



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

NATÁLIA BATISTA DO NASCIMENTO SILVA

**ANÁLISE DO FLUXO VERTICAL NA ZONA HIPORREICA DE UM TRECHO DOS
RIOS BEBERIBE E CAPIBARIBE**

Recife

2019

NATÁLIA BATISTA DO NASCIMENTO SILVA

ANÁLISE DO FLUXO VERTICAL NA ZONA HIPORREICA DE UM TRECHO DOS
RIOS BEBERIBE E CAPIBARIBE

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva.

Coorientador: Prof. Jonathas Barbosa de Araújo Freitas.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586a Silva, Natália Batista do Nascimento.
Análise do fluxo vertical na zona hiporreica de um trecho dos rios Beberibe e Capibaribe / Natália Batista do Nascimento Silva. – 2019.
52 folhas, il., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva.
Coorientador: Prof. Jonathas Barbosa de Araújo Freitas.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia civil. 2. Filtração em margem. 3. Interação água superficial e água subterrânea. 4. Zona hiporreica. 5. Fluxo vertical. 6. Granulometria. I. Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de (Orientador). II. Freitas, Jonathas Barbosa de Araújo (Coorientador). III. Título.

624 CDD (22. ed.)

UFPE

BCTG/2020-53



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO PARA
CONCESSÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL**

CANDIDATO: NATALIA BATISTA DO NASCIMENTO SILVA

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: PROF. DR. ANDERSON LUIZ RIBEIRO DE PAIVA

Coorientador: JONATHAS BARBOSA DE ARAÚJO FREITAS

Examinador 1: PROF^a. DR^a. SYLVANA MELO DOS SANTOS

Examinador 2: MSc. JOSÉ ADSON ANDRADE DE CARVALHO FILHO

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: ANÁLISE DO FLUXO VERTICAL NA ZONA HIPORREICA DE UM TRECHO DOS RIOS BEBERIBE E CAPIBARIBE

LOCAL: Laboratório de Hidráulica, DECIV, CTG, UFPE

DATA: 11/12/2019 **HORÁRIO DE INÍCIO:** 10:00.

Em sessão pública, após exposição de cerca de 30 minutos, o(s) candidato(s) foi (foram) arguido(s) oralmente pelos membros da banca com NOTA: _____ (deixar 'Exame Final', quando for o caso).

1) () aprovado(s) (nota $\geq 7,0$), pois foi demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema da monografia e o texto do trabalho aceito.

As revisões observadas pela banca examinadora deverão ser corrigidas e verificadas pelo orientador no prazo máximo de 30 dias (o verso da folha da ata poderá ser utilizado para pontuar revisões).

O trabalho com nota no seguinte intervalo, **$3,0 \leq \text{nota} < 7,0$** , será reapresentado, gerando-se uma nota ata; sendo o trabalho aprovado na reapresentação, o aluno será considerado **aprovado com exame final**.

2) () reprovado(s). (nota $< 3,0$)

Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da banca e pelo(s) candidato(s).

Recife, 11 de dezembro de 2019

Orientador:

Coorientador:

Avaliador 1:

Avaliador 2:

Candidato :

Coordenação do Curso de Engenharia Civil-Dcivil

Rua Acadêmico Hélio Ramos s/nº, Cidade Universitária, Recife-PE CEP: 50740-530.

Fones: (081)2126.8220/8221 Fone/fax: (081)2126.8219

AGRADECIMENTOS

A Deus pela presença em todos os momentos da minha vida e por toda força concedida para vencer as dificuldades enfrentadas durante o curso.

Aos meus pais, Maria Batista e Carlos Henrique, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda minha trajetória e por todo suporte para que eu não precisasse me preocupar com nada além da minha educação.

À minha família, o núcleo mais importante da minha vida, por sempre acreditarem em mim. Em especial à minha tia Rosemary, por todo apoio, incentivo e investimentos na minha educação.

Ao meu amor, Yann Arruda, por todo estímulo, apoio e cobrança.

Ao meu orientador, professor Anderson Paiva, pela oportunidade de trabalhar nesta pesquisa e por todo o suporte que me foi dado na vida acadêmica.

Ao meu coorientador, Jonathas Freitas, por todo auxílio e disponibilidade.

Aos meus companheiros de curso, que foram fundamentais nessa caminhada, sempre presentes, me auxiliando e contribuindo nas atividades acadêmicas. Em especial a Clayton, Gibson, Riadny e Renato pela amizade e companheirismo.

À equipe de Filtração em Margem, Hedmun Matias, Jonathas Freitas, Suelen Nascimento, Adson Carvalho e Tatiane Veras, pelo companheirismo e por toda ajuda nos trabalhos de campo.

Ao LABOGEO, pela permissão do uso das instalações e de seus equipamentos.

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

Por fim, minha gratidão a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.

RESUMO

A obtenção de água em quantidade suficiente e com a qualidade adequada para o consumo humano tem sido uma grande preocupação. Embora o Brasil seja um dos países de maior disponibilidade hídrica, a escassez de água é elevada e decorre, principalmente, da má distribuição em seu território e da contaminação desse recurso. Nesse contexto, o desenvolvimento e a necessidade de métodos alternativos de tratamento de água se tornam cada vez mais evidentes. Dentre esses métodos está a Filtração em Margem (FM), que se apresenta como pré-tratamento na produção de água potável, com baixos custos e alta eficiência. Essa tecnologia tem sido utilizada em países como Alemanha e Holanda há mais de um século. Na FM acontece uma intensa interação entre a água superficial e água subterrânea, dessa forma, torna-se imprescindível o entendimento dos processos que ocorrem nessas interligações, uma vez que a qualidade da água obtida depende principalmente das características da zona de intercâmbio rio-aquífero. Dentre os vários processos que ocorrem nesta região, a presente pesquisa teve o intuito de analisar o fluxo vertical na zona hiporreica em um trecho dos rios Beberibe e Capibaribe, em Pernambuco. Para tanto, foram realizados testes com piezômetros diferenciais nos leitos dos rios em diferentes seções e diversas campanhas para avaliar suas variações temporais e espaciais. Contudo, sabe-se que o fluxo intersticial é um produto do gradiente hidráulico e da porosidade do leito, que dependem das características granulométricas dos sedimentos. Então, neste estudo também foi verificada a distribuição granulométrica da zona hiporreica. Para ambos os rios estudados, na situação sem interferência de poços próximos, foi possível verificar a conexão entre o rio e o aquífero, ainda que mínima, onde foi observado que há variação temporal e espacial do fluxo. Quanto aos resultados dos testes granulométricos para os dois rios, o material representativo da superfície do leito apresentou homogeneização predominantemente arenosa, o que propicia uma boa interação rio-aquífero.

Palavras-chave: Filtração em margem. Interação água superficial e água subterrânea. Zona hiporreica. Fluxo vertical. Granulometria.

ABSTRACT

The sufficient quantity of adequate quality water for human consumption has been a major concern. Although Brazil is one of the countries with the highest water availability, water scarcity is high and mainly due to irregular distribution in its territory and the contamination of this resource. In this context, the need for development of alternative water treatment methods are becoming increasingly evident. Among these methods is in Bank Filtration (BF), which presents itself a, at least, a pretreatment system for the production of potable water, with low costs and high efficiency. This technology has been used for public supply in countries such as Germany and the Netherlands for over a century. In BF there is an intense interaction between surface water and groundwater, thus, it is essential the understanding of the processes that occur in these interactions, since the water quality depends mainly on the characteristics of the river-aquifer interaction layer. Among the various processes that occur in this zone, this research aimed to analyze the vertical flow in the hyporheic zone in a stretch of the Beberibe and Capibaribe rivers, in Pernambuco State.. Therefore, tests were performed with differential piezometers in the riverbeds in different ranges and several campaigns to evaluate their temporal and spatial changes. However, it is known that interstitial flow is a product of hydraulic gradient type and porosity of the bed, which depends on the grain size characteristics of the sediments. Thus, this study also verified a grain size distribution of the hyporheic zone. For both rivers studied, on the situation without interference from nearby wells, it was possible to verify the connection between the river and the aquifer, even if minimal, where it was observed that there is temporal and spatial variation of the flow. As for the grain size test results, for two rivers or material representative of the bed surface, it shows predominantly sandy homogenization, or that provides a good river-aquifer interaction.

Keywords: Riverbank filtration. Surface water and groundwater Interaction. Hyporheic zone. Vertical flow. GrainSize.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático dos processos que afetam a qualidade da água durante o processo de filtração em margem.	14
Figura 2 - Esquema zona hiporreica.	18
Figura 3 - Bacia hidrográfica do rio Beberibe.	24
Figura 4 - Área de estudo no Rio Beberibe. (A) Ponto 1; (B) Ponto 2; (C) Ponto 3.....	25
Figura 5 - Macrozonas do Rio Capibaribe.....	26
Figura 6 - Área de estudo no Rio Capibaribe.	28
Figura 7 - Leitura da carga hidráulica através de medidor de nível.	29
Figura 8 - Amostrador corer utilizado para coletar amostras para o ensaio de granulometria.	31
Figura 9 - Etapas da metodologia realizada para a determinação da distribuição granulométrica. (A) Amostras no exaustor; (B) Peneiramento úmido; (C) Pipetagem; (D) Peneiramento seco.	32
Figura 10 - Precipitação média mensal referente a 2018 e médias históricas mensais no período de 2007 a 2017 na bacia Hidrográfica do Rio Beberibe.....	33
Figura 11 - Precipitação média mensal referente a 2018 e médias históricas mensais no período de 2007 a 2017 na bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.	34
Figura 12 - Leitura da diferença da carga hidráulica para o Ponto 1.....	40
Figura 13 - Leitura da diferença da carga hidráulica para o Ponto 2.....	41
Figura 14 - Leitura da diferença da carga hidráulica para o Ponto 3.....	42
Figura 15 - Leitura da diferença da carga hidráulica para o Rio Capibaribe.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos de análise.....	26
Tabela 2 - Análise granulométrica do Ponto 1.....	35
Tabela 3 - Análise granulométrica do Ponto 2.....	36
Tabela 4 - Análise granulométrica do Ponto 3.....	37
Tabela 5 - Análise granulométrica do Rio Capibaribe.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
FM	Filtração em Margem
GL1	Grupo de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos de Pernambuco
LABOGEO	Laboratório de Oceanografia Geológica
RMR	Região Metropolitana do Recife
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
SIRH	Sistema Integrado de Recursos Hídricos e Energéticos.
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos gerais e específicos	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Técnica de Filtração em Margem.....	14
2.1.1	Panorama da Filtração em Margem	15
2.2	Interação entre a água subterrânea e superficial	16
2.2.1	Zona hiporreica	18
2.2.2	Características de solo	20
3	ÁREAS DE ESTUDO	23
3.1	Bacia hidrográfica do rio Beberibe	23
3.2	Bacia hidrográfica do rio Capibaribe	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	Avaliação do fluxo vertical de água	29
4.2	Análise granulométrica	30
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	33
5.1	Precipitação	33
5.2	Ensaio granulométrico	34
5.2.1	Rio Beberibe	34
5.2.2	Rio Capibaribe	38
5.3	Ensaio de fluxo vertical.....	39
5.3.1	Rio Beberibe	39
5.3.2	Rio Capibaribe	43
6	CONCLUSÕES.....	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que o Brasil possua cerca de 12% da disponibilidade de água doce do planeta, contando com aproximadamente 48 milhões de litros acessíveis por habitante por ano, de acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (UNESCO, 2014). Porém, a distribuição desse recurso é naturalmente desigual, de modo que as áreas menos povoadas do país concentram a maior parte hídrica. A Região Norte, por exemplo, é a que dispõe da maior fração, com aproximadamente 68% de todo o recursos hídrico disponível, contudo, representa apenas 5% da população brasileira. Enquanto as regiões Nordeste e Sudeste apresentam disponibilidades inversamente proporcionais às suas densidades demográficas.

Além da má distribuição, ainda deve-se considerar os problemas de gestão dos recursos hídricos, uma vez que a obtenção de água potável tem sido um dos principais problemas de saúde pública e ambiental. Esse fato se deve, principalmente, à crescente degradação devido ao lançamento inadequado de efluentes nos cursos d'água e à concentração dessas cargas poluidoras. Desse modo, compreende-se que a escassez não é uma questão relacionada apenas à quantidade, sendo, sobretudo, qualitativa.

O abastecimento público de água é uma preocupação crescente da humanidade, em função da escassez desse recurso e da deterioração da qualidade dos mananciais. De acordo com dados do Ministério das Cidades (SNIS, 2011), cerca de 36 milhões de brasileiros não têm acesso à água tratada. Os crescentes desmatamentos, os processos de assoreamento dos mananciais superficiais, os lançamentos de efluentes e detritos nos recursos hídricos têm contribuído para tal situação. Logo, percebe-se que são necessários cada vez mais investimentos nas estações de tratamento de água e alterações na dosagem de produtos químicos para se garantir a qualidade da água na saída das estações.

Diante desse panorama, é evidente a necessidade de métodos alternativos de tratamento de água. Em vista disso, várias pesquisas têm sido desenvolvidas objetivando a melhor eficiência e o melhor custo para disponibilização de água à população. Dentre os diversos métodos estudados encontra-se a Filtração em Margem (FM), uma tecnologia de tratamento de água que envolve processos naturais.

A FM consiste na instalação de poços de bombeamento próximos a mananciais superficiais. Através do bombeamento, cria-se artificialmente uma diferença de carga hidráulica entre o manancial e o lençol freático, onde a água do manancial é induzida a fluir através de seu leito a caminho do aquífero subjacente e em sequência aos poços de produção.

Durante esse percurso, camada sedimentar entre o manancial e o poço atua como um meio filtrante, sendo responsável por vários processos físico-químicos e biológicos que, de acordo com Jeyakumar, Parimalarenganayaki e Lakshmanan (2017), resultam na remoção de partículas suspensas, coloidais e dissolvidas, bem como na redução de bactérias, vírus, micropoluentes, compostos orgânicos e inorgânicos.

Por ser uma tecnologia de tratamento de água simples e econômica, a utilização da FM apresenta benefícios imediatos, podendo ser, no mínimo, utilizada como tratamento prévio da água para abastecimento público (RAY *et al.*, 2002). Dependendo do uso final e do grau de filtração e atenuação dos contaminantes, a água bombeada já pode ir direto para o sistema de distribuição. Sendo assim, o consumo de produtos químicos será reduzido, como também serão amenizados os custos de operação das Estações de Tratamento de Água. Esta técnica vem sendo utilizado por diversos países, principalmente na Europa, há mais de um século (GUNKEL, 2010).

Tendo em vista que nessa técnica, fundamentalmente, ocorre a interação entre o rio e seu aquífero subjacente, a compreensão das características hidrológicas e do que ocorre na interface entre as águas superficial e subterrânea é essencial. Dessa forma, este trabalho propõe-se a caracterizar fisicamente a zona hiporreica através de ensaios para identificar a dinâmica do fluxo vertical, complementadas com informações granulométricas. A área de estudo compreende o trecho médio do rio Beberibe e um trecho intermitente do rio Capibaribe, no estado de Pernambuco. A região estudada no rio Beberibe situa-se entre as cidades de Recife e Olinda, onde há um projeto-piloto de FM situado no terreno da Estação Elevatória de Caixa d'Água, pertencente à Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), no bairro de Caixa d'Água. Enquanto o trecho intermitente do rio Capibaribe, localiza-se na cidade de Santa Cruz do Capibaribe-PE, contido em uma região inserida dentro de uma macrozona identificada como Alto Capibaribe.

1.1 Objetivos gerais e específicos

O objetivo do presente trabalho é avaliar as condições físicas da interação entre água superficial e água subterrânea na zona hiporreica dos rios Beberibe e Capibaribe.

Como objetivos específicos pretendem-se:

- Caracterizar o regime pluviométrico nas áreas de estudo;

- Identificar a existência da interação entre o rio e o aquífero, através da leitura da diferença da carga hidráulica com o piezômetro diferencial, compreendendo melhor o fluxo vertical no leito e margens do rio;
- Caracterizar fisicamente os sedimentos que compõem a zona hiporreica dos rios Beberibe e Capibaribe nos pontos analisados através de ensaios granulométricos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

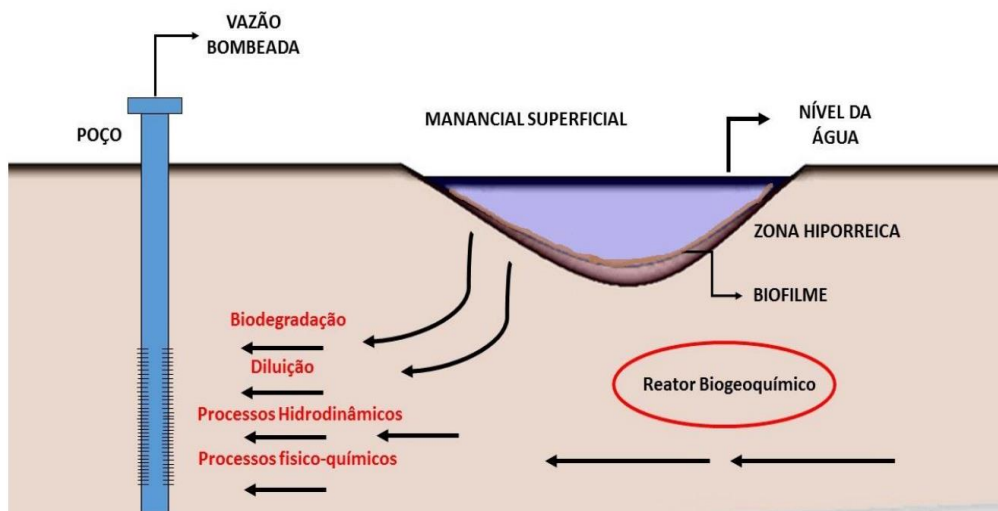
No referencial teórico será feito uma revisão sobre a técnica de Filtração em Margem e a interação entre a água subterrânea e superficial.

2.1 Técnica de Filtração em Margem

Na Filtração em Margem os poços de bombeamento, localizados próximo às margens do rio, bombeiam grandes quantidades de água e induzem à recarga do aquífero com as águas do rio. A água captada apresenta melhor qualidade do que àquela captada diretamente do rio, sendo, na verdade, uma mistura da água subterrânea originalmente presente no aquífero e de parte da água superficial infiltrada.

Paiva (2009) define a Filtração em Margem (FM) como um método de tratamento d'água alternativo eficiente e de baixo custo, onde é possível obter dois benefícios imediatos: minimização da necessidade do uso de produtos químicos nas águas superficiais para o controle de patogênicos no tratamento das águas superficiais e diminuição dos custos do tratamento. Com o emprego da FM, a água é exposta a diversos processos naturais que ocorrem durante sua percolação, Figura 1. Entre eles destacam-se: os hidrodinâmicos, que incluem a adsorção, dispersão, diluição e difusão; os mecânicos, caracterizados pela filtração e colmatação; os biológicos que compreendem a degradação de matéria orgânica pelo metabolismo dos microrganismos presentes no solo e os físico-químicos representados por precipitação, floculação, coagulação entre outras. (DONALD & GRYGASKI, 2002; TUFENKJI, RYAN e ELIMELECH, 2002; SENS *et al.*, 2006).

Figura 1 - Diagrama esquemático dos processos que afetam a qualidade da água durante o processo de filtração em margem.



Fonte: Carvalho Filho (2016).

O desempenho da FM depende do tipo de poço e da taxa de bombeamento, tempo de viagem da água poços, condições hidrogeológicas do local, qualidade da água superficial, reações biogeoquímicas nos sedimentos e aquíferos e qualidade da água subterrânea (SCHIJVEN, BERGER e MIETTINEN, 2002). Segundo Ray *et al.* (2002), a eficiência deste processo depende ainda de fatores como a interface rio-aquífero, o gradiente hidráulico, a taxa de infiltração e a condutividade hidráulica. Sendo assim, é imprescindível a investigação detalhada do local hidrogeológico e conhecimento sobre as características hidrológicas da bacia.

A técnica FM não pode ser aplicada em qualquer região, para isso, são necessárias algumas características hidrogeológicas locais visando a sua aplicação. Dessa maneira, torna-se de extrema importância analisar fatores como a sazonalidade e velocidade do fluxo do rio, estabilidade de seu canal, características das margens e leito, disponibilidade da água superficial que será induzida durante as estações seca e chuvosa, assim como avaliação do nível da qualidade da água do rio e da água subterrânea (HUNT, SCHUBERT e RAY, 2002).

O mais comum é que esses sistemas sejam instalados em aquíferos aluvionais. Devido aos processos de deposição, esses aquíferos são complexos sistemas hidrológicos que apresentam heterogeneidades verticais em suas propriedades hidráulicas. Mas por outro lado, apresentam características hidrogeológicas favoráveis, sendo hidraulicamente conectados a corpos de água de superfície e caracterizados pela facilidade de exploração da água subterrânea. Possuem ainda a capacidade de produção de água elevada e geralmente estão próximos das áreas de maior demanda por água para abastecimento (DOUSSAN *et al.*, 1997; KIM, CORAPCIOGLU e KIM, 2003; DASH *et al.*, 2008).

2.1.1 Panorama da Filtração em Margem

A Filtração em Margem tem sido utilizada no fornecimento de água para abastecimento público por mais de um século, reconhecido como um eficiente processo natural de atenuação da poluição, assegurando sustentabilidade no fornecimento de água potável (STUYFZAND, 1989; KRUHM-PIMPL, 1993; GRISCHEK *et al.*, 1997; VERSTRAETEN *et al.*, 1999). É uma técnica utilizada em várias partes do mundo principalmente na Europa, em países como Alemanha, França, Suíça, Holanda e Hungria (KIM, CORAPCIOGLU e KIM, 2003), sendo aplicada por mais de 100 anos, mais notavelmente nos rios Reno, Elbe e Danúbio (RAY, MELIN e LINSKY, 2002).

Em meados do século XIX, a técnica FM foi oficialmente adotada pela Europa no tratamento de água para abastecimento público (RAY *et al.*, 2002). A primeira utilização

reconhecida com este propósito ocorreu em 1810 no Reino Unido, pela Companhia de Água Glasgow Waterworks, que construiu um poço coletor paralelo ao rio Clyde para extração de água (FREITAS, 2010). No final do século XX cerca de 16% da água potável produzida na Alemanha era advinda desse procedimento (SCHMIDT *et al.*, 2003); em Berlim este percentual chegou a 75%, na República Eslovaca foi de 50%, na Hungria de 45% (HISCOCK & GRISCHECK, 2002) e na França de 50% (DOUSSAN *et al.*, 1997). Nos países baixos, a FM é responsável pelo fornecimento de 7% da água para abastecimento no país, o que corresponde a 80 milhões de m³/ano, advindos de 26 poços de produção (STUYFZAND, JUHÁSZ-HOLTERMAN e LANGE, 2004).

No Brasil, a utilização da técnica acontece apenas a nível de pesquisa científica. Apesar de muitas pesquisas terem sido desenvolvidas nos últimos anos, não há registros de utilização da Filtração em Margem no abastecimento público. A Universidade Federal de Santa Catarina é pioneira em pesquisas na Lagoa do Peri, em Florianópolis-SC. Paralelamente, a Universidade Federal de Pernambuco, através de seu projeto-piloto no Rio Beberibe, em Olinda-PE, também tem contribuído significativamente com o desenvolvimento destas pesquisas científicas.

2.2 Interação entre a água subterrânea e superficial

Os corpos hídricos de água superficial e subterrânea representam os principais componentes do ciclo hidrológico e suas interligações devem ser exploradas no intuito de aprimorar o gerenciamento dos recursos hídricos. De acordo com Sophocleous (2002), a interação entre elas é bem complexa e para serem bem entendidas devem ser analisadas dentro de uma perspectiva hidrogeológica e de maneira conjunta, uma vez que constituem um único recurso e fazem parte do mesmo ciclo.

Entender a dinâmica da interação entre o rio e o aquífero é essencial tanto do ponto de vista quantitativo quanto do ponto de vista qualitativo, uma vez que a alimentação de muitos rios depende das águas subterrâneas, assim como os rios são importantes para a recarga de aquíferos freáticos. Diversos fatores influenciam essa interação como, por exemplo, a cobertura vegetal, geologia, topografia e temperatura da região. Porém, de acordo com Rassam (2011), a principal interferência se dá devido à diferença da carga hidráulica. Ainda segundo Veras (2011), essa interação é governada primeiramente pelo arranjo dos corpos hídricos superficiais com relação ao sistema de fluxo subterrâneo; em seguida, pelas características geológicas de suas margens e depois pelas características climáticas da região.

A depender dessas características fisiográficas e climáticas, as águas subterrâneas podem influenciar ou serem influenciadas pelos corpos hídricos superficiais. Esse comportamento leva a categorização do rio quanto à sua relação de fluxo com seu lençol freático subjacente. Sendo assim, de acordo com Larkin e Sharp Júnior (1992), os rios podem estabelecer configurações efluentes, em que as águas subterrâneas escoam na direção do corpo d'água superficial ou influentes, no qual as águas superficiais infiltram no reservatório subterrâneo contribuindo para seu fluxo. Para a condição de rio efluente, a altura do nível do lençol freático deve ser maior que a altura da lâmina d'água do rio. Já para a configuração de rio influente, a altura do nível freático do aquífero subjacente deve ser menor que a altura de água no rio.

Segundo Reichardt (1996), dentre as variáveis que influenciam o fluxo de água, a condutividade hidráulica destaca-se, sendo um parâmetro que representa a facilidade com que o solo/rocha transmite água. A carga hidráulica é responsável pela variação da direção dos processos de trocas entre a água superficial e subterrânea, enquanto o fluxo depende da condutividade hidráulica dos sedimentos. Para a aplicação da técnica de Filtração em Margem, é de fundamental importância o conhecimento de tal parâmetro, o qual indica o tempo de recarga e permeação da água no solo.

A leitura da carga hidráulica através do piezômetro diferencial permite identificar o sentido do fluxo vertical hidráulico entre a água superficial e a subterrânea. A diferença da carga hidráulica entre o aquífero e o rio é obtida a partir da diferença entre o nível da lâmina d'água do rio e o nível da água no interior do piezômetro. Assim, podem-se obter três resultados: se o nível da água do rio estiver abaixo do nível da água verificado no piezômetro significa que o rio está sendo alimentado pelo aquífero e possui fluxo ascendente; se o nível do rio estiver acima do nível da água visualizado no piezômetro, é possível concluir que o rio está alimentando o aquífero e possui fluxo descendente; se os níveis da lâmina d'água do rio e do piezômetro estiverem no mesmo nível, caracteriza um ponto onde não existe movimento vertical da água, ou seja, fluxo nulo.

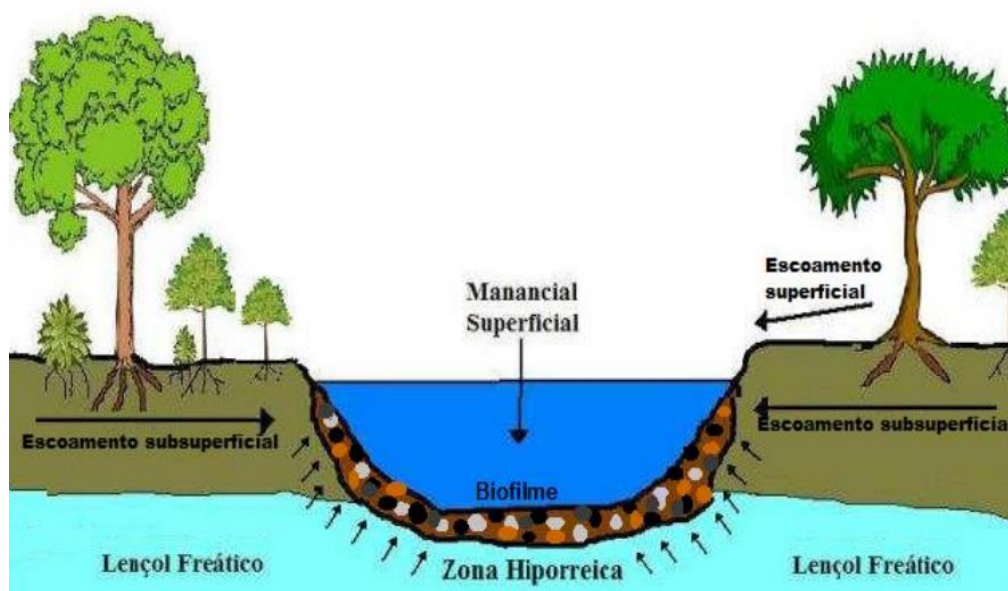
Essa classificação varia espacialmente, em que trechos diferentes podem se comportar hidraulicamente de formas diferentes; e temporalmente, no qual um mesmo trecho pode ora se comportar como influente ora como efluente. A forma de interação rio-aquífero é bastante influenciável e ocorre continuamente, podendo ser modificadas por uma série de fatores externos. A precipitação, por exemplo, a depender de sua intensidade pode causar alterações significativas na saturação do solo e conseqüentemente nas suas propriedades hidráulicas. Segundo Veras (2011), essas alterações podem promover mudanças no fluxo do escoamento

superficial ou subsuperficial. Sendo assim, em épocas de estiagem, o escoamento ocorre unicamente devido à contribuição do lençol freático, caracterizando a condição efluente. Enquanto durante o período chuvoso o rio se eleva, causando maior pressão hidráulica e com isso a infiltração de água passa a contribuir para a recarga do aquífero, provocando a mudança da condição efluente para a condição de influente. Outra variável que pode alterar a dinâmica do fluxo hídrico é o movimento e o depósito dos sedimentos do leito, caracterizando a camada de colmatação.

2.2.1 Zona hiporreica

A zona hiporreica, ilustrada na Figura 2, é definida como a zona de transição entre as águas subterrâneas e superficiais. Caracteriza-se como uma região na qual ocorre uma mistura entre as águas de ambos os ambientes, possuindo características hidrológicas, químicas e biológicas próprias e não pertencendo a nenhum dos dois meios (FREITAS, 2018). Situada subjacente ao leito do rio, ela consiste em um volume subsuperficial de sedimentos e constitui um local de grande dinâmica onde ocorrem constantes trocas de água, biota, nutrientes e matéria orgânica.

Figura 2 - Esquema zona hiporreica.



Fonte: Albuquerque (2015).

A zona hiporreica desempenha um papel fundamental na interação rio-aquífero, além de funcionar como um regulador no fluxo de água, é um filtro natural capaz de atenuar e desacelerar o fluxo de poluentes que afetam tanto o meio superficial quanto o ambiente subterrâneo (BRUNKE & GONSER, 1997). Conforme Vervier *et al.* (1992), essa região pode

atuar como filtro físico, químico e biológico, sendo capaz de imobilizar ou transformar nutrientes e contaminantes, podendo ainda, de acordo com Hancock (2002), prevenir ou reduzir sua passagem entre os meios. Esse desempenho se deve as condições espaciais existentes, onde ocorre um armazenamento temporário da água, responsável pela degradação e/ou absorção de nutrientes e poluentes antes da propagação no corpo d'água (BOULTON & FOSTER, 1998). Assim, é importante conhecer a natureza dos sedimentos envolvidos no sistema tendo em vista os aspectos de permeabilidade e condutividade hidráulica.

O fluxo hiporréico é diferenciado do fluxo de águas subterrâneas por sua natureza bidirecional, ou seja, o fluxo é realizado verticalmente ou horizontalmente, através da interface do leito em escalas relativamente pequenas. O tamanho da zona hiporreica depende da extensão e da força das interações entre água superficial e a água subterrânea, que é em função da porosidade dos sedimentos, da morfologia do leito, força da ressurgência das águas subterrâneas e do fluxo de descarga (DAHM *et al.*, 1998). Porém, seus limites exatos são difíceis de serem definidos, por variarem bastante temporal e espacialmente (BOULTON *et al.*, 1998). A profundidade da penetração dos caminhos do fluxo hiporreico no leito e o tempo de permanência do fluxo hiporreico também são diminuídos pela descarga e recarga da água subterrânea.

Os produtos e as condições locais dessa área são influenciados por características hidrodinâmicas, tamanho da partícula do substrato, permeabilidade do sedimento, condutividade hidráulica, biota residente, tempo de residência da água intersticial e características físico-químicas da água de superfície do rio e dos aquíferos adjacentes (BOULTON & FOSTER, 1998). A troca de água superficial/subterrânea, nutrientes e matéria orgânica acontecem em decorrência dos gradientes hidráulico e químico, da topografia e da litologia do sedimento (ENVIRONMENTAL AGENCY, 2005) e a eficiência de seus processos de transformação está atrelada a um grande potencial redox e à existência de matéria orgânica e atividade microbiana no ambiente hiporreico (HANNAH *et al.*, 2009).

O entendimento dos processos que ocorrem na zona hiporreica é fundamental para a apreciação, gestão e restauração de todo o ambiente do rio. Muitas questões ambientais em sistemas fluviais são influenciados pelas trocas hiporreicas, incluindo a qualidade da água, restauração dos rios, o impacto das mudanças climáticas e compreensão da ecologia dos ambientes fluviais.

2.2.2 Características de solo

O estudo do solo é fundamental para o entendimento da interação água superficial e água subterrânea, uma vez que o processo de passagem da água da superfície para o aquífero depende diretamente das características e propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos sedimentos. A zona de interação entre esses ecossistemas compreende uma região extremamente rica em relação a sua composição, sendo possível encontrar desde cascalhos e areia até solos de granulação fina, como o silte e a argila. Sendo assim, o estudo detalhado da granulometria é fundamental para um melhor entendimento da natureza das partículas, dado que a composição sedimentológica do solo interfere nos processos físicos e os hidrodinâmicos, além de estar relacionada a outras propriedades, como a porosidade e a permeabilidade.

Os solos formam-se a partir do processo de decomposição das rochas de origem e sua distribuição granulométrica pode ser característica de sedimentos de determinados ambientes deposicionais. As partículas erodidas que chegam ao rio, por exemplo, podem ser transportadas em suspensão no meio líquido, de acordo com a velocidade da corrente de água, ou pelo leito, onde além da velocidade da corrente, também sofrem resistência de atrito. Segundo Carvalho (1994), a distribuição vertical do tamanho de partículas de sedimento suspenso pode variar entre rios e entre seções transversais de um mesmo rio, porém, como regra as partículas mais finas são distribuídas uniformemente ao longo da vertical, e as partículas mais grossas estão concentradas junto ao fundo do rio. Isto ocorre porque a movimentação do sedimento depende da velocidade do fluxo, que deve ser capaz de vencer a resistência ao cisalhamento do grão, assim como das propriedades do sedimento, tais como tamanho do grão, composição e grau de arredondamento (LOPES, SILVA E DIAS, 2003; SUGUIO, 2003). De acordo com Minella & Merten (2006), o processo de degradação do solo e a transferência desses sedimentos para a bacia dependerá de alguns fatores, como a distribuição anual de chuvas, uso e manejo do solo e condições geomorfológicas do terreno. Assim, à medida que o curso d'água se encaminha para a jusante, a composição granulométrica dos sedimentos é cada vez mais fina, além de que a tendência de processos erosivos vai diminuindo e a tendência de sedimentação vai aumentando (CARVALHO, 1994). Já em trechos mais a montante, de acordo com o transporte fluvial do rio, estão estacionados os sedimentos mais grosseiros.

A importância da caracterização dos sedimentos é entender a sua influência na velocidade de infiltração da água uma vez que para a técnica de filtração em margem, a

remoção é mais eficiente quanto mais lenta for a percolação. Os diferentes tamanhos das partículas do solo definem sua textura, onde as frações texturais básicas são o silte (tamanho entre 0,002 e 0,05 mm), argila (inferior a 0,002 mm), areia (tamanho entre 0,05 e 2 mm) e cascalho (tamanho entre 2 e 20 mm).

A porosidade e permeabilidade nos solos estão diretamente ligadas a granulometria dos sedimentos, bem como a sua forma e seu arranjo. Quanto maior o diâmetro médio dos grãos, maior a quantidade de vazios e com isso, maior é a condutividade hidráulica. Sendo assim, solos arenosos são mais permeáveis quando comparados aos solos argilosos, pois possuem espaços entre as partículas que permitem a passagem da água com relativa facilidade. Enquanto os solos argilosos possuem partículas constituintes menores que se unem umas as outras deixando poucos espaços livres.

Muitos fatores podem influenciar na velocidade e intensidade do fluxo que passa através da zona hiporreica. Entre eles estão as variáveis do regime de escoamento que podem alterar a condutividade hidráulica dos sedimentos, através de processos de erosão e deposição e, conseqüentemente, afetar a intensidade das interações águas subterrâneas e águas superficiais. A colmatação é um fenômeno bastante influenciável pelo regime de escoamento. Trata-se de um processo lento e natural no qual ocorre a obstrução dos poros presentes no solo, reduzindo a condutividade hidráulica e porosidade deste meio. Ela é dependente do tempo e ocorre em função de vários fatores como as propriedades do rio, erosão e sedimentação; a qualidade da água superficial; características do leito e a distância dos poços de FM (MUCHA *et al.*, 2006; SCHUBERT, 2006), podendo ocorrer de forma externa e interna. Segundo Freitas (2018), a colmatação externa é causada pela deposição de partículas na superfície do leito sob condições de fluxo lento, onde as forças hidráulicas não são fortes o suficiente para mantê-las em movimento. Já a interna é provocada pela obstrução dos poros por sedimentos suspensos abaixo da camada externa.

Esse fenômeno pode se dar por mecanismos físicos, químicos e biológicos. O mecanismo físico é caracterizado por filtração, adsorção e sedimentação. Um exemplo prático é a descida de partículas que estavam suspensas na água ou no próprio solo, e ao descenderem vão se acumulando nos vazios existentes na zona hiporreica, formando uma camada colmatada. Já o mecanismo químico ocorre pela precipitação de poluentes e o biológico devido à degradação proporcionada pela comunidade microbiana organizada em biofilme. Rios em lugares de clima tropical são mais sujeitos à colmatação física, pois estes tendem a ter uma maior carga de partículas finas em suspensão devido ao intemperismo que age na decomposição das rochas. (SOARES, 2015; PHOLKERN *et al.*, 2015).

O processo de colmatção muitas vezes é relacionado negativamente a efeitos indesejáveis na interação entre a água superficial e a água subterrânea, como a diminuição da velocidade de infiltração em processos de recarga e a redução da capacidade potencial dos poços de produção em sistemas de filtração (BOUWER, 2002; GRISCHEK & BARTAK, 2016). Apesar disso, possui grande importância para a engenharia de recursos hídricos, pois promove a diminuição de poluentes que são transportados para a água subterrânea através da retenção destes no leito do rio e através de processos de biodegradação (HISCOCK & GRISCHEK, 2002; VELICKOVIC, 2005).

3 ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudo compreendem o trecho médio da bacia hidrográfica do rio Beberibe situada na divisa entre as cidades de Recife e Olinda no estado de Pernambuco e o trecho intermitente do rio Capibaribe, localizado na cidade de Santa Cruz do Capibaribe-PE, contido em uma região inserida dentro de uma macrozona identificada como Alto Capibaribe. A escolha desses locais ocorreu devido à existência de pesquisas em desenvolvimento através do Projeto de Filtração em Margem.

3.1 Bacia hidrográfica do rio Beberibe

A bacia do Beberibe integra o Grupo de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL-1), localizada no litoral norte do Estado de Pernambuco. Esse grupo limita-se ao norte com a bacia do rio Goiana, ao sul com a bacia do rio Capibaribe, ao leste com o oceano Atlântico e, a oeste, com as bacias do rio Goiana e do rio Capibaribe, Figura 3.

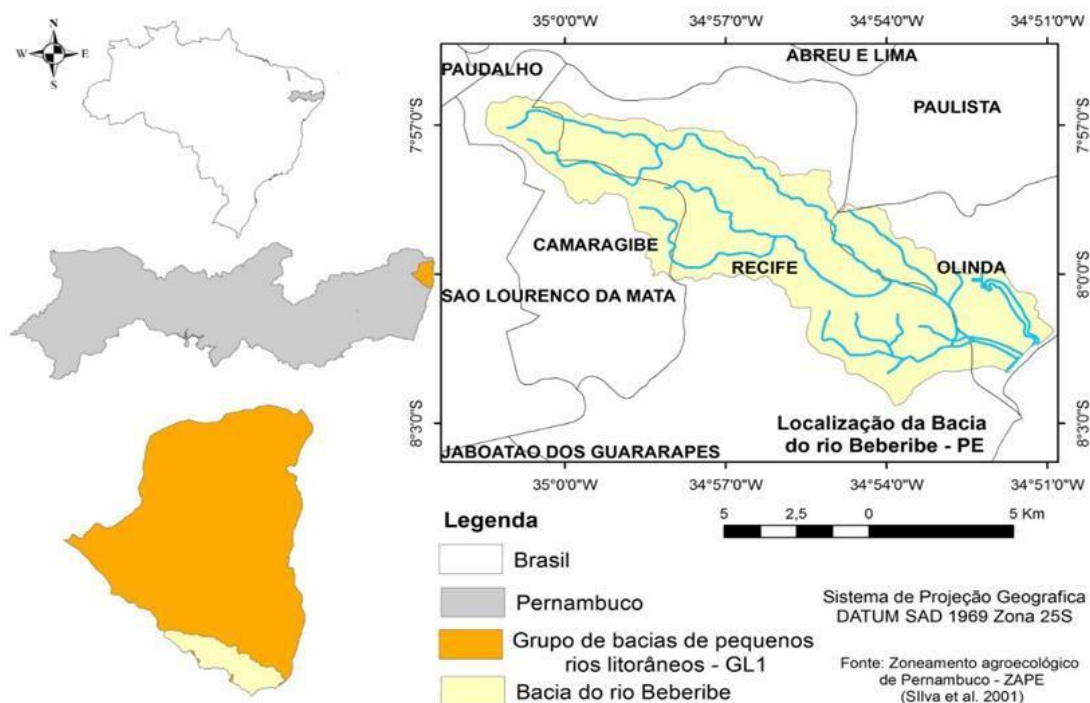
Inserida nos limites da Região Metropolitana do Recife, essa bacia possui aproximadamente 81 km² de área e envolve parcelas dos municípios de Recife, Olinda e Camaragibe. Sendo este último, o município onde localiza-se a nascente, originada através da confluência dos rios Pacas e Araçá. Seu rio é caracterizado como de pequena expansão, totalizando 31 km desde sua nascente até o Oceano Atlântico. Em períodos normais, o Beberibe apresenta uma calha estreita, com largura aproximada de seis metros em grande parte do seu percurso, alargando-se apenas no seu trecho final, próximo a foz, quando sofre influência das marés altas (SIRH, 2012).

O clima, de acordo com a classificação climática de Koppen (1948), é do tipo As', quente e úmido, com chuvas de outono-inverno (CAMPOS, 2003). A precipitação pluviométrica é em média de 2.405,7 mm/ano, sendo o período mais chuvoso entre os meses de março e agosto, com o período mais seco de setembro a fevereiro (FREITAS, 2014). Referente à temperatura, os meses de janeiro e fevereiro expressam medidas máximas mensais com cerca de 26,6 °C, entretanto, a temperatura mínima mensal ocorre, geralmente, durante o mês de julho com medida aproximada de 23,9 °C.

Na geologia da bacia são identificadas extensas exposições terciárias constituídas pela Formação Barreiras, caracterizado por sedimentos de granulometria variada, composta por uma mistura de areias e argilas, com horizontes de seixos sub-horizontais, observadas principalmente nas áreas de encostas com solo exposto. Também é possível verificar a presença de exposições quaternárias, representadas por terraços marinhos, aluviões e

sedimentos de praia, tais como os recifes e mangues (GUSMÃO FILHO, 1998 *apud* CAMPOS, 2003).

Figura 3 - Bacia hidrográfica do rio Beberibe.



Fonte: Silva; Barbosa Neto (2016).

Atualmente o rio Beberibe é um dos mais poluídos do Estado de Pernambuco em decorrência do déficit de saneamento básico. No passado, famoso pela qualidade de suas águas, esse rio já foi responsável por boa parte do abastecimento dos municípios de Recife e Olinda. Porém, o intenso processo de urbanização e as atividades antrópicas desenvolvidas nas suas proximidades afetaram diretamente a qualidade das suas águas superficiais e resultaram nas mais diversas manifestações de degradação.

De acordo com dados da SIRH (2012), a área dessa bacia apresenta uma população total que se aproxima dos 590 mil habitantes, transformando-a em uma área predominantemente urbana e de alta densidade demográfica, com cerca de 7.300 hab/km². Em termos de ocupação, a bacia é dividida pela BR-101. À leste da BR, apresenta elevado índice de ocupação urbana. Já a oeste, a área da bacia apresenta baixo índice de habitação, com resquícios da Mata Atlântica, referentes às Reservas Ecológicas de Passarinho e a de Dois Unidos, que provavelmente são responsáveis pela recarga dos lençóis freáticos da região.

O local de estudo (Figura 4) compreende o trecho médio do rio Beberibe, que vai da BR-101 até o seu encontro com o rio Morno, onde foram selecionados três pontos visando fornecer uma melhor cobertura representativa da área.

Figura 4 - Área de estudo no Rio Beberibe. (A) Ponto 1; (B) Ponto 2; (C) Ponto 3.



Fonte: Autora (2019).

O Ponto 1 situa-se em um local preservado e não urbanizado à montante da BR-101; o Ponto 2 está localizado à jusante da rodovia, em uma área bastante urbanizada, entre a divisa dos bairros de Dois Unidos, em Recife, e Caixa d'Água, em Olinda. Nas suas proximidades, o rio recebe o despejo de esgoto doméstico e dejetos humanos diretamente e há elevada presença de lixo depositado às margens do corpo hídrico. Já o Ponto 3 fica próximo ao terreno da Estação Elevatória de Caixa d'Água pertencente à Companhia Pernambucana de Abastecimento-COMPESA, onde também estão os poços de bombeamento do projeto-piloto de Filtração em Margem. Esse ponto é atingido pela construção de moradias irregulares em

suas margens, responsáveis pelo estreitamento do leito. Além disso, a grande quantidade de entulho no local corrobora para o assoreamento da calha e em alguns trechos para o barramento do rio.

As coordenadas geográficas dos pontos que foram analisados foram coletadas com um GPS Garmin e podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas dos pontos de análise.

Ponto	Coordenadas	
	Latitude	Longitude
1	7°59,776´	34°54,415´
2	7°58,474´	34°55,530´
3	7°59,340´	34°54,964´

Fonte: Autora (2019).

3.2 Bacia hidrográfica do rio Capibaribe

A bacia do rio Capibaribe abrange uma área de 7.454,88 km² correspondente a 7,58% do território estadual. Sendo um rio litorâneo, ele estende-se por cerca de 280 km desde sua primeira nascente, na divisa dos municípios de Poção e Jataúba, no Agreste, até a foz, na cidade do Recife (BRAGA *et al.*, 2015). Segundo os mesmos autores, nesse trajeto, o rio engloba 42 dos 184 municípios pernambucanos, sendo 15 destes totalmente inseridos na bacia e situados nas regiões Agreste, da Zona da Mata e Litoral. Esta bacia pode ser dividida em três macrozonas, identificadas como Alto, Médio e Baixo Capibaribe, como visto na Figura 5.

Figura 5 - Macrozonas do Rio Capibaribe.



Fonte: Pernambuco (2010).

O Alto e o Médio curso, situados no Agreste, apresentam um regime fluvial intermitente, devido à predominância do clima semiárido, caracterizado pelos elevados

índices de evaporação e baixas precipitações. Somente a partir do município de Limoeiro, em seu baixo curso, esse regime torna-se perene. Nessa região predomina o clima tropical úmido com uma estação seca na primavera-verão e outra estação de chuvas no outono-inverno (SILVA, 2003).

Segundo a classificação climática de Koppen (1948), o clima predominante é o BSh, tropical semiárido, quente e seco, com chuvas no outono e inverno caracterizado pela grande irregularidade sazonal e interanual das precipitações. (OLIVEIRA, 2012). As chuvas no Agreste dependem em sua maior parte dos sistemas meteorológicos do tipo Zona de Convergência Intertropical – ZCIT que em anos mais chuvosos podem causar inundações, principalmente na RMR e Zona da Mata. Entretanto, em anos quando esse sistema não atua, acontecem longas estiagens, principalmente no semiárido (SALGUEIRO *et al.*, 2014). Na parte semiárida a precipitação anual média oscila entre 300 a 800 mm e na Zona da Mata e Litoral entre 800 a 2200 mm (SALGUEIRO *et al.*, 2008).

Da nascente até sua foz é observada uma diferença nos tipos de vegetação presente em suas margens, onde ocorrem os biomas Caatinga e Mata Atlântica, incluindo ainda brejos de altitude, restingas e manguezais (SIRH, 2019). No entanto, a vegetação predominante é a caatinga, fortemente influenciada pelas condições climáticas e do solo, formadas por árvores e arbustos.

A bacia hidrográfica do rio Capibaribe é uma das mais importantes de Pernambuco, em virtude da grande concentração populacional e as principais zonas de desenvolvimento socioeconômico que a integram. Sua população é de 1.328.361 habitantes, com 1.041.734 em área urbana e 286.627 em zona rural (CPRH, 2019). Apesar de sua importância, a bacia enfrenta uma série de problemas decorrentes do seu processo de desenvolvimento, do uso e ocupação do solo e, principalmente, das formas de gestão de seus recursos hídricos, a exemplo do desmatamento das margens e nascentes e a poluição hídrica por efluentes domésticos e industriais. Além disso, a região convive com grande alternância de eventos climatológicos em sua historiografia, o que contribui para o déficit hídrico, uma vez que a quantidade anual de chuvas é insuficiente para alimentar os mananciais e atender aos usos múltiplos da água.

O ponto estudado está contido no Alto Capibaribe (Figura 6), localizado na cidade de Santa Cruz do Capibaribe-PE (Longitude UTM: 79°80'52.00'; Latitude. UTM: 91°20'760.00'). Essa região corresponde à área da bacia situada à montante do reservatório Jucazinho, no Município de Surubim. A mesma região abriga o pólo de confecções do Agreste cujas atividades, além de demandar o uso de água na produção do jeans, exige o uso

de lenha, dificilmente originada de manejo da Caatinga ou autorizada pelos órgãos competentes (BRAGA *et al.*, 2015). Outro fator recorrente são os conflitos entre a extração irregular de areia para o uso na construção civil e a captação de água subterrânea através dos poços, afetada quantitativa e qualitativamente com a redução da faixa de areia (FARIAS *et al.*, 2016).

Figura 6 - Área de estudo no Rio Capibaribe.



Fonte: Autora (2019).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando alcançar os objetivos dessa pesquisa, foi necessária a realização das medições dos piezômetros dispostos ao longo da área de estudo para compreensão do fluxo vertical dos rios Beberibe e Capibaribe. Para ajudar a interpretação dos resultados também foram realizados ensaios granulométricos com os sedimentos do leito do rio. Ambos procedimentos são de fundamental importância para a verificação da eficiência da Filtração em Margem.

4.1 Avaliação do fluxo vertical de água

Para a leitura da diferença de carga hidráulica entre o rio e o leito foram realizadas medições através de piezômetros diferenciais, Figura 7. Esse equipamento é constituído por um tubo metálico de 0,90 m com uma ponteira filtrante rosqueável na parte final medindo 0,40 m, a qual fica totalmente cravada no leito submerso do rio até ultrapassar a camada superficial permitindo a passagem de água e impedindo a passagem de grãos de solo. No interior do aparelho existe uma mangueira transparente, através da qual é inserido um medidor de nível com escala graduada em centímetros, responsável por determinar a variação do nível da água.

Figura 7 - Leitura da carga hidráulica através de medidor de nível.



Fonte: Autora (2019).

Com o intuito de avaliar a variação espacial e a variação temporal, as medições foram realizadas nos meses de março, junho, setembro e dezembro de 2018 nos três pontos previamente selecionados ao longo do rio Beberibe e durante os meses de junho, setembro e dezembro de 2018 no ponto do rio Capibaribe. No rio Beberibe, foram instalados três piezômetros, dois nas margens e um no centro, de modo a abranger a seção transversal do rio em cada ponto. Enquanto no Capibaribe, as medições só foram realizadas nas margens. Nestes pontos analisados, o piezômetro é pressionado verticalmente no leito submerso com o auxílio de um martelo até que sua ponteira filtrante esteja completamente penetrada no sedimento.

As leituras das diferenças de carga hidráulica foram realizadas em cada um dos piezômetros. Nos primeiros cinco minutos foram realizadas medições nos tempos de 2, 4 e 5 minutos objetivando reduzir os efeitos da agitação dos sedimentos durante a cravação do aparelho no leito do rio. Após esse período, as medições foram realizadas a cada 5 minutos até que os valores fossem estabilizados, ou atingido um tempo máximo de 35 minutos. Através da diferença entre o nível da lâmina d'água do rio e o nível da água no interior do piezômetro, obtém-se a carga hidráulica entre o aquífero e o manancial, tornando possível a avaliação do comportamento do fluxo vertical. No decorrer do ensaio, todos os dados foram registrados em uma planilha de campo e repassados para planilhas eletrônicas com a finalidade de obter gráficos que comprovem a interação rio-aquífero, através do comportamento dos componentes envolvidos.

4.2 Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada a fim de caracterizar a distribuição granulométrica do solo a partir das partículas que os constituem. As amostras foram coletadas nos pontos de estudo em duas profundidades diferentes, de 0 a 5 cm e de 5 a 10 cm, utilizando um amostrador do tipo *corer* cilíndrico de acrílico liso com área transversal de 11,33 cm² (Figura 8). Após serem coletadas, as mesmas foram armazenadas e posteriormente refrigeradas em um freezer para melhor preservação e assim levadas ao Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO), situado no Departamento de Oceanografia da UFPE. Para realização da análise granulométrica, inicialmente, elas foram armazenadas em uma estufa a 60°C para secagem por 24 horas. Logo em seguida, separou-se 30 g que passou por um tratamento prévio utilizando hidrogênio peróxido a 10% com o intuito de queimar a matéria orgânica contida nos sedimentos. Só após esta etapa, foram efetuadas as análises

granulométricas por meio das técnicas de peneiramento e pipetagem descritas em Suguio (1973) e ABNT (1984).

Figura 8 - Amostrador corer utilizado para coletar amostras para o ensaio de granulometria.



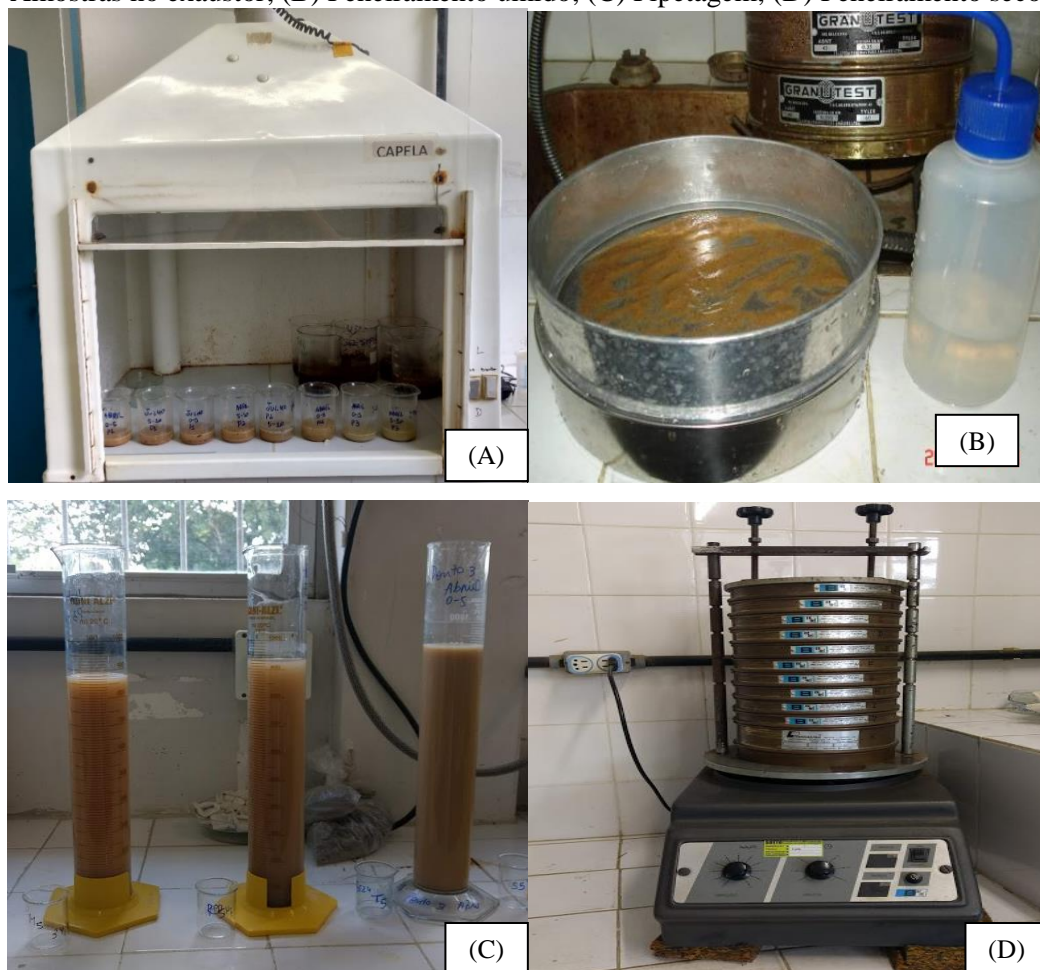
Fonte: Albuquerque (2015).

A separação entre partículas finas e grossas foi realizada a partir do método de peneiramento úmido (Figura 9) utilizando uma peneira com abertura de malha 0,062 mm e água destilada. O material retido, correspondente à fração de cascalho e areia, foi levado a estufa para secagem e, posteriormente, separado entre si através do peneiramento seco, utilizando-se peneiras com abertura de malhas entre 0,062 e 2 mm ajustadas de forma crescente e presas a um equipamento de base vibratória, o qual foi agitado por um período de 12 minutos e em seguida pesado visando a determinação do peso retido em cada peneira. Enquanto para os sedimentos lamosos, passantes na peneira, nos casos em que ocorreram uma variação superior a 10% entre o peso das amostras antes e após o peneiramento, foram classificados pelo método da pipetagem.

A pipetagem (Figura 9) consiste em uma técnica de sedimentação baseada na lei de Stokes e direcionada à separação de silte e argila. Nesse método, os sedimentos são locados em uma proveta graduada e preenchidos até 1000 ml com água destilada na qual, com o intuito de evitar a floculação, é adicionado Pirofosfato de Sódio em até 4 horas antes de iniciar o procedimento. Seguindo a tabela de tempo e profundidade em função da temperatura em que as amostras devem ser coletadas, como indica Gale e Hoare (1991), o material foi pipetado e depositado em *beckers* previamente pesados e identificados que foram transferidos para uma estufa. Após a secagem os *beckers* foram pesados para averiguação da quantidade de material coletado.

Segundo os resultados obtidos, as frações granulométricas foram plotados no *software* SYSGRAN 3.0 para a classificação do solo, através de parâmetros 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.

Figura 9 - Etapas da metodologia realizada para a determinação da distribuição granulométrica. (A) Amostras no exaustor; (B) Peneiramento úmido; (C) Pipetagem; (D) Peneiramento seco.



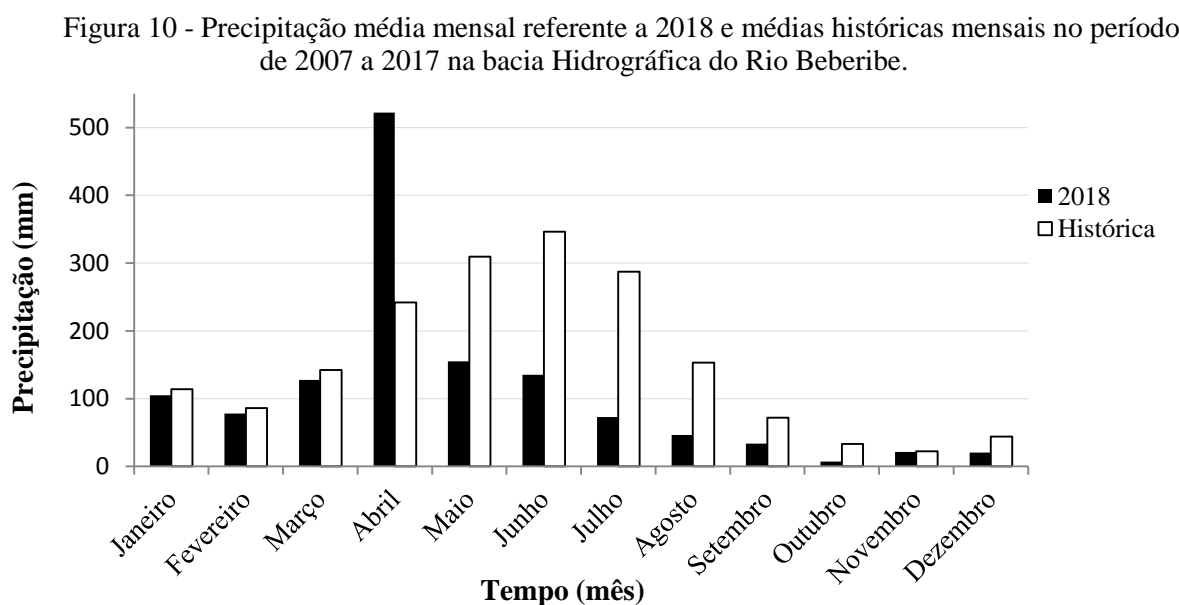
Fonte: Autora (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados alcançados e as considerações pertinentes serão apresentados a seguir.

5.1 Precipitação

Com o intuito de analisar a influência da precipitação no fluxo vertical foram avaliados os dados pluviométricos disponibilizados pela Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC). Para o Rio Beberibe, considerou-se o posto Olinda 199, por ser este o mais próximo do local de estudo em funcionamento. A precipitação média mensal referente ao ano estudado (2018), bem como as respectivas médias históricas mensais no período de 2007 a 2017, estão apresentadas na Figura 10. A análise da precipitação ao longo dos dez anos anteriores ao ano estudado foi realizada como forma de conhecer a distribuição e servir como parâmetro comparativo para os eventos ocorridos em 2018.



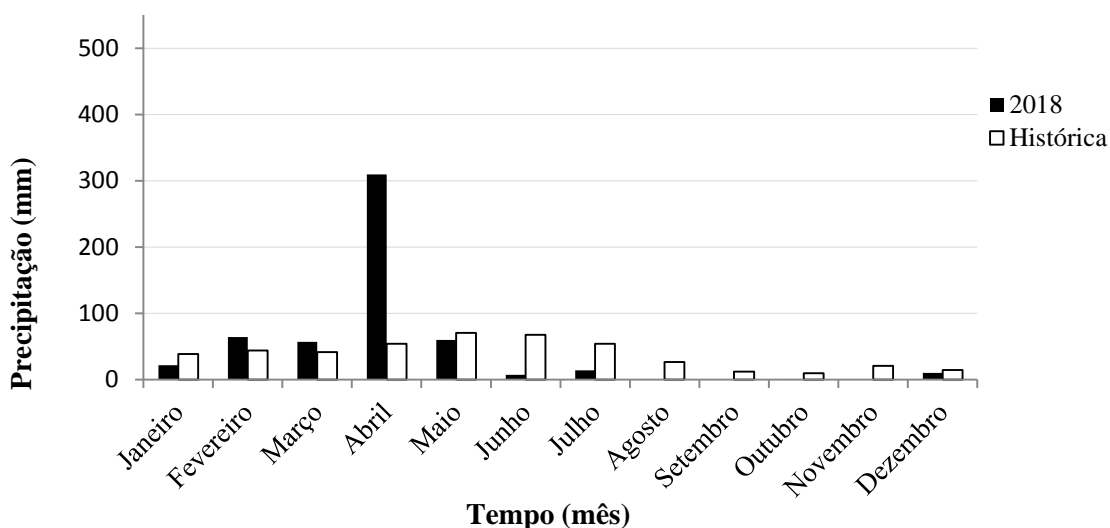
Fonte: Adaptado de APAC (2019).

Verificou-se que a maior precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Beberibe ocorreu no mês de abril, com um valor de 522,2 mm, superando a média histórica de 346,56 mm para o mês de junho. A partir dos dados históricos, constata-se que existe um período chuvoso que acontece de janeiro a agosto e um período seco que vai de setembro a dezembro. Percebe-se ainda que junho é o mês de maior precipitação e novembro o de menor.

Para o Rio Capibaribe os dados de precipitação foram obtidos no posto pluviométrico 86, localizado na cidade de Santa Cruz do Capibaribe-PE. Nessa região as chuvas são muito escassas, porém a Figura 11 mostra que o ano de 2018 foi um ano bastante chuvoso, onde a

precipitação anual chegou a atingir 546,6 mm, sendo abril o mês onde se obteve maior taxa de precipitação, apresentando 309,6 mm, sendo considerado um ano atípico comparado aos últimos dez anos.

Figura 11 - Precipitação média mensal referente a 2018 e médias históricas mensais no período de 2007 a 2017 na bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe.



Fonte: Adaptado de APAC (2019).

5.2 Ensaios granulométricos

A seguir estão os resultados dos ensaios granulométricos para os rios Beberibe e Capibaribe.

5.2.1 Rio Beberibe

Para o Rio Beberibe as coletas foram realizadas durante os meses de março, junho, setembro e dezembro de 2018. Em todos os pontos de amostragem ocorreram variações consideráveis em relação às frações granulométricas, e a distribuição temporal foi representativa durante o período estudado, com predomínio da fração areia e silte em todas as amostras.

Na Tabela 2 estão descritos os dados obtidos na análise granulométrica referente ao ponto 1. Observa-se que ele é predominantemente arenoso, havendo uma heterogeneidade entre seus diâmetros, caracterizando no mesmo ponto areias com granulometria bem distribuída. Esse é o local de coleta mais a montante entre os três, o que pode justificar a presença de sedimentos mais grosseiros, uma vez que as partículas mais pesadas tendem a se depositar primeiro e as partículas mais leves tendem a se depositar posteriormente em regiões

mais baixas do rio. Verifica-se ainda que, apesar de ser o mais arenoso entre os demais, foi o que apresentou os menores diâmetros médios entre outros analisados, variando de 0,6117 a 2,284 ϕ . Em relação à classe de cascalho este foi o ponto que apresentou os valores mais consideráveis.

Quanto à distribuição temporal das frações granulométricas obtidas, pode ser constatado que nos meses de junho e setembro ocorreu um aumento na fração média de areia e diminuição de silte e argila, o que pode ser justificado pelos maiores índices de precipitação anteriores e durante a coleta, pois no período chuvoso, as partículas finas provavelmente foram carregadas devido a uma maior velocidade de fluxo.

Tabela 2 - Análise granulométrica do Ponto 1.

Ponto 1		Diâmetro médio (ϕ)	Classificação	Grau de seleção	% Cascalho	% Areia	% Silte	% Argila
Março	0-5	2,005	Areia fina	MPS	14,65	66,77	13,49	5,09
	5-10	1,665	Areia média	MPS	9,17	80,05	3,72	7,06
Junho	0-5	0,9581	Areia grossa	PS	12,12	82,37	4,51	1,00
	5-10	0,6117	Areia grossa	PS	15,65	81,38	2,50	0,47
Setembro	0-5	0,3775	Areia grossa	PS	21,29	78,64	0,07	0,00
	5-10	1,164	Areia média	PS	5,62	93,49	0,89	0,00
Dezembro	0-5	2,284	Areia fina	MPS	2,03	81,13	9,14	7,70
	5-10	2,25	Areia fina	MPS	3,80	79,40	4,04	12,76

Fonte: A Autora (2019).

PS - Pobremente Selecionado; MPS - Muito Pobremente Selecionado.

Para o Ponto 2, Tabela 3, nos meses de setembro e dezembro, caracterizados como período seco, houve uma grande elevação no teor de argila comparado com os meses de março e junho, sendo possivelmente resultado do assentamento das partículas finas pós-chuvas, que ocorreram entre abril e junho. Com exceção das coletas realizadas no período seco, os sedimentos estão concentrados na classe de tamanho areia, neste mesmo período as amostras apresentaram menor quantidade de areia se comparada com as demais para o mesmo ponto. Em dezembro, é possível observar que, de forma geral, o teor de cascalho é maior em relação ao período chuvoso de 2018 e isto possivelmente se deve a menor vazão que o rio apresenta no período seco.

Sobre o grau de seleção, este é um parâmetro estatístico de dispersão da amostra classificado de acordo com Folk & Ward (1957) a partir do desvio padrão. Quanto maior o grau de seleção, ou seja, o desvio padrão dos diâmetros dos grãos, maior é a variação dos

tamanhos dos grãos e menor é a condutividade, pois os espaços vazios são preenchidos por aqueles de menor diâmetro. No material analisado, as amostras apresentaram-se agrupadas em dois tipos: pobremente selecionados e muito pobremente selecionados, houve maior ocorrência de amostras classificadas como muito pobremente selecionadas, o que indica um sedimento com grande dispersão dos seus valores granulométricos. Quanto melhor selecionados são os sedimentos, menor é a sua distribuição em torno do valor médio, indicando que os grãos têm tamanhos próximos.

Tabela 3 - Análise granulométrica do Ponto 2.

Ponto 2		Diâmetro médio (ϕ)	Classificação	Grau de seleção	% Cascalho	% Areia	% Silte	% Argila
Março	0-5	2,139	Areia fina	PS	0,29	89,20	8,83	1,68
	5-10	3,036	Areia muito fina	MPS	1,41	74,45	14,43	9,71
Junho	0-5	1,813	Areia média	PS	1,51	95,87	2,23	0,39
	5-10	2,283	Areia fina	PS	2,11	87,18	9,155	1,55
Setembro	0-5	6,24	Silte fino	MPS	0,66	33,66	22,58	43,10
	5-10	4,799	Silte grosso	MPS	1,48	49,15	21,54	27,83
Dezembro	0-5	4,653	Silte grosso	MPS	3,08	53,55	11,88	31,49
	5-10	3,102	Areia muito fina	MPS	3,31	71,72	2,14	22,83

Fonte: A Autora (2019).

PS- Pobremente Selecionado; MPS- Muito Pobremente Selecionado.

Na análise granulométrica do Ponto 3 (Tabela 4) foram obtidas as menores presenças de areia, variando de areia muito fina a silte grosso. É possível observar a partir da Tabela 3, que os valores de argila foram, em média, bem mais elevados do que nos outros pontos. De março a setembro houve um crescimento da presença de finos com o tempo, saindo de areia muito fina até chegar a silte médio. Já o mesmo ponto no mês de dezembro apresenta granulometria uniforme, mantendo-se como areia muito fina em toda sua extensão e exibindo percentagens altas de cascalho.

No mês de setembro as amostras foram classificadas em silte grosso para os primeiros 5 cm de profundidade, e em silte médio para os 5 cm seguintes. No entanto, apesar do tamanho das partículas ser menor, o diâmetro médio foi maior, demonstrando um comportamento contrário a tendência natural. O grau de seleção resultou em uma maior dispersão da composição granulométrica, sendo caracterizado como muito pobremente selecionado durante todos os períodos, exceto para o mês de março, que além de um leve aumento do grau de seleção, apresentou uma diminuição do tamanho médio em relação ao Ponto 2.

Tabela 4 - Análise granulométrica do Ponto 3.

Ponto 3		Diâmetro médio (ϕ)	Classificação	Grau de seleção	% Cascalho	% Areia	% Silte	% Argila
Março	0-5	3,103	Areia muito fina	PS	1,16	78,75	8,63	11,46
	5-10	3,19	Areia muito fina	PS	1,10	74,75	19,30	4,85
Junho	0-5	4,268	Silte grosso	MPS	1,76	57,07	14,91	26,26
	5-10	4,388	Silte grosso	MPS	0,97	58,57	13,26	27,20
Setembro	0-5	4,904	Silte grosso	MPS	0,34	49,76	13,71	36,19
	5-10	5,716	Silte médio	MPS	0,29	39,27	33,07	27,37
Dezembro	0-5	3,283	Areia muito fina	MPS	2,18	75,88	9,49	12,45
	5-10	3,808	Areia muito fina	MPS	1,61	71,46	11,23	15,70

Fonte: A Autora (2019).

PS- Pobremente Selecionado; MPS- Muito Pobremente Selecionado.

Veras (2011) encontrou para o mesmo ponto distribuição diferente da encontrada no presente estudo, com maiores frações de cascalho e menor predominância de argila quando comparado aos outros pontos. Essa diferença pode ser explicada devido ao espaço amostral ser o mesmo, porém o período local da coleta de sedimento não ser exatamente no mesmo, contribuindo para a amostra de sedimento coletado ter características granulométricas diferentes.

O alto teor de finos nesse ponto, possivelmente, é devido ao baixo fluxo de energia que pode favorecer a deposição, uma vez que entre os três, ele é o que está mais a jusante. Ainda segundo Xavier *et al.* (2016), essa maior quantidade de finos pode estar atrelada a dejetos orgânicos de origem antrópica. A área de coleta se caracteriza como um ambiente bastante poluído, que recebe grande interferência da urbanização e uma maior descarga de dejetos domésticos, o que certamente contribui para a distribuição e retenção desses sedimentos.

O Ponto 2 foi o que apresentou maior heterogeneidade em sua classificação granulométrica ao longo do período estudado. Esse fato pode refletir na permeabilidade do local, pois a variedade entre os diâmetros dos sedimentos facilita o processo de colmatção afetando a passagem da água entre o leito e o aquífero. A partir da Tabela 2, pode-se observar que existe uma grande variação quanto à granulometria das amostras, com a presença de areia fina até silte fino.

Para os três pontos estudados, as amostras apresentaram predominância de partículas finas, durante toda fase de estudo, evidenciando que não houve uma grande variação de energia entre o período. De modo geral, apesar da classificação variar entre areia muito fina a silte fino, é importante avaliar a porcentagem de areia nessas amostras. Percebe-se que mesmo

com variações na quantidade de finos, todas apresentaram uma considerável porcentagem de areia, caracterizando no geral as amostras como arenosas.

Por suas características hidrogeológicas favoráveis, os sistemas de Filtração em Margem são construídos em aluviões localizados ao longo das margens do rio. Os solos aluvionares são resultantes do carreamento pela água, assim, sua constituição vai depender da velocidade das águas no momento da deposição, por isso estes podem ser encontrados tanto na textura arenosa quanto argilosa (PINTO, 2000). Os resultados granulométricos mostram que, para todos os pontos, o principal tamanho de grão transportado pelo rio é areia, provavelmente condicionado pela velocidade de corrente operante, uma vez que ela não propicia que os sedimentos mais grossos sejam transportados por longas distâncias. Da mesma forma, os sedimentos finos, transportados em suspensão, normalmente não se depositam no canal fluvial, já que as velocidades de corrente se mantêm acima dos valores que permitiriam a decantação. No entanto, as areias finas e médias são transportadas e acumuladas por longas distâncias.

Apesar dos resultados dos ensaios granulométricos indicarem que há predominância de sedimentos arenosos, o leito do rio é formado por uma série de partículas de tamanhos variados, onde as mais finas normalmente são retidas causando a obstrução do leito, tendendo a diminuir a quantidade de água infiltrada minimizando assim a interação. O que deve ser considerado é que a camada de sedimentação é de pequena espessura nos primeiros centímetros do leito, com deposição dos finos na superfície do leito, e a amostragem do solo é de uma camada de 10 cm.

5.2.2 Rio Capibaribe

Os resultados da variação do tamanho das partículas nas amostras coletadas da zona hiporreica do ponto estudado no rio Capibaribe, são mostrados na Tabela 5, juntamente com o diâmetro médio e grau de seleção, que são outros parâmetros discutidos neste estudo. Para o Rio Capibaribe as coletas foram realizadas nos meses de julho e dezembro de 2018 em um único ponto de coleta. porcentagem das frações granulométricas obtidas, é possível perceber que nos primeiros cinco centímetros, a fração predominante foi de areia, apresentando 91,58%, seguida do cascalho com 5,89%. Os cinco centímetros seguintes apresentam igual comportamento, variando pouco as porcentagens encontradas.

Tabela 5 - Análise granulométrica do Rio Capibaribe.

Ponto Capibaribe		Diâmetro médio(ϕ)	Classificação	Grau de seleção	% Cascalho	% Areia	% Silte	% Argila
Julho	0-5	0,7519	Areia grossa	PS	5,89	91,58	2,03	0,50
	5-10	0,7639	Areia grossa	PS	5,02	90,26	3,78	0,94
Dezembro	0-5	1,507	Areia grossa	MPS	6,85	80,45	6,53	6,17
	5-10	0,9267	Areia grossa	PS	5,46	84,80	8,37	1,37

Fonte: A Autora (2019).

PS- Pobremente Selecionado; MPS- Muito Pobremente Selecionado.

Quanto ao grau de seleção obtido foi definido como pobremente selecionado para ambas as profundidades. Já em dezembro, período classificado como verão, as amostras apresentaram menores teores de areia, ao mesmo passo que aumentaram os teores de partículas finas. O grau de seleção para os primeiros cinco centímetros foi muito pobremente selecionado, o que significa que os grãos tiveram tamanhos mais diversificados que os demais.

5.3 Ensaios de fluxo vertical

A seguir estão os resultados dos ensaios de fluxo vertical para os rios Beberibe e Capibaribe.

5.3.1 Rio Beberibe

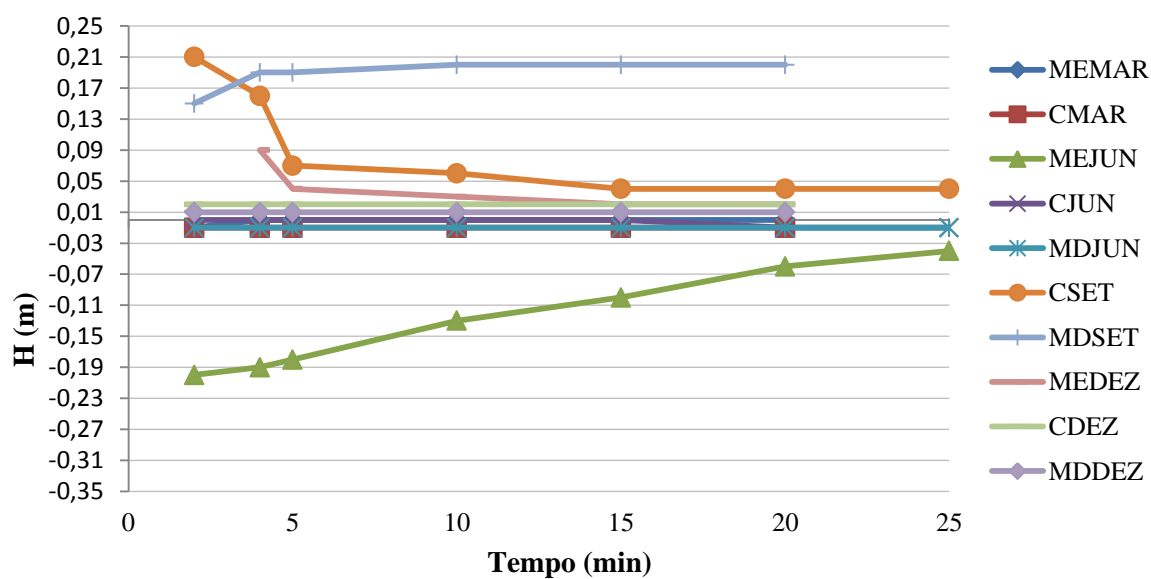
Para o Rio Beberibe, assim como as coletas granulométricas, as medições foram realizadas durante os meses de março, junho, setembro e dezembro de 2018. Visando abranger toda seção transversal do rio, em cada ponto estudado foram instalados três piezômetros, um na margem esquerda (ME), um na margem direita (MD) e outro no centro (C), definidos de acordo com o sentido do curso de água. Dessa forma, para facilitar a identificação das medições, as Figuras 12, 13, 14 e 15 seguem a legenda: MEMAR- margem esquerda medida em março; CMAR- centro medido em Março; MDMAR- margem Direita medida em Março; MEJUN- margem esquerda medida em Junho; CJUN- centro medido em junho; MDJUN- margem direita medida em junho; MESET- margem esquerda medida em setembro; CSET- centro medido em setembro; MDSET- margem direita medida em setembro;

MEDEZ- margem esquerda medida em dezembro; CDEZ- centro medido em dezembro; MDDEZ- margem direita medida em dezembro.

Durante todo o período em que foram realizadas as medições, observou-se que a diferença de carga hidráulica entre o aquífero e o rio Beberibe apresentaram orientações diferentes, podendo ter o fluxo descendente, ascendente e ainda não apresentar fluxo nenhum. As variações de comportamento apresentadas entre os três pontos e no mesmo ponto possivelmente aconteceram em consequência da ocorrência de chuvas, pois intensas precipitações podem refletir na direção do fluxo vertical no leito do rio.

A partir da Figura 12, verifica-se que a leitura da diferença da carga hidráulica para o Ponto 1 é a que apresenta maior variação de fluxo, demonstrando maior interação entre o rio e o aquífero. Nesse ponto, para as medições realizadas no período chuvoso, apenas a margem esquerda analisada em junho estabilizou depois de passados 20 minutos de medição. As demais estabilizaram antes dos 20 minutos. Percebe-se ainda que, com exceção da medição realizada em setembro, o centro do rio mostrou fluxo vertical nulo independente do ponto e do mês de medição, não havendo nenhuma interação.

Figura 12 - Leitura da diferença da carga hidráulica para o Ponto 1.



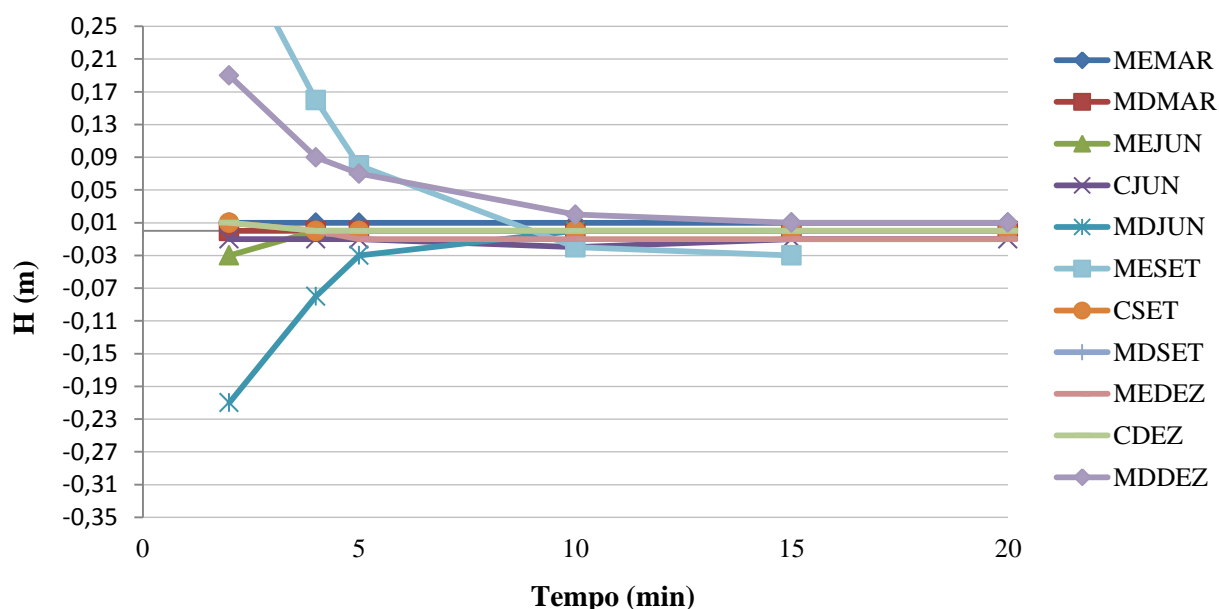
Fonte: Autora (2019).

Para o Ponto2, apresentado na Figura 13, não houve grandes variações no fluxo, o que indica pouca interação rio-aquífero ou o equilíbrio entre os níveis de água superficial e subterrânea. No entanto, nota-se que em algumas medições o fluxo estava ascendente, em outras, descendente e na leitura do mês de março não apresentou fluxo. Apenas as medições

realizadas no mês de junho apresentaram fluxo ascendente. Teve suas medições se estabilizando rapidamente, não passando de 20 minutos.

Para as coletas realizadas nos meses de setembro e dezembro, período de estiagem, esperava-se uma ocorrência de fluxo ascendente. Entretanto, neste período os pontos mostraram fluxo nulo, provavelmente o tempo não foi suficiente para dissipação da poro-pressão, além das grandes chuvas ocorridas no período chuvoso e das recargas subterrâneas advindas das reservas da Mata do Passarinho e de Dois Unidos. Também nesses meses foram verificados movimentos descendentes, como é o caso da margem esquerda medida em setembro e da margem direita medida em dezembro.

Figura 13 - Leitura da diferença da carga hidráulica para o Ponto 2.



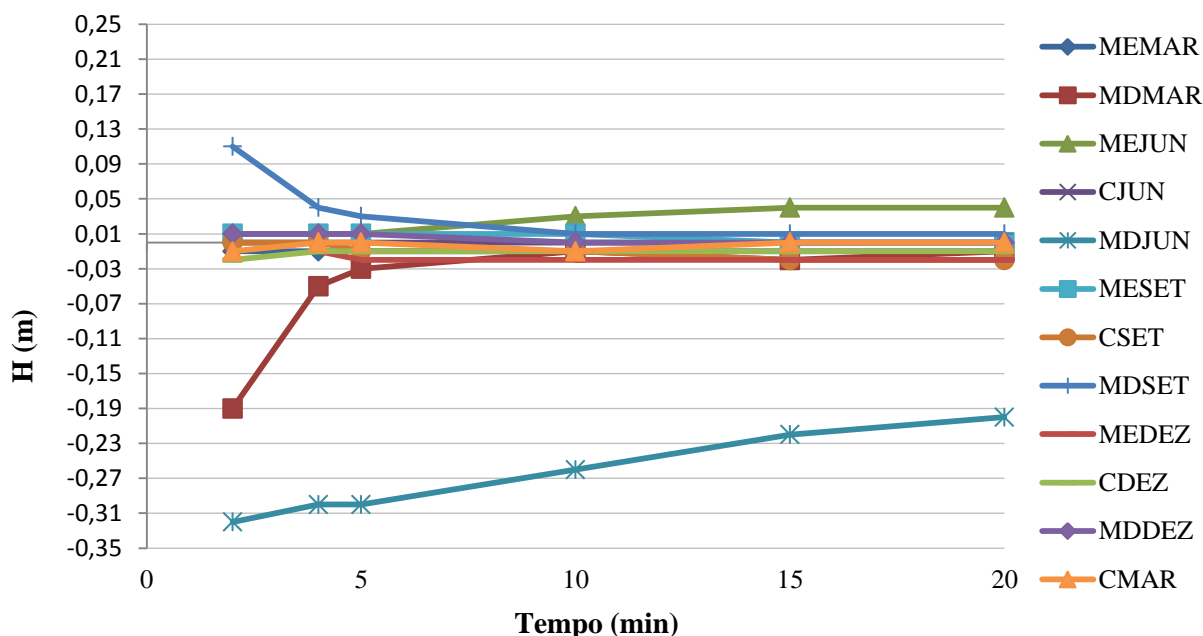
Fonte: Autora (2019).

No Ponto 3, todas as margens apresentaram uma rápida estabilização dentro dos primeiros cinco minutos de medição, com exceção das margens direita e esquerda avaliadas em junho. Para estas, realizadas no período chuvoso, só houve estabilização após passados 20 minutos de ensaio, como exposto na Figura 14. A dificuldade na estabilização pode ser explicada devido ao processo de colmatção ocorrido no leito em consequência ao acúmulo de partículas finas e matéria orgânica carregadas pela água da chuva. Além disso, as características geológicas desse ponto podem diferir das demais, afetando em pequena escala os padrões de infiltração da interface.

É possível notar que o Ponto 3 é o que menos abastece o aquífero. Esse fato pode ser explicado pela dificuldade da passagem de água do rio Beberibe pelos sedimentos do leito localizados nesse ponto, pois de acordo com os resultados de granulometria já apresentados,

na composição do material do leito desse ponto encontra-se uma quantidade de material fino superior ao encontrado nos outros pontos. Ou seja, existe uma maior variação no diâmetro do material do leito favorecendo o processo de colmatção e consequentemente reduzindo a permeabilidade. Além disso, sabe-se que a condutividade hidráulica varia diretamente com o diâmetro das partículas, isto é, quanto menor o tamanho das partículas, menor o volume dos poros que promovem o fluxo através dos quais o líquido fluirá, consequentemente, a condutividade hidráulica será menor.

Figura 14 - Leitura da diferença da carga hidráulica para o Ponto 3.



Fonte: Autora (2019).

Observa-se que todos os pontos estudados obtiveram resultados semelhantes, neles a variação temporal do gradiente hidráulico apresentou valores muito próximos a zero, demonstrando, dessa forma, pouca interação entre a água subterrânea e superficial. Nos pontos onde houve variação na direção do fluxo, os primeiros cinco minutos de medição foram o que mostraram maior variação, para tal comportamento deve-se considerar a possível interferência da entrada de água proveniente do rio em volta do piezômetro, em razão da perturbação causada no momento da cravação. Uma forma de evitar esse efeito seria o uso de bentonita, para garantir o perfeito selamento.

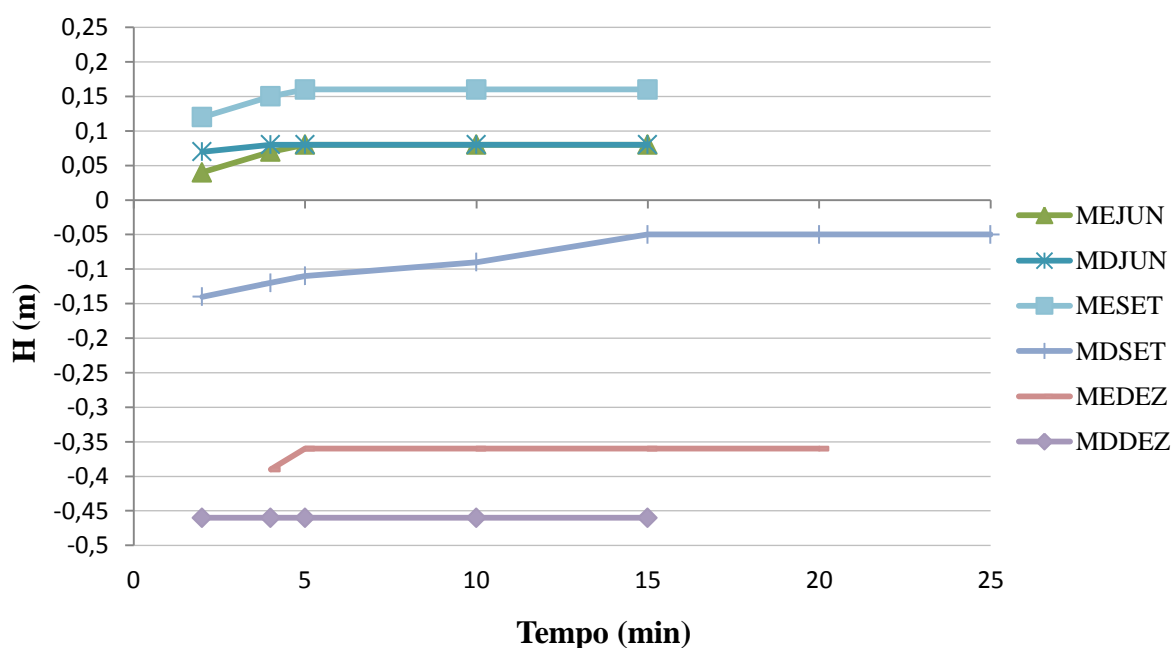
A priori, nos meses mais secos houve uma maior contribuição de água no sentido rio aquífero. Enquanto nos períodos chuvosos, o transporte de água no leito era ascendente. O que deve estar correlacionado com a flutuação dos níveis de água no aquífero, uma vez que há uma maior recarga do lençol freático em períodos chuvosos. Segundo Arantes, Chaudhry e

Marcussi (2006), durante o período chuvoso, o aumento do nível de água no rio ocorre mais rápido em relação ao aumento do nível da superfície freática provocando uma diminuição do diferencial de carga hidráulica entre o aquífero e o manancial superficial, sendo essa uma possível explicação para tal comportamento. Todavia, é importante salientar que as interações entre o rio e o aquífero são complexas e seu comportamento muito dinâmico, sendo extremamente influenciado por fatores externos que podem alterar características do próprio rio. Nesse caso, as características geológicas desses pontos podem afetar os padrões de infiltração da interface.

5.3.2 Rio Capibaribe

Para o Rio Capibaribe, os ensaios foram realizados nas duas margens durante os meses de junho, setembro e dezembro de 2018. A partir da Figura 15, nota-se que a direção do fluxo vertical do rio nem sempre é a mesma, isto porque o trecho analisado é intermitente, tornando-o influente ou efluente dependendo da época do ano.

Figura 15 - Leitura da diferença da carga hidráulica para o Rio Capibaribe.



Fonte: Autora (2019).

Examinando de um modo geral, as análises realizadas mostraram comportamentos igualmente distribuídos. As primeiras medições, referentes ao mês de junho de 2018, foram descendentes, onde o rio estava alimentando o aquífero. A margem esquerda medida em setembro apresentou o mesmo comportamento, enquanto para a margem direita do mesmo mês, o rio estava sendo alimentado pelo aquífero. Já em dezembro para ambas as margens

houve fluxo ascendente. Pode-se observar uma grande variação da taxa do gradiente hidráulico, o que pode ser influenciado pela classificação granulométrica encontrada no ponto estudado, onde foram observados em sua grande maioria areia grossa. Arantes, Chaudhry e Marcussi (2006) quantificaram a taxa de câmbio entre o rio e o aquífero na bacia do Ribeirão da Onça, em Brotas - SP. Com a chegada das chuvas, verificaram que ocorreu uma pequena diminuição na taxa de surgimento. Acredita-se que o aumento no nível do rio tenha sido a causa desse pequeno decréscimo. Isto é semelhante ao presente estudo, onde logo após o grande período de chuva, foi observado um comportamento influente do rio, onde o rio estava alimentando o aquífero.

6 CONCLUSÕES

Nos últimos tempos vem ocorrendo um crescente interesse no que diz respeito a interação entre águas subterrâneas e superficiais e muito disso se deve a importância destas duas massas hídricas que são as principais fontes de abastecimento público. Em vista disso, o estudo aqui exposto buscou o melhor entendimento das características físicas e sedimentológicas da zona hiporreica no trecho médio do Rio Beberibe e um trecho intermitente do rio Capibaribe, contido no Alto Capibaribe, com o intuito de compreender os processos que ocorrem na interface rio-aquífero. Esses aspectos ambientais são importantes, dado que para o melhor desenvolvimento da técnica de filtração em margem esses fatores são levados em consideração.

A avaliação da capacidade de transporte de volumes hídricos entre os rios e o aquífero nos trechos estudados permitiu uma melhor compreensão da troca de água existente na interação rio-aquífero. Para o rio Beberibe foi possível observar que existe interação entre água superficial e subterrânea em alguns pontos, onde ora o rio contribui para a recarga do aquífero ora é alimentado por ele. Durante todo o período de medições, além de apresentar fluxo nulo e descendente, a diferença da carga hidráulica entre o aquífero e o rio se mostrou em alguns momentos ascendente. Os resultados da diferença de carga apresentaram as condições naturais de interação rio-aquífero. A condição de rio influente não é a ideal para a escolha de local de um sistema de Filtração em Margem. No entanto, a contribuição do rio no fornecimento de água para o aquífero pode ser potencializada quando existir uma maior diferença de carga hidráulica e no momento destas análises os poços do projeto de Filtração em Margem encontravam-se parados, não havendo uma indução da água do manancial no aquífero. A partir do momento em que os poços estiverem em funcionamento, estes podem influenciar nas condições de interação rio-aquífero no local, pois existe conexão hidráulica entre o poço de produção e o rio Beberibe.

No rio Capibaribe, houve variações tanto espacialmente, ou seja, entre as margens estudadas quanto temporalmente, onde, logo após o evento de grande precipitação que acarretou na enchente do trecho intermitente estudado, ambas as margens apresentaram um fluxo descendente, no qual o rio estava alimentando o aquífero.

Para complementar os resultados obtidos com o piezômetro foram realizadas análises granulométricas da camada de interseção entre as águas superficiais e subterrâneas. Para ambos os rios, os resultados mostraram que há uma predominância de areia em suas composições. No rio Beberibe, o Ponto 1 foi o mais arenoso, o que pode justificar-se por sua

localização mais a montante, onde sofre muito menos com a ação antropogênica. Já nos pontos 2 e 3 que estão mais a jusante e sofrem bastante com a descarga de poluentes, foram encontrados maiores percentuais de solo fino, mas, ainda assim, as amostras classificam-se como arenosas. No Capibaribe a distribuição granulométrica dos sedimentos também foram predominantemente arenosas, apresentando 91,58% e classificando-se como areia grossa. Esse fato contribui na interação rio-aquífero, pois o leito tem características arenosas facilitando a percolação de água entre os vazios dos sedimentos e auxiliando na eficiência do método.

Através dessa pesquisa foi possível observar que em ambos os rios existe interação entre água superficial e subterrânea. Em vista dos resultados, certifica-se que há contribuição para a recarga do aquífero freático por parte deles, ainda que seja numa pequena quantidade. Foi evidenciada a influência da chuva nas interações entre rio e aquífero, onde sua ocorrência pode promover mudanças no fluxo vertical da água devido à alteração da carga hidráulica. Cabe ressaltar que um rio pode apresentar comportamentos diferentes a depender do trecho e da época do ano. A variabilidade do fluxo vertical na calha do rio é muito complexa de avaliar devido aos mais variados processos envolvidos, logo a medição realizada no começo do dia pode apresentar um valor diferente no final do dia, da mesma forma se realizada em dois pontos próximos. Por isso, seria interessante realizar um maior número de ensaios em menores intervalos, aumentando o número de seções por ponto.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Capibaribe**. Recife: CPRH, 2019. Disponível em: http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/J_Relat01-CB.pdf. Acesso em: 28 set. 2019.
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. **Dados climatológicos**. Recife: APAC, 2019. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br>. Acesso em: 22 out. 2019.
- ALBUQUERQUE, T. B.V. **Caracterização física e biológica da Zona Hiporreica na interação rio - aquífero no Rio Beberibe**: Pernambuco. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. 147p.
- ARANTES, E. J.; CHAUDHRY, F.H.; MARCUSSI, F. F. N. Caracterização da interação entre rio e aquífero com o uso de infiltrômetros. **Águas Subterrâneas**, v.20, n.2, p.97-108, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.
- BOULTON, A.J.; FINDLAY, S.; MARMONIER, P.; STANLEY, E.H.; VALETT, H.M. The functional significance of the hyporheic zone in streams and rivers. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**. v. 29, p. 59-81, 1998.
- BOULTON, A. J.; FOSTER, J. Effects of buried leaf litter and vertical hydrologic exchange on hyporheic water chemistry and fauna in a gravel-bed river in northern New South Wales. **Freshwater Biology**, v. 40, p. 229–243, 1998.
- BOUWER, H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. **Journal of Hydrogeology**, v. 10, p. 121-142, 2002.
- BRAGA, R. A. P.; FARIAS, C. R. O.; SILVA, S. R.; CAVALCANTE, E. R. **Gestão e educação socioambiental na Bacia do Capibaribe**. 1. ed. Recife: Ed. Clã, 2015. 144p.
- BRASIL. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Diagnóstico dos serviços de água e esgotos**. Brasília: SNIS, 2011.
- BRUNKE, M.; GONSER, T. The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater. **Freshwater Biology**, v. 37, n. 1, p. 1-33, 1997.
- CAMPOS, H. L. **Processo hidrológico de gestão na bacia hidrográfica do Rio Beberibe (PE): uma retrospectiva**. 2003. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003. 226p.
- CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM / Eletrobrás, 1994.
- CARVALHO FILHO, J. A. **Tecnologia de filtração em margem para complementação do abastecimento público da região metropolitana do Recife-PE**. 2016. Monografia

(Graduação em Ciências biológicas) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016. 72p.

DAHM, C. N.; N. B. GRIMM, P.; MARMONIER, H. M.; VERVIER, P.. Nutrient dynamics at the interface between surface waters and groundwaters. **Freshwater Biology**, v. 40, p. 427–451, 1998.

DASH, R. R.; MEHROTRA, I.; KUMAR, P.; GRISCHEK, T. Lake bank filtration at Nainital, India: water quality evaluation. **Hydrogeology Journal**, v. 16, n. 6, p. 1089-1099, 2008.

DONALD, D.; GRYGASKI, T. **Development of a sustainable potable water supply for rural villages in the coastal region of Tazanian**. ENVE 431 Final Project Report, Africa. 2002.

DOUSSAN, C.; POITEVIN, G.; LEDOUX, E.; DETAY, M.. River bank filtration: modelling of the changes in water chemistry with emphasis on nitrogen species. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 25, p. 129-156, 1997.

ENVIRONMENTAL AGENCY. **Groundwater–surface water interactions in the hyporheic zone**. Science Report SC030155/SR1. United Kingdom, 2005. p. 71.

FARIAS, C. R. O. CAVALCANTI, E. R.; SILVA, R. P.; BRAGA, R. A. P.. O conflito socioambiental sob enfoque educativo. In: BRAGA, R. A. P. (Ed.). **Águas de areias**. 1 ed. Recife: Clã, 2016. p. 201-242.

FOLK, R.L.; WARD, W.C.. River Bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journ. 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. **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, 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.

GALE, S. J.; HOARE, P. G. **Quaternary sediments: petrographic methods for the study of ulithified rocks**. Londres: Bethaven Press, 1991. 318 p.

GRISCHEK, T.; NEITZEL, P.; ANDRUSCH, T.; LAGOIS, U.; NESTLER, W. Fate of EDTA During Infiltration of Elbe River Water and Identification of Infiltrating River Water in the Aquifer (in German). **Vom Wasser**, v. 89, p. 261-282, 1997.

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

GUNKEL, G.. Bank filtration - an eco-technology for drinking water treatment and the application to the semi-arid zone. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE: CLIMATE, SUSTAINABILITY AND DEVELOPMENT IN SEMI-ARID REGIONS*, 2., Fortaleza, 2010. **Proceedings [...]**. Fortaleza, 2010. 10 p.

HANCOCK, P.J. Human Impacts on the Stream–Groundwater Exchange Zone. **Environmental Management**, v. 29, n. 6, p. 763–781, 2002.

HANNAH, D.; KRAUSE, S.; FLECKENSTEIN, J.; HEPPELL, K.. Biogeochemistry and the hydroecology of the hyporheic zone. *In: ENVIRONMENTAL AGENCY. The Hyporheic Handbook*. Science Report: SC050070. Chapter 5. October, 2009

HISCOCK, K.M.; GRISCHEK T. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. **Journal of Hydrology**, v. 266, p. 139-144, 2002.

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. p. 19-28.

JEYAKUMAR, R; PARIMALARENGANAYAKI, S; LAKSHMANAN, E.. River bank filtration for natural treatment of water in India: A review. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 8, p. 1203-1212, 2017.

KIM, S. B.; CORAPCIOGLU, M. Y., KIM D. J. Effect of dissolved organic matter and bacteria on contaminant transport in riverbank filtration. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 66, p.1-23, 2003.

KOPPEN, W. Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra. **Climatology**. Laboratory of Climatology, New Gersey, 1948.104p.

KRUHM-PIMPL, M. Pesticides in Surface Water– Analytical Results for Drinking Water Reservoirs and Bank Filtrate Waters. **Acta Hydrochim. Et Hydrobiol.** v. 21, p. 145-152, 1993.

LARKIN, R. G.; SHARP Jr., J. M. On the relationship between river-basin geomorphology, aquifer hydraulics, and ground-water flow direction in alluvial aquifers. **Geological Society of America Bulletin**, v. 104, p. 1608-1620, 1992.

LOPES, A.L.M.; SILVA, C.G.; DIAS, G.T.M. Caracterização Sonográfica das Feições Arenosas de Fundo da Plataforma Continental interna e Média a sul da Microbacia de Campos. *In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA*, 8., 2003, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SBGF, 2003. v. 1, p. 1.

MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H. Aplicação das características químicas e físicas dos sedimentos na modelagem dos processos de emissão de sedimentos em bacias hidrográficas (p. 343-83). *In: POLETO, C.; MERTEN, G. H. (org.). Qualidade dos sedimentos*. Porto Alegre: ABRH, 2006, 397 p.

MUCHA, I.; BANSKY, L.; HLAVATY, Z.; RODAK, D. Impact of riverbed clogging - Colmation - On groundwater. *In*: HUBBS, S.A. **Riverbank Filtration Hydrology**. NATO Science Series IV; Earth and Environmental Sciences, 2006. pp. 43-72. 2006.

OLIVEIRA, G.C.S. **Perfil socioeconômico e potencialidades para a captação de água da chuva na microrregião do alto Capibaribe, PE**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. 110p.

PAIVA, A. L. R. **O processo de filtração em margem e um estudo de caso no rio Beberibe**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. 150p.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. **Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do rio Capibaribe** (PHA – Capibaribe). Recife, 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**, v. 73, p.7699-7709, 2015.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 208p. 2000.

RASSAM, D. W. A conceptual framework for incorporating surface and groundwater interactions into a river operation planning model. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1554-1567, 2011.

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

RAY, C.; GRISCHEK, T.; SCHUBERT, J.; WANG, J.; SPETH, T. A perspective of riverbank filtration. **American Water Works Association Journal**, v. 94, n. 4, 2002. (Technology Collection p. 149).

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2 ed. Piracicaba: ESALQ. Depto de Física e Meteorologia, 160 p, 1996.

SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, F. B.; FRANÇA, M. S. Estudo da Distribuição Espacial da Precipitação e seus Tipos de Ocorrências na Bacia do Rio Capibaribe em Pernambuco. *In*: IX SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 9., 2008, Salvador-BA. **Anais [...]**. Salvador: ABRH, 2008. 10 p.

SALGUEIRO, J. H. P. B., PINTO, E. J. A., MONTENEGRO, S. M. G. L., SILVA, B. B. S. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5 Esp.- VIWMCRHPE, p. 1002-1014, 2014.

SCHIJVEN, J. F.; BERGER, P.; MIETTINEN, I. **Bank Filtration for water supply**. Ray, C., (Ed.). Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2002.

SCHMIDT, C. K.; LANGE, F. T.; BRAUCH, H.; KÜHN, W. **Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany**. DVGW - Water Technology Center (TZW), 2003. 17 p.

SCHUBERT, J. Significance of Hydrologic Aspects on RBF Performance. *In: HUBBS, S. A. Riverbank Filtration Hydrology*. NATO Science Series IV; Earth and Environmental Sciences, 2006. pp. 1-20. 2006.

SENS, M. L.; DALSSASSO, R. L.; MONDARDO, R. I.; MELO FILHO, L. C. Filtração em Margem. *In: PROSAB 4. (Org.). Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano*. Rio de Janeiro: PROSAB; ABES, 2006. cap. 5, p. 173-236.

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

SILVA, J. P. **Sedimentologia, batimetria, qualidade da água e vulnerabilidade do Rio Capibaribe na cidade do Recife-PE**. 2003. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003. 101p.

SILVA, J. F. G.; BARBOSA NETO, M. V. Análise da vulnerabilidade a processos erosivos da bacia hidrográfica do rio Beberibe. *In: LISTO, F. L. R.; MÜTZENBERG, D. S.; TAVARES, B. A. C. (orgs.). E-book do I Workshop de Geomorfologia e Geoarqueologia do Nordeste*. Recife: GEQUA, 2016. p. 79-88.

SIRH - Sistema Integrado de Recursos Hídricos e Energéticos. Secretaria de Recursos Hídricos. Disponível em:
http://www.sirh.srh.pe.gov.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=417. Acesso em 27 set. 2019.

SIRH - Sistema Integrado de Recursos Hídricos e Energéticos. Secretaria de Recursos Hídricos. Volume II - Ambiente Natural: Cobertura Vegetal. Disponível em:
http://www.sirh.srh.pe.gov.br/hidroambiental/bacia_capibaribe/index.php/tomo2/cobertura_vegetal. Acesso em set. 2019.

SOARES, M. **The influence of high infiltration rates, suspended sediment concentration and sediment grain size on river and lake bed clogging**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia) - Technischen Universität, Berlin, 2015. 143p.

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

STUYFZAND, P. J.. Hydrology and Water Quality Aspects of Rhine Bank Groundwater in the Netherlands. **Journal Hydrology**, v.106, p.341-363, 1989.

STUYFZAD, P.; JUHÀSZ-HOLTERMAN, M.; LANGE, W. **Riverbank filtration in Netherlands: well fields, clogging and geochemical reactions**. NATO Advanced Research Workshop: Clogging in Riverbank Filtration, Bratislava, p. 7-10 of September, 2004.

SUGUIO, K. **Introdução à Sedimentologia**. São Paulo, Ed. Edgard Blücher/EDUSP. 317p, 1973.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. São Paulo. Ed. Edgard Blücher/EDUSP. 400p, 2003.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.

TUFENKJI, N.; RYAN, J. N.; ELIMELECH, M.. **Bank filtration: a simple technology may inexpensively clean up poor-quality raw surface water**. Environmental Science & Technology. Colorado, USA. p. 423 – 428, 2002.

VELICKOVIC, B. Colmation as one of the processes in interaction between the groundwater and surface water. **Factas Universitatis. Series: Architecture and Civil Engineering**, v. 3, n. 2, p. 165 – 172, 2005.

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.

VERSTRAETEN, I. M., J. D. CARR, G. V.; STEELE, E. M. THURMAN; M. T. MEYER; D. F.. Dormedy. Surface-Water/Ground-Water Interaction: Herbicide Transport into Municipal Collector Wells. **J. Environ. Qual.** v. 28, n. 5, p. 1396-1405, 1999.

VERVIER, P.; GIBERT, J.; MARMONIER, P.; DOLE-OLIVIER, M.- J. A perspective on the permeability of the surface freshwater–groundwater 145 ecotone. **Journal of the North American Benthological Society**, v. 11, p. 93-102, 1992.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). **The United Nations World Water Development Report 2014**: Water and Energy. Paris, UNESCO, 2014.

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.