



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO LUCAS ALVES CALLOU DE SÁ

**INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO: QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA NO
PROJETO DE FILTRAÇÃO EM MARGEM NO RIO BEBERIBE**

Recife-PE
2023

JOÃO LUCAS ALVES CALLOU DE SÁ

**INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO: QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA NO
PROJETO DE FILTRAÇÃO EM MARGEM NO RIO BEBERIBE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Recife-PE
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Sá, João Lucas Alves Callou de.

Interação rio-aquífero: quantidade e qualidade da água no projeto de filtração em margem no rio Beberibe / João Lucas Alves Callou de Sá. - Recife, 2023.
92p. : il., tab.

Orientador(a): Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil - Bacharelado, 2023.

1. águas subterrâneas. 2. fluxo subterrâneo. 3. zona hiporreica. I. Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOÃO LUCAS ALVES CALLOU DE SÁ

**INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO: QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA NO
PROJETO DE FILTRAÇÃO EM MARGEM NO RIO BEBERIBE.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em: 05/10/2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dra. Sylvana Melo dos Santos (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. José Adson Andrade de Carvalho Junior (Examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família que, com muito apoio e amor, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, antes e acima de tudo, por me conceder força, sabedoria e perseverança para concluir este projeto.

Aos meus pais, Marcos e Norma, pelo amor incondicional, apoio emocional e incentivo ao longo de toda a minha vida e jornada acadêmica. As minhas irmãs, pela união e companheirismo.

À toda minha família, em especial meu avô Ulisses (*in memoriam*) por ter sido o maior incentivador do estudo. Ao meu tio Mardômio e família, por me acolher e dar todo suporte necessário em Recife.

À minha querida namorada, Monyque Freire, que esteve ao meu lado, apoiando e incentivando, mesmo nos momentos de maior pressão e desafio. Sua compreensão, amor e paciência foram fundamentais para que eu pudesse me dedicar a este projeto.

Ao meu orientador, professor Dr. Anderson Paiva, expresso meu sincero agradecimento por proporcionar-me a oportunidade de ingressar na pesquisa, bem como por sua orientação, apoio e paciência ao longo de todo este processo. Suas valiosas sugestões e orientações desempenharam um papel fundamental no êxito deste trabalho.

Aos meus professores do primário ao ensino médio, que plantaram as sementes do conhecimento em meu caminho e contribuíram para a minha formação inicial, em especial Luciana Duarte e minha tia Marta Barreto, aos quais desejo expressar minha profunda gratidão.

Aos meus amigos e colegas de graduação, Edilberto e Murilo, que compartilharam comigo momentos de estudo, desafios e aprendizado.

À equipe de FM, em especial Hedmun e Guilherme, por todo o auxílio fornecido durante as coletas e análises de dados.

À CNPq, pela concessão da bolsa durante parte da minha graduação, o que contribuiu para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao LABOGEO, pelo concedimento da autorização para utilização de suas instalações e equipamentos.

Aos docentes e colaboradores da instituição, cuja dedicação à excelência do ensino foi fundamental em minha trajetória acadêmica.

Por fim, expresso novamente minha gratidão a Deus por ter trazido para minha vida todas as pessoas que, de maneira direta e indireta, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

A demanda crescente por água potável, aliada à contaminação dos mananciais superficiais por efluentes domésticos, tem impulsionado a busca por técnicas inovadoras e economicamente viáveis no tratamento desse recurso natural. Nesse cenário, a Filtração em Margem (FM) é uma técnica de baixo custo que envolve a instalação de poços de bombeamento próximos a um manancial superficial. A operação desses poços gera uma diferença no gradiente hidráulico entre o reservatório superficial e o aquífero subterrâneo, induzindo o fluxo de água do rio para o poço de produção. Durante o percurso da água através dos sedimentos do solo, ocorrem processos físicos, químicos e biológicos que desempenham um papel fundamental no aprimoramento da qualidade da água. A FM tem sido crescentemente utilizada em âmbito global e vem sendo testada no Brasil. A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a interação rio-aquífero visando o melhoramento da qualidade de água, por meio do projeto de FM situado na Estação Elevatória de Caixa d'Água, às margens do rio Beberibe, em Olinda-PE. No local, encontram-se oito poços de observação e quatro poços de produção. Para entender a interação entre o rio e o aquífero, foram realizadas as seguintes atividades: análise da diferença de carga hidráulica em um ponto pré-estabelecido no rio Beberibe; caracterização dos sedimentos da zona de hiporreica (zona de intercâmbio entre água superficial e subterrânea); e correlação entre lâmina d'água do rio, as precipitações e os níveis piezométricos dos poços de produção e observação. Em relação à eficiência da Filtração em Margem, foi realizado um monitoramento qualitativo da água do rio e do poço de produção. A caracterização da zona hiporreica constatou-se a predominância de solo arenoso no local, além de baixo teor de matéria orgânica total (MOT) e carbonato de cálcio (CaCO_3). A leitura da diferença de carga hidráulica evidenciou que, em geral, períodos de estiagem favorecem a recarga do aquífero pelo rio, atuante como influente, enquanto no inverno há uma maior tendência de o rio atuar como efluente. Os resultados da correlação entre os níveis piezométricos, a lâmina d'água do rio e as precipitações locais demonstraram uma conexão hidráulica entre os poços e o rio Beberibe, caracterizando uma interação rio-aquífero. A análise qualitativa evidenciou o potencial da técnica na atenuação de poluentes e na melhoria da qualidade da água, servindo, pelo menos, como uma etapa de pré-tratamento para consumo humano.

Palavras-chave: águas subterrâneas; fluxo subterrâneo; zona hiporreica.

ABSTRACT

The growing demand for drinking water, coupled with contamination of surface water sources by domestic effluents, has driven the search for innovative and economically viable treatment techniques for this natural resource. In this context, Bank Filtration (BF) is a low cost technique that involves the installation of pumping wells near a surface water source. The operation of these wells creates a difference in hydraulic gradient between the surface reservoir and the underground aquifer, inducing the flow of water from the river to the production well. During the water's passage through the soil sediments, physical, chemical, and biological processes play a fundamental role in improving water quality. The technique known as Bank Filtration has been increasingly utilized globally and is currently being tested in Brazil. The aim of this research was to evaluate the river-aquifer interaction with a view to improving water quality, through the Bank Filtration project located at the Caixa d'Água Pumping Station, on the banks of the Beberibe River in Olinda-PE. There are eight observation wells and four production wells. To understand the interaction between the river and the aquifer, the following activities were conducted: analysis of the hydraulic head difference at a predetermined point in the Beberibe River; characterization of sediments in the hyporheic zone (the zone of exchange between surface and groundwater); and correlation between the river's water level, precipitation, and the piezometric levels of the production and observation wells. The characterization of the hyporheic zone revealed the predominance of sandy soil at the site, along with a low content of organic matter and calcium carbonate. The analysis of the hydraulic head difference showed that, in general, dry periods favor aquifer recharge from the river, acting as an influent, while in winter there is a greater tendency for the river to act as an effluent. The results of the correlation between piezometric levels, river water level, and local precipitation demonstrated a hydraulic connection between the wells and the Beberibe River, characterizing a river-aquifer interaction. Qualitative analysis has shown the potential of the technique in mitigating pollutants and improving water quality, serving at least as a pre-treatment step for human consumption.

Keywords: groundwater; underground flow; hyporheic zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação do fluxo na interação rio-aquífero.	20
Figura 2 - Esquema simplificado zona hiporreica.	22
Figura 3 - Esquema simplificado da técnica de FM.	26
Figura 4 - Tipos de Poços para o método de Filtração em Margem.	27
Figura 5 - Processos que ocorrem na Filtração em Margem.	30
Figura 6 - Ocupação informal das margens do rio.	36
Figura 7 - Bacia hidrográfica do Rio Beberibe, Pernambuco.	37
Figura 8 - Média mensal de precipitação no Posto Olinda 199 (2001-2021).	39
Figura 9 - Localização da EE Caixa d'Água na divisa entre as cidades de Olinda e Recife, onde está localizado o projeto piloto de FM.	40
Figura 10 - Localização dos poços de observação e de produção na estação experimental de FM em Caixa d'Água.	41
Figura 11 - Esboço dos poços de observação instalados na estação experimental de FM em Caixa d'Água.	42
Figura 12 - Esboço esquemático dos novos poços de produção instalados nas margens.	42
Figura 13 – Poço 01.	43
Figura 14 - Urbanização e matas ao redor da EE Caixa d'Água.	44
Figura 15 - Área do entorno da EE Caixa d'Água com melhor precisão.	44
Figura 16 - Urbanização na área da Rádio Olinda. (A) Foto aérea 2011; (B) Foto aérea 2023.	45
Figura 17 - Localização dos pontos adotados pela equipe de FM.	46
Figura 18 - Localização do Ponto 03 no rio Beberibe.	47
Figura 19 - Esquema simplificado das coletas.	48
Figura 20 - Infográfico das etapas dos processos de análises dos teores de MOT, CaCO ₃ e da granulometria.	49
Figura 21 - Peneiras dispostas sobre a base vibratória.	51
Figura 22 - Detalhes da parte superior do piezômetro diferencial.	52
Figura 23 - Detalhes da ponteira filtrante do piezômetro diferencial.	52
Figura 24 – Posicionamento para cravação do piezômetro diferencial.	53
Figura 25 - Fluxo ascendente.	54
Figura 26 - Fluxo descendente.	54
Figura 27 - Fluxo nulo.	54

Figura 28 - Medição do nível piezométrico de um poço observação.....	55
Figura 29 - Recipientes com amostras de água para análise físico-química.	56
Figura 30 - Resumo da concentração de MOT na área de estudo.	60
Figura 31 - Leitura da diferença de carga hidráulica no leito do Rio Beberibe em relação ao nível do rio.....	61
Figura 32 - Gráfico do monitoramento dos níveis piezométricos, da lâmina d'água do rio Beberibe e da precipitação diária no módulo experimental, Olinda-PE, valores de cotas em relação ao referencial adotado.	65
Figura 33 - Monitoramento do pH do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.	67
Figura 34 - Monitoramento de turbidez do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.	68
Figura 35 - Monitoramento de cor aparente do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.	69
Figura 36 - Monitoramento de condutividade elétrica do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.	70
Figura 37 - Monitoramento de nitrato do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.	71
Figura 38 - Monitoramento de amônia do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água....	72
Figura 39 - Monitoramento de nitrito do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.....	72
Figura 40 - Monitoramento da dureza total em CaCO ₃ do projeto Filtração em.....	73
Figura 41 - Monitoramento do cálcio do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água....	73
Figura 42 - Monitoramento de ferro do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.....	74
Figura 43 - Monitoramento de cloreto do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água. ..	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das partículas de solo, conforme NBR 6502/65 (ABNT,1995).....	23
Tabela 2 - Total acumulado anual da precipitação (mm/ano) na bacia hidrográfica do rio Beberibe no período de 2001 a 2021.....	38
Tabela 3 - Coordenadas do ponto de análise.	46
Tabela 4 - Localização da estação meteorológica.	55
Tabela 5 - Cota da boca dos poços de FM em relação à cota de referência.....	56
Tabela 6 - Análise granulométrica, de MOT e CaCO ₃	58
Tabela 7 - Leitura dos níveis piezométricos, valores em cota a partir do referencial adotado (piso da casa de bomba da EE Caixa d'Água).	63
Tabela 8 - Resultado das análises microbiológicas do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.	77
Tabela 9 - Resumos dos resultados obtidos no monitoramento qualitativo.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
<i>APHAN</i>	<i>American Public Health Association</i>
BF	Bank Filtration
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CE	Condutividade Elétrica
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
DOCEAN	Departamento de Oceanografia
EE	Estação Elevatória
ETA	Estação de Tratamento de Água
FM	Filtração em Margem
GL-1	Grupo de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos de Pernambuco
IQA	Índice de Qualidade das Águas
LABOGEO	Laboratório de Oceanografia Geológica
MON	Matéria Orgânica Natural
MOT	Matéria Orgânica Total
MS	Ministério da Saúde
pH	Potencial Hidrogeniônico
P3	Ponto 03
P3MD	Ponto 03 Margem Direita
P3ME	Ponto 03 Margem Esquerda
UH	Unidade Hazen
UT	Unidade de Turbidez
VMP	Valor Máximo Permitido
ZH	Zona Hiporreica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa e motivação	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Geral	18
2.2	Específicos.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1	Interação rio-aquífero	19
3.1.1	Zona hiporreica	21
3.1.1.1	Características do solo.....	23
3.1.1.2	Colmatação.....	24
3.2	Filtração em Margem	25
3.2.1	Processos envolvidos e remoção de contaminantes	28
3.2.2	Vantagens e desvantagens	32
3.2.3	Histórico no Brasil e no Mundo	33
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.1	Caracterização da área de estudo.....	36
4.1.1	Condições climáticas, vegetais e hídricas	36
4.1.2	Estação Elevatória de Caixa d'Água	39
4.1.2.1	Projeto Piloto de Filtração em Margem	39
4.1.2.2	Entorno da EE Caixa d'Água	43
4.1.3	Ponto no Rio Beberibe	45
4.2	Coleta e análise de dados.....	47
4.2.1	Caracterização dos sedimentos hiporreicos.....	49
4.2.1.1	Matéria orgânica total e carbonato de cálcio.....	50
4.2.1.2	Análise granulométrica.....	50
4.2.2	Medição da diferença de carga hidráulica	52
4.2.3	Monitoramento piezométrico	54
4.2.4	Monitoramento qualitativo.....	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	Caracterização dos sedimentos hiporreicos.....	58
5.2	Medição da diferença de carga hidráulica	61
5.3	Monitoramento piezométrico	63

5.4	Monitoramento qualitativo	67
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
6.1	Conclusões.....	79
6.2	Recomendações para pesquisas futuras.....	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento fundamental para a vida no planeta e indispensável para a sociedade. Ao longo dos anos, com o desenvolvimento acelerado das atividades industriais e o crescimento populacional, foram se tornando cada vez mais diversificadas e exigentes em quantidade e qualidade as necessidades de uso da água, ao mesmo tempo que contribuíram para sua redução e deterioração (Heller; Pádua, 2006).

No Brasil, a contaminação dos mananciais por efluentes advindos da ação antrópica, especialmente em áreas urbanas com ausência de coleta e transporte de esgoto é um crescente impasse no abastecimento de água de qualidade, aumentando os custos de tratamento e a distância de captação. Além disso, as perdas nos sistemas de transporte, em especial as perdas físicas relacionadas às fugas e vazamentos de água, intensificam ainda mais as preocupações com os recursos hídricos.

Devido à crescente demanda por água potável, observa-se um aumento na busca por técnicas inovadoras e economicamente viáveis no tratamento desse recurso natural. Como resultado, muitas pesquisas vêm sendo realizadas, especialmente na recuperação e manutenção de rios.

A Filtração em Margem (FM), nesse cenário, apresenta-se como uma técnica alternativa e eficiente na redução do grau de contaminação em que se encontram as águas superficiais e até mesmo subterrâneas (Freitas, 2010). A técnica é de baixo custo e consiste na instalação de poços com bombeamento próximo às margens de rios ou reservatórios. Através do bombeamento, cria-se uma diferença de carga hidráulica entre o manancial e o lençol freático, induzindo a passagem da água pelo meio poroso até o poço de produção, sendo a água obtida no poço uma mistura de água superficial e subterrânea. Durante esse percurso entre a camada superficial e o poço, a água passa por vários processos físico-químicos, biológicos e mecânicos que melhoram significativamente sua qualidade. Dessa forma, a FM pode ser usada, pelo menos, como uma forma de pré-tratamento, e, dependendo das condições do manancial e do grau de remoção de poluentes, a água poderá estar dentro dos padrões de potabilidade.

Por ser uma tecnologia simples e natural no tratamento da água, a técnica tem sido amplamente utilizada em várias partes do mundo, visto que apresenta benefícios imediatos, pode-se mencionar: a redução do custo no tratamento da água sem aumento do risco a saúde humana e diminuição do uso de produtos químicos (Ray; Melin; Linsky, 2002; Paiva, 2019).

A eficiência deste processo depende de fatores como a qualidade da água bruta do rio ou lago, condições hidrogeológicas do aquífero, interface rio-aquífero, gradiente hidráulico,

taxa de infiltração, condutividade hidráulica e distância entre a margem e os poços de bombeamento (Ray *et al.*, 2002).

Tendo em vista que nessa técnica ocorre, substancialmente, uma interação entre rio e aquífero, o presente trabalho propõe caracterizar os sedimentos que compõem a zona de transição entre o leito do rio e o lençol freático, chamada de zona hiporreica (ZH). Esses sedimentos serão utilizados como meio filtrante e podem estar associados a diversos aspectos da água que será captada pelo poço de produção. Além disso, busca-se compreender a dinâmica do fluxo vertical e realizar o monitoramento quantitativo e qualitativo da água do rio Beberibe e do poço, com o objetivo de avaliar a interação rio-aquífero e a eficácia da técnica de Filtração em Margem, no âmbito do projeto piloto do rio Beberibe.

1.1 Justificativa e motivação

A qualidade da água nos mananciais superficiais está fortemente ligada com o uso e ocupação do solo por parte dos seres humanos. A interferência do homem, seja na geração de resíduos domésticos e industriais ou aplicação de agrotóxicos no solo, alteram a qualidade da água de rios e lagos, assim como interferem na quantidade disponível.

No mundo, mais de 80% do esgoto gerado por atividades humanas é despejado em rios e oceanos sem qualquer tratamento, o que resulta em poluição ambiental e mais de 50 doenças. 80% das doenças e 50% das mortes de crianças em todo o mundo estão relacionados com a baixa qualidade da água (Lin; Yang; Xu, 2022)

A ausência de infraestrutura de saneamento é motivo de séria preocupação, acarretando consequências para o meio ambiente e a saúde humana, especialmente devido à disseminação de doenças transmitidas através das fontes de água disponíveis (Tabor *et al.*, 2023; Onohuean; Nwodo, 2023).

O Rio Beberibe, que já foi uma via navegável e local de lazer, enfrenta atualmente o impacto negativo das inúmeras ações humanas na sua bacia hidrográfica. A indústria local, a agricultura e urbanização, além do desmatamento das margens, construção, bem como a existência de área de descarte inadequado de resíduos, prejudicam de forma direta a qualidade das águas superficiais do Rio Beberibe. Este cenário reforça a urgente necessidade de planejamento sustentável do uso do solo, a fim de preservar a integridade do rio Beberibe e assegurar um ambiente saudável para as gerações futuras.

Com o propósito de fornecer à população água de qualidade e quantidade necessária, levando em consideração os limites financeiros do estado, evidencia-se a relevância de atuar

em linhas de pesquisas que desenvolvam técnicas direcionadas à restauração e preservação da qualidade dos rios.

Tendo em vista os problemas relacionados à contaminação dos mananciais, bem como os elevados custos no tratamento, é notório a importância do estudo e aprimoramento da tecnologia de Filtração em Margem a fim de entender melhor em que circunstâncias a técnica é mais eficiente, bem como as limitações de sua empregabilidade, para que assim possa ser utilizada como complemento no abastecimento de água.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar a interação rio-aquífero visando o melhoramento da qualidade de água no projeto de Filtração em Margem no Rio Beberibe.

2.2 Específicos

- Monitorar o nível piezométrico dos poços de Filtração em Margem e o nível da lâmina de água do rio Beberibe na área de estudo;
- Realizar a caracterização dos sedimentos presentes na zona hiporreica do rio Beberibe, no local de estudo, por meio de ensaios granulométricos, determinações das concentrações de matéria orgânica total e avaliação do teor de carbonato de cálcio;
- Verificar a dinâmica do fluxo vertical através da leitura da diferença de carga hidráulica;
- Realizar o monitoramento qualitativo da água do Rio Beberibe e do poço de produção, através de análises físico-químicas e biológicas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Interação rio-aquífero

O conhecimento da interação rio-aquífero é uma importante condição prévia para a solução de muitos problemas ecológicos e de gestão da água (Macheleidt; Grischek; Nestler, 2006).

Independente da presença ou ausência de conexões diretas entre águas superficiais ou subterrâneas, a gestão dos recursos hídricos deve sempre abranger ambos (Costa *et al.*, 2008), uma vez que qualquer controle exercido sobre um recurso consequentemente afetará o outro. (Feitosa; Manoel Filho, 1997).

Nesse contexto, a demanda por pesquisas relacionadas à interação entre água de superfície e água subterrânea tem experimentado um notável crescimento nos últimos anos (Brunke; Gonser 1997; Silva, 2007; Lautz *et al.*, 2009; Yao *et al.*, 2015; Albuquerque, 2015; Freitas, 2018). Isso reflete a importância dessas duas reservas hídricas, que desempenham um papel fundamental como as principais fontes de abastecimento de água potável e recursos significativos para a indústria e agricultura (Bara *et al.*, 2014).

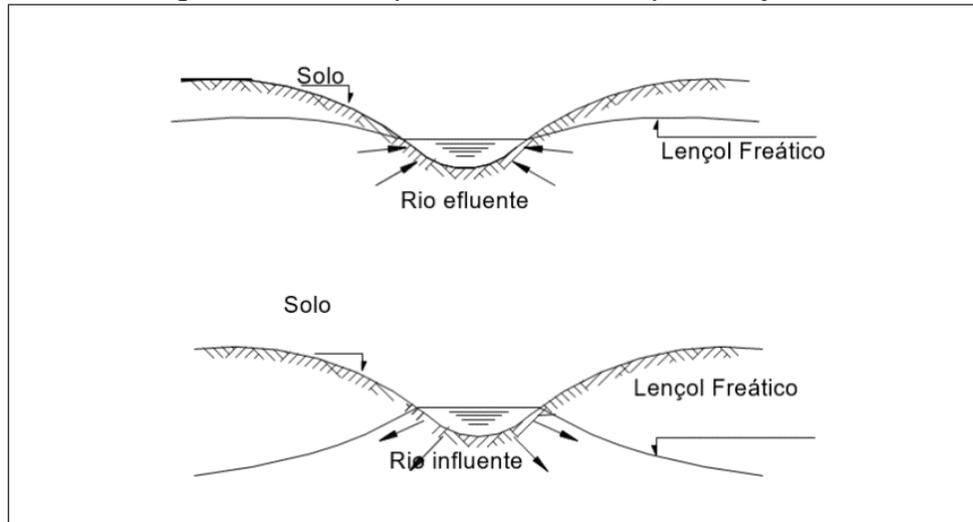
A interação entre água superficial e subterrânea, segundo Schubert (2006), é regulada principalmente pelas oscilações do nível do rio. Além disso, as características geológicas de suas margens, as condições climáticas, os aspectos geomorfológicos (declividade das margens, largura e profundidade do rio, deposição fluvial), podem também contribuir para caracterizar essa interação.

A configuração do fluxo na interação rio-aquífero, por meio da diferença de carga hidráulica, pode ocorrer de duas formas distintas: efluentes, que é descrito pelo movimento das águas subterrâneas em direção aos corpos d'água superficiais, e a condição influente, que acontece quando as águas superficiais contribuem para o fluxo subterrâneo. Além disso, a relação rio-aquífero também pode ser diferenciada. Pode haver uma conexão direta entre os sistemas superficiais e subterrâneos, onde um influencia o outro, ou seja, estão hidráulicamente conectados em condição influente ou efluente. Por outro lado, pode não haver continuidade entre eles, o que possibilita que apenas o corpo de água superficial alimente o aquífero, independente da sua profundidade, caracterizando por um sistema hidráulicamente desconectado (Sophocleous, 2002; Bouwer, 2002).

Tratando-se de um rio com conexão direta com o lençol freático, a configuração do seu fluxo varia tanto em termos espaciais quanto temporais, ou seja, trechos distintos podem se

comportar hidraulicamente de maneira diferente, além de um mesmo trecho alternar entre se comportar como influente ou efluente. A Figura 1 ilustra um rio com conexão direta com as águas subterrâneas.

Figura 1 - Classificação do fluxo na interação rio-aquífero.



Fonte: Cabral *et al.* (2001).

A água flui dos locais com maior carga hidráulica para os locais de menor carga hidráulica. Portanto, o fator predominante que governa a dinâmica hidráulica entre o rio e o aquífero livre subjacente é a discrepância entre suas elevações piezométricas.

O monitoramento e quantificação da interação entre água superficial e subterrânea pode ser feita através de infiltrômetros, mini piezômetros, piezômetros diferenciais, traçadores e lisímetros de fundo de rio (Arantes; Chaudhry; Marcussi, 2006; Veras, 2011; Santos; 2012).

Compreender a dinâmica da interação entre o rio e o aquífero é crucial tanto sob uma perspectiva quantitativa quanto qualitativa, uma vez que a subsistência de diversos rios está vinculada às águas subterrâneas, enquanto os rios desempenham um papel fundamental na recarga dos aquíferos freáticos. Vários fatores exercem influência sobre essa interação, como: influências externas, fatores ambientais, flutuações sazonais e atividades antrópicas, porém, de acordo com Rassa (2011), a interferência principal ocorre devido à diferença de carga hidráulica.

A utilização do piezômetro diferencial permite identificar o sentido do fluxo vertical e é obtida por meio da diferença entre a entre o nível da água do rio e o do interior do piezômetro. Dessa forma, três resultados podem ser obtidos: fluxo ascendente, o rio é efluente e está sendo alimentado pelo aquífero; fluxo descendente, onde o rio influente e está alimentando o aquífero; e fluxo nulo, quando não há movimentação vertical.

Quando a água do aquífero é extraída nas condições em que o rio se apresenta como efluente, há uma redução na contribuição para os corpos hídricos superficiais. O mesmo acontece quando um corpo d'água de superfície com características influentes é submetido à extração de água, isso pode resultar na redução do nível do lençol freático, pois haverá uma diminuição na aportação superficial para o aquífero.

Brunke, Gonser (1997) explicam de forma geral as interações rio-aquífero; sob condições de baixa precipitação, o fluxo de base subterrâneo constitui o fluxo de água superficial (condição efluente). Por outro lado, em condições de elevada precipitação, esse interfluxo aumenta gradualmente, o escoamento superficial leva a uma maior pressão hidráulica no curso do rio, que causa a mudança da condição efluente para a condição de influente, promovendo a recarga do aquífero. Esses ciclos repetidos de descarga e recarga do aquífero têm um efeito de suavização sobre os padrões de escoamento dos rios.

Segundo Mutiti e Levi (2010), compreender como as chuvas intensas afetam a condutividade hidráulica do leito do rio é crucial para avaliar a eficácia da FM como uma alternativa de tratamento de água.

Uma outra variável com potencial para influenciar o comportamento do nível do rio, afetando a dinâmica do fluxo hídrico, é o movimento e deposição dos sedimentos no leito, o que leva à formação da camada de colmatação. Além disso, esse processo de transporte de sedimentos está intimamente ligado à qualidade da água.

O leito do rio consiste em uma variedade de partículas com diferentes tamanhos, sendo que as partículas mais finas geralmente são retidas, resultando na obstrução do leito. Esse processo tende a reduzir a quantidade de água que consegue infiltrar, o que, por sua vez, limita a interação entre o rio e o aquífero.

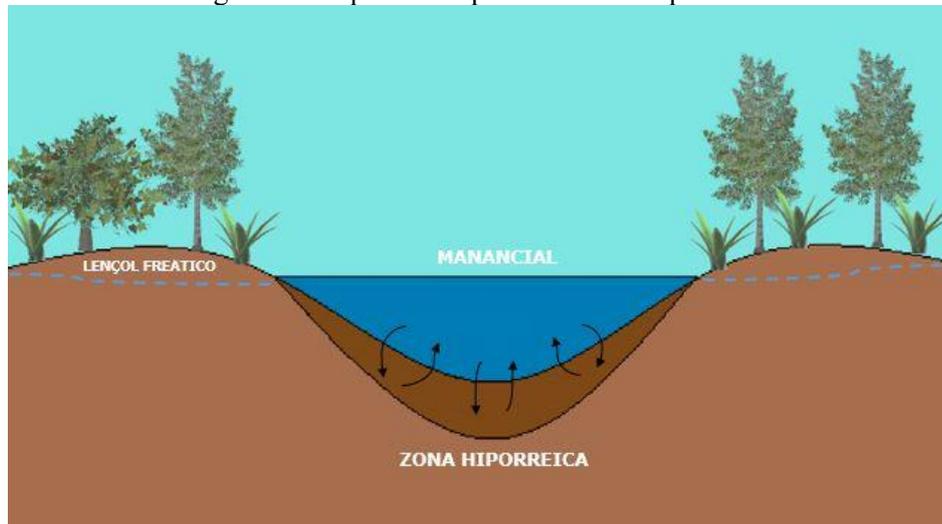
3.1.1 Zona hiporreica

Zona hiporreica é uma zona de transição entre águas superficiais e águas subterrâneas, ou seja, se encontra abaixo do leito do rio, mas acima da camada mais profunda do aquífero subterrâneo. Segundo Freitas (2018), é o ecótono entre os dois meios, porém não pertencendo a nenhum deles e possuindo características hidrológicas, químicas, biológicas e metabólicas próprias, sendo o local onde ocorre a mistura da água superficial com a subterrânea.

Albuquerque (2015) explica que a zona hiporreica pode ser definida como volume subsuperficial de sedimentos e um adjacente espaço poroso a um curso d'água onde ocorrem constantes trocas. Biologicamente, é um ambiente rico e que sofre diferentes processos de

colonização de invertebrados (Dole-Olivier, 2011). A Figura 2 demonstra o esquema simplificado da ZH.

Figura 2 - Esquema simplificado zona hiporreica.



Fonte: Carvalho Filho (2019).

A zona hiporreica desempenha um papel importante na filtração e purificação da água, na decomposição de matéria orgânica, na ciclagem de nutrientes e na sustentação da vida aquática.

Segundo Brunke e Gonser (1997), a zona hiporreica além de funcionar como um regulador no fluxo de água, é considerado um filtro natural capaz de atenuar processos físico-químicos que afetam tanto o meio superficial quanto o subterrâneo. Além disso, segundo Boulton e Foster (1998), nesta zona ocorre um armazenamento temporário da água, e nesse período ocorre a degradação e/ou absorção de nutrientes e poluentes antes de se propagar no corpo d'água.

Algumas atividades antrópicas podem resultar em impactos significativos na integridade da zona hiporreica, sendo a dragagem umas das principais causadoras. A remoção de sedimentos pode comprometer a capacidade natural da zona hiporreica de atenuar a presença de poluentes.

Os limites exatos de dimensões da zona hiporreica são difíceis de serem definidos, visto que variam bastante temporal e especialmente (Boulton *et al.*, 1998). Em virtude das suas funções ecológicas e hidrogeológicas, essa zona é um foco importante de estudo, sendo relevante entender as características dela.

3.1.1.1 Características do solo

A investigação do solo é essencial para compreender a relação entre a água superficial e a água subterrânea, pois a transferência de água da superfície para o aquífero está intrinsecamente ligada às características e propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos depósitos sedimentares. Os parâmetros granulométricos, além de revelar as propriedades físicas do sedimento, pode ser empregada em diversas combinações, fornecendo dados relevantes sobre os processos físicos e hidrodinâmicos do ambiente.

A Matéria Orgânica Total (MOT) e o Carbonato de Cálcio (CaCO_3) desempenham um papel importante na caracterização da zona hiporreica. A existência de matéria orgânica nos sedimentos pode fornecer informações acerca da influência antropogênica na área (Barcellos *et al.*, 2016; Xavier *et al.*, 2016). Enquanto o carbonato de cálcio atua como um agente cimentante que facilita a ligação de partículas de solos, resultando no incremento da colmatação e na consequente diminuição da condutividade hidráulica (Hiscock; Grischek, 2002).

A região de transição entre a água superficial e a água subterrânea pode possuir uma diversidade em termos de composição. Nessa zona, podem ser encontrados diversos materiais, que vão desde cascalhos e areia, classificados como solos de granulação mais ampla, até solos de granulação mais fina, como silte e argila.

A água desempenha uma forte ligação com o solo, onde vários fenômenos e mecanismos ocorrem como impacto direto da água sobre ele. Entre estes fenômenos e mecanismos estão o intemperismo, os processos de formação, crescimento de plantas e atividade biológica (Reinert; Reichert, 2006). A variação temporal atrelada ao regime de chuvas tem forte influência nestes mecanismos da água sobre o solo, além de influenciar na própria granulometria.

As propriedades físicas mais significativas do solo incluem a sua composição granulométrica, que se refere à distribuição de tamanho das partículas. Portanto, os ensaios granulométricos são fundamentais e essenciais para caracterização do material presente, permitindo estimar as proporções relativas de cada fração granulométrica do solo.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1995) agrupa as partículas de solo de acordo com seus diâmetros, sendo estas partículas dadas da seguinte forma:

Tabela 1 - Classificação das partículas de solo, conforme NBR 6502/65 (ABNT, 1995).

ARGILA	SILTE	AREIA			CASCALHO
		Fina	Média	Grossa	
0,002	0,06	0,2	0,6	2 mm	

A composição granulométrica possui grande relação com a condutividade hidráulica, e consequentemente com a qualidade e quantidade de água obtida no processo de FM. A condutividade pode ser entendida como a facilidade com que a água pode fluir através do solo ou subsolo, sendo influenciada pela porosidade, permeabilidade e estrutura do solo.

De acordo com Freitas (2018), quanto maior o tamanho médio dos grãos do solo, maior é sua condutividade hidráulica, pois os vazios são maiores. Além disso, quanto maior o desvio padrão (grau de seleção) dos diâmetros dos grãos, menor é a condutividade hidráulica, visto que possui uma maior variação de diâmetro.

3.1.1.2 Colmatação

A colmatação é um processo que ocorre em virtude da sedimentação ou intrusão de partículas no leito do manancial, cuja consequência direta é a diminuição da condutividade hidráulica. Na Filtração em Margem, a colmatação reduz a capacidade específica do poço (Hubbs, 2006).

A colmatação na superfície de infiltração pode ser de 4 tipos (Soares, 2015; Grischek; Bartak, 2016). Pode-se mencionar:

- Físicos: Ocorre quando sólidos suspensos, como: areia fina, silte e argila começam a congestionar o meio poroso através de sua deposição.
- Químicos: é causada por alterações no potencial redox, pH e temperatura nas áreas e infiltração, ocasionando a precipitação de substâncias dentro dos poros dos sedimentos, como carbonato de cálcio.
- Biológicos: ocorrem quando há o crescimento de micro-organismos no solo, o que forma biofilmes e biomassa (assim inclui polissacarídeos e outros produtos metabólicos) os quais bloqueiam os poros e/ou reduzem o seu tamanho (Bouwer, 2002). Esses micro-organismos, que englobam fungos, algas, protozoários, ciliados e diversas categorias de bactérias, são os mais abundantes nos primeiros centímetros de um leito de rio, riacho ou lago (Hoffmann; Gunkel, 2011);
- Mecânicos: causada pelo aprisionamento de gases no meio poroso. Dentre esses gases, incluem gás carbônico (CO₂), nitrogênio (N₂), hidrogênio (H₂), oxigênio (O₂) e metano (CH₄).

Pholkern *et al.* (2015) explicam que a aplicação da técnica de Filtração em Margem pode acelerar os processos de obstrução no rio, uma vez que cria uma situação na qual os sedimentos em suspensão, matéria orgânica e inorgânica, precipitados químicos e outras partículas se acumulam, formando uma camada de colmatação nos primeiros centímetros ao longo do percurso até o poço de produção.

Os processos que resultam na obstrução podem ser mitigados mediante a redução dos parâmetros que a desencadeiam. Pode-se mencionar alguns deles, como a raspagem do fundo da bacia, e de forma natural temos a movimentação de águas e a alimentação por meio de organismos, como peixes, que reduz a quantidade de sedimentos do local (Veras, 2011; Albuquerque, 2015).

3.2 Filtração em Margem

A FM se baseia na utilização de componentes naturais provenientes das margens e do leito do manancial como meio filtrante. Isso ocorre quando há uma diferença de carga hidráulica entre o manancial e o lençol freático, que pode ocorrer de forma natural ou de forma induzida por intermédio de poços de bombeamento interligados hidráulicamente, fazendo com que a água escoar em direção ao poço de produção. Estes poços são construídos em proximidade às margens do corpo d'água superficial.

A água extraída dos poços de captação submetidos às condições de FM, consiste em uma mistura da água infiltrada do manancial superficial e da água subterrânea existente no aquífero. A proporção dessa mistura varia conforme a distância entre o poço e a margens, e outros fatores como: vazão bombeada, condições hidrológicas, hidroquímicas e hidrobiológicas (Tufenkji *et al.*, 2002; Sens *et al.*, 2006; Grischek *et al.*, 2010).

A qualidade da água proveniente da FM está intrinsecamente ligada com o nível de poluição do manancial superficial, eficiência dos processos de purificação que se desencadeiam durante a aplicação da FM (Kuehn; Mueller, 2000; Eckert; Irmscher, 2006). No que se refere a qualidade das águas subterrâneas, é potencialmente influenciada por vários fatores, incluindo o uso do solo e atividades humanas, geologia da área, taxa de recarga e descarga, condições ambientais e climáticas da região (Tum *et al.* 2023; Adimalla; Qian, 2020, 2021; Roy *et al.* 2021; Lin *et al.* 2021).

Nagy-Kovács *et al.* (2019) afirmaram que a FM é um processo natural de tratamento amplamente utilizado e que 50% da água tratada deve ser proveniente das águas superficiais, e que além da superfície fonte de água, as características hidrogeológicas do aquífero, a área

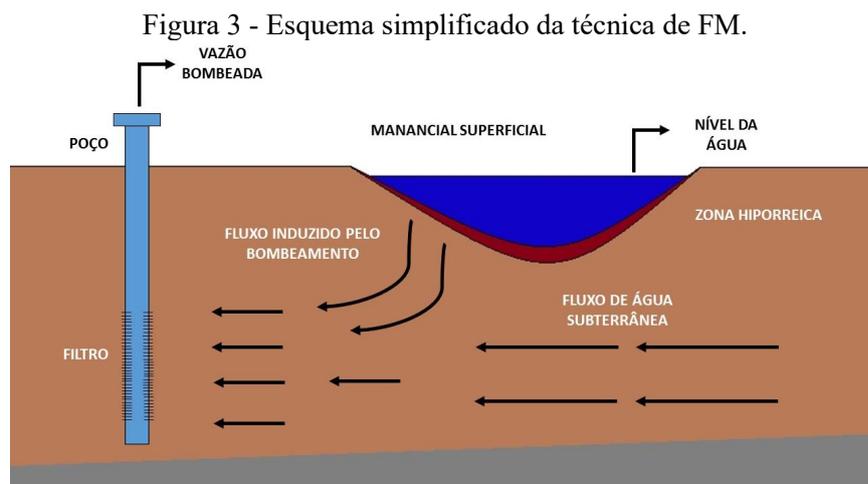
protegida da bacia hidrográfica e as particularidades da produção desempenham também um papel importante na qualidade da água produzida. Nesse contexto, é vital considerar a qualidade tanto das fontes de água superficiais quanto dos aquíferos ao incorporar a abordagem da Filtração em Margem. (Hunt *et al.*, 2002; Grischek *et al.*, 2010).

A FM tem produzido resultados satisfatórios quanto ao tratamento de água, e dependendo da qualidade da água superficial, a técnica é utilizada como tratamento preliminar ou tratamento único acrescido de cloração (FUNASA, 2018).

A instalação do sistema de FM requer conhecimento prévio das condições do local, pois a sua efetividade depende da combinação de muitos processos (FUNASA, 2018; Emmendoerfer, 2020; Nascimento, 2021): Alguns parâmetros são levados em consideração antes da implantação (Sens *et al.*, 2006), pode-se mencionar:

- Disponibilidade de indução de água do manancial para o aquífero;
- Qualidade da água do manancial superficial a ser utilizada;
- Características do sedimento do leito do rio;
- Velocidade do fluxo da água;
- Características do meio poroso;
- Sazonalidade do escoamento; e
- Estabilidade do leito do curso d'água.

A Figura 3 ilustra, de forma resumida, um esquema simplificado da FM.



Fonte: Carvalho Filho (2016).

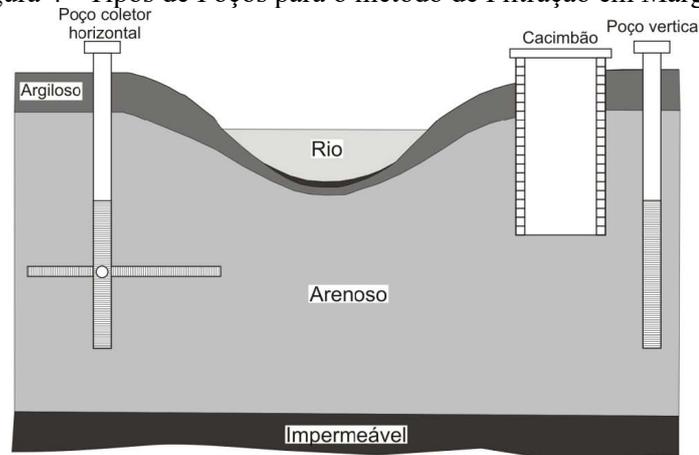
Grande parte dos sistemas de FM são implementados em terrenos aluviais localizados às margens do rio, visto que possuem características hidrogeológicas favoráveis, como

facilidade na exploração de água subterrânea. Segundo Paiva (2009), esses aquíferos são constituídos por uma diversidade de depósitos, predominantemente compostos por área ou até mesmo areia e pedregulho. Além disso, Dash *et al.* (2008) afirmaram que estes aquíferos têm alta capacidade de produção de água.

Os poços construídos, predominantemente, afastam-se das margens das fontes hídricas em intervalos de 15 a 50 metros, entretanto, é viável identificar poços a distâncias mais amplas, estendendo-se de 100 a 150 metros (Sens *et al.*, 2006). A distância adotada entre a margem e poço deve ser apropriada para que se tenha um tempo de detenção necessário para o tratamento da água. Nesse contexto, é importante levar em consideração alguns parâmetros, como a porosidade do solo, a permeabilidade, o potencial de oxirredução de substâncias orgânicas, o nível de oxigênio, a temperatura, a qualidade e a composição do lençol freático, entre outros, durante o cálculo das dimensões (Rabelo, 2006). Os poços normalmente são rasos, com profundidade entre 7 e 15 metros e uma diferença de 4 a 8 metros entre superfície do solo e o nível d'água do manancial superficial, o que resulta em um desnível de aproximadamente 3 a 7 metros entre a cota da lâmina d'água do rio e o fundo do poço (Mondardo, 2009). Entre os poços de produção e o manancial, devem ser construídos poços de monitoramento, chamados de piezômetros.

Desde que a FM foi estabelecida, historicamente tem-se usado três tipos de poços, como podem ser vistos na Figura 4, sendo eles: poços com coletores horizontais ou radiais, poços verticais ou tubulares, e poços escavados ou cacimbão. O modelo mais frequentemente empregado é o poço de coleta vertical, devido à sua instalação mais simplificada e à eficácia no tratamento da água (Ray, 2002; Paiva, 2009).

Figura 4 - Tipos de Poços para o método de Filtração em Margem.



Fonte: Paiva *et al.* (2010).

3.2.1 Processos envolvidos e remoção de contaminantes

Durante a percolação da água proveniente do corpo hídrico superficial em direção ao poço, diversos mecanismos físicos, químicos e biológicos acontecem, resultando em uma melhoria na qualidade da água. (Sens *et al.*, 2006; Paiva *et al.*, 2010; Sprenger *et al.* 2011, Hu *et al.*, 2016; Freitas *et al.*, 2018; Covatti; Grischek, 2021; Carvalho Filho *et al.*, 2022; Abd-Elaty *et al.*, 2023; Handl *et al.*, 2023). Segundo Veras (2011), os processos hidrodinâmicos e mecânicos são também responsáveis por garantir o bom funcionamento da FM.

Além disso, Stuyfzand *et al.* (2006) mencionam que processos biogeoquímicos também acontecem, desde a água superficial até a água obtida no poço após a FM:

- Na água superficial ocorre a mistura com água da chuva, absorção de nutrientes, evaporação, redução da dureza biogênica, volatilização, fotólise e biodegradação;
- Na interação rio-aquífero ocorre a filtração, entradas de CO₂ e O₂ adicionais, mineralização da matéria orgânica, dissolução do carbonato de cálcio, precipitação de sulfetos, nitrificação e oxidação do carbono orgânico dissolvido;
- Na passagem pelo aquífero ocorre o deslocamento da água subterrânea, trocas de cátions, oxidação de pirita e matéria orgânica, dissolução de minerais, sorção de oligoelementos, decaimento radioativo de macro e micropoluentes orgânicos, biodegradação de micropoluentes orgânicos e inativação de micro-organismos;
- No poço de produção ocorre a mistura de várias qualidades de água e mistura com a água subterrânea nativa.

Através desses processos, diversos parâmetros e compostos contaminantes passam por remoção ou redução, tais como turbidez (Sahoo *et al.*, 2005; Nagy-Kovács *et al.*, 2019; Shrikoti; Sharma, 2019), variações de pH (Santos *et al.*, 2011), cores aparente e real (Guedes *et al.*, 2017), nitrato (Regnery *et al.*, 2005; D'alessio; Dvorak; Ray, 2018), carbono orgânico dissolvido (Maeng; Lee, 2019; Sandhu *et al.*, 2019), DBO5 (Maeng; Lee, 2019), DQO (Nagy-Kovács *et al.*, 2019), micropoluentes orgânicos polares (HAMANN *et al.*, 2016; GLORIAN *et al.*, 2018; ABdelrady *et al.*, 2019; Sandhu *et al.*, 2019), total de coliformes (Sahoo *et al.*, 2005; D'alessio; Dvorak; Ray, 2018; Shrikoti; Sharma, 2019; Driezum *et al.*, 2019), *Escherichia coli* (Guedes *et al.*, 2017; Freitas *et al.*, 2017) e agentes patogênicos (Freitas *et al.*, 2017).

A maneira pela qual a água se desloca no solo é um aspecto de relevância na técnica. Esse deslocamento é essencialmente influenciado por três forças distintas que atuam sobre ela (Mondardo, 2009):

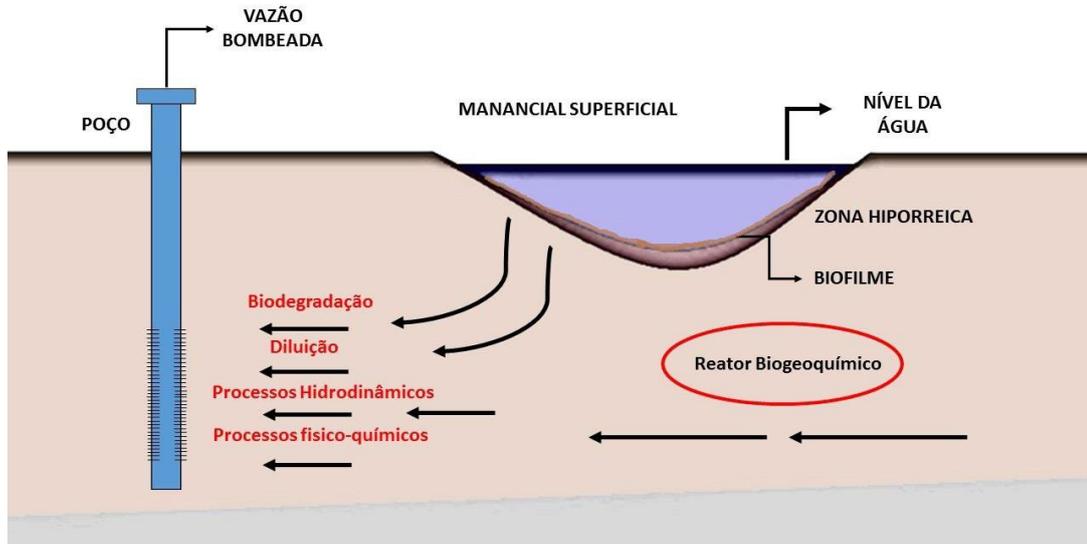
1. Adsorção, que mantém uma fina camada de água aderida às partículas do solo devido à atração molecular;
2. Capilaridade, que retém ou move a água em pequenas aberturas devido à tensão superficial; e
3. Gravidade, que desloca a água através de poros maiores, motivada por diferenças de carga ou pela existência de um gradiente hidráulico.

Cabe salientar que o resultado resultante dessas forças é influenciado, em parte, pela quantidade de umidade existente em relação ao espaço disponível no material poroso (Dillon *et al.*, 2002).

A FM é sujeita a múltiplos processos, os quais podem variar de acordo com as condições particulares de cada localidade. Conseqüentemente, a intensidade e eficácia dos mecanismos operantes durante a Filtração em Margem também variam entre locais, pois cada ambiente apresenta características distintas. A heterogeneidade característica de cada local ressalta a importância da compreensão de cada processo (Veras, 2011). Sabe-se que os fenômenos e princípios envolvidos na FM não são completamente conhecidos.

Dos processos que se destacam durante a percolação, pode-se mencionar: os hidrodinâmicos, que incluem adsorção, advecção, dispersão, diluição e difusão; os mecânicos, representados pela filtração e colmatação, os biológicos caracterizados pela degradação de matéria orgânica pelo metabolismo dos microrganismos presente no solo e os físico-químicos compreendidos pela precipitação, floculação, coagulação, entre outras. A Figura 5, demonstra de maneira resumida, alguns processos que ocorrem durante a percolação da água no fluxo subterrâneo.

Figura 5 - Processos que ocorrem na Filtração em Margem.



Fonte: Carvalho Filho (2016).

A filtração de natureza mecânica resulta na eliminação de partículas em suspensão, abrangendo componentes como substâncias orgânicas hidrofóbicas adsorvidas e sólidos suspensos (Sens *et al.*, 2006). À medida que o conteúdo filtrado atravessa o subsolo, mantém contato com a matriz sólida do aquífero, potencialmente dando origem ao processo de adsorção dos compostos orgânicos (Kim *et al.*, 2002).

A intensidade de adsorção varia com base na natureza dos compostos, bem como o tipo de material sólido presente. De maneira geral, maior distância no escoamento entre o manancial superficial e o poço de produção intensificam o processo de adsorção. Além disso, a diluição entre a água subterrânea e a infiltração (água superficial) pode acarretar uma redução nas concentrações de poluentes e a atenuação dos picos dessas concentrações, a depender da qualidade da água subterrânea (Sens *et al.*, 2006).

Foram registradas alterações sazonais e temporais na qualidade da água dos sistemas de Filtração em Margem. A temperatura figura como um dos importantes fatores que afetam a qualidade, pois provoca maiores atividades microbianas, que conseqüentemente ocasionam condições anóxicas no meio (von Gunten *et al.*, 1991; Bourg; Bertin, 1994; Ahmed; Marhaba, 2016).

A interface entre água superficial e os sedimentos das margens do rio e do aquífero possui relevância significativa no processo de FM, assim como a zona hiporreica e microorganismos presentes nos espaços intersticiais dos sedimentos (Gunkel *et al.*, 2009). Durante a infiltração da água, a ação dos microorganismos nessa área de transição, associada à

entrada e ao volume de matéria orgânica natural (MON), atrelado aos processos físico-químicos, contribui para a autopurificação da água (Hoffmann; Gunkel, 2009; Maeng *et al.*, 2010).

Diversos mecanismos naturais reunidos como a atividade biológica, filtração de partículas e reações redox em cenários de Filtração em Margem têm a capacidade de aprimorar a qualidade da água por meio da eliminação de uma série de compostos indesejáveis (Kedziorek *et al.*, 2008).

A eliminação de poluentes acontece desde a etapa de infiltração da água da superfície até a extração da água do poço de produção. Cada processo ocorre em momentos e locais distintos, sendo responsável pela remoção de diversas categorias de poluentes. Entre os elementos poluentes químicos, está a MON, os compostos orgânicos sintéticos, os componentes inorgânicos, os agentes farmacêuticos e outros. Quanto aos poluentes biológicos, incluem-se os protozoários, as bactérias e os vírus.

A remoção de MON através da FM ocorre por meio de processos físicos e bioquímicos. A fração biodegradável de MON realiza-se, predominantemente, nos primeiros metros de infiltração no solo e se dá pelas bactérias presentes no meio filtrante, enquanto a fração refratária é removida através de adsorção na fase sólida (Marmonier *et al.*, 1995).

O processo de eliminação da matéria orgânica presente na água demonstra maior eficácia quando a velocidade da água induzida é baixa e o aquífero é composto de material granular com espaço aberto entre os poros para que a água flua ao redor dos grãos (Schijven; Berger; Miettinen, 2003).

Ao estabelecer um sistema de Filtração em Margem, é de suma importância direcionar a atenção para duas características de crescimento inverso: a capacidade de gerar a quantidade de água necessária e a capacidade de alcançar água com a qualidade almejada (Ray; Prommer, 2006).

Em solos mais finos e de menor condutividade hidráulica, a quantidade de água será reduzida, porém a qualidade tenderá a ser aprimorada. Conseqüentemente, durante o fluxo de água na interação entre rio e aquífero, quanto mais lento a percolação, maior será a atenuação de poluentes. De acordo com Ahmed e Marhaba (2016), a qualidade da água por intermédio do processo de FM é menor se tiver um caminho de fluxo curto, gradientes hidráulicos elevados, percolação em alta velocidade, aquífero cárstico e significativos níveis de heterogeneidade.

3.2.2 Vantagens e desvantagens

Dentre as vantagens do uso da FM como pré-tratamento, estão a simplificação do processo e diminuição dos custos de operação e manutenção a longo prazo, em virtude da redução da necessidade de agentes químicos nos corpos d'águas, a qual permite, em menor escala, que a técnica seja aplicada de forma descentralizada (Ray; Grischek, 2009).

Paiva (2009) afirma que a FM permite a obtenção de água de boa qualidade, além da redução dos produtos químicos, como coagulantes e oxidantes, minimizando o risco de formação de subprodutos prejudiciais à saúde. A melhora da qualidade da água se dá por vários processos que ocorrem durante a infiltração, onde há eliminação ou redução de diversos compostos, conforme mencionado no tópico anterior.

A FM também fornece tempo hábil para tomadas de decisões em eventos extremos, como em casos de grandes contaminações pontuais (Santos *et al.*, 2011).

Na captação de água do manancial, muitas espécies de peixes e plantas são mortas durante o processo de sucção, enquanto a FM garante a manutenção de um ambiente sustentável.

Em virtude das vantagens mencionadas, gera-se um interesse por parte das companhias de abastecimento, visto que há uma relação custo-benefício positiva. Apesar das vantagens da FM, a técnica possui algumas limitações que podem ser consideradas desvantagens.

É válido afirmar que uma das limitações da FM se refere ao local de instalação, visto que deve apresentar condições geológicas e hidrogeológicas favoráveis. Dessa forma, é necessário um estudo elaborado para escolha do local adequado. Segundo Albuquerque (2015), áreas suscetíveis a inundações devem ser excluídas, uma vez que a qualidade da água proveniente do poço de captação poderia ser afetada.

Outra questão destacada é a dificuldade no acompanhamento dos processos associados a FM e a otimização do controle de qualidade, exigindo levantamento de dados e investigações adicionais, devido às rápidas alterações ecológicas e de exigências relacionadas ao ciclo hidrológico (Jekel; Heinzmann, 2003).

Nem sempre os compostos, por exemplo, como pesticidas e fármacos, ficarão retidos no solo da margem, sendo necessário, nesses casos, formas complementares de tratamento (Kuehn; Mueller, 2000). Dessa forma, a água infiltrada pode contaminar o corpo hídrico subterrâneos (Alburquerque, 2015).

No processo de FM, é possível que ocorram mudanças na condutividade hidráulica devido à entrada de partículas menores, microrganismos, coloides, deposição de carbonatos de

cálcios e hidróxidos de ferro e manganês, e a formação de bolsas de gás nas estruturas do leito fluvial (Sharma; Grischek; Kimoth, 2014), causando uma dificuldade na passagem de água em virtude do entupimento dos poros do solo. Esse processo, conhecido como colmatação, gera uma diminuição da condutividade hidráulica, o que conseqüentemente reduz a vazão de água obtida da Filtração em Margem. No entanto, apesar de possuir implicações negativas, a colmatação pode ser benéfica no tratamento da água por promover a biodegradação dos compostos (Hiscock; Grischek, 2002).

É válido destacar que essa influência pode ser variável, alternando conforme a velocidade de escoamento do rio ou com as cheias (Paiva *et al.*, 2010). As inundações e as secas exercem um impacto indireto na eficácia do procedimento da FM. Em períodos de secas há uma tendência ao entupimento do leito do rio, enquanto períodos de inundações impedem a ocorrência da colmatação devido à erosão, causando uma autopurificação do manancial (Ahmed; Marhaba, 2016).

Apesar das eventuais limitações elencadas pela Filtração em Margem (FM), essa abordagem tem sido empregada com êxito há vários anos em várias nações, especialmente na Europa. No contexto brasileiro, essa tecnologia ainda não foi plenamente implementada para o suprimento público de água, contudo, algumas pesquisas já foram iniciadas com o propósito de verificar a viabilidade dessa abordagem no tratamento de água para o país.

3.2.3 Histórico no Brasil e no Mundo

A FM é amplamente estudada e aparece como uma técnica bastante eficiente na melhoria da qualidade da água, sendo utilizada em vários países como principal meio de tratamento dos sistemas de abastecimento público. Na Europa, a técnica tem sido utilizada há mais de um século (Hubbs, 2006, Schmidt *et al.*, 2019; Abd-Elaty *et al.*, 2022; Poojitha *et al.*, 2022). Segundo Gillefalk *et al.* (2018), cerca de 57 países europeus já realizaram estudos sobre a FM.

Atualmente, 80% da água potável utilizada na Suíça tem sua origem da FM, 50% na França, 48% na Finlândia, 40% na Hungria e 7% nos Países Baixos (Uniyal, 2018). Em Budapeste, na capital Húngara, a companhia de abastecimento local opera 756 poços, responsáveis por suprir as necessidades de aproximadamente 1,89 milhões de indivíduos (Nagy-Kovács *et al.*, 2019). Na Alemanha, a produção de água da FM representa em média 15% do abastecimento público do país. (Karakurt *et al.*, 2019)

Nos Estados Unidos, esta técnica também é bastante difundida em estados como Califórnia, Nebraska, Califórnia, Texas e Kentucky (Freitas *et al.*, 2018). De acordo com Hunt (2003), a experiência americana com a Filtração em Margem começou em meados da década de 1930, assim acumulam mais de 80 anos de utilização dessa tecnologia.

A cidade de Changwon, que fica às margens do rio Nakdong, na Coreia do Sul, fornece 80.000 m³/dia de água potável desde 2006, utilizando FM com poços coletores verticais e horizontais. Este sistema foi o primeiro local da FM ser instalado para fornecer água potável na Coreia do Sul (Noh *et al.*, 2022).

Na China, o primeiro poço foi construído na década de 1930, e a FM é utilizada como uma técnica de abastecimento de água potável para a população. No país se encontram 300 instalações de FM, fornecendo aproximadamente 18,3% do abastecimento de água do país (HU *et al.*, 2016).

No Egito, um sistema de filtração às margens do Rio Nilo foi introduzido para o abastecimento de mais de 30 mil pessoas em 2004 (Shamrukh; Abdel-wahab, 2008). Ghodeif *et al.* (2016) concluíram que embora não seja viável em todos os locais do país, a FM possui um alto potencial ao longo das águas superficiais no deserto no vale e no delta do rio Nilo, bem como na planície de inundação no vale do Nilo, no Alto Egito.

Na Tailândia, foi desenvolvido um sistema que simula o colmatação do leito do Rio Ping, na província de Chiang Mai, onde há déficit no abastecimento urbano e grande potencial de implantação do sistema de FM (Pholkern *et al.*, 2015). Na Malásia, pesquisas vêm sendo realizadas em virtude da sua primeira estação de FM no país, no estado de Selangor (Mustafa *et al.*, 2016).

No Brasil, apesar da técnica de FM ainda não seja utilizada no abastecimento público, diversos estudos têm sido conduzidos demonstrando um potencial promissor (Rabelo, 2006; Paiva *et al.*, 2010; Romero *et al.*, 2010; Freitas *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2014; Rocha; Marques, 2016; Romero-Esquivel *et al.*, 2017; Guedes *et al.*, 2019; Emmendoerfer, 2020; Freitas *et al.*, 2022).

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) é pioneira nos estudos da técnica de FM no Brasil, a realização das pesquisas prévias para a implantação foi realizada em 2004, por Rabelo (2006), na Lagoa do Peri, Florianópolis – SC. No trabalho, desenvolveu-se uma simulação da FM através do método da filtração em colunas. Ainda em Santa Catarina, Sens *et al.* (2006), em pesquisa realizada na Lagoa do Peri, avaliaram e concluíram que a técnica apresenta bons resultados na remoção de cianobactérias, bem como Romero *et al.* (2010) na remoção de coliformes totais e *Escherichia coli*.

Em Pernambuco, Paiva (2009) iniciou as investigações em 2007 para implantação de um projeto piloto de FM às margens do rio Beberibe, em Olinda – PE. Dessa forma, constatou-se boas condições para instalação da técnica no local. Desde então, várias pesquisas, incluindo trabalhos de conclusão de curso, dissertações e tese, vêm sendo realizados no projeto piloto do rio Beberibe, localizado na Estação Elevatória de Caixa D'água (Freitas, 2011, 2014; Veras, 2011; Albuquerque, 2015; Carvalho Filho, 2016; Freitas, 2018; Silva, 2019). Ainda em Pernambuco, Santos (2012) realizou estudos sobre a implantação de um sistema de FM no agreste pernambucano, no reservatório do mundaú. Enquanto Nascimento (2021), avaliou também o potencial de aplicação de FM no sertão, às margens do rio São Francisco, nas cidades de Santa Maria da Boa Vista, Orocó e Petrolândia, e no rio Prata, no agreste pernambucano.

Além de Pernambuco e Santa Catarina, foram realizados estudos na cidade de Viçosa, no estado de Minas Gerais, através de um sistema de FM instalado em uma microbacia dentro das instalações da Universidade Federal de Viçosa (Rocha, 2015; Rocha; Marques, 2016, 2018). Campos (2012) realizou uma análise preliminar para aplicação da FM nos municípios de Rio Grande, no Rio Grande do Sul.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

4.1.1 Condições climáticas, vegetais e hídricas

A presente pesquisa foi conduzida em uma área experimental às margens do Rio Beberibe, situado na fronteira entre os municípios de Recife e Olinda. Indiscutivelmente, trata-se de um dos rios mais contaminados no estado de Pernambuco e, atualmente, enfrenta sérios desafios decorrentes das ocupações irregulares estabelecidas nas suas margens.

Os sérios desafios socioambientais presentes na região foram agravados a partir da rápida expansão urbana que teve início na segunda metade do século XX. Inicialmente, a cobertura verde da área era predominantemente composta pela Mata Atlântica e pelos ecossistemas correlacionados de praia, restinga e manguezais. Após a intensa influência humana, embora tenham ocorrido poucas alterações significativas nos aspectos climáticos, geológicos e topográficos, observou-se, por outro lado, transformações de grande impacto nos cenários vegetal e hidrográfico (Campos, 2003). Na Figura 6 é possível observar tubulações de despejo direto de efluentes advindo de residência às margens do Rio Beberibe.

Figura 6 - Ocupação informal das margens do rio.

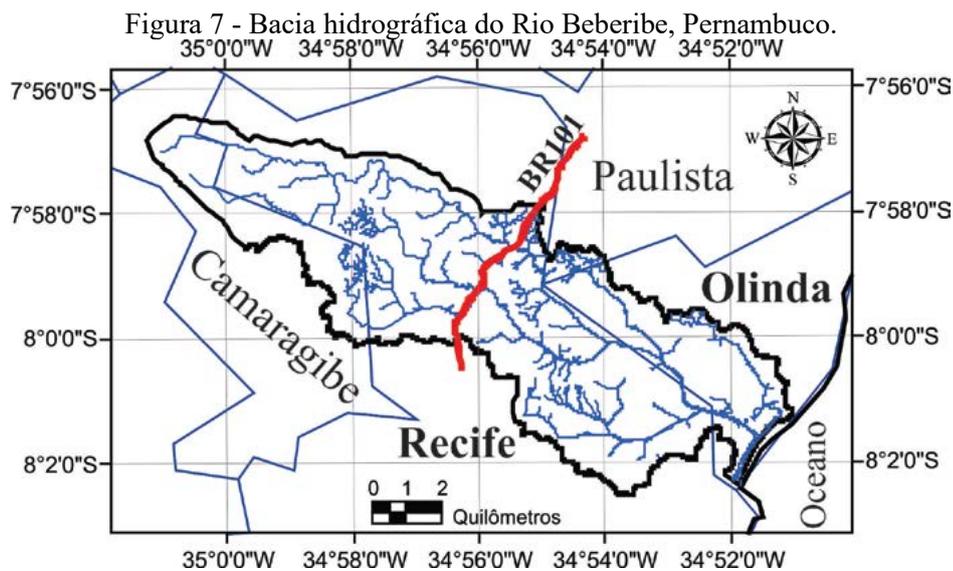


Fonte: Autor (2023).

Grande parte das águas superficiais do rio Beberibe e seus afluentes se enquadram em um estágio de alta poluição, sendo este estágio uma condição em que os corpos receptores estão,

de fato, sendo afetados pela carga poluidora que recebem. Essa situação é bem caracterizada próximo a estação elevatória da COMPESA em Caixa D' água (Olinda), se estendendo até a foz conjunta com o Capibaribe. Nessa área, o rio Beberibe apresenta uma corrente de água escura e com odor desagradável, com valores de Índice de Qualidade de Água (IQA) variando de ruim a péssimo (Campos; Pacheco, 2018).

A bacia hidrográfica do Rio Beberibe pertence ao grupo de Bacias Hidrográficas Litorâneas (GL-1), pertencente ao grupo de Bacia de Pequenos Rios Litorâneos, e está localizada no litoral norte do estado de Pernambuco, entre 7° 35' 12" e 8° 03' 48" de latitude Sul e 34° 48' 46" e 35° 11' 33" de longitude Oeste. Esta bacia encontra-se dividida pela BR-101 em duas áreas distintas, como pode ser visto na Figura 7, do lado oeste da rodovia a região da bacia apresenta baixa ocupação, com vestígios remanescentes da Mata Atlântica, enquanto na parte leste da estrada há elevados índices de urbanização (Campos, 2003).



Fonte: Veras *et al.* (2017).

O Rio Beberibe nasce em Camaragibe, através da junção dos rios Pacas e Araçá a altitude de 130 m, percorrendo um total de 31 km até o Oceano Atlântico, sendo caracterizado como um rio de pequena extensão. Com área total de 81 km², a bacia hidrográfica Beberibe pertence, em sua maior parte, à cidade do Recife, representando 64,51% da área, enquanto os municípios de Olinda e Camaragibe detêm, respectivamente, 21,25% e 14,19% (Campos, 2003).

Segundo Albuquerque (2015), o Rio Beberibe é segmentado em três compartimentos distintos, no que diz respeito às questões hídricas. Esses compartimentos são definidos como

alto Beberibe, que abrange desde as nascentes até a BR-101, médio Beberibe, que se estende da BR-101 até o ponto que se encontra com o rio Morno, e baixo Beberibe, que se estende desde a junção com o Rio Morno até a foz combinada com o Rio Beberibe. A variação do relevo na área, resultado da diminuição das cotas altimétricas, foi utilizada como critério para divisão desses compartimentos.

A bacia hidrográfica apresenta características predominantemente de clima quente e úmido, se enquadrando no tipo “As”, conforme a classificação climática de Köppen (1948). A precipitação média anual é elevada em comparação com outras áreas do Pernambuco e, inclusive, em relação a outras regiões do nordeste do Brasil, apresentando uma média de 1850,20 mm/ano como pode ser visto na Tabela 2. Os dados pluviométricos apresentados foram fornecidos pela Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC), referentes ao posto Olinda 199, que está localizado nas proximidades da área de estudo.

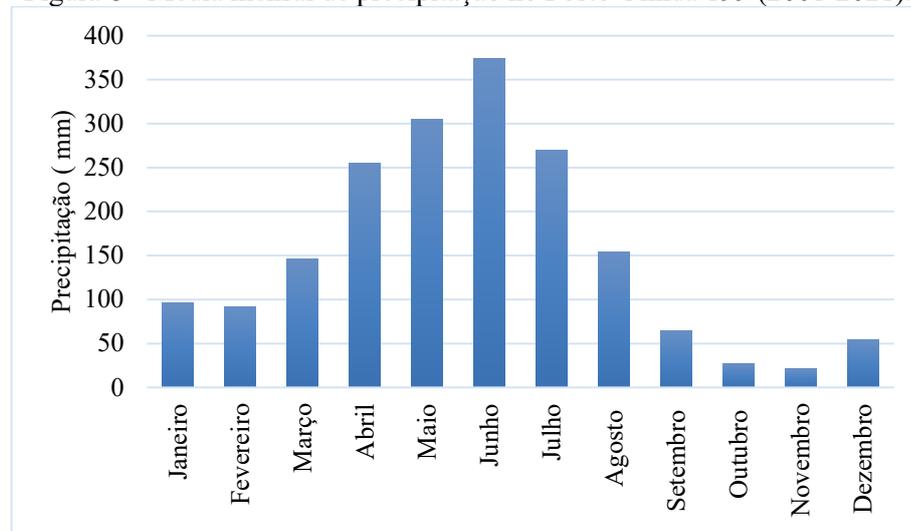
Tabela 2 - Total acumulado anual da precipitação (mm/ano) na bacia hidrográfica do rio Beberibe no período de 2001 a 2021.

Ano	Total Acumulado (mm/ano)
2001	1347,79
2002	1918,10
2003	1901,90
2004	2574,50
2005	2038,20
2006	1952,90
2007	1793,90
2008	1882,90
2009	2410,30
2010	1693,80
2011	2616,30
2012	1350,50
2013	1804,00
2014	1978,40
2015	1414,50
2016	1673,60
2017	1746,87
2018	1325,50
2019	1929,55
2020	1496,20
2021	2004,40
MÉDIA	1850,20

Fonte: Apac (2023).

Na Figura 8, observa-se as médias mensais de precipitação (mm) entre 2001 e 2021, revelando claramente a sazonalidade do regime pluviométrico na região, com ocorrência de um período seco de setembro a fevereiro, e outro período chuvoso de março a agosto. O mês de junho é caracterizado como o mês mais chuvoso, com uma precipitação média mensal de 374,30 mm, enquanto novembro apresenta os menores índices pluviométricos, com média de 21,25 mm. Devido à ausência de dados referentes aos anos de 2022 e 2023 no banco de dados da APAC, foi utilizado informações até o ano de 2021.

Figura 8 - Média mensal de precipitação no Posto Olinda 199 (2001-2021).



Fonte: Apac (2023).

Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), a temperatura média mensal na capital pernambucana apresenta baixa amplitude térmica ao longo do ano, com temperaturas médias superiores a 26°C no verão, de novembro a março, e com temperaturas mais baixas, aproximadamente 23°C, no mês de agosto.

4.1.2 Estação Elevatória de Caixa d'Água

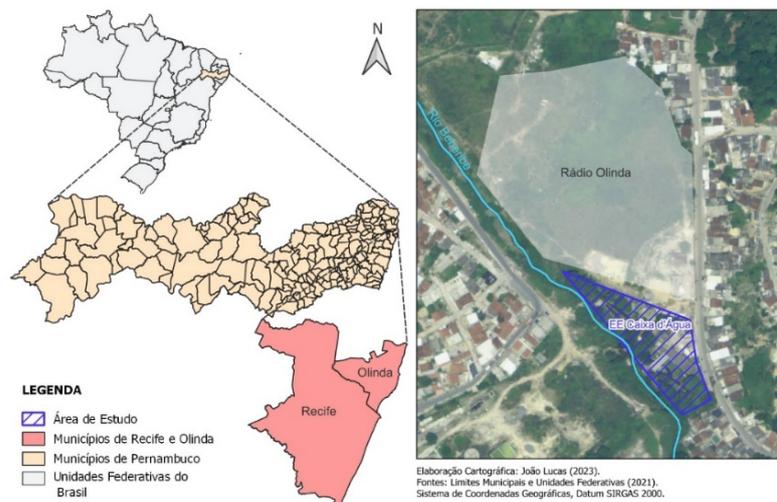
4.1.2.1 Projeto Piloto de Filtração em Margem

A implantação do projeto piloto de Filtração em Margem foi iniciada em 2007 por Paiva (2009) nas margens do Rio Beberibe, em um terreno onde está inserida a Estação Elevatória de Caixa d'Água, em Olinda-PE, de propriedade da COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento). Segundo Paiva (2009), alguns pontos positivos favoreceram a implantação desta área, são eles: a propriedade pertence a COMPESA, o que simplifica o acesso e a salvaguarda

das instalações implementadas, o Rio Beberibe margeia ao longo da extensão do terreno da estação, a região está sobre uma formação sedimentar, ou seja, há a possibilidade da água explotada pelo projeto piloto ser direcionada pelo sistema de bombeamento já estabelecido pela COMPESA.

Originalmente, na área da estação elevatória, algumas décadas atrás, havia a captação direta das águas do Rio Beberibe a fio d'água. Porém, como já mencionado, ao longo dos anos houve um agravamento da poluição do rio, o que levou à desativação dessa captação (Paiva *et al.*, 2010; Demetrio *et al.*, 2013). Atualmente a estação elevatória realiza o bombeamento de água proveniente tanto de poços profundos quanto da superfície do Rio Beberibe, coletada em uma região mais a montante de sua localização. Essa água é encaminhada para duas Estações de Tratamento de Água (ETA), nomeadamente Alto do Céu e Caixa D'água (Freitas, 2010). A Figura 9 apresenta uma elaboração cartográfica da localização da área de estudo, com demarcação da EE Caixa d'Água, onde está inserido o projeto piloto de FM.

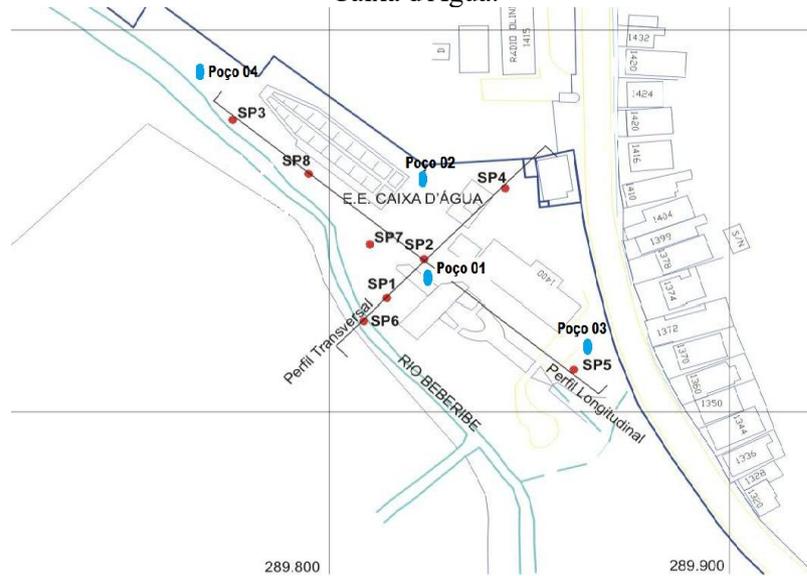
Figura 9 - Localização da EE Caixa d'Água na divisa entre as cidades de Olinda e Recife, onde está localizado o projeto piloto de FM.



Fonte: Autor (2023).

O projeto piloto de Filtração em Margem possui uma estrutura composta por oito poços de observação (SP1, SP2, SP3, SP4, SP5, SP6, SP7 e SP8) e quatro poços de produção (Poço 01, Poço 02, Poço 03, Poço 04). O Poço 01 ou Poço de Produção, está a uma localização de aproximadamente 20 m do rio Beberibe. A Figura 10 apresenta a localização e distribuição dos poços de produção e observação.

Figura 10 - Localização dos poços de observação e de produção na estação experimental de FM em Caixa d'Água.

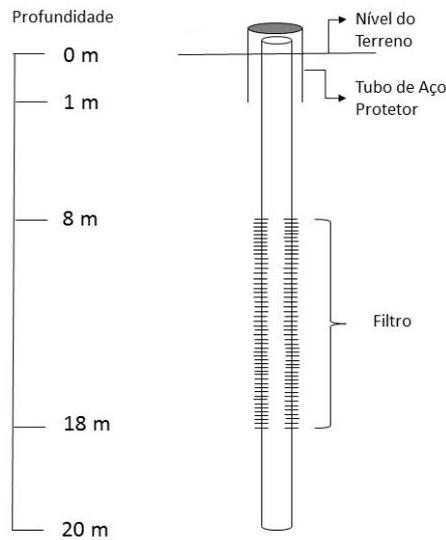


Fonte: Albuquerque (2015).

A construção dos poços de observação foi realizada conforme os padrões e recomendações da NBR-15497-1-07 (ABNT, 2007) e Norma 6410 da CETESB (Cetesb, 2018), tendo bastante atenção na disposição de uma camada de filtro com material granular adequado, bem como na colocação do tubo metálico de proteção e na proteção superficial com base cimentada (Paiva, 2009).

As perfurações de sondagem foram adequadamente aparelhadas para servirem como poços de observação após as análises. Cada perfuração foi equipada com um tubo de PVC de 1 polegada, alcançando uma profundidade de 20 metros e apresentando ranhuras a cada intervalo de 10 centímetros. Os piezômetros receberam proteção em sua porção superior por meio de um tubo de aço com 1,20 metros de altura. As Figura 11 e Figura 12 esboçam os esquemas de instalação dos poços de observação e produção, respectivamente.

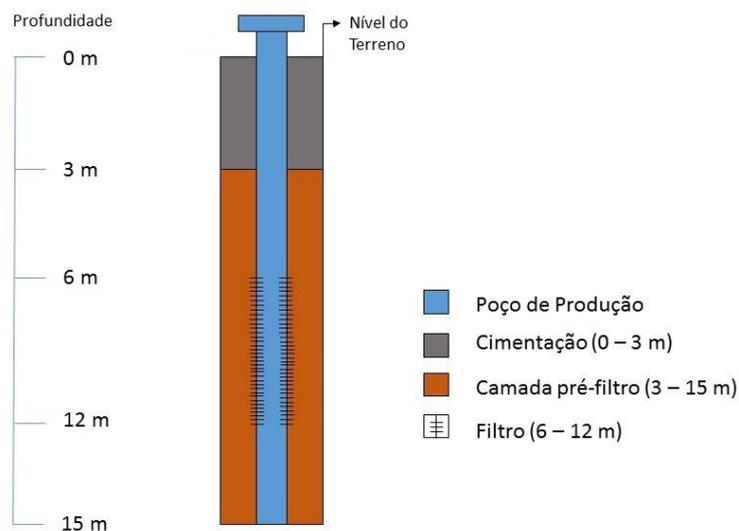
Figura 11 - Esboço dos poços de observação instalados na estação experimental de FM em Caixa d'Água.



Fonte: Carvalho Filho (2016).

Para a perfuração dos poços de produção empregou-se a técnica de rotativa com circulação direta, com um diâmetro de perfuração de 12¼ polegadas, diâmetro final de 6” e revestimento com tubos de PVC geomecânico. Os poços possuem seção de filtro na profundidade de 6 a 12 m, e profundidade total de 15 m (Freitas, 2014).

Figura 12 - Esboço esquemático dos novos poços de produção instalados nas margens.



Fonte: Carvalho Filho (2016).

Dos poços de produção que compõem o projeto piloto de FM no rio Beberibe, apenas o poço 01 vem operando ininterruptamente desde sua implantação em 2009. A água resultante do processo de Filtração em Margem no local passa por análises físico-química e bacteriológicas periodicamente, e é lançada no poço de sucção do sistema convencional da COMPESA já existente. A Figura 13 apresenta o Poço 01.

Figura 13 – Poço 01.



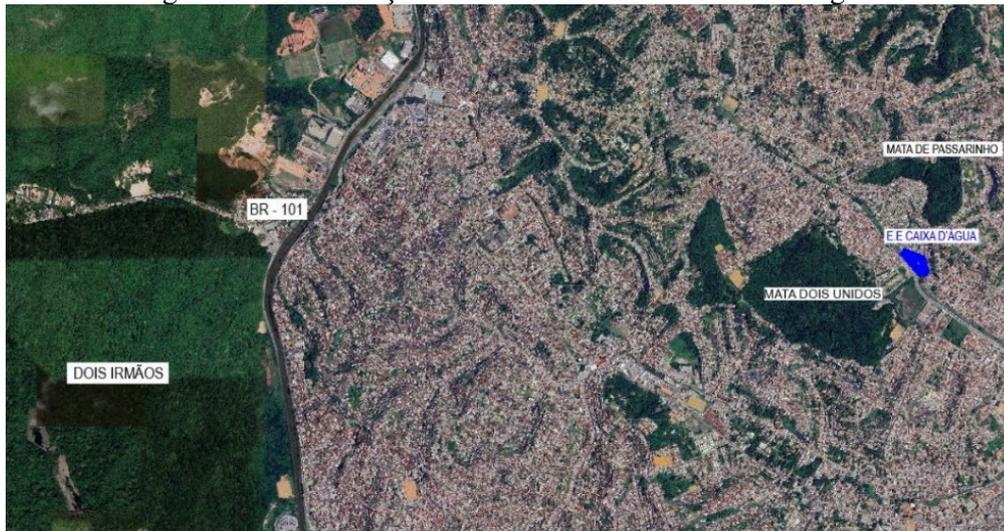
Fonte: Autor (2023).

4.1.2.2 Entorno da EE Caixa d'Água

É possível observar, através das imagens das Figura 14 e Figura 15 , obtidas através de imagem de satélite por meio do Google Earth, a localização da área de interesse e seu entorno.

A EE Caixa d'Água, onde está localizado o projeto de Filtração em Margem, fica próximo às Reservas Ecológicas Mata de Passarinho e Mata Dois Unidos. Além disso, aparece em destaque a reserva florestal Dois Irmãos, e a BR-101.

Figura 14 - Urbanização e matas ao redor da EE Caixa d'Água.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

No trecho mais a jusante do Rio Beberibe, após a BR-101, observa-se muita urbanização no entorno da EE Caixa d'Água, especialmente nas margens do Rio Beberibe. No entanto, há ainda a Mata de Passarinho e Mata Dois Unidos, reservas ecológicas que possuem área verde preservada com cerca aproximadamente 11,5 ha e 50 ha, respectivamente, além de serem áreas de possível recarga dos lençóis freáticos da região.

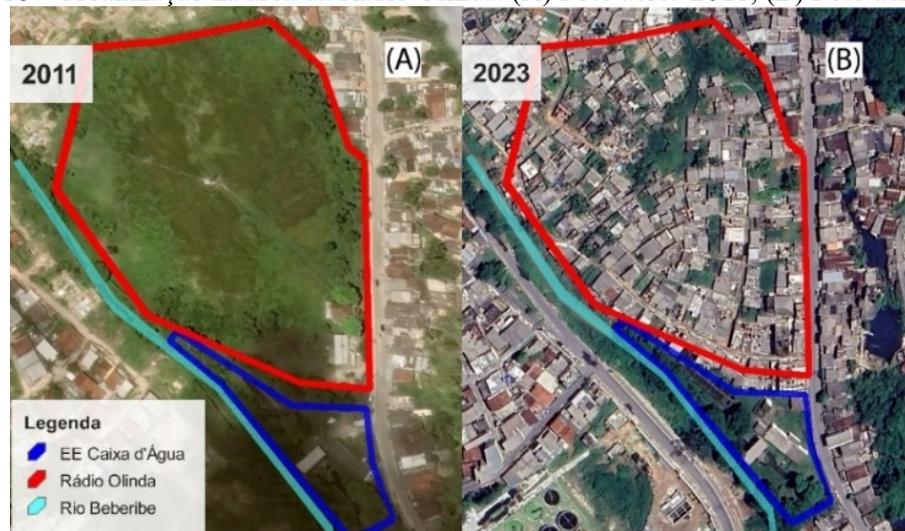
Figura 15 - Área do entorno da EE Caixa d'Água com melhor precisão.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

O terreno adjacente a EE Caixa d'Água, de propriedade da Rádio Olinda, era um local ambientalmente importante, pois além de muito próximo ao projeto de FM, havia a presença de área verde. No entanto, nos últimos anos, devido às ocupações irregulares e despejo inadequado de resíduos, o que antes era considerada uma área de boa recarga hídrica para o lençol freático, hoje é uma local de potencial risco hídrico, tanto para as águas superficiais do rio Beberibe com o despejo de resíduos sólidos, quanto ao lençol freático em virtude da presença de fossas negras. Na Figura 16, observa-se o rápido processo de urbanização no entorno da EE Caixa d'Água.

Figura 16 - Urbanização na área da Rádio Olinda. (A) Foto aérea 2011; (B) Foto aérea 2023.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2023).

4.1.3 Ponto no Rio Beberibe

O projeto piloto de Filtração em Margem na Estação Elevatória Caixa d'Água vem gerando inúmeros estudos desde sua implantação. A caracterização da bacia hidrográfica do Beberibe é de suma importância no projeto de FM, para isso, pontos do Beberibe foram caracterizados e nomenclaturas foram dadas a estes pontos a fim de identificá-los. A numeração foi dada do ponto mais a montante até o ponto mais a jusante, assim o Ponto 01 (P1) localiza-se mais a montante, o Ponto 2 (P2) é intermediário e o Ponto 3 (P3) é o mais a jusante (Freitas, 2017; Monteiro, 2017; Silva, 2019). A localização de cada ponto pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 17 - Localização dos pontos adotados pela equipe de FM.



Fonte: Adaptado de Veras *et al.* (2017).

A presente pesquisa utilizou a mesma denominação a fim de facilitar os futuros trabalhos do grupo de FM, no entanto, os pontos 01 e 02 não serão abordados na presente pesquisa, que consistiu em caracterizar apenas o Ponto 03 (P3), sendo esse o mais próximo da EE Caixa d'Água e possui maior influência no projeto de FM no Rio Beberibe.

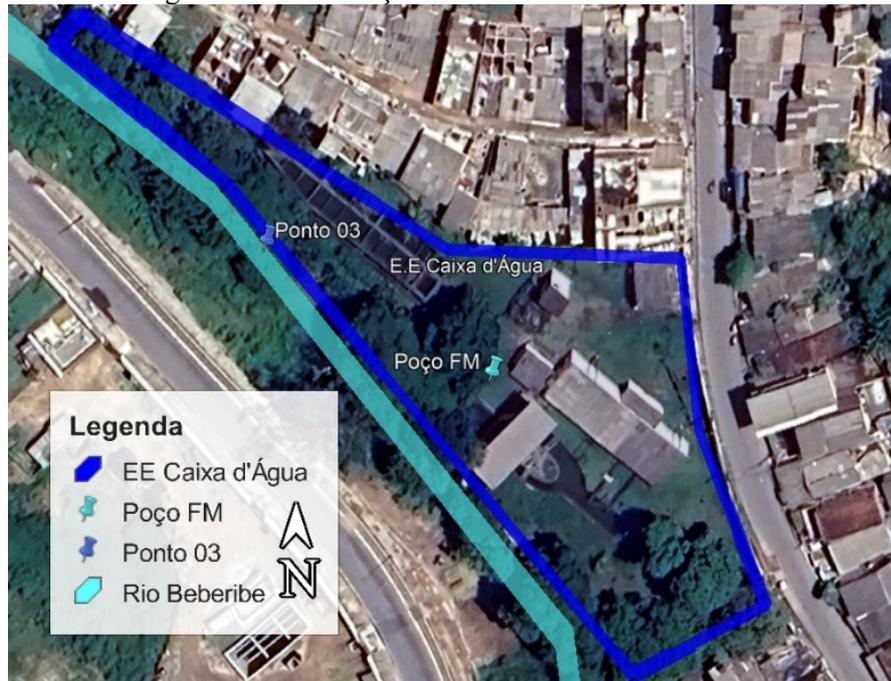
Tabela 3 - Coordenadas do ponto de análise.

Ponto	Coordenadas	
	Latitude	Longitude
3	7° 59,776'	34° 54,415'

Fonte: Autor (2023).

O P3 no Rio Beberibe, possui cerca de 6,0 m de largura e uma lâmina d'água que varia entre 30 cm e 45 cm de altura. A água apresenta uma cor escura e odor desagradável, o local sofre com muitas ações antrópicas, especialmente com o despejo de resíduos sólidos e efluentes, além de ser comum a presença de animais na área. Na Figura 18, visualiza-se com maior clareza a localização do Ponto 03 no Rio Beberibe e sua proximidade com o Poço de Produção da FM.

Figura 18 - Localização do Ponto 03 no rio Beberibe.

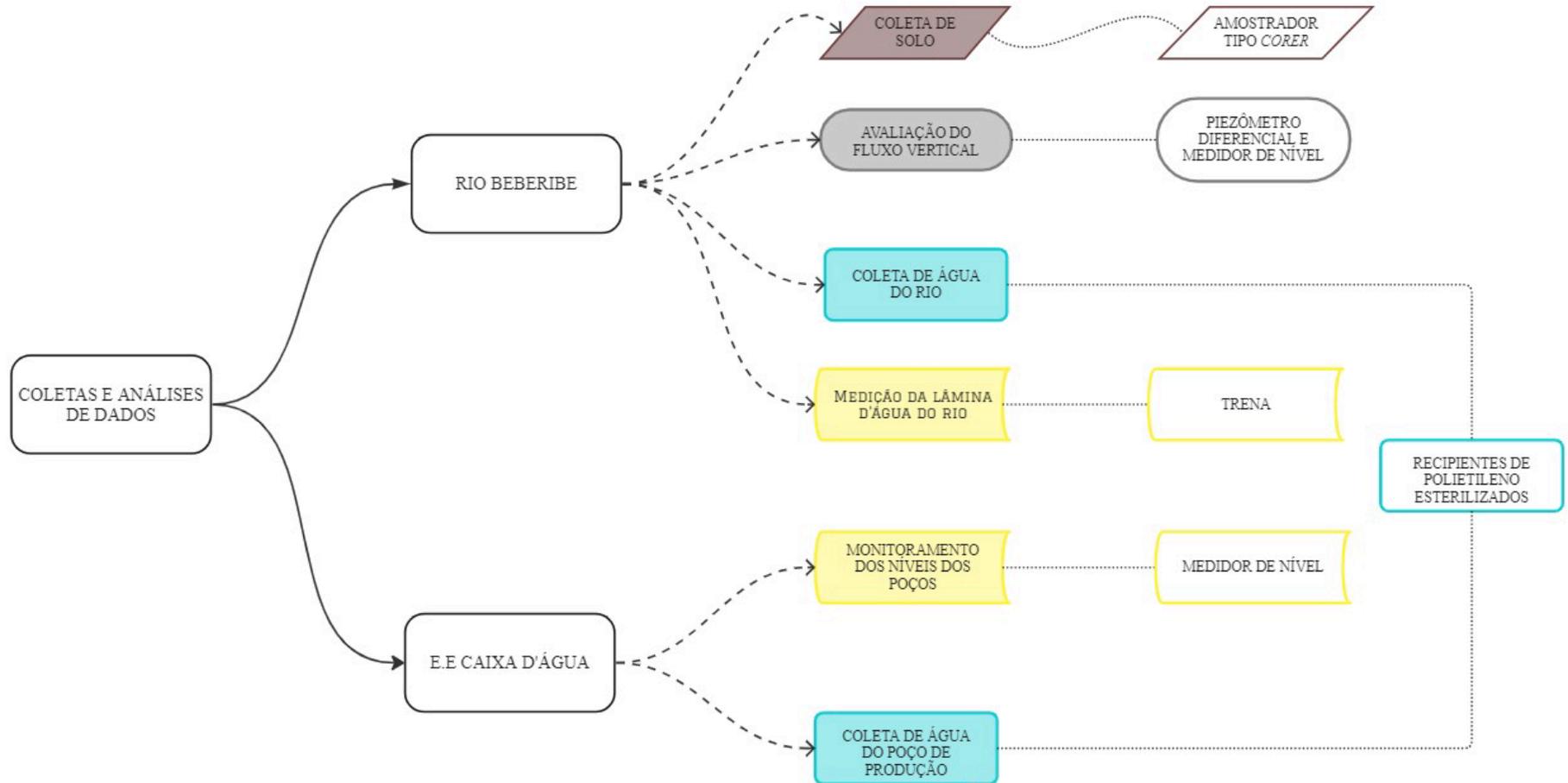


Fonte: Adaptado do Google Earth (2023).

4.2 Coleta e análise de dados

Como já mencionado, a presente pesquisa foi conduzida em escala piloto do processo de Filtração em Margem, em Olinda-PE, na EE de Caixa d'Água, que dispõe de 8 poços de observação e 4 poços de produção. Nesta área foram conduzidos o monitoramento quantitativo (medição de níveis), e qualitativo (análise físico-química e biológica) do projeto de FM, a fim de avaliar a eficiência da técnica no melhoramento da qualidade d'água. No Beberibe, além das coletas de água para análises qualitativas, obteve-se amostras dos sedimentos da zona hiporreica, no ponto 03, para análise granulométrica e determinação dos teores de MOT e CaCO_3 . Em paralelo, foi monitorado a dinâmica do fluxo vertical e a lâmina d'água do rio. Na Figura 19 tem-se o esquema simplificado das atividades realizadas na presente pesquisa, sendo possível visualizar também os locais, as datas e o material utilizado. Durante a coleta de dados, houve algumas interrupções devido a problemas com o transporte da UFPE e questões relacionadas à pandemia da COVID-19.

Figura 19 - Esquema simplificado das coletas.



LEGENDA:

INDICA O LOCAL
→

INDICA ATIVIDADE REALIZADA
- - - - - →

INDICA O EQUIPAMENTO UTILIZADO
.....

INDICAM O PERÍODO

SET/22 a JUL/23

MAI/21 a NOV/21 e MAI/22 a DEZ/22

NOV/22 a JUN/23

JAN/23 e MAI/23

Fonte: Autor (2023).

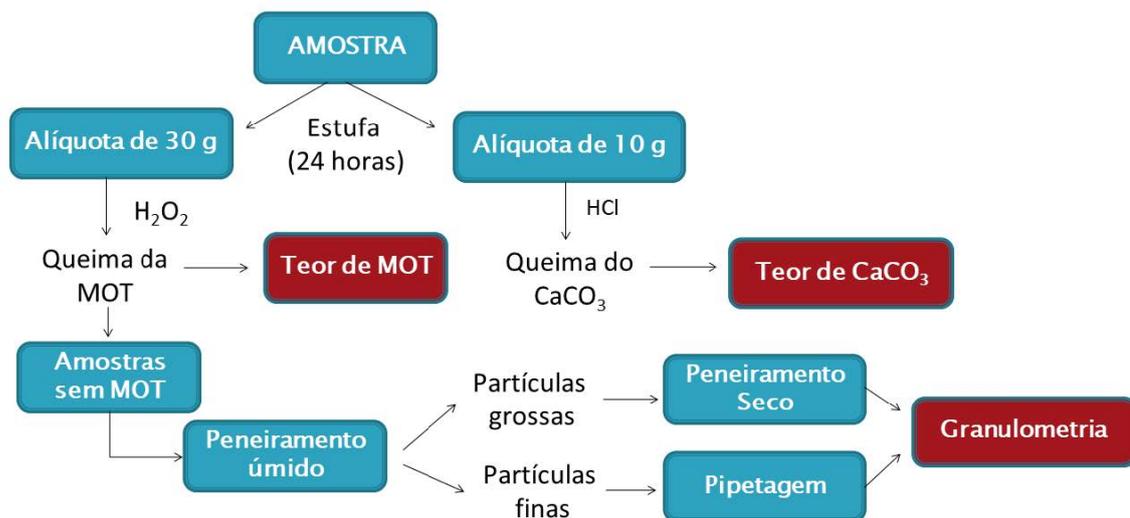
4.2.1 Caracterização dos sedimentos hiporreicos

As amostras foram extraídas do Ponto 03, do Rio Beberibe, nos dias 17 de janeiro e 16 de maio do ano de 2023. Para extração da amostra utilizou-se um amostrador do tipo *Corer*, um objeto cilíndrico, de plástico liso e transparente com aproximadamente 5 cm de diâmetro, enterrado a 10 cm de profundidade no leito do rio.

Em campo, as amostras foram refrigeradas para assegurar sua conservação e posteriormente levadas ao laboratório. As análises granulométricas ocorreram no Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO), do Departamento de Oceanografia (DOCEAN) na UFPE.

O processo de análise da amostra envolve algumas etapas. Inicialmente, a amostra foi submetida a um período de secagem em estufa a 60°C, com duração mínima de 24 horas. Após essa secagem, a amostra foi dividida em dois béqueres distintos: um primeiro contendo 30 g destinado à determinação do teor de MOT e granulometria, e o segundo contendo 10 g, destinado à determinação do teor de CaCO₃. Na Figura 20 tem-se um infográfico das etapas realizadas para caracterização dos sedimentos hiporreicos.

Figura 20 - Infográfico das etapas dos processos de análises dos teores de MOT, CaCO₃ e da granulometria.



Fonte: Carvalho Filho (2019).

4.2.1.1 Matéria orgânica total e carbonato de cálcio

Para análise da porcentagem de MOT, foi adicionado, lentamente, peróxido de hidrogênio (H₂O₂) diluído a 10%, no béquer que continha os 30 g de solo. O reagente foi colocado de modo que toda a amostra fosse afetada, assim, utilizou-se um bastão de vidro para agitar. Após 24 horas, verificou se toda a MOT foi eliminada e posteriormente a amostra foi lavada ao menos duas vezes para retirada do peróxido de hidrogênio. Depois de lavada, foi colocada novamente na estufa até eliminar completamente a umidade. Depois de seca, pesou-se a amostra, obteve-se o peso final e calculou-se a porcentagem de matéria orgânica por meio da seguinte fórmula:

$$\%MOT = \frac{(Peso\ final - Peso\ inicial)}{Peso\ inicial} \times 100 \quad (1)$$

Para obtenção do teor de CaCO₃, adicionou uma solução de ácido clorídrico (HCl) a 10%, no béquer com os 10g de solo. O restante do processo é análogo ao de MOT.

$$\%CaCO_3 = \frac{(Peso\ final - Peso\ inicial)}{Peso\ inicial} \times 100 \quad (2)$$

De posse das equações (1) e (2), é possível obter os teores de MOT e CaCO₃, respectivamente (Carver, 1971).

4.2.1.2 Análise granulométrica

Na análise granulométrica, foram determinados, em cada amostra, os teores de cascalho, areia, silte e argila. Adicionalmente, obteve-se seu diâmetro médio e o grau de seleção a partir do tratamento estatística de Folk e Ward (1957) e a classificação textuais de Shepard (1954).

A porção utilizada para a determinação do teor de CaCO₃ é descartada e a alíquota utilizada para a determinação da MOT é utilizada para a granulometria. O processo de análise granulométrica se deu por meio do peneiramento úmido e peneiramento seco, conforme descrito por Suguio (1973).

Inicialmente, as partículas finas (< 0,062 mm) foram separadas das partículas grossas por meio do peneiramento úmido. As partículas foram novamente colocadas na estufa e as grossas posteriormente submetidas ao peneiramento seco. Nesse processo, utilizou um conjunto de peneiras nomeadas de A a K, cada qual com uma abertura de malha diferente, em ordem

decrecente, sendo elas: 2,000; 1,410; 1,000; 0,707; 0,500; 0,354; 0,250; 0,177; 0,125; 0,088 e 0,062 mm, demonstradas na Figura 21. As peneiras foram presas e vibradas por cerca de 12 min em uma base vibratória, que param automaticamente após o encerramento do tempo. Após isso, são pesados os sedimentos retidos de cada peneira.

Figura 21 - Peneiras dispostas sobre a base vibratória.



Fonte: Autor (2023).

A respeito das partículas finas, siltes e argila, utiliza-se o método denominado pipetagem, que se baseia na Lei de Stokes. Embora a pipetagem seja de extrema importância para complemento da análise granulométrica, o ensaio não foi realizado, visto que as duas amostras de solos apresentaram valores muito baixo de partículas finas, com uma proporção insignificante diante da amostra total, o que não alteraria a classificação do solo por meio da modelagem utilizada. No entanto, foi realizada também a pesagem dos finos.

Os pesos registrados através do processo de peneiramento úmido e seco, foram inseridos no *software* Sysgran Versão 4.0 (Carmargo, 2006). Esse *software* efetua o processamento dos dados de acordo com os parâmetros estatísticos propostos por Folk e Ward (1957) obtendo estatísticas dos sedimentos como diâmetro médio e grau de seleção, e o diagrama triangular de Shepard (1954), que permite a distinção entre diferentes tipos de sedimentos através de classificações baseadas nas classes texturais.

4.2.2 Medição da diferença de carga hidráulica

Na presente pesquisa, para determinar a direção do fluxo vertical entre o rio e o aquífero na área de estudo, empregou-se um denominado piezômetro diferencial, baseado em Chen *et al.* (2003). O equipamento utilizado para o procedimento de leitura, o piezômetro diferencial, como pode ser visto na Figura 22 e Figura 23, é composto de um tubo metálico de aproximadamente 90 cm, com uma ponteira filtrante e rosqueável na sua extremidade, a qual fica totalmente cravada no solo impedindo a passagem de grão de solo e permitindo a passagem de água. Dentro do aparelho encontra-se uma mangueira fina e transparente, que vai da ponteira até a extremidade superior, essa mangueira possibilita a passagem de um medidor de nível com escala graduada em centímetros.

Figura 22 - Detalhes da parte superior do piezômetro diferencial.



Fonte: Autor (2023).

Figura 23 - Detalhes da ponteira filtrante do piezômetro diferencial.



Fonte: Autor (2023).

O monitoramento foi realizado entre novembro de 2022 e junho de 2023, com exceção do mês de fevereiro, totalizando 7 campanhas. Foram instalados dois piezômetros paralelos de forma a abranger uma parte seção transversal do rio, no local padrão do rio adotado pela presente pesquisa. Nestes pontos, o piezômetro é fixado no leito submerso com um auxílio de um martelo até que sua extremidade filtrante esteja totalmente imersa no sedimento, e com um

medidor de nível de água de pulso elétrico é possível realizar as leituras do nível d'água dentro e fora do piezômetro.

O ponto 03 do rio apresenta uma largura aproximada de 6 metros. Para a instalação dos piezômetros, foi adotado um espaçamento de 2 metros entre eles, considerando também uma distância de 2 metros em relação a cada margem. Para a identificação dos resultados, adotou-se a nomenclatura, onde o piezômetro mais próximo à margem esquerda é denominado como Ponto 03 margem esquerda (P3ME) e o piezômetro correspondente à margem direita é designado como Ponto 03 margem direita (P3MD). Essa referência é estabelecida considerando o sentido contrário ao fluxo da água, ou seja, na margem esquerda em relação aos piezômetros, está a Rua Barachel Severino Torres Galindo do Nascimento, enquanto na margem direita encontra-se a EE Caixa d'água. A Figura 24 contém o processo de posicionamento para cravação do piezômetro diferencial.

Figura 24 – Posicionamento para cravação do piezômetro diferencial.

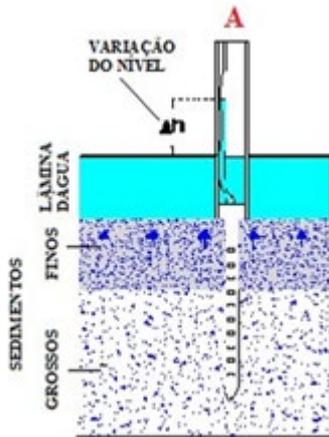


Fonte: Autor (2023).

As leituras das variações de carga hidráulica foram efetuadas em cada um dos piezômetros. Nos primeiros cinco minutos, procedeu-se à coleta de dados nos momentos de 2, 4 e 5 minutos, com o propósito de minimizar os efeitos da turbulência causada durante a inserção do equipamento no leito do rio. Posteriormente, as medições foram conduzidas a intervalos de 5 minutos, até que os valores se estabilizassem ou até um limite de tempo máximo

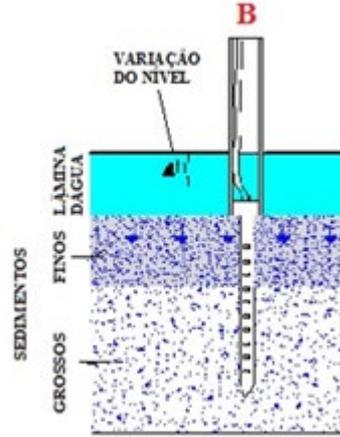
de 35 minutos fosse atingido. Através da diferença entre o nível da superfície da água no rio e o nível da água no interior do piezômetro, foi possível calcular a carga hidráulica entre o aquífero e o manancial superficial, permitindo assim a avaliação do comportamento do fluxo vertical.

Figura 25 - Fluxo ascendente.



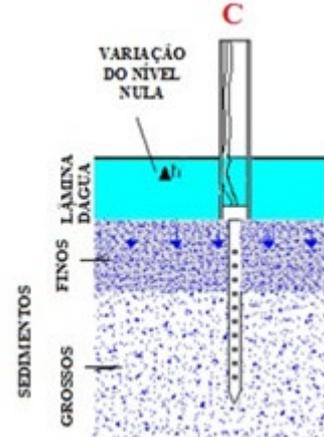
Fonte: Veras (2011).

Figura 26 - Fluxo descendente.



Fonte: Veras (2011).

Figura 27 - Fluxo nulo.



Fonte: Veras (2011).

Conforme apresentado na Figura 25, Figura 26 e Figura 27, existem três situações possíveis: se o nível da água no rio estiver inferior ao nível da água registrado na mangueira, indica que o aquífero está fornecendo água para o rio neste ponto, caracterizando um fluxo ascendente (Condição A); se o nível da água do rio estiver superior ao nível da água no dispositivo, podemos concluir que o rio está recarregando o aquífero, representando um fluxo descendente (Condição B); se ambas as medidas apresentarem o mesmo nível, isso indica um ponto onde não ocorre movimento vertical da água (Condição C).

4.2.3 Monitoramento piezométrico

As medições de níveis dos poços de produção, observação e da lâmina d'água do rio, fazem parte do acompanhamento rotineiro do projeto piloto da técnica Filtração em Margem. As leituras dos poços foram realizadas mensalmente, no período de setembro de 2022 a agosto de 2023, por meio de um medidor de nível de água de pulso elétrico, com trena acoplada, que funciona através de um sinalizador sonoro quando em contato com água. A leitura fornece a profundidade do nível d'água em relação à cota do poço. Na Figura 28, observa-se o processo de leitura do nível de um poço de observação.

Os resultados foram correlacionados com os níveis da lâmina d'água do Rio Beberibe no ponto pré-estabelecido, medidos através de uma trena, e com as precipitações pluviométricas diárias.

Dados de precipitação pluviométrica diária no período foram obtidos através do monitoramento realizado pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden, 2023), na Estação Caixa D'Água, localizado nas proximidades da estação experimental de FM. Na Tabela 4 constam as especificações do pluviômetro.

Tabela 4 - Localização da estação meteorológica.

Estação		Coordenadas	
Código	Nome	Latitude	Longitude
260960001G	Caixa D'Água	7° 59,695'	34° 54,339'

Fonte: autor (2023).

Figura 28 - Medição do nível piezométrico de um poço observação.



Fonte: Autor (2023).

Para determinar o efetivo nível do lençol freático nos poços de produção e observação, foi necessário calcular a diferença de cotas topográficas entre o topo do tubo e a profundidade dos níveis piezométricos.

As cotas do topo de cada tubo ou boca do poço foram obtidas através de um levantamento topográfico, para isso, adotou-se o piso da casa de bombas da EE Caixa d'Água como cota 0,00m. Embora existam quatro poços de produção e oito poços de observação na área, alguns deles estão inacessíveis ou com ausência da cota topográfica do topo do tubo, o

que impossibilita a obtenção do nível efetivo do lençol freático. Na Tabela 5 é apresentado as cotas de cada poço em relação à cota de referência.

Tabela 5 - Cota da boca dos poços de FM em relação à cota de referência.

POÇO	Poço 1	Poço 3	SP1	SP2	SP5
COTA (m)	0,437	0,225	-0,103	0,210	0,250

Fonte: Adaptado de Freitas (2014).

4.2.4 Monitoramento qualitativo

O monitoramento qualitativo foi realizado entre maio de 2021 e dezembro de 2022, em amostras do rio Beberibe e do poço de produção, conforme apresentado no esquema simplificado da Figura 19. Durante as atividades de coleta em campo, foram empregados frascos de polietileno esterilizados com capacidade de 1 L para a realização das análises físico-químicas e bacteriológicas.

Após a coleta e identificação, as amostras foram encaminhadas ao LAMSA (Laboratório de Análises Minerais Solos e Água) no Departamento de Engenharia Química da UFPE, onde foram processadas utilizando a metodologia descrita pela *American Public Health Association* (APHA, 2017). Na Figura 29 tem-se os frascos com água do rio e do poço, recém coletadas e prestes a serem levados para o laboratório.

Figura 29 - Recipientes com amostras de água para análise físico-química.



Fonte: Autor (2023).

Foram submetidos à análises os parâmetros físico-químicos (pH, turbidez, cor aparente, condutividade elétrica, nitrato, amônia, nitrito, dureza total em CaCO₃, ferro e cloreto). Enquanto as microbiológicas foram coliformes totais e fecais ou termotolerantes.

Os resultados foram analisados e comparados com os máximos valores permitidos (VMP) pela portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021 (Brasil,2021), que dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, além de investigar a relação com os índices pluviométricos.

A avaliação qualitativa conduzida neste estudo representou uma extensão das atividades realizadas por Paiva (2009), Freitas (2010, 2014), Veras (2011), Albuquerque (2015), Freitas (2018). Esses pesquisadores adotaram a mesma abordagem metodológica empregada neste estudo, tanto para as análises físico-químicas quanto para as análises bacteriológicas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos sedimentos hiporreicos

Como mencionado anteriormente, foram coletadas duas amostras a uma profundidade de 10 cm do leito do rio Beberibe, uma em janeiro e outra em maio, ambas em 2023. É válido compreender que o mês de janeiro se enquadra como um período seco, com baixos índices pluviométricos, enquanto o mês de maio é caracterizado por fazer parte do período de inverno, com maior quantidade de chuvas.

O grau de seleção representa um parâmetro estatístico de dispersão aplicado na classificação da amostra, conforme definido por Folk e Ward (1957), derivado do cálculo do desvio padrão (σ) e está relacionado ao tamanho dos sedimentos. Em uma amostra de solo, quanto mais bem selecionados forem os sedimentos, menor será o desvio padrão, indicando uma distribuição mais próxima do valor médio. Isso sugere que os grãos da amostra possuem tamanhos semelhantes, ou seja, grãos uniformes. Na Tabela 6 consta os resultados das análises granulométricas através do Sysgran 4.0.

Tabela 6 - Análise granulométrica, de MOT e CaCO₃.

PONTO 03	% Cascalho	% Areia	% Silte e Argila	D Méd (mm)	Clas.	G. de Seleção	% MOT	% CaCO₃
JANEIRO	1,46	98,38	0,16	0,469	AM	MS	0,63	0,8
MAIO	5	94,52	0,48	0,483	AM	MS	0,8	1,2

D = diâmetro; Med = médio; Clas = classificação; G = grau; AM = areia média; MS = moderadamente selecionado.

Fonte: Autor (2023).

As análises granulométricas obtidas para o Ponto 3 demonstram uma predominância de partículas de areia em sua composição, sendo classificadas como areia média, de acordo com a classificação de Shepard (1954).

No que se refere ao grau de seleção, as duas amostras do leito do rio no Ponto 03 foram classificadas como moderadamente selecionadas, ou seja, não há uma grande dispersão granulométrica, com diâmetros das partículas próximas ao seu valor médio.

Em geral, os resultados textuais apresentaram uma homogeneização dos sedimentos no Ponto 03, com diâmetro médio de 0,469 mm no mês de janeiro e 0,483 mm no mês de maio, além de apresentarem porcentagens relativamente semelhantes.

No que diz respeito à MOT, foi registrada uma concentração de 0,63% no mês de janeiro, ao passo que em maio ocorreu um ligeiro aumento, alcançando um teor de 0,8%. Em relação ao CaCO_3 , os valores constatados foram de 0,8% e 1,2% nos meses de janeiro e maio, respectivamente.

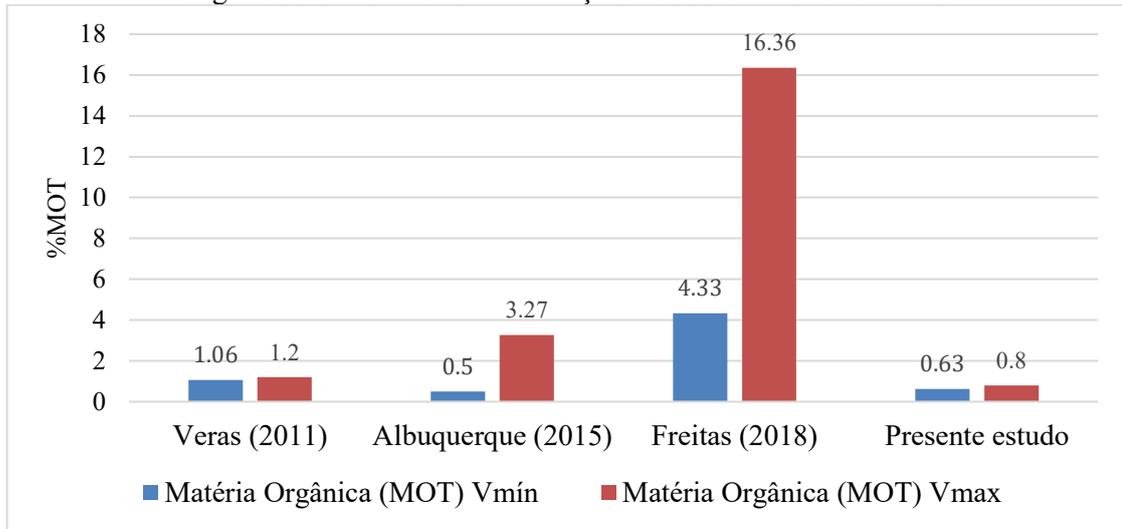
Conforme mencionado por Tyson (1995), teores de MOT abaixo de 2% são classificados como baixos. Portanto, na região de estudo do rio, notou-se uma baixa presença de MOT em seu leito. Além disso, o CaCO_3 também apresentou baixa concentração.

Comparando a análise do mês de janeiro com o de maio, é possível perceber que ocorreram poucas alterações na composição granulométrica, nos teores de MOT e no CaCO_3 em virtude da variação temporal.

Geralmente, as chuvas têm o potencial de causar alterações nos sedimentos devido à erosão. Portanto, a observação de poucas mudanças pode estar relacionada ao fato de que, embora o mês de maio seja conhecido por suas chuvas intensas, as precipitações significativas ocorreram após a data de coleta, que foi em 16 de maio de 2023. No decorrer de maio, a precipitação total atingiu 219,60 mm, com apenas 10% desse total ocorrendo entre o início do mês e o dia 16 de maio. Além disso, nos sete dias que antecederam a coleta, choveu apenas 1,54% do total do mês, o que equivale a aproximadamente 3,40 mm (CEMADEN, 2003).

Em relação a outras pesquisas conduzidas na área, especificamente no que se refere aos níveis de MOT, Veras (2011) e Albuquerque (2015) também identificaram baixas concentrações em alguns meses, enquanto Freitas (2018) demonstrou uma presença significativa de MOT, como pode ser vista na Figura 30. Segundo Freitas (2018), a elevação da concentração desses parâmetros se deve ao processo descontrolado de urbanização na área e à contribuição de esgoto doméstico no rio.

Figura 30 - Resumo da concentração de MOT na área de estudo.



Fonte: Autor (2023).

Com base no mencionado, era esperado que este estudo também obtivesse concentrações elevadas de MOT, possivelmente até mais altas do que o estudo realizado por Freitas (2018). No entanto, durante o segundo semestre de 2022, sem precisão da data, uma intervenção de dragagem foi efetuada no leito do rio, na área de pesquisa, por uma empresa privada.

A ação pode ter ocasionado modificações no local, especialmente nos primeiros centímetros, o que inclui a diminuição dos teores de MOT e CaCO_3 , bem como alterações na composição granulométrica e mudanças na hidrodinâmica do ponto em análise. Também é importante destacar que as precipitações podem influenciar nas variações dos parâmetros analisados.

Em relação à análise granulométrica, além dos autores mencionados, Silva (2019) também avaliou a granulometria no local. Embora a concentração de areia seja predominante em todos os trabalhos, observou-se, uma grande redução de finos (argila e silte) no presente trabalho quando comparado às outras pesquisas (Veras, 2011; Albuquerque, 2015; Freitas, 2018; Silva, 2019). De acordo com Tyson (1995), altos teores de matéria orgânica estão associados com maiores quantidades de finos, adicionalmente, Xavier *et al.* (2016) acrescentaram que essa MOT pode estar ligada à matéria orgânica de origem antrópica.

Considerando os resultados da caracterização física da zona hiporreica, com a granulometria e a determinação dos teores da MOT e do CaCO_3 , é bastante provável que redução dos valores finos, bem como das concentrações de desses parâmetros, esteja associada à raspagem da camada inicial de solo. O aumento da concentração da MOT e do CaCO_3 , pode

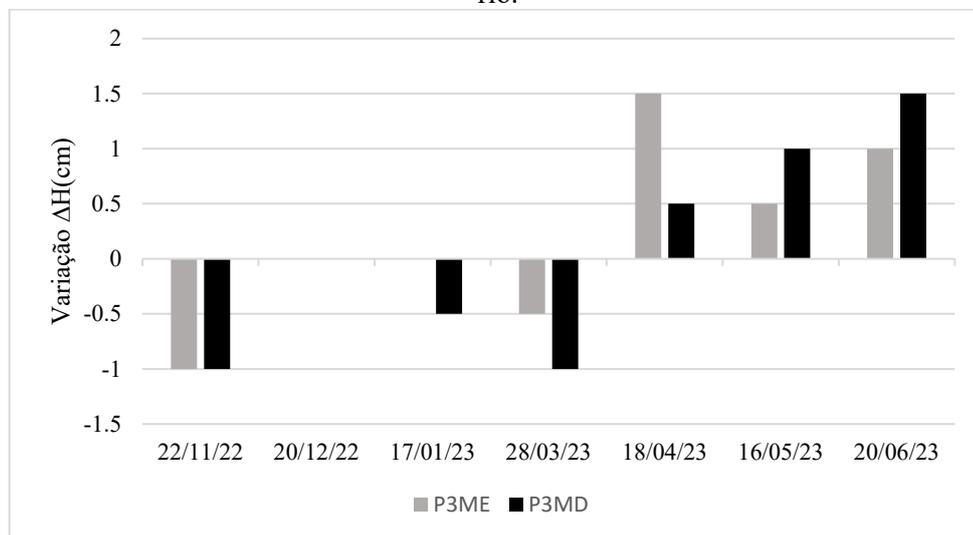
estar atrelado a ocorrência de colmatção. De acordo com Albuquerque (2015), uma das formas de reduzir a área colmatada é realizar uma raspagem no fundo da bacia, provocando a desobstrução do leito. Essa observação valida os resultados obtidos e a discussão apresentados no contexto da presente pesquisa.

5.2 Medição da diferença de carga hidráulica

O estudo da dinâmica do fluxo vertical desempenha um papel crucial na compreensão da troca de água entre um rio e um aquífero. O processo de recarga e descarga de um aquífero está intimamente relacionado com a diferença de carga hidráulica, a qual, por sua vez, é influenciada pela variabilidade temporal e espacial, especialmente devido às precipitações nessas regiões.

A medição com piezômetro diferencial permitiu identificar o sentido do fluxo vertical e auxilia na compreensão de sua dinâmica sazonalmente ao longo do período estudado. Na Figura 31, observa-se os resultados estabilizados da diferença de carga hidráulica no ponto de estudo.

Figura 31 - Leitura da diferença de carga hidráulica no leito do Rio Beberibe em relação ao nível do rio.



Fonte: Autor (2023).

Como mencionado anteriormente, foram realizadas sete campanhas de medição entre novembro de 2022 e junho de 2023, com exceção do mês de fevereiro. Em geral, os piezômetros alcançaram a estabilização rapidamente, com tempos de espera que não ultrapassaram 20 minutos. Solos de natureza arenosa tendem a estabilizar os piezômetros mais rapidamente, ao contrário de solos que possuem uma maior proporção de finos, como argila e silte.

Nos meses de novembro a março, observaram-se fluxos descendentes ou nulos, enquanto nos meses de abril, maio e junho, foram registrados fluxos ascendentes. Ao longo das medições, foi possível observar diferentes direções na diferença de carga hidráulica entre o aquífero e o Rio Beberibe, incluindo fluxo descendente, ascendente e ausência de fluxo. Na maioria das vezes, ambos os piezômetros mantiveram as orientações, com exceção do mês de janeiro, quando P3MD indicou fluxo descendente, enquanto o P3ME apresentou fluxo nulo.

É possível observar um comportamento da carga hidráulica em função da variação temporal, especialmente influenciado pelas condições pluviométricas da época em análise. Nos meses correspondentes às épocas secas, como novembro, dezembro e janeiro, observou-se a presença de fluxos descendentes ou nulos. Isso indica uma recarga do aquífero, com o rio atuando como influente. É importante mencionar que a magnitude deste processo depende de vários fatores, como a permeabilidade do solo, a velocidade do fluxo da água subterrânea e as condições hidrogeológicas específicas do local.

Por outro lado, durante os meses de inverno, houve uma inversão notável na dinâmica, com os fluxos de água tornando-se ascendentes, indicando que o aquífero estava fornecendo água para o rio, ou seja, o rio assumiu o papel de efluente. A explicação para a mudança de fluxo se deve à possibilidade de eventos chuvosos provocarem a saturação do solo; conseqüentemente, ainda que anteriormente o rio estivesse contribuindo para o aquífero, pode ocorrer uma inversão do fluxo, onde o aquífero passa a abastecer o rio. Além disso, ao longo desse processo, ocorre um momento de transição, onde o fluxo é nulo.

Segundo Cheng, Xi e Cheng, Xunhong (2003), durante uma fase de aumento do nível da água, a água do rio infiltra-se em um aquífero hidráulicamente conectado, e, inversamente, durante a fase de redução do caudal, ocorre a recarga do riacho. O volume de água armazenado é liberado após a enchente.

Embora no mês de maio marque o início do período de inverno, foi notada a ocorrência de fluxos descendentes. Isso pode ser atribuído ao fato de que, em geral, segundo Albuquerque (2015), o início de eventos chuvosos pode não alterar o gradiente hidráulico ou gerar apenas pequenas variações.

No entanto, é de suma importância enfatizar que as interações entre o rio e o aquífero são complexas, e seu comportamento é altamente dinâmico, sujeito a consideráveis influências de fatores externos que têm o potencial de modificar as características do local.

5.3 Monitoramento piezométrico

Os registros dos níveis do lençol freático, obtidos por meio de piezômetros e poços estrategicamente distribuídos na área de estudo, são de grande relevância para a compreensão do comportamento das águas subterrâneas, incluindo o direcionamento do fluxo subterrâneo e as mudanças no cone de rebaixamento resultantes das atividades de bombeamento.

Conforme anteriormente mencionado, a medição regular dos níveis do lençol freático faz parte acompanhamento do projeto piloto de Filtração em Margem na EE Caixa d'Água, às margens do Rio Beberibe. Este acompanhamento incluiu um total de onze medições, realizadas mensalmente, com exceção do mês de fevereiro. Durante todo o período de coleta de dados, o poço de produção esteve sujeito a bombeamento.

Na Tabela 7, estão registradas as leituras dos níveis piezométricos, as cotas estão de acordo com o ponto de referência adotado, sendo calculadas conforme a metodologia descrita neste estudo.

Tabela 7 - Leitura dos níveis piezométricos, valores em cota a partir do referencial adotado (piso da casa de bomba da EE Caixa d'Água).

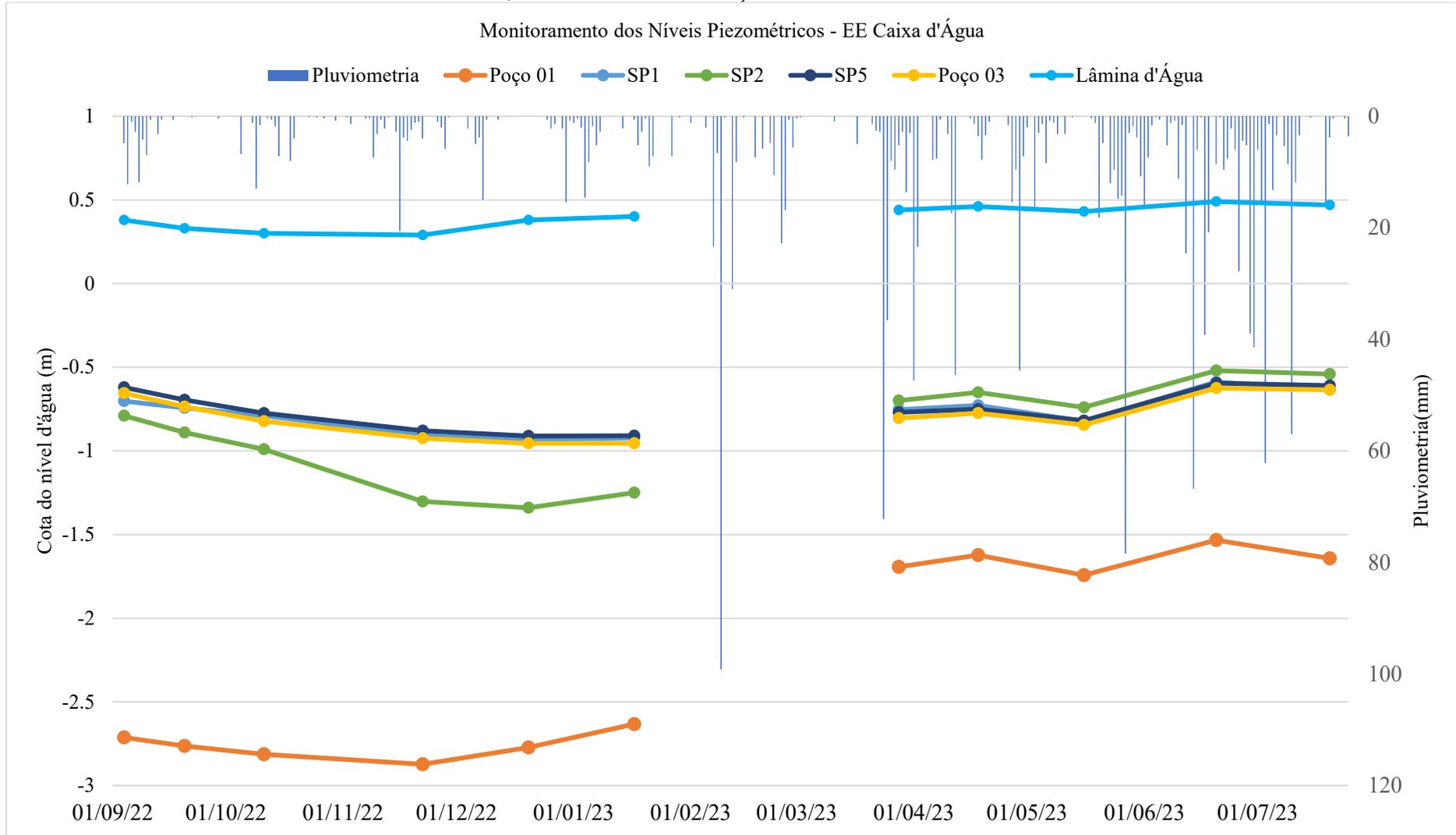
Leitura dos níveis (m)					
Data	Poço 01	Poço 03	SP1	SP2	SP5
04/09/2022	-2,71	-0,66	-0,70	-0,79	-0,62
20/09/2022	-2,76	-0,74	-0,74	-0,89	-0,70
11/10/2022	-2,81	-0,82	-0,79	-0,99	-0,78
22/11/2022	-2,87	-0,93	-0,91	-1,30	-0,88
20/12/2022	-2,77	-0,96	-0,93	-1,34	-0,91
17/01/2023	-2,63	-0,96	-0,92	-1,25	-0,91
28/03/2023	-1,69	-0,81	-0,75	-0,70	-0,77
18/04/2023	-1,62	-0,78	-0,73	-0,65	-0,75
16/05/2023	-1,74	-0,85	-0,82	-0,74	-0,82
20/06/2023	-1,53	-0,63	-0,59	-0,52	-0,60
20/07/2023	-1,64	-0,64	-0,63	-0,54	-0,61

Fonte: Autor (2023).

As leituras dos níveis potenciométricos, apresentados na Tabela 7, em conjunto com a medição da lâmina d'água do rio, feitas ao longo do tempo, fornecem informações importantes a respeito da interação rio-aquífero. Além disso, os dados foram correlacionados com as precipitações diárias obtidas no Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e representados graficamente na Figura 32.

Através da Figura 32 , torna-se mais visível a conexão hidráulica entre o rio e o aquífero, bem como a influência do bombeamento e das precipitações no nível do lençol freático.

Figura 32 - Gráfico do monitoramento dos níveis piezométricos, da lâmina d'água do rio Beberibe e da precipitação diária no módulo experimental, Olinda-PE, valores de cotas em relação ao referencial adotado.



Fonte: Autor (2023).

É possível observar, em todas as leituras, uma sincronia entre os níveis d'água dos poços de produção, de observação, e a lâmina d'água do rio Beberibe, comprovando a conexão hidráulica entre o rio e o aquífero.

Em um determinado dia do mês de fevereiro, ocorreu um desligamento não programado da bomba, que foi prontamente religada no dia seguinte. No entanto, observou-se uma diminuição na vazão de recalque em comparação com os meses anteriores. Essa redução pode estar relacionada a uma possível obstrução na válvula de pé devido ao acúmulo de sedimentos. É relevante destacar que, mesmo diante do problema relatado, a bomba tem operado continuamente no Poço 01 ao longo de toda a pesquisa até o presente momento.

A alteração na vazão de bombeamento resultou em um aumento nos níveis dos poços. Apesar da influência da forte chuva ocorrida em fevereiro, a elevação dos níveis de janeiro a março foi principalmente consequência dessa mudança na vazão. Essa explicação torna-se evidente ao analisar o poço de observação mais próximo do Poço 01, o SP2. Inicialmente, os níveis do SP2 estavam abaixo dos demais poços de observação, mas após o incidente relatado, eles ultrapassaram os níveis dos outros poços, o que confirma que a alteração abrupta foi resultado direto da operação da bomba.

O incidente ocorrido no mês de fevereiro prejudicou a análise temporal da variação dos níveis, uma vez que fevereiro e março representam um período de transição do regime seco para o chuvoso. No entanto, ao considerar o gráfico em dois períodos distintos, antes e após fevereiro, ainda é possível identificar claramente o impacto das precipitações nas oscilações da lâmina do rio e do lençol freático. Por exemplo, as medições realizadas entre maio e junho evidenciam que, após eventos de chuva, houve um notável aumento nos níveis dos poços e na lâmina do rio, enquanto em meses de baixa precipitação, os níveis apresentaram redução.

Por último, é pertinente ressaltar que o bombeamento no Poço 01 exerce influência significativa sobre a cota piezométrica em uma extensa parte do aquífero sob a EE Caixa de Água. Essa influência foi confirmada por Paiva (2009), através de um monitoramento piezométrico e a representação das linhas de fluxo em um mapa potenciométrico. Esse estudo evidenciou claramente a existência de um aporte de fluxo do rio Beberibe e do lençol freático partindo do poço em questão.

5.4 Monitoramento qualitativo

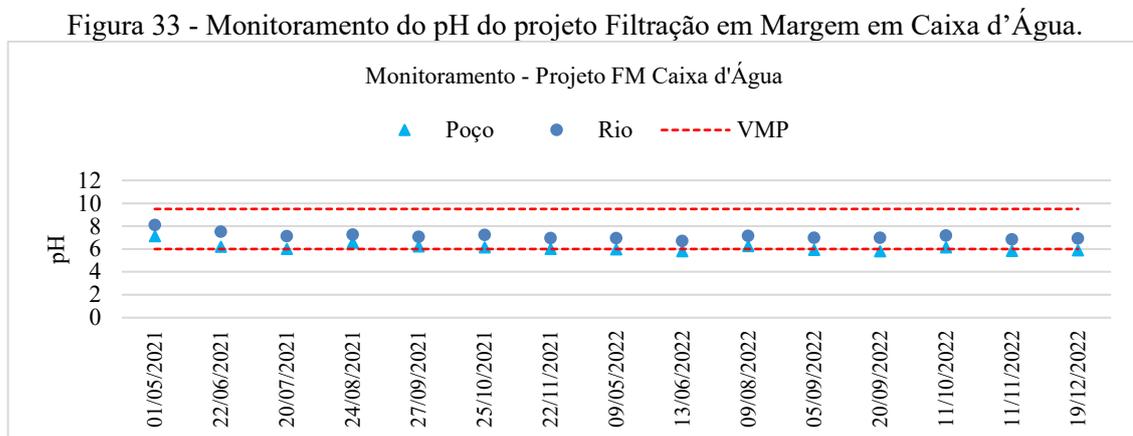
O monitoramento qualitativo é um procedimento essencial para avaliar as características da água, desempenhando um papel fundamental na obtenção de informações e na tomada de decisões relacionadas ao tratamento e uso da água.

Nesse contexto, realizou-se o monitoramento da água do rio Beberibe e do poço de produção, conforme descrito na metodologia deste trabalho. Os resultados foram comparados com os valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888, para águas destinadas ao consumo humano em todo o território nacional (Brasil, 2021).

Os parâmetros físico-químicos analisados foram: pH, turbidez, cor aparente, condutividade elétrica, nitrato, amônia, nitrito, dureza total em CaCO_3 , cálcio, ferro e cloreto. Já os biológicos verificaram a presença de coliformes totais e termotolerantes.

Na Figura 33, observam-se as variações do pH no rio e no poço. Quanto ao pH, o intervalo dos VMP pela Portaria GM/MS n. 888/2021 é de 6,0 a 9,5 (Brasil, 2021). O poço apresentou variações de 5,79 a 7,10, com um valor médio de 6,12. Ao analisar em termos de média, o pH ficou dentro dos valores estabelecidos, porém, das quinze amostras coletadas, 40% apresentaram valores abaixo. O pH do Rio Beberibe variou de 6,7 a 8,0, com um valor médio de 7,12.

Os resultados corroboram os estudos bibliográficos conduzidos por Braga (2021) e Nyenje (2022), que indicam que as águas subterrâneas, em sua maioria, apresentam uma leve acidez. Embora os valores estejam acima dos VMP, eles ainda são considerados aceitáveis de acordo com a portaria mencionada. Portanto, estar fora dessa faixa, especificamente no que diz respeito ao pH, não significa que a água seja inadequada para consumo humano, uma vez que essa leve acidez não representa um risco para a saúde humana.



Fonte: Autor (2023).

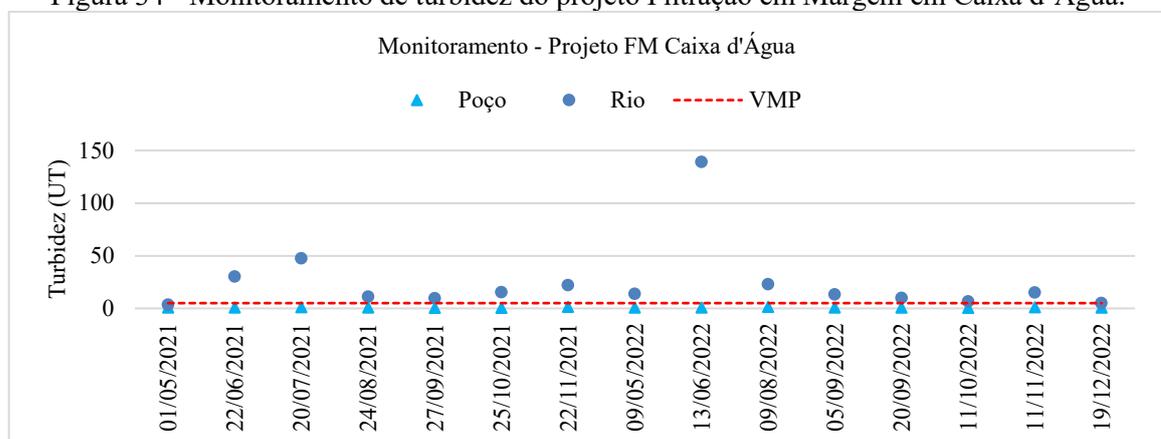
Na Figura 34, observam-se as concentrações da turbidez no rio e no poço. Este parâmetro refere-se ao nível de interferência da passagem da luz através da água (Von Sperling, 2005), e está associado à quantidade de partículas sólidas em suspensão, incluindo sedimentos, argila, matéria orgânica em suspensão, algas e outros materiais que tornam a água turva ou opaca. A turbidez é um parâmetro monitorado nas estações de tratamento de água, e níveis elevados podem comprometer a eficácia dos processos de desinfecção.

O valor máximo permitido de turbidez, conforme a Portaria GM/MS nº 888/2021, é de 5 UT. O poço apresentou variações entre 0,40 e 1,28 UT, com um valor médio de 0,73 UT, ou seja, todas as amostras estavam abaixo do limite estabelecido. Já o Rio Beberibe, nos meses analisados, teve apenas uma amostra abaixo do VMP, com variações entre 3,59 UT e 139 UT, e um valor médio de 24,27 UT.

No mês junho de 2022, pôde-se observar um aumento brusco na turbidez, o qual ocorreu devido às fortes chuvas registradas no mês de maio e no início de junho de 2022. Ainda assim, a água do poço apresentou valores muito abaixo do estabelecido. Wahaab, Salah e Grischek (2019), em um estudo realizado no rio Nilo, no Egito, evidenciaram que fortes chuvas causaram elevados níveis de turbidez, interrompendo estações convencionais de tratamento de águas superficiais, enquanto os poços de FM ainda poderiam ser operados durante períodos de enchentes repentinas.

Em geral, houve uma redução média de aproximadamente 95% na turbidez da água, chegando até em 99%. Os resultados obtidos corroboram com o observado no estudo realizado por Nagy-Kovács *et al.* (2019), no qual os autores demonstraram a eficiência da Filtração em Margem na remoção de até 99% da turbidez.

Figura 34 - Monitoramento de turbidez do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.



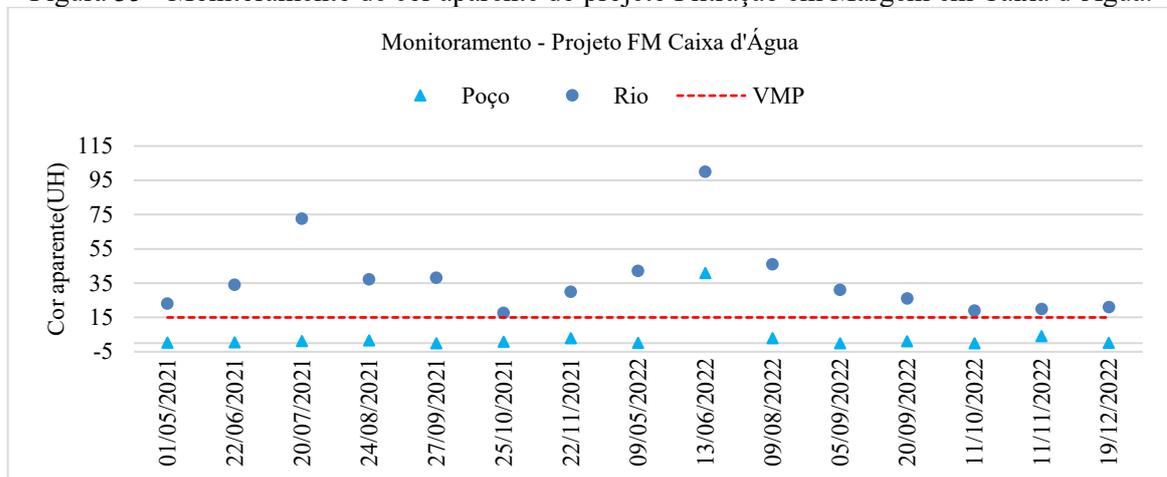
Fonte: Autor (2023).

Na Figura 35, observam-se as concentrações de cor aparente no rio e no poço. Em relação ao parâmetro mencionado, ele está relacionado à tonalidade visível da água devido à presença de substâncias dissolvidas e/ou em suspensão que conferem uma coloração a ela. A causa da coloração pode variar, podendo ser de origem natural ou antropogênica, incluindo a presença de materiais orgânicos, minerais ou poluentes. O valor máximo para este parâmetro é de 15 UH.

No rio Beberibe, todas as análises estavam acima do valor máximo permitido. Esses resultados podem ser explicados pela quantidade de despejos de esgotos nas águas no ponto de estudo.

A água do poço apresentou bons resultados, com um valor médio de cor aparente de 5,69 UH, bem abaixo do valor máximo permitido. Além disso, houve uma redução média de aproximadamente 83% em relação ao rio Beberibe. Apenas uma amostra esteve acima do valor permitido, o que pode ser explicado devido às fortes chuvas ocorridas na época, provocando deslizamentos e erosões. As concentrações no poço variaram de 0,40 a 41 uH, enquanto o rio apresentou um mínimo de 17,60 uH e um máximo de 72,70 uH, com uma taxa média de 32,69 uH.

Figura 35 - Monitoramento de cor aparente do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.

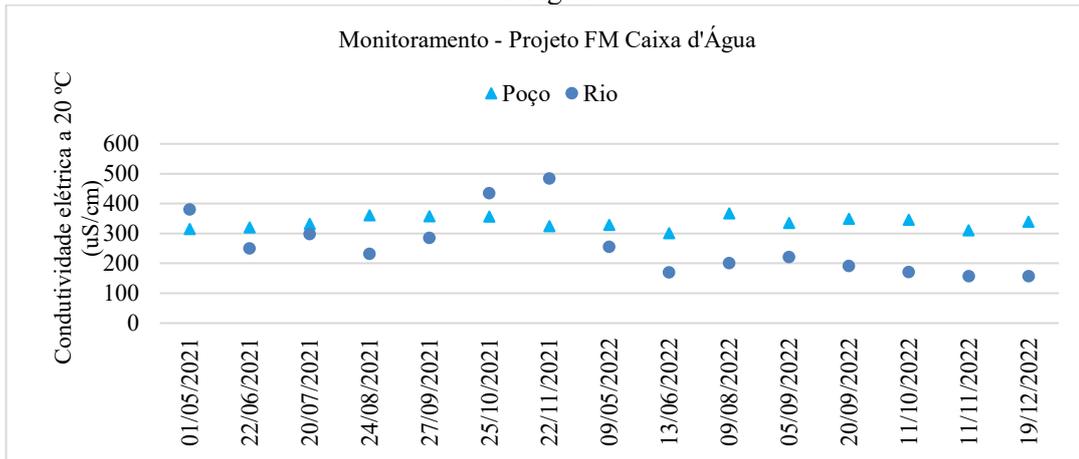


Fonte: Autor (2023).

Na Figura 36, notam-se as variações de condutividade elétrica (CE) no rio e no poço. A CE é um indicador da presença de sais, e uma característica é que são persistentes no meio poroso; porém não há um valor máximo permitido. Observa-se que, de maneira geral, a água do poço apresenta valores de CE superiores aos do rio. Por outro lado, o rio Beberibe demonstra variações mais acentuadas, predominantemente associadas ao período de chuvas.

Vários estudos têm confirmado que a condutividade elétrica aumenta da água do rio para o poço da FM (Paiva *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2011; Thakur; Singh; Ojha, 2012; Sahu *et al.*, 2019). De acordo com Thakur, Singh e Ojha (2012), a água, ao percolar através do solo, absorve solutos que contribuem para o aumento da CE.

Figura 36 - Monitoramento de condutividade elétrica do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.



Fonte: Autor (2023).

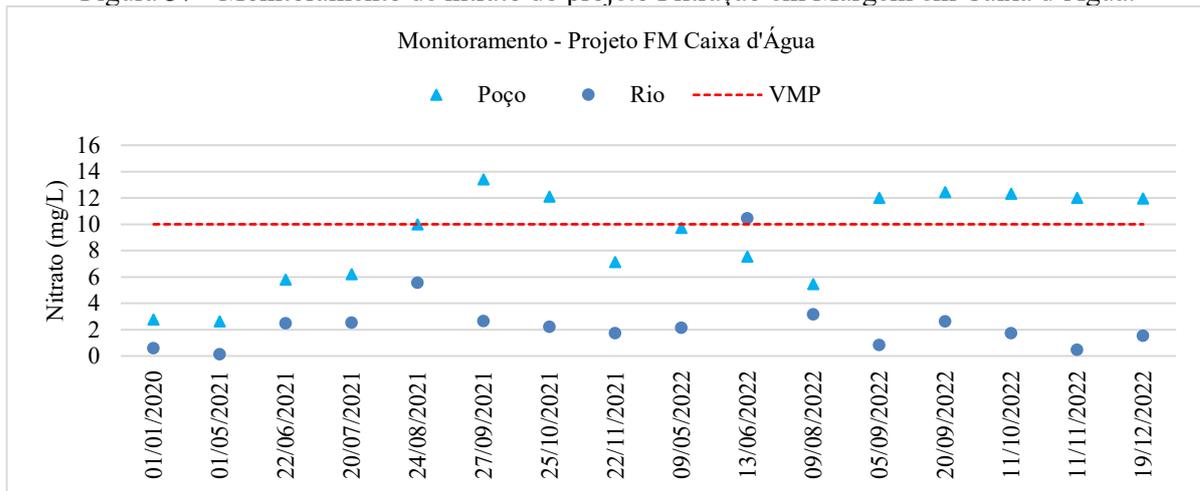
Na Figura 37 observam-se as concentrações de nitrato no rio e no poço. Nas campanhas realizadas, foi constatado que 93,33% das amostras de água do poço apresentaram concentrações de nitrato superiores às do rio Beberibe. Isso aconteceu em virtude da presença de fossas próximas ao poço de produção, tendo em vista que nitrato possui uma grande mobilidade no meio poroso.

No poço, as concentrações variaram de 2,63 a 13,40 mg/L, com uma média de 9,38 mg/L. Além disso, 46,67% das amostras excederam a concentração de 10 mg/L, que é o valor máximo permitido estabelecido pela Portaria GM/MS n. 888/2021 (Brasil, 2021). É possível notar que as concentrações mais elevadas de nitrato no poço ocorrem durante os períodos de estiagem, geralmente entre setembro e dezembro. Isso ocorre porque a ausência de chuvas no local favorece a recarga do aquífero por meio de fossas negras, aumentando a concentração, enquanto períodos chuvosos contribuem para diluição e reduzem a concentração. No rio, os valores de nitrato apresentaram variações entre 0,13 e 10,44 mg/L, com valor médio de 2,68 mg/L.

Conforme destacado por Von Sperling (2005), os compostos nitrogenados analisados nesta pesquisa (nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato), quando presentes em altas concentrações na água, são indicativos de contaminação de origem humana, como proveniente

de esgotos domésticos, depósitos de lixo, descargas industriais, uso de fertilizantes e resíduos animais. Silva *et al.* (2019) especifica que concentrações de nitrato acima de 5 mg/L podem ser consideradas indícios de contaminação antropogênica. Concentrações de nitrato superiores a 10 mg/L na água podem representar riscos para a saúde humana, tornando-a imprópria para consumo humano (Ebrahimi e Roberts, 2013; Brasil, 2021).

Figura 37 - Monitoramento de nitrato do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.

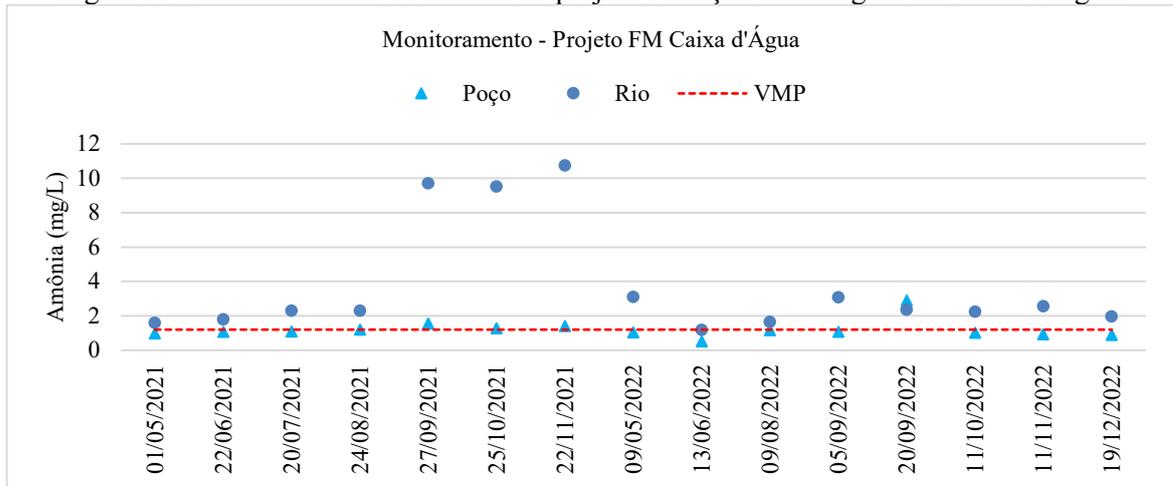


Fonte: Autor (2023).

Na Figura 38 observam-se as concentrações de amônia no rio e no poço. As maiores concentrações ocorrem no rio, variando entre 1,18 e 10,75 mg/L, e valor médio de 3,74 mg/L. Conforme a Portaria GM/MS N° 888 (Brasil, 2021), o VMP para o consumo humano é de 1,20 mg/L. No poço de produção, os valores variaram entre 0,51 e 2,88 mg/L, com valor médio de 1,20 mg/L.

Os resultados do poço mostraram que 66,66% das análises realizadas apresentaram valores abaixo do limite máximo estabelecido, e as baixas concentrações podem estar relacionadas a absorção da amônia pelo pelas partículas de solos durante o fluxo subterrâneo. A maior dispersão nos dados do rio, quando comparado ao do poço, se dá em virtude de águas superficiais estarem mais propícias a sofrer influência externa do que as águas subterrâneas.

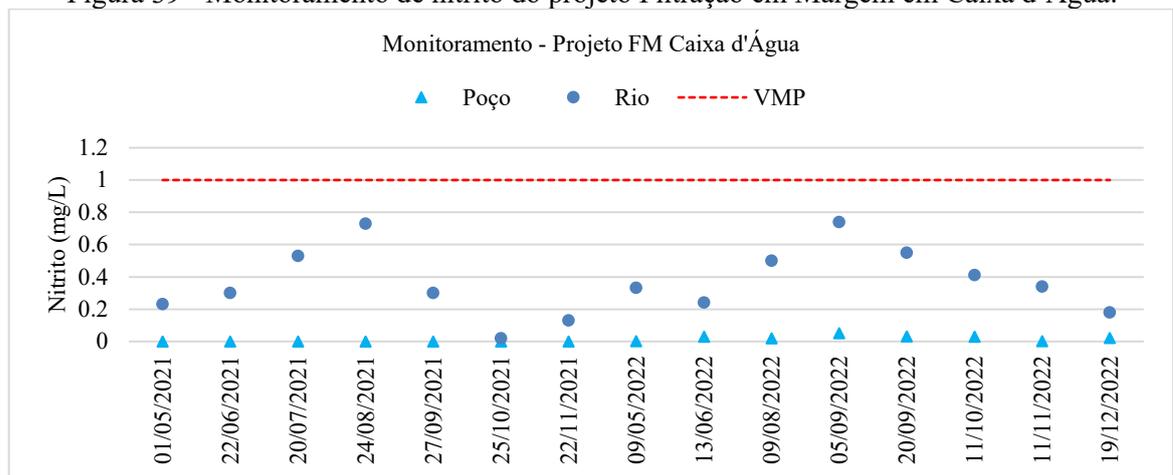
Figura 38 - Monitoramento de amônia do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 39 observam-se as variações de nitrito no rio e no poço. As concentrações de nitrito no poço apresentaram valores menores do que 0,1 mg/L, enquanto no rio os valores variaram entre 0,02 e 0,74 mg/L, com média de 0,4 mg/L. Segundo Samkumpim (2023), o nitrito é bastante instável na presença de oxigênio, e devido a isso todas as análises, tanto do rio quanto do poço, apresentaram valores abaixo do limite máximo estabelecido, que é 1,0 mg/L (Brasil,2021).

Figura 39 - Monitoramento de nitrito do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.

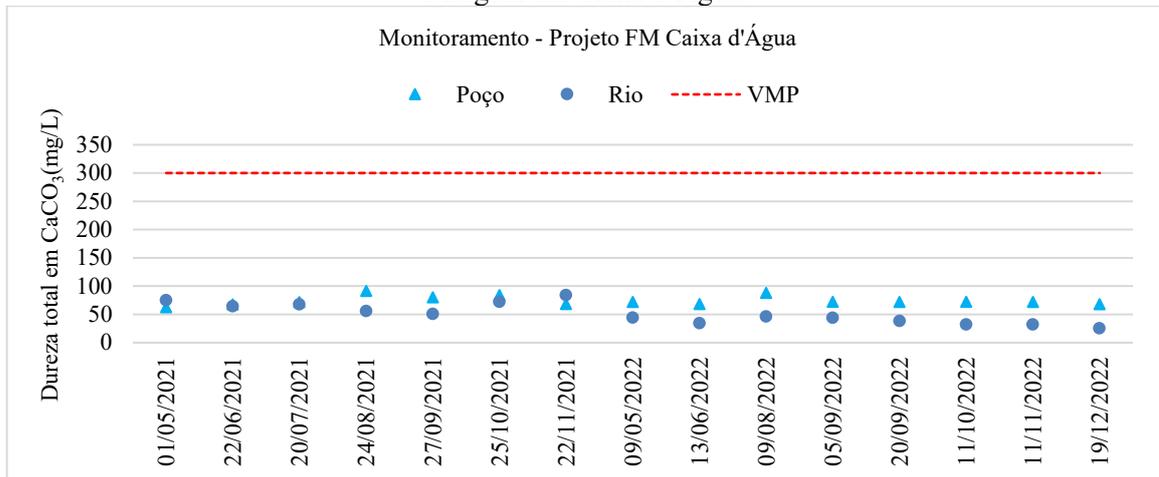


Fonte: Autor (2023).

A Figura 40 e Figura 41 apresentam respectivamente as concentrações de dureza total e cálcio no rio e no poço. A dureza da água é atribuída principalmente ao cálcio em solução e, em menor escala, ao magnésio. Normalmente, é expressa em termos de quantidade equivalente

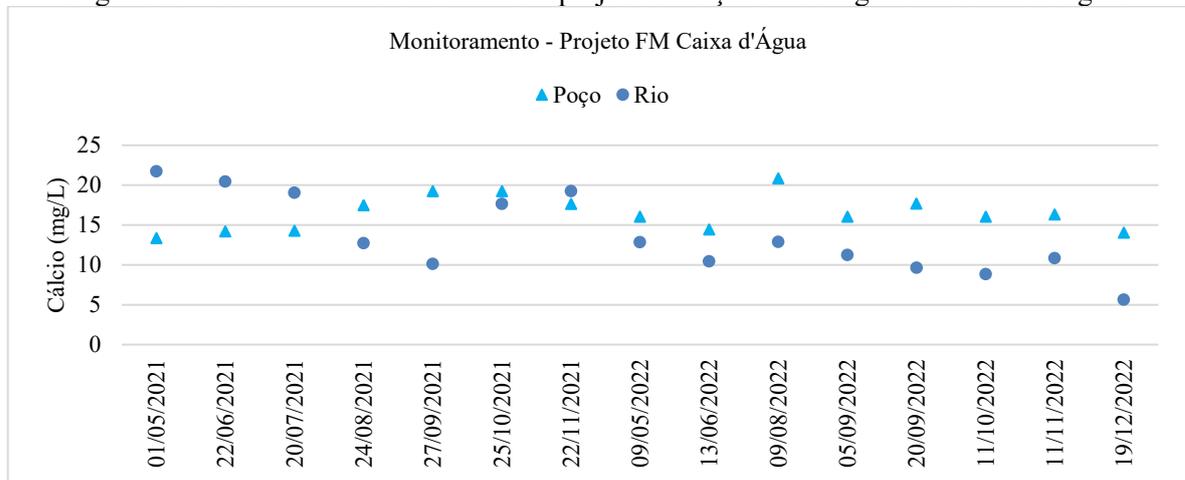
de carbonato de cálcio. Embora não represente um risco para saúde, elevadas concentrações de dureza podem afetar o gosto, e pode ser um incômodo em termos de aceitação pelo usuário. Comparando a Figura 40 e Figura 41, percebe-se a correlação entre os valores de cálcio e dureza total.

Figura 40 - Monitoramento da dureza total em CaCO_3 do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.



Fonte: Autor (2023).

Figura 41 - Monitoramento do cálcio do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.



Fonte: Autor (2023).

Em relação ao padrão de potabilidade, estabelecido pela Portaria GM/MS N° 888 do Ministério da Saúde, o valor máximo permitido de dureza total para o consumo humano é 300 mg/L (Brasil, 2021), nesse caso a variação dos níveis de dureza entre o poço de produção e o rio foram pouco relevantes, onde ambas estiveram dentro dos padrões exigidos.

A variação dos níveis de dureza total no poço foi 62,50 a 91,08 mg/L, com taxa média de 73,89 mg/L, já o rio Beberibe apresentou maiores valores, de 25,00 a 84,0 mg/L, com uma menor taxa média de 50,89 mg/L.

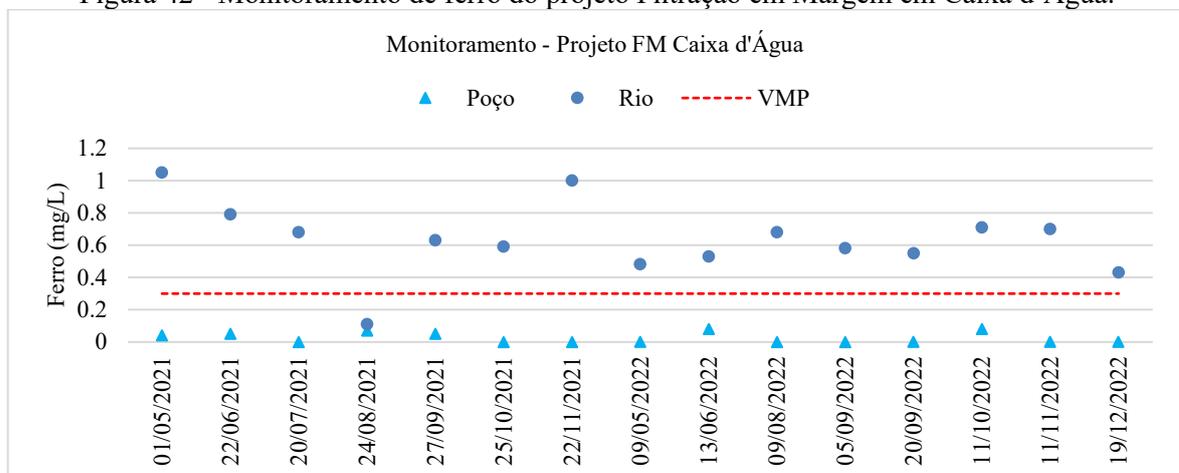
Na Figura 42 observam-se os teores de ferro no rio e no poço. O ferro é conhecido por provocar uma coloração avermelhada na água, e suas concentrações mais elevadas na água podem estar relacionadas a antigas tubulações corroídas ou ao uso de coagulantes de ferro em estações de tratamento de água.

Segundo a Portaria nº 888/2021 do MS, concentrações de ferro acima de 0,3 mg/L causam efeitos negativos na aparência e no gosto da água. Verifica-se que a concentração de ferro no rio, esteve abaixo do VMP em apenas uma análise, com valores que variaram entre 0,11 e 1,05 mg/L, e um valor médio de 0,63 mg/L.

No poço, 100% dos resultados apresentaram concentrações muito abaixo do VMP, além de terem verificado poucas oscilações em sua concentração ao longo do período analisado. O teor de ferro no poço variou entre 0,04 e 0,08 mg/L, com uma média de 0,06 mg/L.

Apesar do rio ter apresentado, em geral, valores acima do estabelecido, o poço manteve um grau de constância em seus teores de ferro ao longo da variação temporal. Na presente pesquisa, obteve-se uma redução média de 88,45% da redução do teor deste parâmetro, chegando até 96,20%. Em geral, mostra uma boa eficiência na Filtração em Margem na amortização da concentração de ferro. Estudos realizados no Brasil, também mostram uma eficiência na redução de 96% do teor de ferro (Paiva, 2009; Freitas, 2010; Paiva *et al.*, 2010; Freitas *et al.*, 2012).

Figura 42 - Monitoramento de ferro do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.



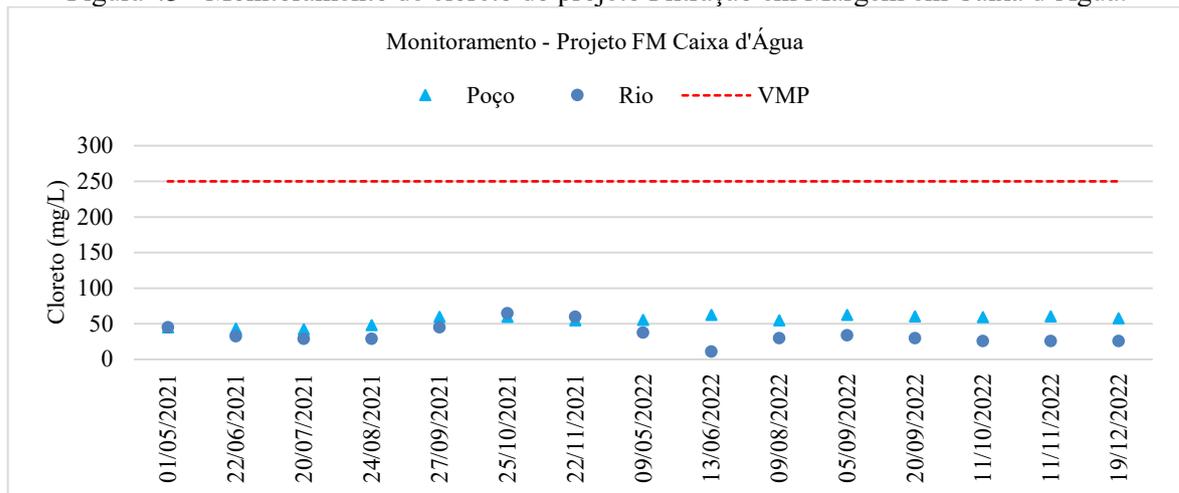
Fonte: Autor (2023).

Na Figura 43 verifica-se os teores de cloreto no rio e no poço. A presença de cloreto na água pode ter várias origens, pode-se mencionar: fontes naturais, relacionadas a formação geológica; poluição natural, em virtude da presença de sais ou solos salinos; poluição antropogênica, incluindo o sal de cozinha; e por salinização, devido a intrusão de águas salgadas.

Concentrações elevadas podem afetar a flora e fauna e, em certos contextos, a saúde humana. Dessa forma, é estabelecido um limite de 250 mg/L para a concentração de cloreto em água potável (Brasil, 2021).

Tanto a água do poço quanto a do rio apresentaram valores bem abaixo do limite máximo estabelecido. A concentração no rio variou entre 11,0 e 65,0 mg/L, com um valor médio de 35,01 mg/L. Já o poço apresentou teores levemente acima, de 42,50 a 62,50, com um valor médio de 55,05 mg/L.

Figura 43 - Monitoramento de cloreto do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.



Fonte: Autor (2023).

Os microrganismos presentes no esgoto, especialmente os parasitas, são patogênicos e têm a capacidade de provocar doenças em seres humanos e animais. Nos rios, sobretudo aqueles que atravessam áreas urbanas, a origem desses agentes patogênicos é principalmente de origem humana, e causam impacto direto nas condições de saneamento e o estado de saúde da população que dependem desses recursos hídricos (Von Sperling, 1996). Quando as águas dos rios estão contaminadas com microrganismos patogênicos, as pessoas que usam essa água para beber, cozinhar ou tomar banho correm o risco de contrair doenças transmitidas pela água, o que pode afetar a saúde da população.

A detecção de microrganismos patogênicos em amostras de água é desafiadora devido às baixas concentrações, requerendo volumes significativos de amostras para localizar esses microrganismos. Mesmo assim, existe a possibilidade de não os encontrar. As principais razões para essa dificuldade incluem: a diluição significativa do material contaminado no corpo receptor; a baixa concentração de patógenos nas fezes; e ocorrência de doenças de veiculação hídrica apenas em uma pequena parte da população. A detecção de patógenos é realizada através do uso de organismos indicadores de contaminação fecal. Embora esses organismos sejam principalmente não patogênicos, eles fornecem uma indicação confiável da presença de contaminação por fezes humanas ou de animais na água, o que está diretamente relacionado à sua capacidade de transmitir doenças.

Os principais indicadores de contaminação fecal incluem coliformes totais (CT) e coliformes fecais (CF) ou termotolerantes. Os CT, embora ainda usados como indicadores, podem estar presentes em água e solos não contaminados, o que significa que podem incluir organismos não intestinais. Por outro lado, os CF são testados a temperaturas elevadas para reduzir a presença de bactérias não fecais. Embora principalmente provenientes do trato intestinal humano e de outros animais, ainda pode haver uma pequena possibilidade de presença de bactérias de vida livre (não fecais). No entanto, essa probabilidade é muito menor em comparação com o grupo de coliformes totais. Recentemente, o termo preferido para esses indicadores tem sido "coliformes termotolerantes", pois essas bactérias resistem a temperaturas elevadas, não sendo necessariamente fecais.

A Tabela 8 apresenta o resultado das análises microbiológicas realizadas na água do poço e do rio. A respeito do grupo coliformes, a Portaria GM/MS Nº 888 do Ministério da Saúde exige que a água esteja ausente desse grupo para que seja própria para consumo humano. Nesse contexto, além da água do rio apresentar grandes concentrações de coliformes totais e termotolerantes, existem fossas negras próximas ao poço que atuam como fonte de contaminação do aquífero. No entanto, na água do poço de produção não foi detectada a presença do grupo coliforme, podendo afirmar que, durante o fluxo subterrâneo, a técnica atua como uma barreira microbiológica para o grupo, impedindo sua chegada ao poço de produção.

Tabela 8 - Resultado das análises microbiológicas do projeto Filtração em Margem em Caixa d'Água.

Data	Rio Beberibe		Poço	
	Coliformes totais	Coliformes termotolerantes	Coliformes totais	Coliformes termotolerantes
	NMP/100 mL	NMP/100 mL	NMP/100 mL	NMP/100 mL
01/05/2021	> 1600	> 1600	Ausente	Ausente
22/06/2021	2,4.10 ⁷	2,4.10 ⁷	Ausente	Ausente
20/07/2021	2,8.10 ⁷	2,8.10 ⁷	Ausente	Ausente
24/08/2021	6,3.10 ⁴	4,6.10 ⁴	Ausente	Ausente
27/09/2021	1,6.10 ⁸	1,6.10 ⁸	Ausente	Ausente
25/10/2021	3,5.10 ⁹	2,5.10 ⁹	Ausente	Ausente
22/11/2021	1,6.10 ¹⁰	2,8.10 ⁹	Ausente	Ausente
09/05/2022	1,6.10 ⁸	1,6.10 ⁸	Ausente	Ausente
13/06/2022	1,1.10 ⁷	7,0.10 ⁵	Ausente	Ausente
09/08/2022	2,8.10 ⁷	2,8.10 ⁷	Ausente	Ausente
05/09/2022	1,4.10 ⁹	2,1.10 ⁸	Ausente	Ausente
11/10/2022	1,7.10 ⁶	1,7.10 ⁶	Ausente	Ausente
11/11/2022	1,7.10 ⁶	1,7.10 ⁶	Ausente	Ausente
19/12/2022	1,4.10 ⁷	1,4.10 ⁷	Ausente	Ausente

Fonte: Autor (2023).

Estudos realizados no Brasil, evidenciam a eficiência da FM na remoção do grupo coliforme (Paiva *et al.*, 2010; Freitas, 2010; Freitas *et al.*, 2012; Demétrio *et al.*, 2013; Albuquerque, 2015; Freitas *et al.*, 2017), além de estudos fora do Brasil, que também apresentaram resultados satisfatórios (Dash *et al.*, 2010; Hamdan *et al.*, 2013; Abdalla, Abbasi-Moghadam, 2021). A Tabela 9 apresenta um resumo do monitoramento qualitativo, com as variações das concentrações, média, desvio padrão, valor máximo permitido e a eficiência da Filtração em Margem.

Tabela 9 - Resumos dos resultados obtidos no monitoramento qualitativo.

Parâmetros	Variações nas concentrações		Concentrações médias e desvio padrão		VMP	Resultado das Filtração em Margem
	RIO	POÇO	RIO	POÇO		
	Mín-Max	Mín-Max	Média ± Desvio Padrão	Média ± Desvio Padrão	-	
Ph	6,70 - 8,08	5,79 - 7,10	7,12 ± 0,32	6,12 ± 0,33	6 - 9,5	Não significativo
Turbidez (uT)	3,59 - 139,00	0,40 - 1,28	24,27 ± 32,52	0,73 ± 0,26	5	Reduziu significativamente
Cor Aparente (uH)	17,60 - 72,70	0,40 - 41,00	32,69 ± 14,09	5,69 ± 11,82	15	Reduziu significativamente
Condutividade Elétrica (Us/cm)	156,00 - 484,00	301,00 - 367,00	258,99 ± 98,46	335,97 ± 19,22	-	Não significativo
Amônia (mg/L)	1,18 - 10,75	0,51 - 2,88	3,74 ± 3,17	1,20 ± 0,51	1,2	Reduziu significativamente
Nitrito (mg/L)	0,02 - 0,74	0,02 - 0,05	0,37 ± 0,20	0,03 ± 0,01	1	Reduziu significativamente
Nitrato (mg/L)	0,13 - 10,44	2,63 - 13,40	2,68 ± 2,41	9,38 ± 3,21	10	Aumentou significativamente
Dureza total (mg/L)	25,00 - 84,00	62,50 - 91,08	50,89 ± 17,40	73,89 ± 7,89	300	Aumentou não significativamente
Ferro (mg/L)	0,11 - 1,05	0,04 - 0,08	0,63 ± 0,22	0,06 ± 0,02	0,3	Reduziu significativamente
Cloreto (mg/L)	11,00 - 65,00	42,50 - 62,50	35,01 ± 13,39	55,05 ± 6,74	250	Aumentou não significativamente
Coliformes Totais (NMP/100mL)	> 1600 - >1,6.10 ¹⁰	Ausente	-	-	Ausente	Eliminou
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	< 1600 - > 2,8.10 ⁹	Ausente	-	-	Ausente	Eliminou

Fonte: Autor (2023).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A caracterização da zona hiporreica no Ponto 03 revelou que os sedimentos são predominantemente arenosos, especificamente classificados como areia média. Esses sedimentos são homogêneos, o que significa que possuem uma uniformidade notável, com um diâmetro médio variando de 0,469 mm a 0,483 mm e porcentagens semelhantes nos períodos analisados. Quanto à matéria orgânica total e ao carbonato de cálcio, apesar da expectativa de valores elevados devido às atividades humanas na área, foram registradas concentrações baixas. Essas baixas concentrações podem estar relacionadas a uma dragagem anterior à coleta, que removeu a camada superficial onde esses parâmetros se concentram.

Em geral, a variação temporal teve pouco impacto nas características dos sedimentos, e a área de transição entre o rio e o aquífero apresenta um cenário favorável para uma maior recarga do aquífero, com baixos indícios de colmatção e granulometria propícia para uma interação mais eficaz entre o rio e o aquífero. No entanto, a redução dos finos pode comprometer a capacidade natural de atenuação de poluentes.

A medição da diferença de carga hidráulica desempenhou um papel crucial na compreensão da dinâmica do fluxo vertical no local estudado. Observou-se que o rio, especialmente durante períodos secos, age predominantemente como uma fonte de recarga para o aquífero, funcionando como influente. Contudo, no inverno, há uma maior tendência de o rio atuar como efluente, sendo abastecido pelo aquífero.

Os resultados do monitoramento piezométrico dos poços de produção, observação e do nível da água do rio Beberibe confirmam a existência da conexão hidráulica e demonstram uma importante interação entre o rio e o aquífero. Adicionalmente, ao correlacionar esses dados com as precipitações, fica evidente como a sazonalidade tem impacto nas variações dos níveis.

Sobre a análise qualitativa, os dados de coliformes totais e termotolerantes revelam que a contaminação não alcançou o poço de produção. Quanto à turbidez, observou-se uma redução significativa, com valores próximos a zero, devido ao processo de filtração ao longo do fluxo subterrâneo, assim como em relação à cor aparente.

No que diz respeito ao metal ferro, foram registrados valores acima do permitido no rio, porém, esses valores foram atenuados ao longo da infiltração para o poço, resultando em um

substancial redução na concentração, com valores abaixo do limite máximo permitido. No entanto, a condutividade elétrica não apresentou redução, uma vez que os sais não são removidos no meio poroso.

No contexto dos compostos nitrogenados, apesar de a amônia e o nitrito terem apresentado resultados positivos, as concentrações de nitrato, em geral, estiveram acima dos níveis observados no rio e dos valores máximos permitidos. Isso se deveu a contaminações pontuais provenientes de fossas negras próximas ao poço.

As análises bacteriológicas (coliformes totais e termotolerantes) apresentaram resultados insatisfatórios para a água do rio Beberibe, contaminação fecal em 100% das amostras encontradas. No Poço de Produção, não foi detectada a presença de coliformes totais e termotolerantes. Isso demonstra que a FM é eficiente na remoção do grupo de coliformes, pois conseguiu eliminar todos eles, apesar das fontes pontuais de contaminação, como as fossas negras, estando localizadas muito próximas do Poço de Produção.

Portanto, é importante destacar que o projeto Filtração em Margem, instalado às margens do rio Beberibe, demonstrou um considerável potencial de remoção ou eliminação de poluentes. Embora a água bombeada não tenha atendido aos padrões de potabilidade devido ao nitrato, a técnica pode ser considerada, pelo menos, como uma forma de pré-tratamento.

6.2 Recomendações para pesquisas futuras

- Sugere-se a continuação das atividades realizadas na presente pesquisa, como forma de observar as possíveis variações sazonais;
- Sugere a instalação de bombas nos poços de produção que não estão operando até a presente pesquisa;
- Recomenda-se a avaliação do projeto piloto de Filtração em Margem instalado no rio Beberibe na remoção de contaminantes emergentes, como foco especial na eficácia da remoção de fármacos, uma vez que esse tipo de poluente vem trazendo desafios para as companhias de abastecimento de água;
- Recomenda-se a realização de um estudo da qualidade das águas subterrâneas nas proximidades da Estação Elevatória de Caixa d'Água, com o propósito de estabelecer comparações com a água obtida a partir do poço de produção;
- Recomenda-se a expansão das áreas experimentais em diferentes regiões do estado de Pernambuco, com o objetivo de aprofundar o entendimento das particularidades, restrições e eficácia da tecnologia de Filtração em Margem.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, F.; SHAMRUKH, M. Quantification of River Nile/Quaternary aquifer exchanges via riverbank filtration by hydrochemical and biological indicators, Assiut, Egypt. **Journal of Earth System Science**, v. 125, 1697-1711, 2016.
- ABDELRAHY, A.; SHARMA, S.; SEFELNASR, A.; ABOGBAL, A.; KENNEDY, M. Investigating the impact of temperature and organic matter on the removal of selected organic micropollutants during bank filtration: A batch study. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 1, p.102904-102912, 2019.
- ABD-ELATY, I.; KURIQI, A.; GANAYEM, H. M.; AHMED, A.; SALEH, O. K.; GARROTE, L. Assessment of riverbank filtration performance for climatic change and a growing population. **Front. Environ. Sci.** V. 11, 1-14,2023.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro. 18p, 1995.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR15495-1/07 - Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados**. Parte 1: Projeto e construção, 2007.
- ADIMALLA, N.; QIAN, H.. Introductory Editorial Special Issue:“Groundwater quality and contamination and the application of GIS”. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 18, p. 420, 2020.
- AHMED, A. K. A.; MARHABA, T. F. Review on river bank filtration as an in situ water treatment process. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 2, p.349-359, 2016.
- APAC - Agência Pernambucana de Água e Clima. Monitoramento Pluviométrico. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/monitoramento,2023>.
- APHA - American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23th ed. Washington: **American Public Health Association**, 2017.
- ARANTES, E.J.; CHAUDHRY, F.H.; MARCUSSI, F.F.N. Caracterização da integração entre rio e aquífero com o uso de infiltrômetros. **Águas Subterrâneas**, v.20, n.2, p.97-108, 2006.
- BARA, M. K.; VEKISKOVA, Y.; DULOVICOVA, R.; SCHUGERL, R.; Influence of surface water level fluctuation and riverbed sediment deposits on groundwater regime. **Journal of Hydrology** 62. P.177-185. 2014.
- BARCELLOS, R.L.; FLORES-MONTES, M.J.; ALVES, T.M.F.; CAMARGO, P.B. Modern sedimentar processes and seasonal variations of organic matter in na urban tropical estuary, Jaboatão River (PE), Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 75, p. 38-42, 2016.

BORBA, A.L.S.; COSTA FILHO, W.D, COSTA, M.R. **Diagnóstico do aquífero Beberibe – Estados de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte**. X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2010.

BOUWER, H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. **Journal of Hydrogeology**. v.10, p.121-142, 2002.

BRAGA, E.A.S.; ROMERO, F. B.; AQUINO, M. D.; MENDES, L. S. A. S. Identificação do tipo de acidez responsável pela agressividade de águas subterrâneas. **Águas Subterrâneas**, v. 35, 1-7, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro, 2021. **Portaria GM/MS nº 888**, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, 29p.

BRUNKE, M.; GONSER, T. O. M. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. **Freshwater Biology**, v. 37, n. 1, p. 1-33, 1997.

BOURG, A.C.M., BERTIN, C. Seasonal and spatial trends in manganese solubility in an alluvial aquifer. *Environmental Science Technology*, v.28, n.5, p.868–876, 1994.

CABRAL, J. J. S. P.; KOIDE, S.; SIMOES, S.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Recursos Hídricos Subterrâneos. In: João Batista Dias de Paiva; Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. 1ed.Porto Alegre: ABRH, v. 1, p. 237- 277, 2001.

CAMPOS, L. P. S. **Filtração em Margem no tratamento de água: avaliação da aplicação da técnica no manancial da Lagoa do Peri, Santa Catarina, e análise prévia de viabilidade de aplicação em Rio Grande, Rio Grande do Sul**. Florianópolis, 2012, 58f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CAMPOS, H. L. **Processo hidrológico de gestão na bacia hidrográfica do Rio Beberibe (PE): uma retrospectiva**. 226f. 2003. Tese de Doutorado. Tese (Doutorado)–Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CAMPOS, H. L.; PACHECO, S. M. Uma análise histórico-geográfica da importância do rio Beberibe para o abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife. **Agua y Territorio/Water and Landscape**, n. 11, p. 34-43, 2018.

CARVALHO FILHO, J. A. **Tecnologia de filtração em margem para complementação do abastecimento público da região metropolitana do Recife-PE**. 2016. Monografia 48 (Graduação em Ciências biológicas) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. 72p.

CARVALHO FILHO, J.A. **Estudo de contaminantes emergentes e meiofauna no Rio Ipojuca no município de Caruaru**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

CARVALHO FILHO, J. A. A.; CRUZ, H. M.; FERNANDES, B. S.; MOTTERAN, F.; PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. D. S. P. Efficiency of the bank filtration technique for diclofenac removal: A review. **Environmental Pollution**, 118916, 2022.

CARVER, R.E. **Procedures in Sedimentary Petrology**. Publisher, John Wiley & Sons Canada, Limited, 1971.

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Monitoramento de Secas para o Brasil. Disponível em: <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>. Acesso em: 01 de set. 2023.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Norma 6410. Amostragem e monitoramento das águas subterrâneas – Norma CETESB, 1988.

CHEN, Xi; CHEN, Xunhong. Stream water infiltration, bank storage, and storage zone changes due to stream-stage fluctuations. **Journal of Hydrology**, v. 280, n. 1-4, p. 246-264, 2003.

CHEN, X.; SONG, J.; CHENG, C.; WANG, D.; LACKEY, S.O. A new method for mapping variability in vertical seepage flux in streambeds. **Journal of Hydrology**, 17: 519 - 525, 2003.

COSTA, M. L. M.; MEDEIROS, C. M.; LOUREIRO, L. C. B.; RIBEIRO, M. M. Análise da integração das águas superficiais e subterrâneas no aparato legal de recursos hídricos do Brasil e do estado da Paraíba. In: **Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Natal, RN, 2008.

COVATTI, G.; GRISCHEK, T. Sources and behavior of ammonium during riverbank filtration. **Water Research**, v. 191, 116788, 2021.

DASH, R. R.; PRAKASH, P. B.; KUMAR, P.; MEHROTRA, I.; SANDHU, C.; GRISCHEK, T. River bank filtration in Haridwar, India: removal of turbidity, organics and bacteria. **Hydrogeology Journal**, v. 18, (4), 973,2010.

D'ALESSIO, M.; DVORAK, B.; RAY, C. Riverbank Filtration Impacts on Post Disinfection Water Quality in Small Systems—A Case Study from Auburn and Nebraska City, Nebraska. **Water**, v. 10, n. 12, p.1865-1875, 2018.

DEMÉTRIO, J.G.A.; PAIVA, A.L.R.; FREITAS, D.A.; BATISTA, A. G. S.; CABRAL, J.S.P. Características hidrogeológicas das aluviões do rio Beberibe na área da bateria de poços no bairro de Caixa d`Água, Olinda-PE. **Águas Subterrâneas**, v.27, n.3, p.111-126, 2013.

DOLE-OLIVIER, M. J. The hyporheic refuge hypothesis reconsidered: a review of hydrological aspects. **Marine and Freshwater Research** 62(11):1281-1302, 2011.

EBRAHIMI, S.; ROBERTS, D. J. Sustainable nitrate-contaminated water treatment using multi cycle ion-exchange/bioregeneration of nitrate selective resin. **Journal of Hazardous Materials**, v. 262, 539-544,2013.

ECKERT, P.; IRMSCHER, R. Over 130 years of experience with riverbank filtration in Düsseldorf, Germany. **Journal Water SRT Aqua**, v.55, p.283–291, 2006.

EMMENDOERFER, M. L. **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, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

ESQUIVEL, L.G.R. **Remoção de matéria orgânica natural e precursores de trihalometanos por filtração em margem na lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil**. Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Ambiental. Florianópolis, SC, 2012.

FEITOSA, F. A. F.; MANOEL FILHO, **Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações**. 1997.

FOLK, R.L.; WARD, W.C. River Bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedim. Petrol.**, v. 27, n. 1, p. 3-26, 1957.

FREITAS, D. A. **O emprego da técnica de Filtração em Margem para tratamento de água no rio Beberibe, região metropolitana do Recife**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. 148p.

FREITAS, D. A.; CABRAL, J.J.S.P.; PAIVA, A.L.R.; MOLICA, R.J.R. Application of bank filtration technology for water quality improvement in a warm climate: a case study at Beberibe River in Brazil. **Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA**, v. 61, n. 5, p. 319-330, 2012.

FREITAS, D. A. **Uso da técnica de filtração em margem para remoção de cryptosporidium spp. e giardia spp. e outros micro-organismos patogênicos no rio Beberibe – Pernambuco**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014. 197p.

FREITAS, D. A.; CABRAL, J. J. S. P.; ROCHA, F. J. S.; PAIVA, A. L. R.; SENS, M. L.; VERAS, T. B. Cryptosporidium spp. and Giardia spp. removal by bank filtration at Beberibe River, Brazil. **River Research and Applications**, v. 33, n. 7, p. 1079-1087, 2017.

FREITAS, J. B. A. **Caracterização da zona hiporreica no trecho médio do rio Beberibe considerando aspectos biológicos e sedimentológicos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. 146p.

FREITAS, J. B. A.; CABRAL, J. J. D. S. P.; PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. N.; NASCIMENTO SILVA, N. B. A técnica de Filtração em Margem: histórico de aplicação no mundo e experiências brasileiras. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 4, n.1,2018.

FREITAS, J. B. A.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; VERAS, T. B.; BARCELLOS, R. L.; SANTOS, P. J. P.; GOMES JUNIOR, E. L. Evidence of protective effects on aquifer recharge from polluted tropical rivers: An analysis of hyporheic meiofauna and sediments. **River Research and Applications**, v. 38, n. 2, p. 345-357, 2022.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Manual de operação e manutenção de sistemas de tratamento de água por filtração em margem**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018. 57 p.

GHODEIF, K; GRISCHEK T; BARTAK, R; WAHAAB, R; HERLITZIUS, J. Potential of river bank filtration (RBF) in Egypt. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 8, p. 671, 2016.

GILDEFALK, M; MASSMANN, G.; NÜTZMANN, G.; HILT, S. Potential impacts of induced bank filtration on surface water quality: a conceptual framework for future research. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1240, 2018.

GLORIAN, H.; BÖRNICK, H.; SANDHU, C.; GRISCHEK, T. Water Quality Monitoring in Northern India for an Evaluation of the Efficiency of Bank Filtration Sites. **Water**, v. 10, n. 12, p.1804-1819, 2018.

GRISCHEK, T., SCHOENHEINZ, D., SYHRE, C. & SAUPE, K. Impact of decreasing water demand on bank filtration in Saxony, Germany. **Drink Water Engineering Science** 3, 11–20, 2010.

GRISCHEK, T.; BARTAK, R. Riverbed Clogging and Sustainability of Riverbank Filtration. **Water**, v.8, p.604; doi:10.3390. 2016.

GUEDES, T. L.; SOUZA, F. H.; GHISI, D. B.; PEREZ, A. B. A.; DALSSASSO, R. L.; SENS, M. L. Aplicação da filtração em margem de rio como alternativa de tratamento de água para comunidades isoladas. **Revista DAE**, v. 67, n. 215, p.84-94, 2017.

HAMANN, E.; STUYFZAND, P. J.; GRESKOWIAK, J.; TIMMER, H.; MASSMANN, G. The fate of organic micropollutants during long-term/long-distance river bank filtration. **Science of the Total Environment**, v. 545-546, p.629-640, 2016.

HAMDAN, A. M.; SENSOY, M. M.; MANSOUR, M. S. Evaluating the effectiveness of bank infiltration process in new Aswan City, Egypt. **Arabian Journal of Geosciences**, v.6, 4155 – 4165, 2013.

HANDL, S.; KUTLUCINAR, K. G.; ALLABASHI, R.; TROYER, C.; MAYR, E.; LANGERGRABER, G.; HANN, S.; PERFLE, R. Importance of hydraulic travel time for the evaluation of organic compounds removal in bank filtration. **Chemosphere**, v. 317, 137852, 2023.

HELLER, L.; PÁDUA, V.L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 859 p.

HU, B; TENG, Y; ZHAI, Y; ZUO, R; LI, J; CHEN, H. Riverbank filtration in China: A review and perspective. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 914-927, 2016.

HUANG, X.; ANDREWS, C. B.; J. YAO, Y.; LIU, C.; TYLER S.W.; SELKER, J.S; ZHENG, C.; Assimilation of temperature and hydraulic gradients for quantifying the spatial variability of streambed hydraulics. **Water Resources Research**, [s.l.], v. 52, n. 8, p.6419-6439, ago. 2016. Wiley-Blackwell.

HUBBS, S.A. Evaluating streambed forces impacting the capacity of river bed filtration systems., in **Riverbank Filtration Hydrology. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences**, HUBBS, S.A., Editor 2006, Springer, Dordrecht.

HUBBS, S.A. **Riverbank Filtration Hydrology**, in: Stuyfzand P.J., Juhász-Holterman M.H.A., Lange W.J. (Eds), *Riverbank Filtration in the Netherlands: Well Fields, Clogging and Geochemical Reactions*. Hubbs S.A. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol 60. Springer, Dordrecht, 119-153,2006.

HUNT, H. American Experience in Installing Horizontal Collector Wells., in **Riverbank Filtration: Improving Source-Water Quality**. Water Science and Technology Library, 2003.

HUNT, H.; SCHUBERT, J.; RAY, C. Riverbank Filtration – Improving Source-Water Quality. Chapter Conceptual Design of Riverbank Filtration Systems. Kluwer Academic Publishers. California, USA. 2002.

HISCOCK, K. M.; GRISCHEK, T. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. **Journal of Hydrology**, v. 3, n. 4, p.139-144, 2002.

JEKEL, M.; HEINZMANN, B. The Research Project **Natural and Artificial Systems for Recharge and Infiltration (NASRI), its Relation to the Specific Water Management Challenges of Berlin and the International Relevance**. Conference Wasser Berlin. KompetenzZentrum Wasser Berlin. p.10, 2003.

KARAKURT, S.; SCHMID, L.; HÜBNER, U.; DREWES, J. E. Dynamics of wastewater effluent contributions in streams and impacts on drinking water supply via riverbank filtration in Germany - A national reconnaissance. **Environmental Science & Technology**, v. 53, (11), 6154-6161, 2019.

KEDZIOREK, M. A. M.; GEOFFRIAU, S.; BOURG, A. C. M. Organic Matter and Modeling Redox Reactions during River Bank Filtration in an Alluvial Aquifer of the Lot River, France. **Environmental Science Technology**, v.42, n.8, p. 2793–2798, 2008.

KIM, S. B.; CORAPCIOGLU, M. Y. Contaminant transport in riverbank filtration in the presence of dissolved organic matter and bacteria: A kinetic approach. **Journal of Hydrology**, v.266, p.269–283, 2002.

KUEHN, W. e MUELLER, U.; **Riverbank filtration: an overview**. J AmWater Works Assoc, 2000. 92 (12): p. 60-69.

LAUTZ, L. K.; KRANES, N. T.; SIEGEL, D. I. Heat tracing of heterogeneous hyporheic exchange adjacent to in-stream geomorphic features. **Hydrological Processes** 24:3074-3086, 2009.

LIN, T.; Yu, H.; Wang, Q.; Hu, L. Surface water quality assessment based on the Integrated Water Quality Index in the Maozhou River basin, Guangdong, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. 10, p. 368, 2021.

LIN, L.; YANG, H.; XU, X. Effects of water pollution on human health and disease heterogeneity: a review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, p. 880246, 2022.

MAENG, S.; LEE, K. Riverbank Filtration for the Water Supply on the Nakdong River, South Korea. **Water**, v. 11, n. 1, p.129-140, 2019.

MAREFAT, V.; DUHAIME, F.; CHAPUIS, R. P. Pore pressure response to barometric pressure change in Champlain clay: Prediction of the clay elastic properties. **Engineering Geology**, [s.l.], v. 198, p.16-29, nov. 2015. Elsevier BV.

MACHELEIDT, W.; GRISCHEK, T.; NESTLER, W. New approaches for estimating streambed infiltration rates. In: HUBBS, S.A. **Riverbank Filtration Hydrology**. NATO Science Series IV; Earth and Environmental Sciences, p. 74-91, 2006.

MENDONÇA, F. e DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

MONDARDO, R.I. **Avaliação da filtração em margem como pré-tratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas**. Doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Ambiental Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC. p. 291, Florianópolis- Santa Catarina, 2009.

MUSTAFA, S., BAHAR, A., AZIZ, Z.A. e SURATMAN, S. Modelling contaminant transport for pumping wells in riverbank filtration systems. **Journal of Environmental Management**, 165: p. 159-166, 2016.

MUTITI, S.; LEVY, J. Using temperature modeling to investigate the temporal variability of riverbed hydraulic conductivity during storm events. **Journal of Hydrology**, v. 388, n. 3-4, p. 321-334, 2010.

NASCIMENTO, R. F. **Avaliação preliminar da contaminação por compostos farmacêuticos na interação Rio-aquífero**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

NAGY-KOVÁCS, Z., DAVIDESZ, J., CZIHAT-MÁRTONNÉ, K., TILL, G., FLEIT, E., GRISCHEK, T. Water Quality Changes during Riverbank Filtration in Budapest, Hungary. **Water**, v. 11, n. 2, p.302-316, 2019.

NOH, J. H.; SO, S. H.; PARK, J. W.; KIM, S. Y.; SONG, K. G.; CHOI, J.; KIM, G. B.; SON, H.; KIM, H.; MAENG, S. K. An Assessment of the Effectiveness of Riverbank Filtration in a Sewage Plant Effluent-Impacted River Using a Full-Scale Horizontal Well. **Water**, v. 14, n. 12, p. 1873, 2022.

ONOHUEAN, H.; NWODO, U. U. Demographic dynamics of waterborne disease and perceived associated WASH factors in Bushenyi and Sheema districts of South-Western Uganda. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 7, p. 864, 2023.

PAIVA, A. L. R. **O processo de Filtração em Margem e um estudo de caso no rio Beberibe**. 2009. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; DEMÉTRIO, J. G. A.; SOBRAL, M. C. M. S. Filtração em margem para indução de recarga e melhoria da qualidade de água – estudo de caso: Rio Beberibe. **Águas Subterrâneas**, v. 24, n. 1, p.103-114, 2010.

PHOLKERN, K; SRISUK, K; GRISCHEK, T; SOARES, M. Riverbed clogging experiments at potential river bank filtration sites along the Ping River, Chiang Mai, Thailand. **Environmental Earth Sciences**, 73: p. 7699-7709,2015.

POOJITHA, S. N.; HARI PRASAD, K. S.; OJHA, C. S. P. Effect of clogging on riverbank filtration: An experimental analysis using ganges riverbed sediment. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 26, n. 2, p. 04021065, 2022.

RABELO, L. **Estudos preliminares para implantação da filtração em margem na Lagoa do Peri como pré-tratamento de água para remoção de fitoplâncton**. Mestrado, Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. p. 152, Florianópolis-Santa Catarina, 2006.

RAY, C.; MELIN, G.; LINSKY, R. B. **Riverbank Filtration: improving source-water quality**. Kluwer Academic Publishers. California, USA, 2002.

RAY, C.; PROMMER, H. Clogging-induced flow and chemical transport simulation. In: HUBBS, S.A. **Riverbank Filtration Hydrology**. NATO Science Series IV; Earth and Environmental Sciences 2006. pp. 74-91. 2006.

REGNERY, J.; BARRINGER, J.; WING, A. D.; HOPPE-JONES, C.; TEERLINK, J.; DREWES, J. E. Start-up performance of a full-scale riverbank filtration site regarding removal of DOC, nutrients, and trace organic chemicals. **Chemosphere**, v. 127, p.136-142, 2015.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria. 2006.

ROCHA, S.F. **Implantação de um sistema de filtração em margem e avaliação hidrogeológica da interação Lago-Aquífero**. Doutorado, Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa. p. 130, Viçosa-MG, 2015.

ROCHA, S.; MARQUES, E. Caracterização hidrogeológica de um sistema de filtração em margem de lago. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v.38, (1), 133-141,2016.

ROCHA, S.F; MARQUES, E.G. Three-dimensional modeling of steady-state flow in Lake bank filtration – Brazil. **Water Science and Technology: Water Supply**, 19: p. ws2018052,2018.

ROMERO, L. G.; PIZZOLATTI, B. S.; SOARES, M. B. D.; MICHELAN, D. C. D. G. S.; SENS, M. L. Bank filtration: Application in rural areas. Case studies in Santa Catarina, Brazil. In: **21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and**

Environment Conference Proceedings, 21-24 February 2010, Universidad EARTH, Costa Rica. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 1,2010.

ROMERO-ESQUIVEL, L. G.; GRISCHEK, T.; PIZZOLATTI, B. S.; MONDARDO, R. I.; SENS, M. L. Bank filtration in a coastal lake in South Brazil: water quality, natural organic matter (NOM) and redox conditions study. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, 2017.

ROY, P. D.; SELVA, S.; Gopinath, S.; LAKSHUMANAN, S.; MUTHUSANKAR, G. QUIROZ-JIMENEZ, J. MARTINEZ, O. VENKATRAMANAN, S. Hydro-geochemistry-based appraisal of summer-season groundwater from three different semi-arid basins of northeast Mexico for drinking and irrigation. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. 16, p. 529, 2021.

SAHOO, G; RAY, C; WANG, J; HUBBS, S; SONG, R; JASPERSE, J; SEYMOUR, D. Use of artificial neural networks to evaluate the effectiveness of riverbank filtration. **Water Research**, v. 39, n. 12, p.2505-2516, 2005.

SAKATA, Y.; BARAN, G. SUZUKI, T. CHIKITA, K. Estimate of river seepage by conditioning downward groundwater flow in the Toyohira River alluvial fan, Japan. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 7, p. 1280-1290, 2016.

SANDHU, C.; GRISCHEK, T.; BÖRNICK, H.; FELLER, J.; SHARMA, S. K. A Water Quality Appraisal of Some Existing and Potential Riverbank Filtration Sites in India. **Water**, v. 11, n. 2, p.215-232, 2019.

SANTOS, L. L.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; ZUCCHI, M. R. Utilização de isótopos estáveis para análise da interação da água superficial e água subterrânea num estudo de filtração em margens. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 16, 2010, São Luiz. **Anais [...]**. São Paulo: Congresso Brasileiro de águas Subterrâneas, 2010. p. 1-14.

SANTOS, L.L.; CABRAL, J.S.P.; CIRILO, J.A.; FREITAS, D.A.; SENS, M.L.; ARAGÃO, R.; BARROS, T.H.S. Aplicação da tecnologia de filtração em margem para população difusa no Semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, (4), 49-58, 2014.

SANTOS, L. L.; CABRAL, J. J. S. P; MELO, R. T.; MOLICA, R. J. R; BARROS, T. H. S. Aplicação da Técnica de Filtração em Margens em um Reservatório Eutrofizado no Semi-Árido Nordeste. In: XIV World Water Congress. Congresso Internacional de Recursos Hídricos. **Anais [...]**. Porto de Galinhas-PE, 2011.

SANTOS, L.L. **Filtração em margem para remoção de cianobactérias e contaminantes físico-químicos em um reservatório de abastecimento público no semiárido pernambucano.** Universidade Federal de Pernambuco, Doutorado em Engenharia Civil – Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Tese de Doutorado. Recife – PE, 2012.

SCHIJVEN, J. F.; BERGER, P.; MIETTINEN. I. Removal of Pathogens, Surrogates, Indicators, and Toxins Using Riverbank Filtration In: **Riverbank Filtration Improving Source-Water Quality**. v. 43. p. 73-116, 2003.

SCHUBERT, J. Significance of Hydrologic Aspects on RBF Performance: Everything is linked to everything else. In: Riverbank Filtration Hydrology: Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Riverbank Filtration Hydrology Bratislava, Slovakia September 2004. **Anais [...]**. Springer Netherlands, p. 1-20, 2006.

SENS, M. L.; DALSSASSO, R. L.; MONDARDO, R. I.; MELO FILHO, L. C. Filtração em margem. In: Pádua, V. L. (coord). **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES- Prosab 4, p.173-236, 2006.

SHAMRUKH, M; ABDEL-WAHAB Water Pollution and Riverbank Filtration for Water Supply Along River Nile, Egypt., in **Riverbank Filtration for Water Security in Desert Countries** 2011, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. CAP. 2.

SHAMRUKH, M.; ABDEL-WAHAB, A. Riverbank filtration for sustainable water supply: application to a large-scale facility on the Nile River. **Technologies and Environmental Policy**, 2008. 10: p. 351-358.

SHARMA, B.; GRISCHEK, T.; KIMOTHI, P.C. A sustainable solution for safe drinking water through bank filtration technology in Uttarakhand, India. **Current Science**, v. 107, n. 7, p.1118-1124, 2014.

SHARMA, M.; VERMA, S.; SHARMA, P. Behavioural and genotoxic effects of paracetamol after subchronic exposure to *Cyprinus carpio*. **Journal Of Entomology and Zoology Studies**, v. 7, n. 3, p. 22-25, 2019.

SHEPARD, F.P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios, **Journal of Sedim. Petr.**, v. 24, n. 3, p. 151-158, 1954.

SHRIKOTI, A; SHARMA, M. P. Comparison of River Bank Filtration with other filtration technique at Haridwar city. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 6, n. 6, p.2576-2581, 2019.

SILVA, F. C. **Análise integrada de uso de água superficial e subterrânea em macroescala numa bacia hidrográfica: o caso do alto rio Paranaíba**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre – RS, 2007.

SILVA, N. B. N. **Análise do fluxo vertical na zona hiporreica de um trecho dos rios Beberibe e Capibaribe**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso.

SILVA, R. A.; SANTOS, R. C.; FERREIRA, L. O. Avaliação da concentração de nitrato em águas subterrâneas de poços das regiões de Assis e Marília, São Paulo. **Vigilância Sanitária em Debate**, v. 7, 102-106,2019.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. **Hydrogeologic J.v.** 10, p. 52-67. 2002.

SOARES, M. **The Influence of High Infiltration Rates, Suspended Sediment Concentration and Sediment Grain Size on River and Lake Bed Clogging**. Technischen Universität Berlin, Doutorado em Engenharia. Tese de Doutorado. Berlin, 2015.

SPRENGER, C.; LOREZEN, G.; HULSHOFF, I. GRUTZMACHER, G.; RONGHANG, M.; PEKDEGER, A. Vulnerability of bank filtration systems to climate change. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 4, p. 655-663, 2011.

STEWARTSON, M.J. DATRY, T.; LAMOUREUX N.; PELLA H.; THOMMERET N.; VALETTE L.; GRANT S.B; Variation in reach-scale hydraulic conductivity of streambeds. **Geomorphology**, [s.l.], v. 259, p.70-80, abr. 2016. Elsevier BV.

STUYFZAND, P.J., JUHASZ-HOLTERMAN, M.H.A. e DE LANGE, W.J. Riverbank filtration in the Netherlands: Well fields, clogging and geochemical reactions., in **Riverbank Filtration Hydrology**, HUBBS, S.A., Editor 2006, NATO Science Series IV; Earth and Environmental Sciences.

SAMKUMPIM, T.; ALAHMAD, W.; TABINI, H.; VARANUSUPAKUL, P.; KRAIYA, C. Application of oxygen scavengers in gel electromembrane extraction: A green methodology for simultaneous determination of nitrate and nitrite in sausage samples. **Food Chemistry**, v. 422, p. 136190, 2023.

TABOR, R.; ALMHAWISH, N.; ALADHAN, I.; TARNAS, M.; SULLIVAN, R.; KARAH, N.; ZEITOUN, M.; RATNAYAKE, R.; ABBARA, A. Disruption to water supply and waterborne communicable diseases in northeast Syria: a spatiotemporal analysis. **Conflict and Health**, 2023

TYSON, R.V. Sedimentary Organic Matter. London, **Chapman & Hall**. 589p. 1995.

TUM, S.; MATSUMOTO, S.; NISHIKATA, M.; YASUTAKA, T. Assessment of seasonal changes in groundwater quality of waste rock dump in temperate continental climate, northern Japan. **Chemosphere**, v. 327, p. 138482, 2023.

UNIYAL, D. P; BARI, S. K; ASWAL, J. S; DOBHAL, R; POKHRIYAL, A; KAUSHIK P. K. River bank filtration: an innovative solution for safe drinking water. **Everyman's Science**, Kolkata, v. 53, n. 2, p.70-76, 2018.

VAN DRIEZUM, I. H.; DERX, J.; OUDEGA, T. J.; ZESSNER, M.; NAUS, F. L.; SARACEVIC, E.; KIRSCHNER, A. K. T.; SOMMER, R.; FARNLEITNER, A. H.; BLASCHKE, A. P. Spatiotemporal resolved sampling for the interpretation of micropollutant removal during riverbank filtration. **Science of the Total Environment**, v. 649, p.212-223, 2019.

VERAS, T.B. **Análise da interação rio-aquífero na zona hiporreica para a tecnologia de Filtração em Margem**: Estudo de caso no rio Beberibe-PE. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. 118p.

VERAS, T. B.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; BARRETO, A. F. S. Interação rio-aquífero e a meiofauna do ambiente hiporreico. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 1, p. 20-35, 2017.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. Vol 1. Ed. UFMG, 2005.

Von GUNTEN, H.R., KARAMETAXAS, G., KRA“HENBU“ HL, U., KUSLYS, M., GIOVANOLI, R., HOEHN, E., KEIL, R. Seasonal biogeochemical cycles in riverborne groundwater. **Geochim. Cosmochim. Acta** v.55, p.3597–3609, 1991.

WAHAAB, R. A.; SALAH, A.; GRISCHEK, T. Water quality changes during the initial operating phase of riverbank filtration sites in Upper Egypt. **Water**, v. 11, n. 6, p. 1258-1275, 2019.

WANG, L. J., WEIWEI; C., JINXI; DOU, X.; GUO, H.; XU, S.; ZHANG, G.; WEN, M; LONGO, Y.; LI, Q. Investigating spatial variability of vertical water fluxes through the streambed in distinctive stream morphologies using temperature and head data. **Hydrogeology Journal**, v. 25, n. 5, p. 1283, 2017.

XAVIER, D.A.; BARCELLOS, R.L.; FIGUEIRA, R.C.L.; SCHETTINI, C.A.F. Evolução sedimentar do estuário do Rio Capibaribe (Recife-PE) nos últimos 200 anos e suas relações com a atividade antrópica e processo de urbanização. **Tropical Oceanography**, v. 44, n. 2, p. 74-78, 2016.

XU, S.; SONG, J.; JIANG, W.; ZHANG, G. WEN, M.; ZHANG, J.; XUE, Y.; Variability of darcian flux in the hyporheic zone at a natural Channel Bend. **Water**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.170-184, 27 fev. 2017. MDPI AG.

YAO, Y.; HUANG, X.; LIU, J.; ZHENG, C.; HE, X.; LIU, C. Spatiotemporal variation of river temperature as a predictor of groundwater/surface-water interactions in an arid watershed in China. **Hydrogeology Journal**, 23: 999–1007, 2015.