaltam ainda haver lacunas na investigação da FM que precisam ser preenchidas para otimizar as metodologias de seleção de locais, tais como as taxas de infiltração sustentáveis para um local de Filtração em Margem para evitar ou minimizar os efeitos da colmatação do leito; as faixas de turbidez e sólidos suspensos no rio que podem afetar significativamente a obstrução (colmatação) e o impacto da composição do leito do rio nas questões anteriores.

Estudos de Ahmed and Marhaba (2016) mostram que na Índia, a qualidade da água tratada com FM não foi significativamente alterada durante os períodos de monções ou não monções. Nos meses sem monções, a água tratada com o processo FM teve uma redução de turbidez de 1 log. Nos meses de monções, a remoção de

turbidez aumentou para mais de dois registros. Este estudo concluiu que a FM em Haridwar (Índia) é um processo confiável para a remoção de turbidez (DASH et al. 2010 apud AHMED and MARHABA, 2016).

IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As **mudanças climáticas** têm um efeito considerável na qualidade e quantidade da água, nas condições de oxidação, no tempo de viagem e na eficiência de remoção dos poluentes (AHMED and MARHABA, 2016). Exemplificam os autores que apesar das inundações evitarem a colmatação do leito do rio por erosão, o oposto ocorre durante condições de **seca**, já que nas **inundações** a força de cisalhamento chamada autopurificação, promove a “limpeza” no sedimento, mas a seca promove a sedimentação de sólidos suspensos, levando à obstrução do leito do rio. A colmatação do leito do rio pode ser vantajosa em algumas situações, mas também indesejável, pois se por um lado favorece a biodegradação de contaminantes, por outro reduz a condutividade hidráulica da zona de filtração subterrânea (Hiscock e Grischek 2002 apud Ahmed and Marhaba, 2016). Segundo Ahmed and Marhaba (2016), as **secas** impulsionam e reforçam as condições anaeróbicas durante o percurso da FM e as **inundações** diminuem o tempo de viagem e provocam a passagem rápida e a penetração de micropoluentes indesejáveis (Sprenger et al. 2011 apud Ahmed and Marhaba, 2016), ao menos durante e nos primeiros dias após os eventos.

A **temperatura** pode desempenhar um papel notável na taxa de degradação através do processo FM, pois acelera a velocidade de reação dos processos biológicos e químicos (Schijven e Hassanizadeh 2000 apud Ahmed and Marhaba, 2016), além de aumentar a condutividade hidráulica da água filtrada em margem e subterrânea. Assim, para o processo de FM as altas temperaturas da água podem estimular a degradação, entretanto, a continuidade da estimulação a longo prazo pode levar a condições anóxicas ou anaeróbicas, o que por sua vez diminui a taxa de degradação (SPRENGER et al. 2011 apud AHMED and MARHABA, 2016).

Rudolf von Rohrer et al. (2014) apud Ahmed and Marhaba (2016) investigaram o efeito da **temperatura** e da **matéria orgânica dissolvida** (MOD), como variáveis indiretas das mudanças climáticas, na taxa de degradação durante o processo de FM. Estudos de coluna foram utilizados nessas investigações e os resultados indicaram que a **temperatura** tem um forte efeito no processo aeróbio acompanhado da degradação da matéria orgânica particulada e que a ação combinada de **altas temperaturas** (iguais ou superiores a 20° C) e **baixas taxas de infiltração** (iguais ou inferiores a 0,01 m/h), pode causar **condições anóxicas**.

Enfim, Eckert et al. (2008) apud Ahmed and Marhaba (2016), concluíram que a redução da vazão dos rios causou um aumento de poluentes químicos, mas ainda assim, a investigação concluiu que a FM possui uma defesa natural podendo superar o impacto dessas alterações climáticas.

Pang (2009) apud Ahmed and Marhaba (2016), relatam que a **força iônica** da solução solo-água, o **teor de argila** e o **pH** têm um efeito positivo na capacidade de sorção da MOD no solo e o tipo de solo tem influência na remoção microbiana. Solos vulcânicos, areia fina, areia pedra-pome e rochas aquíferas altamente intemperizadas apresentam elevadas taxas de remoção microbiana. No entanto, foram observadas baixas taxas de remoção em rochas fraturadas.

A **variação no nível da água** do rio tem um efeito direto na velocidade subterrânea da água infiltrada, o que pode levar a alterações na quantidade e qualidade da água infiltrada durante o processo FM Ahmed and Marhaba (2016). Derx et al. (2010) apud Ahmed and Marhaba (2016), indicaram que existe uma estreita relação entre a zona de mistura rio-aquífero e as flutuações do nível da água do rio. As variações no nível da água do rio podem promover a penetração dos vírus nas margens dos rios a distâncias mais longas e em concentrações mais elevadas quando comparados com aqueles em nível de água constante. Por exemplo, em seus estudos, o aumento do nível da água entre 1 e 5 m causou um aumento nas concentrações de vírus em 2 a 4 log e uma diminuição no tempo de viagem em 30% (DERX et al. 2013 apud AHMED and MARHABA, 2016).

As alterações no **uso do solo** nas bacias hidrográficas podem afetar várias características do ecossistema fluvial, tais como a qualidade da água, a estrutura da comunidade, a produção primária e secundária, a decomposição da matéria orgânica, o metabolismo do ecossistema e os fluxos de energia (ALLAN 2004; YOUNG et al. 2008 apud AHMED and MARHABA, 2016) e assim, causar efeito indireto no processo FM, além de **efeito direto pela dissolução dos poluentes** dos usos do solo durante a passagem da água para o poço de produção.

Projeto de aquífero

A disposição do poço é vital para obter a qualidade e quantidade de água desejada. Existem muitas maneiras diferentes de construir poços com vários espaçamentos e distâncias da margem do rio. Um estudo de viabilidade deve ser realizado para escolher o melhor projeto para o processo de FM (SCHIJVEN and HASSANIZADEH 2000 apud AHMED and MARHABA, 2016).

Existem dois tipos de projeto de poço: vertical e horizontal. Ambos podem estar situados em um ou em ambos lados da margem do rio. O poço horizontal, também é chamado de poço coletor radial (do inglês, RCW), é composto por alguns tubos horizontais conectados prontamente a um tubo coletor vertical maior. Os tubos horizontais penetram no aquífero para acumular água. Na maioria das vezes, o RCW é construído adjacente ao rio, permitindo a colocação de tubos horizontais sob o leito do rio induzindo a água do rio a se mover em direção ao RCW. No RCW, a quantidade de água pode ser aumentada com um projeto adequado da tela do poço, do conjunto de filtros, da disposição e do comprimento dos tubos horizontais do RCW (AHMED and MARHABA, 2016). O design apropriado poderia atualizar e otimizar o processo FM (Lee et al. 2012 apud AHMED and MARHABA, 2016). O RCW tem menor rebaixamento, baixa velocidade de entrada nas tubulações e menos operações de limpeza. Isto resulta em custos operacionais mais baixos; portanto, é mais eficiente que o poço vertical (Bakker et al. 2005 apud AHMED and MARHABA, 2016), apesar do seu elevado CAPEX (EPA, 2010).

pH

Muitos estudos mostraram que o pH elevado aumenta a repulsão eletrostática, que por sua vez diminui a ligação do vírus PRD1 fago (GRANT et al. 1993; HERMANSSON 1999; ISRAELACHVILI 2011; LOVELAND et al. 1996 apud Ahmed and Marhaba, 2016). A adsorção do COD em relação às partículas do solo foi dependente do pH da solução, e a máxima adsorção ocorreu no pH 4,5 (JARDINE et al. 1989 apud Ahmed and Marhaba, 2016).

Os **tempos de percurso** na área de infiltração entre um rio e o(s) poço(s) de bombeamento podem ser avaliados utilizando abordagens baseadas em sistemas hidráulicos ou baseados em rastreadores. Os métodos hidráulicos baseiam-se na medição da **condutividade hidráulica**, gradientes hidráulicos e porosidade dos sedimentos presentes entre o leito do rio e o(s) poço(s). Em seguida, as velocidades de fluxo e os tempos de viagem são determinados indiretamente usando cálculos da lei de Darcy ou modelagem numérica do fluxo de águas subterrâneas. Tempos de viagem mais curtos não são favoráveis para a remoção de contaminantes, enquanto velocidades mais baixas e caminhos de fluxo mais longos são mais favoráveis (JARAMILLO, 2012; Wang et al. 2000 apud Ahmed and Marhaba, 2016; Gutiérrez et al. 2017), embora possam reduzir a produtividade ou a fração de água filtrada em margem em comparação com a água subterrânea.

Vale destacar que o posicionamento e o projeto do sistema FM não dependem apenas de fatores hidrogeológicos, mas, em certa medida, de fatores técnicos, econômicos, regulatórios e de uso do solo (JARAMILLO, 2012).

Aspectos econômicos

Em geral, a FM é frequentemente preferida para ser usada como um processo de tratamento de água potável em casos onde há água subterrânea insuficiente e o custo de tratamento da FM versus o tratamento direto da água do rio é menor (GRISCHEK et al. 2002 apud AHMED and MARHABA, 2016).

O custo do FM como processo de pré-tratamento foi estudado nos Estados Unidos (GROOTERS 2007 apud AHMED and MARHABA, 2016) e concluiu que o uso de FM, como pré-tratamento para osmose reversa, poderia reduzir os custos do tratamento em 10–20%.

Estudos de viabilidade foram realizados para a FM como processo de pré-tratamento para ultrafiltração. O estudo mostrou que 20-70% dos sólidos suspensos poderiam ser removidos pela FM, dependendo da qualidade da água do rio (AHMED and MARHABA, 2016).

ANDAMENTO DO ESTUDO PILOTO NA SABESP

Objetivo do Estudo da Sabesp

A Sabesp iniciou em novembro de 2023 um contrato na região do Rio Paraíba do Sul, cujo objetivo é avaliar técnica e economicamente a tecnologia de Filtração em Margem de Rio (FMR) através da implantação de dois pilotos, partindo neste contrato, da investigação de áreas potenciais na região, com vistas à seleção e posterior contratação da implantação dos 2 pilotos.

A intenção da empresa é expandir o uso da técnica em seus projetos e planejamento de expansão, identificando sites no estado de São Paulo onde a técnica possa ser aplicada e também expandir o conhecimento e divulgar os resultados para que outras companhias de saneamento no país possam se beneficiar dos conhecimentos adquiridos, contribuindo com a redução na geração de lodos, redução no consumo de produtos químicos e na emissão de GEE, colaborando com a implantação da economia circular no saneamento, com o uso de tecnologias verdes e com a universalização do saneamento em regiões de maior precariedade de recursos e onde o uso da técnica se faça viável.

Etapas dos Estudos

Na sequência, serão apresentadas as etapas para a investigação preliminar das áreas utilizadas nos estudos da Sabesp, de forma a se resumir o que está sendo levantado desde os históricos de qualidade da água bruta, existência de áreas contaminadas nos entornos, levantamentos de informações secundárias, dados geofísicos, topográficos, sondagens, avaliação hidrológica, entre outras, trazendo a título de exemplificação, dados levantados (como mapas geológicos) em uma das áreas em avaliação preliminar.

Avaliação Preliminar

Resumidamente, foram efetuadas visitas às áreas para avaliação preliminar e definição de 4 a serem investigadas, com base em:

- Infraestrutura das ETAs.
- Segurança da captação.
- Demandas de qualidade da água bruta (parâmetros de interesse).
- Dados de riscos ambientais.
- Classe dos corpos hídricos (qualidade das águas superficiais, subterrâneas e eventuais áreas contaminadas no entorno), dados dos meios físicos nas bacias consideradas, (geologia, hidrogeologia, histórico de cheias, climas, eventuais informações de sondagens já disponíveis, topografias, entre outros).

Caracterização Detalhada

Na atual etapa, estão sendo iniciados estudos mais aprofundados das áreas candidatas que caracterizará e avaliará 4 (quatro) áreas candidatas à implantação das 2 (duas) unidades pilotos, selecionados a partir de:

- Estudos geofísicos.
- Sondagens e caracterização do material do aquífero (granulométrica e físico-química).

- Caracterização das condutividades hidráulicas, porosidades efetivas, coeficiente de uniformidade, permeabilidade, transmissividade.
- Caracterização do sedimento do rio e da meiofauna.
- Instalação de piezômetros p/ avaliação da qualidade da água e teste do potencial de colmatação.

Realização de Anteprojetos Visando Implantação

Por fim, serão elaborados os Anteprojetos para posterior contratação integrada da implantação e monitoramento dos 2 pilotos com base em:

- Finalização dos estudos anteriores com sondagens complementares.
- Testes de produção com poço teste.
- Modelagem para os 2 pilotos.
- Ensaio de tratabilidade (bancada).
- Avaliação técnico-econômica preliminar
- Documentação ambiental

Contratação de Projetos básico/executivo, obras de implantação e campanhas de monitoramento para avaliação técnico-econômica da tecnologia, finalizarão os estudos pilotos.

LEVANTAMENTOS PRELIMINARES

Os trabalhos foram iniciados a partir de imagens utilizando a ferramenta Google Earth, de locais primeiramente nas imediações das captações ou áreas da Sabesp nas proximidades de rios. O passo seguinte foi a realização de visitas a campo a fim de se colher informações visuais, além da busca de informações complementares em banco de dados sobre:

- ✓ Histórico de qualidade da água bruta => Análise do histórico de qualidade da água do manancial superficial é importante para identificar os principais contaminantes locais e, conseqüentemente, propor o foco da pesquisa no âmbito da qualidade da água. Uma análise do histórico de concentrações de ferro e manganês no manancial superficial podem auxiliar na escolha da área de estudo.
- ✓ Vazões mínimas e máximas do manancial de superfície - Variações de vazões no manancial são importantes para prover a autolimpeza das margens (recuperação da capacidade de infiltração devido a colmatação natural ou forçada), já exposto anteriormente.
- ✓ Calha do manancial - Informações prévias sobre a calha do manancial tais como largura, profundidade, declividade etc., poderá fornecer informações sobre variações de velocidade (baseados no regime de vazões).
- ✓ Imagem aérea local - Análise visual de trechos com visível dinâmica de arraste e deposição de sedimentos no leito do rio. Locais, onde de forma mais acentuada, ocorre alternância de períodos com variações de velocidade e turbulência, são preferidos.

Na planilha elaborada como apoio à definição “preliminar” de áreas, foram considerados aspectos como:

- ✓ condições de acesso;
- ✓ características do local (aspectos visuais, disponibilidade de informações secundárias e primárias eventualmente disponíveis, aspectos climáticos, cobertura vegetal, existência de barramento próximo, entre outras informações);
- ✓ características do solo;
- ✓ características do rio / leito (velocidade aparente do rio, largura, profundidade, áreas de remanso, turbidez e cor, presença de algas, presença de bancos de areia, risco de inundação, entre outros);

- ✓ facilidade de aplicação de modelo matemático;
- ✓ facilidade de conexão ao sistema de abastecimento de água existente;
- ✓ disponibilidade de energia elétrica;
- ✓ se área é de propriedade da Sabesp, de órgãos públicos ou privada.

CARACTERIZAÇÃO DETALHADA

A Sabesp está iniciando esta etapa e nela serão aprofundados os estudos com o levantamento de dados primários através de:

- A caracterização dos aquíferos (aluviais ou formações geológicas não consolidadas) => como já mencionado, partiu-se da busca em mapas geológicos e informações secundários em banco de dados e estudos pré-existentes. Na presente etapa, após seleção preliminar das áreas, serão aprofundadas as investigações das áreas com a realização de ensaios geofísicos e sondagens, incluindo a coleta de testemunhos contínuos relativamente imperturbados da superfície até uma profundidade pelo menos igual ao fundo projetado da tela do poço, para o poço de produção proposto.
- Caracterização do material de sondagem em intervalos amostrados => composto de cerca de 60 cm de comprimento ou a cada alteração litológica.
- Avaliação preliminar da qualidade das águas (superficiais e subterrâneas, com a instalação de piezômetros).
- Realização de ensaios para avaliação do potencial de colmatção/ obstrução no sedimento do rio.

Após as avaliações mais detalhadas, serão definidas duas áreas para as quais serão elaborados os anteprojetos para implantação dos pilotos (próxima etapa dos estudos).

ELABORAÇÃO DE ANTEPROJETOS

Como já mencionado anteriormente, os anteprojetos terão o suporte de modelagem matemática calibrada a partir de levantamentos complementares em campo, avaliação preliminar da qualidade esperada da água por meio de ensaios de produção em poço teste e ensaios laboratoriais de tratabilidade.

A implantação e monitoramento dos pilotos será objeto de nova contratação já que a presente está focada na investigação e definição das áreas adequadas ao uso da tecnologia de filtração em margem de rio.

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Resultados parciais das avaliações preliminares

Para fins de exemplificação, serão apresentados os levantamentos preliminares para um dos locais em avaliação pela Sabesp (figura 5).

O clima em São José dos Campos/ SP é tropical de altitude, classificado como subtropical úmido (Cwa): com verões quentes e úmidos; invernos amenos e secos. O mês mais quente, fevereiro, possui temperatura média de 22,4 °C, e o mais frio, julho, de 15,6 °C. Outono e primavera são estações de transição. A precipitação média anual é de 1.155 mm, sendo julho o mês mais seco, quando ocorrem apenas 26,6 mm. Em dezembro, o mês mais chuvoso, a média fica em 202,1.

Em visita ao local verificou-se que o rio possui boa largura e a profundidade e velocidade reportadas, constituem um fator positivo.

A figura 4 mostra as localizações de **fontes pontuais de contaminação do solo e águas subterrâneas** em raio de 500 metros dos pontos centrais nos círculos verdes (Fonte DAEE-DATAGEO). Salienta-se que as áreas de interesse para implantação dos Sistemas FM distam cerca de 1,0 Km ou mais dessas fontes, ou seja, nenhuma

CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

A área a seguir, localizada no município de São José dos Campos, localizada na margem direita do Rio Paraíba do Sul, no final de um meandro aparentemente natural, em uma área de várzea onde a Área de Proteção Permanente (APP) pouco se vê da mata ciliar que ali deve ter 100 metros de largura, já que a calha do rio naquele local, apresenta pouco mais de 50 metros de largura (Lei 12.651/2012 – Novo Código Florestal).

A imagem abaixo mostra (figura 6), na mesma escala, o contexto litológico do entorno, conforme mapeamento geológico da CPRM de 2006 (disponível em <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app>).

Figura 6: Contexto Geológico de área em São José dos Campos



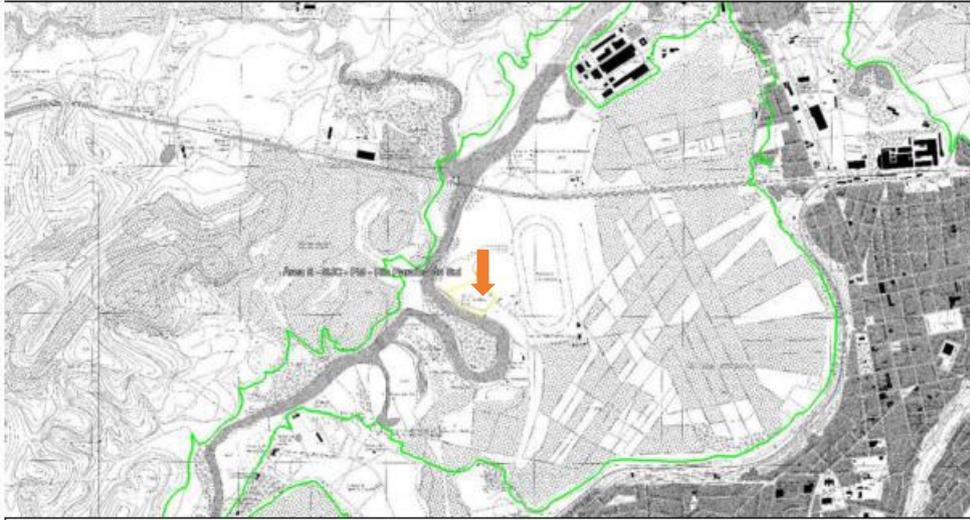
Fonte: Relatório SABESP (2024).

A imagem mostra a área em estudo localizada sobre terreno aluvionar quaternário, depositado sobre sedimentos Terciários, no contato entre a Fm. Resende e a Fm. Pindamonhangaba (mais jovem). Esta última possui características mais arenosas (formada por camadas de Arenito, Argilito, Arenito Conglomerático, Siltito, Ortoconglomerado) e, muitas vezes, é também explorada como jazida de areia, ampliando a Reserva Mineral.

Neste contexto geológico, espera-se encontrar no local em estudo Sedimentos Quaternários inconsolidados e Sedimentos Terciários jovens com baixa consolidação.

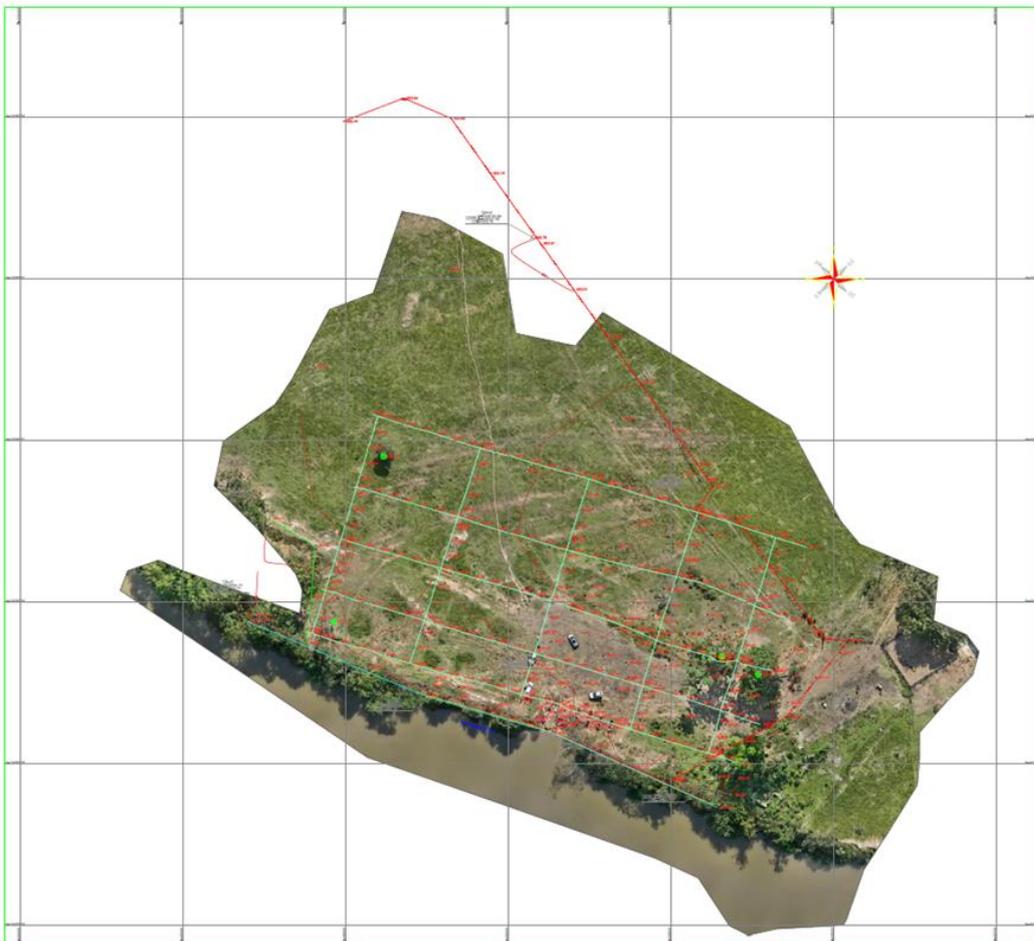
Analisando-se a topografia do local, percebe-se que a área em análise está inserida em uma ampla planície, com superfície bastante plana e de cota mais baixa que todo seu entorno. A imagem abaixo (figuras 7 e 8) mostra a topografia da área, conforme levantamento do IGC-1980 (disponível em <https://datageo.ambiente.sp.gov.br/app>).

Figura 7 – Levantamento topográfico da região, realizado pelo IGC, em 1980. Em verde está a delimitação da área de várzea do Rio Paraíba do Sul, conforme estudo do IG (2009).



Fonte: Relatório SABESP (2024).

Figura 8: Levantamento topográfico de trecho em avaliação.



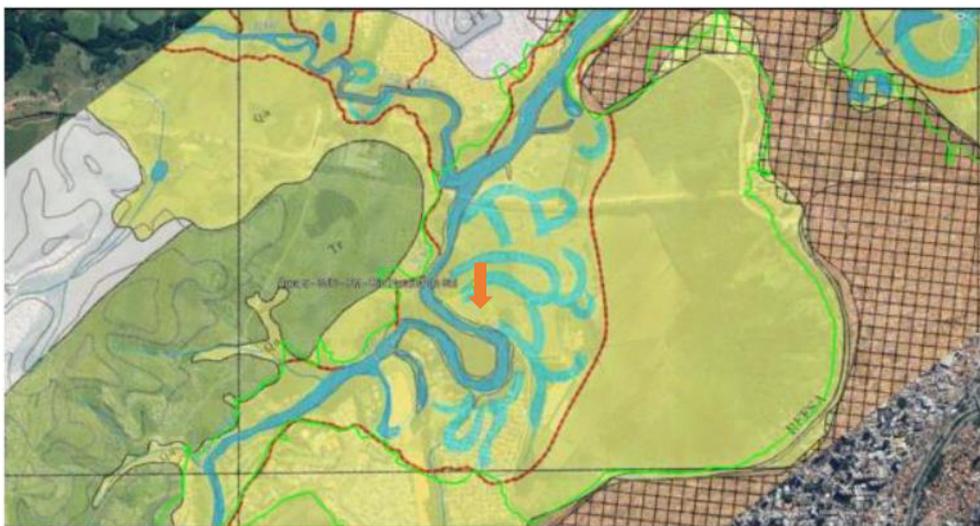
Fonte: Relatório SABESP (2024).

CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO – ÁREA DE VÁRZEA E ENVOLTÓRIA MEÂNDRICA

Um estudo relativamente recente, publicado pelo IG-SP, em duas etapas, a primeira em 2009 e a segunda em 2016, denominado “Projeto Paraíba do Sul – Potencialidade de Areia”, apresentou a delimitação da envoltória de meandros abandonados (Envoltória Meândrica) e a indicação do provável limite da área de várzea do Rio Paraíba do Sul (apresentado em verde nas imagens da figura 9).

O local em estudo, além de estar dentro da várzea do Rio Paraíba do Sul, também está dentro dos limites de sua “Envoltória Meândrica”, como se pode ver na imagem abaixo:

Figura 9 – Relação entre a área em estudo (seta laranja), o limite da Várzea do Rio Paraíba do Sul (linha verde claro) e a Envoltória Meândrica (linha vermelha), como definida pelo IG em estudo de 2009, com destaque dos meandros abandonados ainda visíveis (em azul mais claro).



Fonte: Relatório SABESP (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base em informações prospectadas em estudos e artigos publicados, percebe-se que o processo de FM é controlado por numerosos fatores, incluindo biológicos, biogeoquímicos e hidrogeológicos que podem sofrer variações não apenas de local para local, mas também sazonalmente. Desta forma, não se tem conhecimento da existência de padrões orientativos para a otimização de projetos de FM.

De qualquer forma, a quantificação da água, o tempo de viagem e a velocidade da água nos poros têm uma forte influência na qualidade da água extraída da FM. Outro parâmetro relevante é a temperatura, já que sua elevação pode levar a maiores atividades microbianas, que por sua vez causam condições anóxicas de FM. Compreender o efeito da temperatura no mecanismo de consumo de oxigênio é crucial na FM, a fim de controlar a condição anóxica e essa pode ser uma questão relevante nas pesquisas da Sabesp, já que estamos em um país de clima tropical.

Pode-se extrair que a eficiência do processo de FM é diminuída na ocorrência de:

- caminho de fluxo muito curto;
- gradientes elevados;
- velocidade de percolação muito alta;
- aquífero cárstico e altos níveis de heterogeneidade;
- também é necessário compreender-se melhor o processo de obstrução (colmatação) no sedimento do rio para uma melhor definição de critérios operacionais nos poços.

Em geral, as etapas e metodologias adotadas em investigações de áreas para a implantação de processo de filtração em margem de rio adotam critérios desde visitação aos locais, levantamento de mapas geológicos, vegetação, clima, uso e ocupação do solo além da utilização de uma abordagem integrada, se possível usando diferentes métodos e técnicas de forma colaborativa, tais como: geofísica, sistema de informação geográfica (GIS), análises hidrogeológica e hidroquímica por meio de sondagens, caracterização granulométrica e físico-química do solo, sedimento e água, testes de produção e modelagem.

Esses critérios combinados permitem a determinação do fluxo da água através do solo, o tamanho das partículas do solo bem como a velocidade de escoamento que também tem grande influência no nível de filtração obtido.

Com relação aos estudos da Sabesp, os resultados preliminares vêm confirmando a expectativa de adequação da área investigada para a implantação de pilotos na região do Paraíba do Sul.

A expectativa é que com o pré-tratamento via FM, haja maior estabilidade na qualidade da água bruta, redução no consumo de produtos químicos, na geração de lodos, além de ampliação da capacidade de abastecimento na região.

Outro aspecto diz respeito ao potencial da região, já que os mapas geológicos sinalizam a existência de grandes áreas de aluvião quaternário, o que se espera ser confirmado e validado por ensaios geofísicos, sondagens, teste de produção e modelagem (próximas etapas da pesquisa).

Essas futuras etapas dos estudos permitirão também a avaliação do potencial de colmatação nos sedimentos das áreas selecionadas, de modo a auxiliar complementarmente na modelagem e na determinação de critérios operacionais futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHMED, Ahmed Khaled Abdella; MARHABA, Taha F. Review on river bank filtration as an in situ water treatment process. *Clean Techn Environ Policy* (2017) 19:349–359. DOI 10.1007/s10098-016-1266-0. 2016.
2. CHERBAKIAN, Eloisa Helena. Visão geral sobre a tecnologia de filtração em margem de rio na produção de água e as perspectivas de sua utilização na Sabesp. Encontro Técnico AESABESP. 33º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. São Paulo, 2022.
3. DALSSASSO, R. L.; GUEDES, T. L. Manual de operação e manutenção de sistemas de tratamento de água por filtração em margem. Fundação Nacional de Saúde (FUNASA), 2018.
4. EMMENDOERFER, M. L.; MARTINS, M.; PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M.B.D.; SIGNORI, A.M.; SENS, M.L. A review of seventeen years of bank filtration in Brazil: results, benefits and challenges - Part 2: states of Pernambuco and Minas Gerais. *Revista DAE*. São Paulo. v. 69, n 233 / pp (149-163). Ed. Esp. Nov. 2021.
5. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). 40 CFR Parts 9, 141, and 142 National Primary Drinking Water Regulations: Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule; Final Rule. January 5, 2006. Disponível em: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2006-01-05/pdf/06-4.pdf>. Acesso em 20/09/19.
6. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Long Term 2 Enhanced Surface Water Treatment Rule Toolbox Guidance Manual. April 2010. www.epa.gov/safewater. Disponível em: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1009JLI.txt>. Acesso em: 26/04/2022.
7. GRISCHEK, T., SCHUBERT, J., JASPERSE, J.L., STOWE, S.M., COLLINS, M.R.. What is the appropriate site for RBF? Proceedings Of The 6th International Symposium On Managed Artificial Recharge Of Groundwater, ISMAR6. Phoenix, Arizona/USA. october 28 - november 2, 2007 (466-474). Disponível em: https://dinamar.tragsa.es/pdf/AquiferRecharge_ISMAR6.pdf. Acesso em: 16/05/2022.
8. GUTIÉRREZ, Juan Pablo; VAN HALEM, Doris and RIETVELD, Luuk. Riverbank filtration for the treatment of highly turbid Colombian rivers. *Drinking Water Engineering and Science*, 10, 13–26, 2017.

9. HOANG, Ngoc Anh T.; COVATTI, Gustavo; GRISCHEK, Thomas. Methodology for evaluation of potential sites for large-scale riverbank filtration *Hydrogeology Journal* (2022) 30:1701–1716. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02522-4>
10. JARAMILLO, Marcela. Riverbank filtration: an efficient and economical drinking-water treatment technology. *Ingeniería, Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Dyna*, year 79, Nro. 171, pp. 148-157. ISSN 0012-7353. 2012.
11. SABESP. RELATÓRIO RFR - Relatório Final de Resultados da Fase 2. Contrato Sabesp Nº 00.486/23. Março, 2024.
12. TUFENKJI, Nathalie; RYAN, Joseph N. and ELIMELECH, Menachem. The PROMISE of Bank Filtration. A simple technology may inexpensively clean up poor-quality raw surface water. *American Chemical Society - Environmental Science & Technology*. November 1, 2002; 423A–428A.
13. UMAR, Da’u Abba, RAMLI, M. F., ARIS, A. Z., SULAIMAN, W. N. A., KURA, N. U., TUKUR, A.I. An overview assessment of the effectiveness and global popularity of some methods used in measuring riverbank filtration. *Journal of Hydrology* 550 (2017) 497 – 515. March 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.05.021>. Acesso em 26/04/2022.
14. WAHAAB, Rifaat Abdel; AFIFI, Mohamed Abdel Hadi. Overview of Riverbank Filtration (RBF) Projects in Egypt - International Riverbank Filtration Conference in Dresden, Alemanha. University of Applied Sciences Dresden (HTW Dresden), Division of Water Sciences. Outubro, 2023.