



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS**

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E BIOLÓGICA DA ZONA
HIPORREICA NA INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO NO RIO
BEBERIBE - PERNAMBUCO.**

Tatiane Barbosa Veras de Albuquerque

**Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge Parreira dos Santos**

Recife
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E BIOLÓGICA DA ZONA
HIPORREICA NA INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO NO RIO
BEBERIBE - PERNAMBUCO.

Tatiane Barbosa Veras de Albuquerque

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil, na Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge Parreira dos Santos

Recife
2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

A345c Albuquerque, Tatiane Barbosa Veras de.

Caracterização física e biológica da Zona Hiporreica na interação rio- aquífero no Rio Beberibe - Pernambuco / Tatiane Barbosa Veras de Albuquerque. – Recife: O Autor, 2015.

147fol. il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Jorge Pereira dos Santos.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Zona Hiporreica. 3. Interação Água Superficial e Água Subterrânea. 4. Meiofauna. 5. Filtração em Margem. 6. Sedimentos Hiporreicos. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (Orientador). II. Santos, Paulo Jorge Pereira dos (Co-orientador). III. Título.

624 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2016/ 10



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado
**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E BIOLÓGICA DA ZONA HIPORREICA NA
INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO NO RIO BEBERIBE - PERNAMBUCO**

defendida por

Tatiane Barbosa Veras de Albuquerque

Considera a candidata APROVADA

Recife, 27 de novembro de 2015

Orientadores:

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral - UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Paulo Jorge Parreira dos Santos - IFPE
(coorientador)

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral - UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Maurício Luiz Sens - UFSC
(examinador externo)

Prof. Dr. Laércio Leal dos Santos - UEPB
(examinador externo)

Prof. Dr. Roberto Lima Barcellos - UFPE
(examinador externo)

Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva - UFPE
(examinador externo)

Dedicatória

Às pessoas mais especiais da minha vida: meus Tons! Obrigada por tanto amor. Aos meus pais, Ênio (*in memoriam*) e Maria Tereza, meus primeiros e melhores mestres. Aos meus irmãos Ayron e Aury pelo eterno apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por se fazer presente em luz, força, coragem e perseverança.

Aos meus Tons (marido e filho) que superaram minha ausência e minha falta de atenção em alguns momentos.

Ao meu pai, Ênio Veras (*in memoriam*), que mesmo em sua ausência sempre iluminou meu caminho, a Maria Tereza Veras, minha querida mãe, por todo apoio, paciência e carinho. Aos meus irmãos pela nossa união.

Aos meus familiares que sempre me deram amor, valorizando meus potenciais.

Ao meu orientador, professor Jaime Cabral, pelos ensinamentos valorosos.

Aos meus amigos Adson Carvalho e Edvaldo Neto, por toda ajuda nos trabalhos de campo e nos laboratórios que passamos nessa caminhada.

Ao professor Paulo Santos, pela co-orientação e receptividade no LABDIN.

Aos professores e amigos Anderson Paiva e Laércio Leal, agradeço pelo auxílio e incentivo a pesquisa.

Ao professor Roberto Barcellos, obrigada por suas contribuições.

As minhas eternas amigas do GRH Dayana Freitas, Tássia dos Anjos e Rafaella Matos, pela força nas dificuldades encontradas e principalmente pelos momentos de descontração.

Aos meus queridos colegas do Grupo de Recursos Hídricos/UFPE, obrigada pelo incentivo, colaboração e momentos de descontração.

Aos amigos do Grupo de Tecnologia Ambiental/ UFPE, Fernanda Magalhães e André Ferreira, obrigada pelo apoio.

As secretárias que formam o PPGEC Andrea Negromonte e Claudiana Santiago.

Aos professores que fazem parte do programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Ao grupo do Laboratório da Água de Évora - PT, em especial profa. Manuela Morais, Helena Silva e Anabela Rosado, obrigada pela recepção e por toda a ajuda.

Aos Labdinianos que me acolheram tão bem. Em especial, Tita, Cori, Ana Paula e Aliny, obrigada pelos ensinamentos.

Ao grupo do Laboratório de Oceanografia Geológica - LABOGEO, em especial Lú Santos, obrigada pelo apoio e paciência.

À COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) pela colaboração para o desenvolvimento da pesquisa.

À FACEPE (Fundação de Amparo ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado de Pernambuco) pela concessão da bolsa de doutorado e financiamento do projeto.

À CAPES (Coordenação de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa concedida para o estágio de doutorado na Universidade de Évora, Portugal.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E BIOLÓGICA DA ZONA HIPORREICA NA INTERAÇÃO RIO-AQUÍFERO NO RIO BEBERIBE - PERNAMBUCO

O abastecimento de água além de ser realizado por águas superficiais também pode ser obtido pelas águas subterrâneas, onde não se pode esquecer que existe uma interação entre elas de grande potencial na gestão sustentável dos recursos hídricos. Dentro da perspectiva dessa interação, surge a técnica de Filtração em Margem (FM) como um método de tratamento de água alternativo e de baixo custo. Vários processos ocorrem durante a FM, onde esses dependem direta ou indiretamente da zona hiporreica que é uma região de intercâmbio entre o curso de água superficial e subterrâneo, onde ocorre um conjunto de reações importantes. Sendo assim, o sucesso da técnica de Filtração em Margem, entre outras coisas, depende das características do ambiente hiporreico que é responsável pela sustentabilidade do abastecimento de água através dessa tecnologia. A presente pesquisa teve o intuito de caracterizar os aspectos físicos e biológicos da zona hiporreica num trecho do rio Beberibe, Olinda - PE, onde existe um projeto piloto de Filtração em Margem com 4 poços rasos de produção e sete poços de observação. Em relação ao potencial da Filtração em Margem foi realizado um monitoramento qualitativo através de análises físico-químicas e bacteriológicas, onde foi possível observar uma melhora significativa na qualidade da água após submetida a FM. A interação rio-aquífero foi analisada através da correlação da lâmina d'água do rio Beberibe, da precipitação do local e dos níveis piezométricos dos poços de produção e dos poços de observação. A partir dos resultados, ficou evidente que existe uma conexão hidráulica entre os poços rasos e o rio Beberibe, caracterizando interação rio-aquífero. A caracterização biológica foi realizada através da quantificação e identificação da distribuição vertical da meiofauna bentônica presente nos sedimentos hiporreicos. A meiofauna esteve composta por um total de 7804 indivíduos, distribuídos em oito taxa, onde 96% dos organismos foram representados pelos rotíferas, nemátodos e anelídeos. A caracterização física da zona hiporreica consistiu em ensaios granulométricos dos sedimentos do ambiente hiporreico, onde o material representativo da superfície do leito apresentou certa homogeneização predominantemente arenosa. Além disso, foi avaliada a capacidade de transporte de volumes hídricos entre o rio e o aquífero através de ensaios de infiltração e leituras da diferença da carga hidráulica, onde observou-se que o rio Beberibe no seu curso médio, contribui para a recarga do lençol freático, com exceção de alguns dias que o fluxo no leito do rio apresentou ascendência após longos períodos de chuva. A taxa média de infiltração nos ensaios realizados foi de 0,013 mm/s. Observou-se, ainda, que a distribuição granulométrica dos sedimentos influenciam as taxas de escoamento vertical e a condutividade hidráulica da zona hiporreica.

Palavras-chave: Zona Hiporreica. Interação Água superficial e Água subterrânea. Meiofauna. Filtração em Margem. Sedimentos Hiporreicos.

ABSTRACT

PHYSICAL AND BIOLOGICAL CHARACTERIZATION OF HYPORHEIC ZONE IN RIVER-AQUIFER INTERACTION AT BEBERIBE RIVER-PERNAMBUCO

Water supply can be accomplished either by surface water or by groundwater, and it is important to state that there is an interaction between them, for the sustainable management of water resources. Riverbank Filtration technique (RBF) within the perspective of this interaction, arises as an alternative and low cost method for water treatment. Multiple processes occur during RBF, that depend directly or indirectly on the hyporheic zone, which is a region between the surface and underground water flow, where a series of important reactions occur. Therefore, the success of Riverbank Filtration technique, among other things, depends on the characteristics of hyporheic environment that is responsible for the sustainability of the water supply through this technology. The present research aimed to characterize the physical and biological aspects of the hyporheic zone in a stretch of the Beberibe river, Olinda-PE, where there is a pilot project of Riverbank Filtration with four shallow production wells and seven observation wells. In regards to the potential of Riverbank Filtration, it was conducted a qualitative monitoring by physicochemical and bacteriological analyses, where it was possible to observe a significant improvement in the water quality after submitted to RBF. River-aquifer interaction was analysed by correlation of water from the river, local precipitation and piezometric levels of production wells and observation wells. From the results, it was evident that there is a hydraulic connection between the shallow wells and the Beberibe river, featuring river-aquifer interaction. Biological characterization was performed by quantification and identification of the vertical distribution of benthic meiofauna present in hyporheic sediments. The meiofauna was composed of a total of 7804 individuals, distributed in eight taxa where 97% of organizations were represented by rotíferas, nematodes and annelids. Physical characterization of the hyporheic zone consisted of grain size sediment tests of hyporheic environment, where the material representative of the surface of the bed, presented homogenization, predominantly sandy. In addition, it was evaluated the carrying capacity of water volumes between the river and the aquifer through infiltration tests and difference of hydraulic head, where it was observed that Beberibe river in its middle course, contributes to the recharge of groundwater, with the exception of a few days that the flow in the river presented ascendancy after long periods of rain. The average rate of infiltration in the tests was of 0,013 mm/s. It was observed that particle size distribution of sediments affect the vertical flow rates and the hydraulic conductivity of the hyporheic zone.

Keywords: Hyporheic Zone. Superficial Water – subsurface Water interaction. Meiofauna. Riverbank Filtration. Hyporheic Sediment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	- Disponibilidade de água no planeta em percentual.	12
Figura 2.2	- Interação entre água superficial e subterrânea: a) Fluxo para o manancial superficial conectado; b) Fluxo para o aquífero conectado; c) Manancial superficial desconectado com o aquífero freático raso; d) Manancial superficial desconectado com o aquífero freático profundo.	14
Figura 2.3	- Esquema conceitual da zona ripária.	17
Figura 2.4	- Esquema zona hporreica.	19
Figura 2.5	- Transporte dos sedimentos de acordo com suas dimensões.	24
Figura 2.6	- Ilustração de um solo com permeabilidade baixa.	26
Figura 2.7	- Ilustração de um solo com permeabilidade alta.	26
Figura 2.8	- Ciclo de desenvolvimento de um biofilme.	33
Figura 2.9	- Esquema simplificado da técnica de Filtração em Margem.	40
Figura 2.10	- Diagrama esquemático dos processos que afetam a qualidade da água durante o processo de Filtração em Margem.	43
Figura 3.1	- Bacia hidrográfica do rio Beberibe.	49
Figura 3.2	- Média mensal da precipitação no posto de Olinda 199 (2003 - 2013).	51
Figura 3.3	- Localização dos pontos de pesquisa no rio Beberibe.	56
Figura 3.4	- Ilustração do ponto 1.	57
Figura 3.5	- Ilustração do ponto 2.	57
Figura 3.6	- Ilustração do ponto 3.	58
Figura 3.7	- Imagem de satélite da EE de Caixa d'Água e localização do rio Beberibe.	59
Figura 3.8	- Perfil litológico transversal ao rio Beberibe no módulo experimental.	60

Figura 3.9	- Perfil litológico paralelo ao rio Beberibe no módulo experimental.	60
Figura 3.10	- Foto do poço de produção na EE de Caixa d'Água.	61
Figura 3.11	- Amostras de sedimento coletadas a cada metro durante a perfuração dos poços de produção 02, 03 e 04 na área experimental de FM.	62
Figura 3.12	- Instalação do poço 04.	62
Figura 3.13	- Localização dos piezômetros e dos poços de produção (na área experimental de Filtração em Margem no rio Beberibe - PE.	63
Figura 4.1	- Detalhe dos locais onde foram realizados ensaios de infiltração no rio Beberibe.	67
Figura 4.2	- Material utilizado para realização dos ensaios de infiltração.	68
Figura 4.3	- Operação de fixação do cilindro na zona hiporreica.	68
Figura 4.4	- Esquema do sistema para ensaios de infiltração.	69
Figura 4.5	- Infiltrômetro de cilindro com aba lateral.	70
Figura 4.6	- Piezômetro diferencial, aparelho usado para a leitura do fluxo vertical do rio: A) Detalhe do aparelho; B) Aparelho sendo usado no local.	72
Figura 4.7	- Leitura do fluxo vertical do rio: A) Fluxo ascendente; B) Fluxo descendente; C) Sem fluxo.	73
Figura 4.8	- Amostrador utilizado para coletar amostras para ensaios granulométricos.	74
Figura 4.9	- Amostrador (<i>corer</i>) utilizado para coletar amostras da meiofauna.	76
Figura 4.10	- Metodologia realizada em campo para coleta das amostras da meiofauna: A) Coleta da meiofauna hiporreica; B) Imersão no formaldeído 4%.	77
Figura 4.11	- Metodologia utilizada para lavagem das amostras da meiofauna.	78
Figura 4.12	- Placa de Dollfus.	79
Figura 5.1	- Localização na bacia do rio Pardiela em Portugal.	86

Figura 5.2	- Localização do poço e do ponto de coleta do rio Pardiela.	86
Figura 5.3	- Operação de coleta da água das amostras do poço e do ponto do rio Pardiela.	87
Figura 5.4	- Amostras do rio Pardiela e do poço de produção para análise físico-química.	87
Figura 5.5	- Conexão do reservatório de água no cilindro.	88
Figura 5.6	- Ensaio de infiltração: margem e leito do rio Pardiela.	88
Figura 5.7	- Medições da lâmina d'água e temperatura do rio Pardiela.	89
Figura 6.1	- Precipitação diária e médias das taxas de infiltração no ponto 2 localizado ao longo do rio Beberibe.	98
Figura 6.2	- Precipitação diária e médias das taxas de infiltração no ponto 3 localizado ao longo do rio Beberibe.	99
Figura 6.3	- Leituras quinzenais da diferença da carga hidráulica no leito do rio Beberibe em relação ao nível do rio no período entre 11/02/2014 e 07/11/2014.	100
Figura 6.4	- Percentual de abundância da meiofauna nos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe distribuídos nos pontos de estudo.	102
Figura 6.5	- Percentual de abundância dos grupos mais representativos da meiofauna dos sedimentos hiporreicos para o conjunto de pontos analisados do rio Beberibe.	103
Figura 6.6	- Amostra devidamente corada da meiofauna hiporreica dos sedimentos do rio Beberibe, com o aumento de 4x com o auxílio da lupa e destaque aos grupos mais representativos com o aumento de 40x com o auxílio de microscópio estereoscópico.	103
Figura 6.7	- Percentual de abundância dos grupos mais representativos da meiofauna nos sedimentos hiporreicos nos três pontos analisados do rio Beberibe.	105
Figura 6.8	- Densidades médias da taxa da meiofauna presente nos sedimentos hiporreicos nos três pontos analisados; As barras representam a média \pm intervalo de confiança de 95%. A) ponto 1; B) ponto 2; C) ponto 3.	108
Figura 6.9	- Densidade média (indivíduos / 10 cm ²) em relação as profundidades analisadas (0- 5 cm e 5-10 cm) dos três pontos de estudo do rio	109

Beberibe.

Figura 6.10	- Densidade média (indivíduos/ 10 cm ²) em relação aos locais analisados (leito e margem) dos três pontos de estudo do rio Beberibe.	110
Figura 6.11	- Densidade média (indivíduos/ 10 cm ²) em relação as estações analisadas (verão e inverno) dos três pontos de estudo do rio Beberibe.	110
Figura 6.12	- Densidades médias da meiofauna presente nos sedimentos hiporreicos dos três pontos relacionados com as estações do ano e os pontos analisados. As barras representam a média ± intervalo de confiança de 95%. A) ponto 1; B) ponto 2; C) ponto 3.	112
Figura 6.13	- Ordenação MDS da estrutura da comunidade da meiofauna para as profundidades analisadas (0- 5 cm e 5-10 cm) nos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe.	113
Figura 6.14	- Ordenação MDS da estrutura da comunidade da meiofauna para os locais analisados (leito e margem) nos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe.	114
Figura 6.15	- Ordenação MDS da estrutura da comunidade da meiofauna para as estações do ano analisadas (verão e inverno) nos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe.	114
Figura 6.16	- Gráficos do monitoramento físico-químico da água do rio Beberibe e do poço de produção realizado na área de estudo, Olinda - PE	119
Figura 6.17	- Gráfico do monitoramento dos níveis piezométricos dos poços , de observação, dos poços de produção, da lâmina d'água do rio Beberibe e da precipitação diária no módulo experimental, Olinda - PE, entre fevereiro e novembro de 2014.	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Classificação das partículas do solo, conforme ABNT.	25
Tabela 3.1	- Estações de amostragem da rede de monitoramento do rio Beberibe.	55
Tabela 3.2	- Coordenadas dos pontos de análise.	56
Tabela 3.3	- Vazão média dos pontos de estudo num trecho do rio Beberibe.	58
Tabela 3.4	- Vazão dos poços de produção da estação experimentas FM.	63
Tabela 4.1	- Classificação do grau de seleção dos sedimentos de acordo com seus diâmetros.	75
Tabela 4.2	- Cotas da boca de cada poço de observação para monitoramento piezométrico, adotando como cota 0,00 m o piso da cada de bombas.	82
Tabela 6.1	- Análise granulométrica - PONTO 1.	91
Tabela 6.2	- Análise granulométrica - PONTO 2.	92
Tabela 6.3	- Análise granulométrica - PONTO 3.	93
Tabela 6.4	- Ensaio de infiltração realizados no Leito e na margem do rio Beberibe no tempo de 1200s e área de $5,03 \times 10^3 \text{ mm}^2$ - PONTO 2.	95
Tabela 6.5	- Ensaio de infiltração realizados no Leito e na margem do rio Beberibe no tempo de 1200 s e área de $5,03 \times 10^3 \text{ mm}^2$ - PONTO 3.	97
Tabela 6.6	- Diferença de carga hidráulica no leito do rio Beberibe, em cm, em relação ao nível d'água no rio.	101
Tabela 6.7	- Abundancia média (indivíduos) e desvio padrão (DP) dos grandes grupos da meiofauna encontrados no ponto 1 do rio Beberibe.	105
Tabela 6.8	- Abundancia média (indivíduos) e desvio padrão (DP) dos grandes grupos da meiofauna encontrados no ponto 2 do rio Beberibe.	106
Tabela 6.9	- Abundancia média (indivíduos) e desvio padrão (DP) dos grandes grupos da meiofauna encontrados no ponto 3 do rio Beberibe.	107
Tabela 6.10	- Concentrações de Coliformes totais e <i>Escherichia coli</i> no rio Beberibe e no poço de produção.	116
Tabela 6.11	- Parâmetros físico-químicos mensurados do poço de produção 1 e nos três pontos do rio Beberibe durante amostras de outubro, novembro e dezembro de 2014.	117
Tabela 6.12	- Monitoramento piezométrico realizado entre fevereiro e dezembro de 2014, no módulo experimental de FM em Olinda - PE.	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
CONDEPE/FIDEM	Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco
CPRH	Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências
DAE	Departamento de Água e Esgoto
DP	Desvio padrão
EE	Estação Elevatória
EPA	Environmental Protection Agency
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FIDEM	Fundação de Desenvolvimento Municipal (atualmente, CONDEPE/FIDEM)
FM	Filtração em Margem
GL 1	Grupo de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos de Pernambuco
GPS	Global Position System
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ITEP	Instituto de Tecnologia de Pernambuco
LABDIN	Laboratório de Dinâmica de Populações
LABOGEO	Laboratório de Oceanografia Geológica
MO	Matéria orgânica
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
RBF	River Bank Filtration
RMR	Região metropolitana de Recife
SPT	Standard Penetration Test
SECTMA	Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco
SEPLAN	Secretaria de Planejamento e Gestão

SGQC	Sistema de Gestão de Controle de Qualidade
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
UE	Universidade de Évora
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
USEPA	United States Environmental Protection Agency
USP	Universidade de São Paulo
uH	Unidade de Hazen
uT	Unidade de Turbidez
UTM	Universal Transversal de Mercator
VMP	Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1 - INTRODUÇÃO	2
1.2 - HIPÓTESE	5
1.3 - OBJETIVOS	6
1.3.1 - Objetivo geral	6
1.3.2 - Objetivos específicos	6
1.4 - ESBOÇO DA TESE	7
2 - EMBASAMENTO TEÓRICO E CONCEITUAL	9
2.1 - ABORDAGEM HIDROLÓGICA	10
2.1.1 - Aspectos hidrológicos	10
2.1.2 - Interação rio-aquífero	13
2.1.3 - Aspectos ambientais	16
2.2 - ZONA HIPORREICA	19
2.2.1 - Formação da zona hiporreica	23
2.2.2 - Características do solo	24
2.2.3 - Colmatação	28
2.2.4 - Meiofauna	30
2.2.4.1 - <i>Biofilmes</i>	32
2.2.5 - Dinâmica do fluxo vertical	34
2.3 - FILTRAÇÃO EM MARGEM	36
2.3.1 - A Filtração em Margem no Brasil e no Mundo	36
2.3.2 - A técnica FM	39
2.3.3 - Processos envolvidos	43

2.3.4 - Influência da zona hiporreica na FM	45
3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
3.1 - CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	50
3.2 - CONDIÇÕES GEOLÓGICAS	51
3.3 - COBERTURA VEGETAL	52
3.4 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	52
3.5 - CONDIÇÕES HÍDRICAS	53
3.6 - ÁREA DE PESQUISA	55
3.6.1 - Pontos de estudo no rio Beberibe	55
3.6.2 - EE de Caixa d'água	58
3.6.2.1 - <i>Projeto piloto</i>	59
4 - METODOLOGIA	65
4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ZONA HIPORREICA	66
4.1.1 - Caracterização física	66
4.1.1.1 - <i>Ensaio de infiltração</i>	66
4.1.1.2 - <i>Leitura da diferença da carga hidráulica</i>	71
4.1.1.3 - <i>Granulometria</i>	73
4.1.2 - Caracterização biológica	75
4.2 - FILTRAÇÃO EM MARGEM	81
4.2.1 - Monitoramento qualitativo	81
4.2.2 - Monitoramento quantitativo	82
5 - EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL	84
5.1 - UNIVERSIDADE DE ÉVORA - PORTUGAL	85
5.1.1 - Análises dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos	87
5.1.2 - Ensaio de infiltração	88
6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
6.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ZONA HIPORREICA	91
6.1.1 - Caracterização física	91
6.1.1.1 - <i>Granulometria</i>	91
6.1.1.2 - <i>Taxa de infiltração</i>	94

6.1.1.3 - <i>Leitura da diferença da carga hidráulica</i>	100
6.1.2 - Caracterização biológica	102
6.2 - FILTRAÇÃO EM MARGEM	115
6.2.1 - Monitoramento qualitativo	115
6.2.1.1 - <i>Análises bacteriológicas</i>	115
6.2.1.2 - <i>Análises físico-químicas</i>	116
6.2.2 - Monitoramento quantitativo	120
6.2.2.1 - <i>Piezometria</i>	120
7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	124
8 - REFERÊNCIAS	126

CAPÍTULO 1

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

A água é o recurso natural mais abundante do planeta, de maneira quase que onipresente na vida da população, ela esta no dia a dia das pessoas. Numa economia mundial cada vez mais integrada, além do crescimento populacional, a urbanização e a industrialização também ampliam a demanda pelo produto "água".

Nos últimos anos vivencia-se uma realidade em que a quantidade e a qualidade dos recursos naturais estão cada dia mais ameaçados. Um dos maiores desafios a ser enfrentado pela geração atual e pelas futuras gerações está na disponibilidade de água para consumo humano. O problema de abastecimento público de água advém não só da quantidade de água, mas principalmente da qualidade de água disponível, sendo muitas vezes um fator determinante no quadro de escassez, sobretudo nas grandes cidades, onde a poluição compromete os mananciais.

Nesse panorama, as preocupações com o uso e a qualidade de água adquirem especial importância, onde vários países convivem com a escassez da água provocada por diferentes motivos, desde a poluição de fontes naturais até secas sem precedentes.

No Brasil, muitos mananciais apresentam algum tipo de poluição e a situação se agrava com o crescente descarte de esgoto bruto diretamente nas águas superficiais. O Estado de Pernambuco também vêm sendo prejudicado com a falta de água, onde além de vários mananciais apresentarem níveis alarmantes de degradação o estado vem sofrendo com a estiagem.

A necessidade crescente por água potável tem aumentado o interesse por técnicas de tratamento de água como a Filtração em Margem e muitas pesquisas vêm sendo desenvolvidas neste âmbito para aprimoramento da técnica na produção de água de melhor qualidade.

A Filtração em Margem (FM) tem sido utilizada no fornecimento de água para abastecimento público por mais de um século, reconhecida como um eficiente processo de atenuação da poluição, assegurando sustentabilidade no fornecimento de água potável a um custo mais baixo (FREITAS, 2014). É uma técnica de baixo custo, que

produz água de melhor qualidade quando comparada a água extraída diretamente do corpo d'água superficial, normalmente impróprio para o consumo humano.

A linha de pesquisa deste trabalho pretende estudar a interação entre água superficial e água subterrânea, pois dentro dessa perspectiva, a FM utiliza poços localizados próximos às margens de um rio ou de um lago, sendo que a água chega aos poços por infiltração induzida pelo bombeamento.

Nos últimos anos muitos estudos tem focado as interações de pequena escala na interface entre o rio e o aquífero, também conhecida como zona hiporreica. Este ambiente tem sido um tema de pesquisa bastante ativo em vários lugares do mundo (GENEREUX *et al.*, 2008; LAUTZ, KRANES & SIEGEL, 2009; BOANO, REVELLI & RIDOFI, 2010; BIANCHIN, SMITH & BECKIE 2011; LAWRENCE *et al.*, 2013; ALBUQUERQUE *et al.*, 2014; LENCIONE & SPITALE, 2015), onde é considerado um ambiente de grande dinâmica. É um meio muito heterogêneo e dinâmico, necessitando de avaliações contínuas.

A zona hiporreica pode ser definida como um volume subsuperficial de sedimentos e um adjacente espaço poroso a um curso d'água, onde as propriedades dos sedimentos e a distribuição dos grãos controlam o volume intersticial. O estudo do fluxo de água na zona hiporreica tem significativa relevância, podendo representar uma grande oportunidade para se avaliar a eficácia da zona hiporreica na melhoria da qualidade de água ou servindo como uma barreira contra a contaminação do aquífero (LAWRENCE *et al.*, 2013). Esse conhecimento promove a base dos princípios destas relações para uma efetiva investigação do fluxo vertical de água na interação rio-aquífero.

Além disso, existe uma grande infiltração de material orgânico nesses interstícios favorecendo o estabelecimento de algumas espécies, onde destaca-se a meiofauna. A composição meiofaunística e suas características tem sido utilizada em diversos estudos para demonstrar complexas relações com algumas variáveis ambientais, tais como: temperatura, características e a composição geoquímica do sedimento (ARMONIES & HELLWIG-ARMONIES, 1987; GIÈRE, ELEFTHERIOU & MURISON, 1988; CARTES *et al.*, 2002), os processos hidrodinâmicos (PALMER, 1986), alguns indicadores de poluição e contaminação antropogênicos (SOMERFIELD & WARWICK, 1996) e degradação da matéria orgânica (CARTES *et al.*, 2002; PFANNKUCHE & SOLTWEDEL, 1998).

Diante do exposto, é de muita relevância conhecer as características da zona hiporreica como uma das zonas de interação das águas subterrâneas com as águas superficiais, promovendo a base para uma efetiva análise da interação rio-aquífero.

A técnica FM tem sido utilizada com sucesso em várias partes do mundo. No estado de Pernambuco um sistema piloto de Filtração em Margem foi instalado nas margens no rio Beberibe. Atualmente o projeto conta com 4 poços de produção e 7 poços de observação para avaliação da técnica sob condições geológicas e hidrológicas locais. Além de informações importantes sobre qualidade de água e interação rio-aquífero relacionados ao sistema piloto de Filtração em Margem instalado no rio Beberibe-PE, essa tese propõe-se a contribuir com conhecimentos sobre a dinâmica do fluxo vertical complementadas com informações granulométricas e caracterização da meiofauna hiporreica.

1.2 - HIPÓTESE

A zona hiporreica é uma região de grande dinâmica física e biológica e é importante para a recarga dos aquíferos.

1.3 - OBJETIVOS

1.3.1 - Objetivo geral

Essa pesquisa tem como objetivo principal caracterizar a zona hiporreica nos aspectos físicos e biológicos para aprofundar o estudo da interação entre águas superficiais e águas subterrâneas, visando à técnica de Filtração em Margem para o abastecimento público no Estado de Pernambuco.

1.3.2 - Objetivos específicos

- Caracterizar os sedimentos que compõem a zona hiporreica do rio Beberibe no trecho analisado: na estrutura física e na distribuição da meiofauna bentônica;
- Investigar a dinâmica de transporte de volumes hídricos que ocorre no ambiente hiporreico avaliando o fluxo vertical de água;
- Avaliar os níveis piezométricos sob efeitos hidrológicos dos níveis da lâmina d'água no rio Beberibe e precipitação;
- Analisar a eficiência da técnica FM para remoção de poluentes através de comparações da qualidade da água dos poços de produção e do rio Beberibe.

A presente tese de doutorado encontra-se dividida e apresentada em formato de capítulos.

O Capítulo 1 refere-se as considerações iniciais, onde encontra-se a introdução que descreve o tema da tese e sua relevância, objetivos e o esboço da tese.

O Capítulo 2 destaca o embasamento teórico e conceitual, onde ocorre uma breve revisão de literatura sobre aspectos relacionados a caracterização física e biológica da zona hiporreica na interação água superficial e subterrânea. Sendo feita uma abordagem hídrica, relacionando o tema com aspectos hidrológicos, ambientais e a interação rio-aquífero. Ainda neste capítulo se apresenta aspectos relevantes da zona hiporreica, ressaltando sua formação, características do solo, colmatação, meiofauna, biofilme e dinâmica do fluxo vertical. Além disso, aborda-se a técnica de Filtração em Margem no que concerne o histórico da técnica no Brasil e no mundo, os processos envolvidos e a influência da zona hiporreica na técnica de Filtração em Margem.

No Capítulo 3 estão descritas as características relevantes da área de estudo inseridas na bacia hidrográfica do rio Beberibe como: condições climáticas, geológicas, hídricas, cobertura vegetal e uso e ocupação do solo. Neste Capítulo também é enfatizado aspectos da área de pesquisa, onde são detalhados os pontos de estudo do rio Beberibe, do terreno da Estação Elevatória de Caixa d'Água e alguns aspectos das metodologias utilizadas na tese como implantação do projeto piloto de Filtração em Margem.

O Capítulo 4 aborda as metodologias utilizadas para atender os objetivos do presente estudo, sendo divididas em duas etapas. Primeiramente são descritas as técnicas utilizadas para caracterização física e biológica da zona hiporreica, em seguida são descritas as metodologias usadas para o estudo da Filtração em Margem.

O Capítulo 5 descreve a experiência internacional através de um estágio de doutorado de 4 meses na Universidade de Évora, Portugal, no Laboratório da Água.

No Capítulo 6 são abordados os resultados e discussões referentes a caracterização da zona hiporreica. Onde a caracterização física apresenta resultados dos ensaios granulométricos, testes de infiltração e da leitura da diferença de carga hidráulica. A caracterização biológica apresenta resultados sobre a estrutura da comunidade da meiofauna hiporreica presente nos sedimentos do rio Beberibe. Ainda

nesse capítulo, são relatados os resultados do monitoramento quantitativo e qualitativo referentes a técnica de Filtração em Margem.

No Capítulo 7 encontra-se as considerações finais da tese assim como recomendações e perspectivas de futuras pesquisas relacionadas ao tema do presente estudo.

O Capítulo 8 traz as referências bibliográficas citadas durante todos os capítulos da tese em questão.

CAPÍTULO 2

EMBASAMENTO TEÓRICO E CONCEITUAL

2 . EMBASAMENTO TEÓRICO E CONCEITUAL

2.1 - ABORDAGEM HIDROLÓGICA

A água é essencial a vida no planeta. Apesar de ser um recurso renovável, o consumo em excesso, aliado a poluição e ao desperdício, vem causando um grande déficit global. A escassez de água esta se tornando uma realidade em várias regiões do planeta.

A contaminação dos recursos hídricos sem dúvidas é um dos principais problemas para a saúde humana. Diante disso o abastecimento público de água em termos de quantidade e qualidade é uma preocupação crescente não só no Brasil, mas em todo o mundo.

O abastecimento de água além de ser realizado por águas superficiais também é obtido diretamente por outra fonte hídrica que são as águas subterrâneas. O uso da água subterrânea para fins de abastecimento urbano e/ou industrial tem motivado cada vez mais o interesse dos pesquisadores sobre as relações existentes entre água superficial e água subterrânea, onde o foco principal dessas pesquisas é a gestão sustentável dos recursos hídricos.

2.1.1 - Aspectos hidrológicos

Compreender a importância da água e conhecer suas principais particularidades é um ponto de partida para uma gestão eficaz.

As águas superficiais foram definidas por Tucci (2004) como as águas que escoam ou estão armazenadas sobre a superfície da Terra, devido à contribuição das águas de precipitação, da recarga de aquíferos ou de escoamento de outros corpos d'água superficiais. Sua ocorrência é definida através do espaço e do tempo, pois depende de diversos fatores relacionados ao clima, relevo, vegetação e a própria hidráulica do solo.

Os ambientes armazenadores de águas superficiais estão sujeitos a uma certa mobilidade gerando uma grande dificuldade para estabelecer suas reservas.

A qualidade e a quantidade dos corpos hídricos superficiais são extremamente vulneráveis a diversas variações, pois sofrem influências do comportamento natural do ciclo hidrológico, além das atividades antrópicas. Nesse sentido já se pode ter uma noção da variabilidade quali-quantitativa que as águas superficiais estão sujeitas.

Em relação ao uso da água de superfície, o Brasil encontra-se em uma situação bastante similar aos países desenvolvidos, pois a agricultura tem certa predominância sobre os demais: doméstico e industrial.

Em geral a ocorrência da água é influenciada pelo homem, pois as atividades antrópicas podem modificar sua qualidade e alterar direta ou indiretamente o evento natural do ciclo hidrológico.

Campos de conhecimento diversos tratam da água na superfície, tais como: Engenharia Hidráulica, Engenharia Sanitária, Limnologia, Engenharia Agrícola, entre outros, o que vai definir a linha de estudo é a função do seu uso.

Além das águas superficiais, as águas subterrâneas também tem um papel fundamental na natureza, sendo de grande relevância a compreensão da sua função no ciclo hidrológico para que o ambiente natural mantenha certo equilíbrio.

Rebouças (1992) já dizia que dentro da moderna abordagem do gerenciamento integrado dos recursos hídricos, as águas subterrâneas representam a parcela do ciclo hidrológico que transita pelo subsolo de um sistema hidrográfico.

De um modo geral, as águas subterrâneas estão intimamente ligadas as águas superficiais, uma vez que constituem uma parte de água precipitada, ou seja, a água subterrânea é originada na área de superfície.

De acordo com Vaitsman & Vaitsman (2005), as águas subterrâneas podem ser consideradas todas as águas existentes abaixo da crosta terrestre que preenchem cavidades, fissuras, poros, falhas e fraturas que constituem o perfil geológico das rochas que formam os aquíferos.

Quando ocorre a infiltração da água no solo, uma parte da água fica retida nas regiões mais rasas do solo, não preenchendo os vazios, esta região é chamada de zona não saturada. Outra parte da água, através da força da gravidade, consegue atingir as áreas mais profundas do solo, constituindo a zona saturada.

Pode-se considerar que a disponibilidade e a ocorrência hídrica subterrânea é uma combinação de fatores climáticos e geológicos de uma determinada região. A ocorrência de formações rochosas normalmente apresenta uma capacidade de

armazenamento baixa, onde a disponibilidade normalmente ocorre nas fissuras. Esta é uma condição que apresenta a disponibilidade hídrica completamente dependente do clima. Mas, nas formações hidrogeológicas sedimentares, existe um potencial de armazenamento de água maior, nesta condição a disponibilidade hídrica fica menos dependente do clima da região.

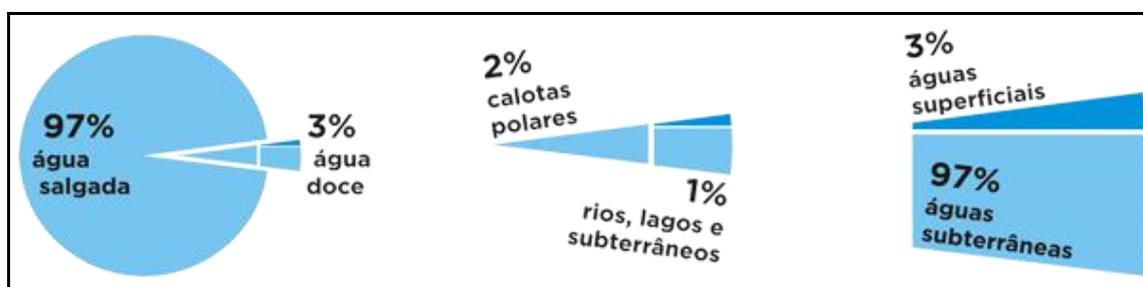
Enquanto a água superficial normalmente ocorre em períodos de chuva, os aquíferos armazenam água em diferentes níveis e sustentam a vazão dos rios ao longo do tempo permitindo que o fluxo de grande parte dos rios se apresente perene ao longo do tempo. Isto ocorre devido a baixa velocidade (1 m/dia a 100 m/dia, TUINHOF *et al.*, 2003) de movimento da água no solo entre diferentes camadas geológicas. Sendo assim, o tempo do ciclo da água subterrânea é de dezenas ou milhares de anos.

Atualmente a água subterrânea contribui de forma bastante ativa no abastecimento da população, de maneira artificial através de poços verticais ou de forma natural aflorando na superfície da terra.

A distribuição das águas superficiais e subterrâneas não ocorre de maneira homogênea, ou seja, a disponibilidade delas é muito variável, uma vez que elas se inter-relacionam no ciclo hidrológico.

Apesar da quantidade de água disponível no ambiente ser superior a necessidade do homem, normalmente existe um certo desequilíbrio em relação a distribuição populacional. O planeta é composto por 3/4 de água e 1/4 de terra, mas essa diferença não significa ter água de sobra ou mesmo água doce. Apenas uma pequena parcela de água doce esta disponível para os diferentes usos (Figura 2.1).

Figura 2.1- Disponibilidade de água no planeta em percentual.



Fonte: DAE (2014).

E para agravar a situação, considerando o total de água existente no planeta apenas uma pequena parcela é doce, desse total, uma pequena parcela representa as

águas superficiais e só 0,3% se encontram em lugares de fácil acesso sob forma de rios, lagos e livres na atmosfera. As águas subterrâneas são encontradas numa parcela maior. De toda água existente no planeta, cerca de 97% é disponibilizada em forma de água salgada.

Independente da forma, estado ou posição, o importante é que toda a água do planeta circula e integra-se ao ambiente através do ciclo hidrológico.

Todas as projeções relacionadas a demanda e a oferta dos recursos hídricos estimam a falta de água no mundo, ao considerar que este é um planeta cuja superfície é coberta principalmente por água. Mas, 97% desta é imprópria para consumo humano ou para irrigar cultivos, por ser salgada e parte do resto está fora de alcance em aquíferos profundos, glaciais e calotas polares.

O importante é que a água doce, seja superficial ou subterrânea, vem sendo considerada por alguns especialistas como o recurso natural mais valioso desse milênio e os problemas atuais relacionados à gestão de recursos hídricos são desafiadores e urgentes.

2.1.2 - Interação rio-aquífero

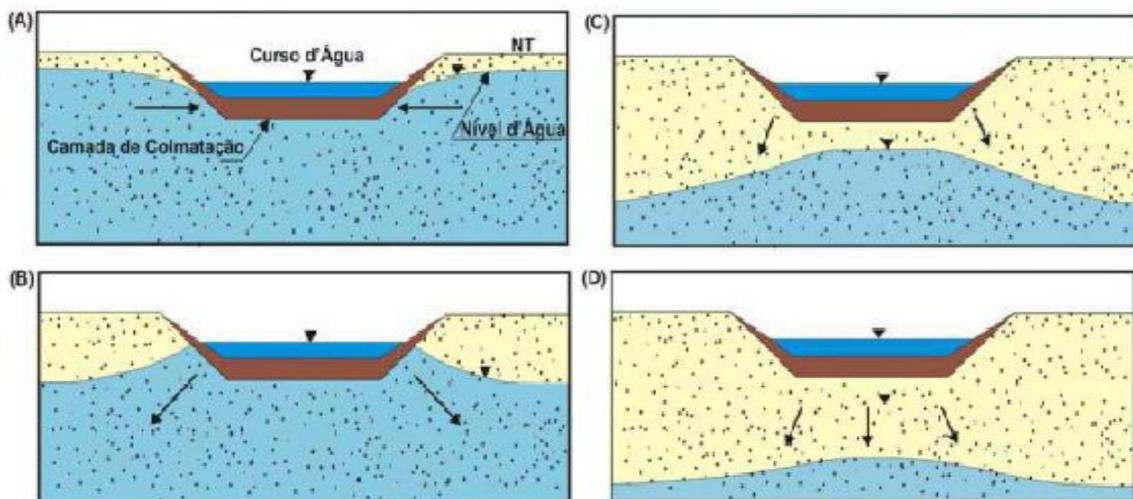
Compreender e estudar a interação que um manancial exerce sobre o outro é de fato uma grande contribuição para um efetivo gerenciamento dos recursos hídricos. Entretanto, independente da existência ou não de ligações diretas entre águas de superfície e subterrâneas, o planejamento e a gestão de recursos hídricos deve sempre incluir os dois recursos, incorporando cada um deles no sistema global, de acordo com as suas características específicas (COSTA *et al.*, 2008) . De uma maneira ou de outra, qualquer controle exercido sobre um recurso acabará afetando o outro (FEITOSA & MANOEL FILHO, 1997).

Nessa perspectiva o interesse em estudos relacionados a interação entre água superficial e a água subterrânea tem aumentado significativamente nos últimos anos BRUNKE & GONSER 1997; SILVA, 2007; LAUTZ *et al.*, 2009; YAO *et al.*, 2015. Algumas pesquisas se limitaram ao entendimento do processo físico dessa interação, outras procuraram quantificar e analisar essa interface de maneira mais complexa. É importante saber que cada metodologia tem suas particularidades e que a taxa de troca hídrica entre a água subterrânea e a água superficial varia no espaço e no tempo.

A interação entre água superficial e água subterrânea primeiramente é governada 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. Os aspectos geomorfológicos também podem caracterizar essa interação, onde através de declividade das margens, deposição fluvial/lagunar, sinuosidade, largura e profundidade do rio é possível avaliar se existe a ocorrência do fluxo de água superficial para o fluxo subterrâneo ou vice-versa.

A configuração do fluxo entre os corpos hídricos superficiais e subterrâneos podem ocorrer de duas maneiras distintas: a condição efluente que é caracterizada pelo escoamento das águas subterrâneas na direção do corpo d'água superficial e a condição influente que ocorre quando as águas superficiais contribuem para o fluxo de subsuperfície. Diante disso, a ocorrência das relações rio-aquífero pode acontecer de duas formas distintas, podendo existir conexão direta entre os meios superficiais e subterrâneos, onde um alimenta o outro, esse é o sistema hidráulicamente conectado em condição influente ou efluente; ou no caso de não existir uma continuidade entre eles, ocorrendo à possibilidade de um manancial superficial alimentar um aquífero independente de sua profundidade caracterizando um sistema hidráulicamente desconectado (USGS, 1998; SOPHOCLEOUS, 2002; BOUWER, 2002). A Figura 2.2 ilustra as formas de interação citadas.

Figura 2.2 - Interação entre a água superficial e subterrânea: a) Fluxo para o manancial superficial conectado; b) Fluxo para o aquífero conectado; c) Manancial superficial desconectado com o aquífero freático raso; d) Manancial superficial desconectado com o aquífero freático profundo.



Fonte: Adaptado de Sophocleous (2002).

Quando um corpo hídrico superficial com características influentes sofre extração de água pode promover a depleção do lençol freático, pois vai ocorrer uma diminuição da contribuição superficial para o aquífero. O mesmo acontece quando a água do aquífero é retirada, ocorre uma diminuição na sua contribuição aos corpos hídricos superficiais.

Por isso a movimentação dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos de formas segregadas devem ser planejadas e ponderadas, pois podem causar danos nas inter-relações entre esses sistemas (SILVA, 2007).

Woessner (2000) afirma que o maior intercâmbio hidrológico entre as águas subterrâneas e águas superficiais em uma paisagem é influenciado por vários fatores como, pela distribuição e magnitude da condutividade hidráulica, ambas dentro do canal de fluxo e geometria e posição do canal de fluxo dentro da planície aluvial. Por outro lado, as variáveis do regime de escoamento podem alterar a condutividade hidráulica dos sedimentos através de processos de erosão e deposição e, conseqüentemente, afetar a intensidade das interações água subterrânea com água superficial (SOPHOCLEOUS, 2002).

As formas de interação rio-aquífero podem ser modificadas por uma série de influências externas, condições ambientais e até variações sazonais.

O ambiente de interface entre águas superficiais e águas subterrâneas é bastante influenciado. A precipitação influencia indiretamente, gerando escoamento no rio e conseqüentemente transporte de sedimentos. Em consequência disso, há modificações significativas no fluxo do escoamento superficial ou subsuperficial. Além disso, eventos de precipitação podem gerar a elevação dos níveis do aquífero, influenciando a diferença de cargas hidráulicas entre o rio e o aquífero.

Brunke & Gonser (1997) resumem de forma abrangente as interações entre os rios e águas subterrâneas. Sob condições de baixa precipitação, o fluxo de base subterrâneo constitui o fluxo de água superficial na maior parte do ano (condição efluente). Em contraste, em condições de elevada precipitação, escoamento superficial e este interfluxo aumenta gradualmente, levando a maior pressão hidráulica no curso inferior do rio, que causa a mudança da condição efluente para a condição de afluyente, ocorrendo infiltração pelas margens e promovendo a recarga do aquífero.

Outra variável que pode influenciar no comportamento do nível do rio, podendo alterar a dinâmica do fluxo hídrico, é o movimento e depósito dos sedimentos do leito,

caracterizando a camada de colmatção, assim como o fenômeno de transporte que tem relação direta com a qualidade da água.

O meio poroso e o curso d'água são ligados por uma série de conexões de fluxo, pois são formados por uma rica variação de sedimentos. Essa heterogeneidade é quem vai caracterizar a permeabilidade da interface. O leito do rio é formado por uma série de partículas de tamanhos variados, onde as mais finas normalmente são retidas ocorrendo à obstrução do leito. Esse processo tende a diminuir a quantidade de água que é infiltrada minimizando a interação rio-aquífero.

Independentemente da importância das águas superficiais e das águas subterrâneas, não se pode esquecer que existe uma grande interação entre elas, assim a má qualidade que por vezes se encontra nas águas superficiais pode ser transmitida as águas subterrâneas e vice-versa.

A água subterrânea e a água superficial podem estar intimamente ligadas mesmo quando espacialmente separadas. Cada uma contribui para a outra, tendo estas interações um papel importante na hidrologia da região (USGS, 2009). Apesar de fazerem parte do mesmo ciclo, essa interação é extremamente complexa e depende de vários fatores para seu entendimento.

2.1.3 - Aspectos ambientais

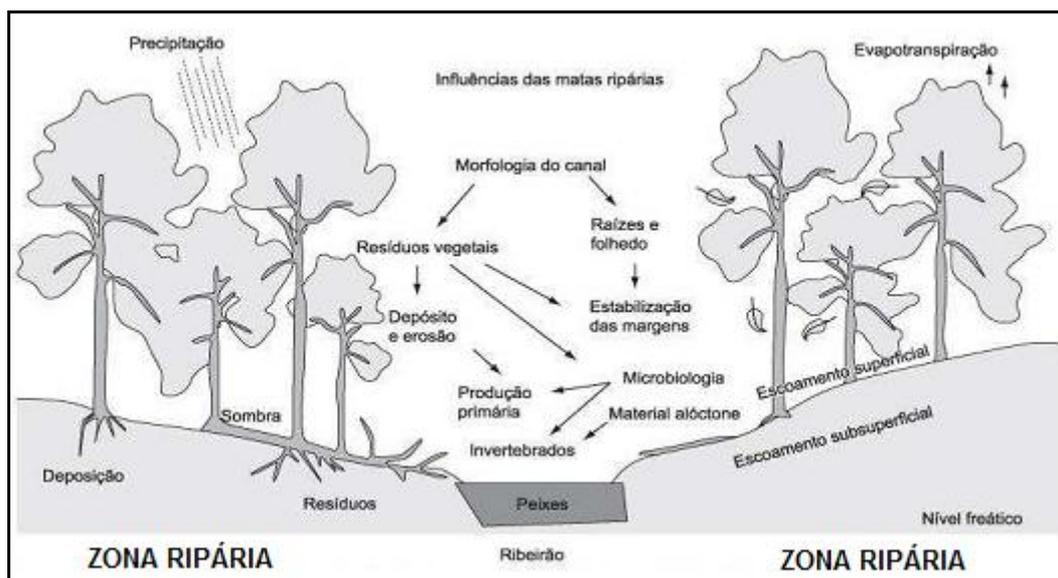
Existem duas zonas distintas entre as águas superficiais e as águas subterrâneas, pois normalmente entre os aquíferos e os corpos d'água superficiais passa um fluxo de água favorecendo a criação de um habitat dinâmico na zona de mistura dessas águas.

A zona ripária é uma das zonas dessa interação, ela tem um importante papel na manutenção dos recursos hídricos em relação à vazão e a qualidade da água, bem como o ecossistema aquático.

Durante muitos anos acreditava-se que as alterações que ocorriam na água fluvial ou intersticial aconteciam por processos completamente distintos, onde os ambientes não se influenciavam. Desde a década de 1980, ocorreram mudanças de paradigmas ambientais e as pesquisas e estudos sobre as zonas ripárias têm sido intensificados em todo o mundo (GREGORY *et al.*, 1991; WALKER *et al.*, 1996; NAIMAN & DÉCAMPS, 1997; LIMA & ZAKIA, 2006; ABELL, ALLAN & LEHNER, 2007; PERT *et al.*, 2010).

As zonas ripárias são áreas de saturação hídrica da microbacia, encontradas principalmente ao longo das margens e nas cabeceiras da rede de drenagem, mas podendo ocorrer também em partes mais elevadas da encosta, dependendo da topografia e das condições de transmissividade do solo (ATTANSIO *et al.*, 2012). A interação entre o corpo d'água superficial e o aquífero é evidente na zona ripária (Figura 2.3).

Figura 2.3 - Esquema conceitual de zona ripária.



Fonte: Adaptado de Likens (1992).

Mesmo estando intimamente ligada ao curso d'água, os limites da zona ripária não são fáceis de serem demarcados, pois o alcance da planície de inundação é muito variável. O limite a montante, por exemplo, seria a nascente, mas a zona saturada da microbacia poderia se estender consideravelmente durante parte do ano, o que implica na necessidade de se considerar as áreas côncavas das cabeceiras como parte integrante da zona ripária (LIMA & ZAKIA, 2000).

A vegetação que ocupa a zona ripária é altamente variável em termo de estrutura, composição e distribuição espacial. Essas modificações podem ser explicadas devido às frequentes alterações que ocorrem entre clima, geologia e água.

As zonas ripárias exercem importante função do ponto de vista hidrológico e ecológico, contribuindo assim para a manutenção da saúde ambiental e da resiliência da microbacia hidrográfica (WALKER *et al.*, 1996; LIMA & ZAKIA, 2000; AGNEW *et al.*, 2006; ALLAN, VIDON & LOWRANCE, 2008; BISHOP *et al.*, 2008;

BURKHARD, PETROSILLO & COSTANZA, 2010; PERT *et al.*, 2010, ATTANSIO *et al.*, 2012). Esta zona de interação tem várias funções ecológicas, entre elas a proteção da fauna e a reprodução vegetal, além disso, sua preservação pode ser viável no sentido de melhoria da qualidade da água, ciclagem de nutrientes e interação direta com o meio aquático.

Este ambiente é reconhecido por melhorar a qualidade da água já que a mesma é fortemente influenciada pela atividade microbial desenvolvida dentro dos sedimentos das margens, além disso, o ambiente ripário com uma boa cobertura vegetal funciona como proteção contra ocorrência da erosão pela sua composição vegetacional, assim como controla os regimes de inundação (KILEY & SCHNEIDER, 2005; HINKEL, 2003). Uma vegetação adequada na zona ripária ainda pode diminuir significativamente a concentração de herbicidas nos cursos d'água de microbacias tratadas com tais produtos (BARTON & DAVIES, 1993).

Muitas atividades podem ser desenvolvidas na zona ripária, onde essa interface pode ser considerada um ambiente de interação entre os ecossistemas terrestres e aquáticos. Além disso, os processos que acontecem no ambiente ripário refletem diretamente nas características hidrológicas da região.

O curso de água superficial forma apenas parte visível de um ecossistema de água doce, que inclui água subterrânea, aluviões e os sistemas ripários (GIBERT *et al.*, 1990).

De acordo com Kobiyama (2003), o curso de água tem seu fluxo não só superficialmente, mas também através dos interstícios dos sedimentos do leito e das margens, criando assim uma zona de mistura entre a água de superfície e água do subsolo. Esses ambientes são interligados por uma área conhecida por zona hiporreica.

A zona hiporreica é considerado um ambiente de grande dinâmica, onde ocorre um conjunto de reações entre componentes bióticos e abióticos representando uma região de interação entre água superficial – água subterrânea. Embora a zona hiporreica fisicamente seja definida pela hidrologia de cursos d'água e seu ambiente circunvizinho, tem uma forte influência na ecologia e temperatura dos cursos d'água.

Intercâmbios entre zona hiporreica e superfície envolvem águas subterrâneas, mata ciliar, várzea (zona ripária) e habitats aluviais, onde ocorrem em uma ampla gama de escalas espaciais e temporais (BOULTON & FOSTER, 1998). O volume e a rapidez

dessas interações variam muito, sendo regidas pela descarga das águas superficiais, estrutura do leito e condições ambientais (HANCOCK, 2002).

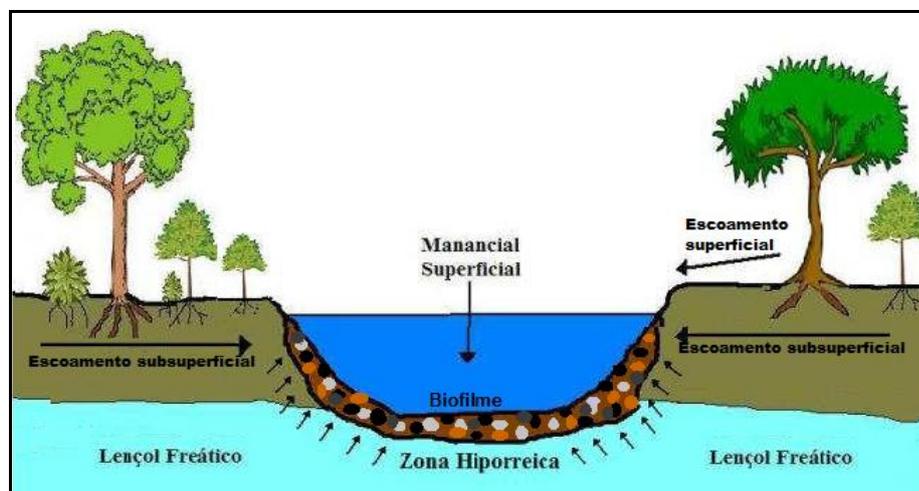
Nesse contexto, a zona hiporreica e a zona ripária, podem ser consideradas como um ecótono onde as águas subterrâneas se misturam entre os ecossistemas terrestres e aquáticos. Além disso, essas zonas de interação entre as águas superficiais e as águas subterrâneas fazem parte de um ambiente único e dinâmico, regendo atividades hidroecológicas de grande importância.

2.2 - ZONA HIPORREICA

Muitas variáveis têm sido utilizadas para a definição da zona hiporreica, tais como: ecologia, morfologia, química, hidrologia, tempo de residência e até combinações entre essas variáveis (WILLIAMS, 1989; GOOSEFF, 2010; BIANCHIN, SMITH & BECKIE *et al.*, 2011; LAWRENCE *et al.*, 2013). A definição selecionada pode alterar a linha de estudo, mas o importante é entender que a zona hiporreica é um ambiente de grande dinâmica, apresentando um ecossistema responsável por um conjunto de reações. O estudo da zona hiporreica é interdisciplinar, envolvendo hidrólogos, ecologistas e biogeoquímicos.

Em suma, a zona de intercâmbio entre o curso de água superficial e subterrâneo é a chamada zona hiporreica (Figura 2.4), definida como um volume subsuperficial de sedimentos e um adjacente espaço poroso a um curso d'água onde ocorrem constantes trocas.

Figura 2.4 - Esquema Zona Hiporreica.



Este ambiente é conhecido como uma região biogeoquímica distinta, caracterizada por gradientes de luz, temperatura, pH, oxigênio e carbono orgânico, além de ter efeitos sobre a qualidade da água.

Nesta região de transição os processos ecológicos, seus produtos e as condições locais 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-química da água de superfície do rio e dos aquíferos adjacentes (BOULTON & FOSTER, 1998). Porém, não é possível afirmar que as características das águas fluviais são influenciadas apenas pelas atividades que ocorrem na zona hiporreica.

Existem diversas técnicas usadas para tentar caracterizar essa região. Uma possibilidade é a instalação de diversos poços rasos, em várias profundidades, com os quais possam ser medidos parâmetros físicos e químicos podendo ser observado às características distintas desse ambiente. Na quantificação da interação entre o rio e o aquífero, utiliza-se, por exemplo, infiltrômetros (LEE, 1977; TRAUB, 1982; KALERIS 1998; ALBUQUERQUE *et al.*, 2014), traçadores (CASTRO & HORNBERGER, 1991; HARVEY *et al.*, 1996), minipiezômetros (LEE & CHERRY 1978), lisímetros (KALERIS, 1998) e modelos computacionais que são bastante úteis nos estudos dessa interação (GOMES, 1990; LIMA, FRISCHKORN & BURTE, 2007; PAIVA, CABRAL & FREITAS, 2013). Outros pesquisadores, como Jordan (1977), Lane (1983) e Walters (1990), analisaram sistemas rio-aquífero específicos a partir da quantificação da diminuição da vazão dos rios ao longo do seu curso. Além disso, técnicas referentes à química da água, como a utilização de isótopos também podem ser usadas nessa avaliação (FRISCHKORN, 1989; SANTOS *et al.*, 2010). Logicamente, o uso destas técnicas podem ser complementares na maioria dos casos.

A existência da zona hiporreica ajuda na minimização dos impactos nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, tendo a vantagem de não competir com o espaço usado pela atividade humana, pois ocupa apenas uma pequena parcela do ambiente.

O tamanho da zona hiporreica depende da extensão e da força das interações entre água superficial com 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). Além disso, a extensão lateral da zona hiporreica pode variar de apenas alguns centímetros de canais confinados de terra firme

a vários quilômetros de grandes sistemas fluviais com amplas planícies aluviais (LAPWORTH *et al.*, 2009; SAWYER *et al.*, 2009).

De acordo com White (1993), a definição selecionada pode afetar drasticamente o tamanho da zona hiporreica. Ou seja, como existem muitas variáveis envolvidas na definição dessa interface, o tamanho da zona hiporreica vai depender do conceito que será utilizado em cada pesquisa.

Esta zona, de grande atividade biológica, funciona como um sumidouro de nutrientes e poluentes (HANCOCK, 2002), onde alguns processos atuam com maior eficácia em uns poluentes do que em outros, esses efeitos estão atrelados às particularidades que existem na zona de interação. O ambiente subterrâneo é coordenado por uma infinidade de processos que atuam na degradação de poluentes ou retardam seu movimento, dessa forma são considerados atenuadores naturais.

A temperatura da água é um importante determinante das condições ambientais na zona hiporreica por causa de sua relação direta com os níveis de O₂ e taxas de reação bioquímica (HATCH *et al.*, 2006; SCHMIDT, BAYER - RAICH & SCHIRMER, 2006; WEBB *et al.*, 2008). A temperatura da água na zona hiporreica é um reflexo das contribuições das águas superficiais e subterrâneas (KRAUSE, HANNA & FLECKESTEIN, 2009; RAU *et al.*, 2010). Provavelmente a mudança de temperatura das águas hiporreicas vai gerar algumas consequências sobre as comunidades ecológicas que vivem nesse ambiente.

Os ecossistemas subterrâneos podem ser muito persistentes através do tempo geológico (HUMPHREYS, 2008), mudanças climáticas (LEYS, WATTS & COOPER, 2003), eras glaciais (BJARNI, KRISTJANSSON & SUARVASSON, 2007); sendo assim estes ecossistemas contêm amostras de linhagens que compõem a fauna de vários períodos geológicos.

O ambiente hiporreico pode ser considerado um resumo dos diversos caminhos dos organismos bentônicos de um rio, essa é uma das explicações para a grande quantidade de reações biológicas que ocorrem nessa área.

A zona hiporreica é um habitat importante para muitos organismos de água doce, que são muitas vezes referidos como os hiporreos quando fazem uso desta zona subterrânea (BOULTON & FOSTER, 1998; WOOD *et al.*, 2010). Alguns destes organismos só usam a zona hiporreica transitoriamente como um refúgio, quando as condições na superfície tornam-se desfavoráveis, como durante enchentes, secas, ou

períodos de qualidade da água prejudicada ou grande pressão dos predadores (STUBBINGTON, WOOD & REID, 2011), outros usam exclusivamente a zona hiporreica (GILBERT & DEHARVENG, 2002).

Essa interface é muito importante no ciclo de vida de vários biotas, incluindo peixe, macroinvertebrados e anfíbios (LÓPEZ-RODRÍGUEZ *et al.*, 2009; RESH & ROSENBERG, 2010; WILLIAMS, FEBRIA & WONG, 2010). Ou seja, muitos peixes dependem do ambiente hiporreico para atender as necessidades para sobrevivência dos seus ovos (SOULSBY *et al.*, 2009), insetos aquáticos usam a zona hiporreica durante sua fase larval (REYNOLDS & BENKE, 2012) e anfíbios, entre outras funções, usam a zona hiporreica para se refugiar dos predadores (FERAL, CAMANN & WELSH, 2005).

A zona hiporreica é um dinâmico ecótono entre o fluxo de água superficial e subterrâneo, bem como abrange uma única e diversa fauna de invertebrados (MARMONIER *et al.*, 1993) e é frequentemente um local de intensa atividade biogeoquímica (MORRICE *et al.*, 2000). Da perspectiva biogeoquímica as águas subterrâneas são geralmente pobres em oxigênio dissolvido e ricos em solutos inorgânicos em comparação aos corpos d'água superficiais. Fazendo com que ocorra um gradiente biogeoquímico na zona hiporreica.

Este ecótono é evidente na zona hiporreica, pode atuar como filtro físico, químico e biológico (VERVIER *et al.*, 1992) capaz de imobilizar ou transformar nutrientes e poluentes (BOURG & BERTIN 1993), prevenindo ou reduzindo sua passagem entre água subterrânea e superfície (HANCOCK, 2002).

A diminuição da condutividade hidráulica no meio poroso influencia na permeabilidade e coesão dos sedimentos, conseqüentemente levando capacidades de infiltração limitadas na zona superior dos interstícios (GOLDSCHNEIDER, HARALAMPIDES & MACQUARRIE, 2007; GUNKEL & HOFFMANN, 2009).

Outro ponto de suma importância na zona hiporreica é o tipo de material que constitui esse ambiente. A interface entre água superficial e água subterrânea compreende uma zona extremamente rica em relação a sua composição, pois é possível encontrar vários tipos de materiais, desde cascalhos e areia que são considerados solos de granulação grosseira até solos de granulação fina, como o silte e a argila. Nesse ambiente também é possível encontrar uma grande quantidade de solos orgânicos.

De acordo com Suguio (2003), as propriedades texturais, principalmente as granulométricas e as composicionais dos sedimentos fluviais dependem das condições climáticas, da intensidade de tectonismo e dos tipos de detritos supridos ao canal. O mesmo autor ainda afirma que o volume de material suprido está condicionado à topografia do terreno, às condições climáticas da área-fonte e dos locais de transporte e sedimentação.

Nesse contexto é importante conhecer a natureza dos sedimentos envolvidos no sistema tendo em vista os aspectos de permeabilidade e condutividade hidráulica que são essenciais para um melhor entendimento da dinâmica do fluxo vertical.

2.2.1 - Formação da zona hiporreica

A maneira como os solos são encontrados atualmente na superfície da terra é consequência de alguns processos que se iniciaram sob uma fonte primária, ou seja, as rochas. Estas por sua vez, ao se decompor, formarão um substrato, a partir do qual os solos se originarão (OLIVEIRA, 2011).

O solo é formado por um material que lhe dá origem através da ação do intemperismo que é um conjunto de processos físicos e químicos que modificam as rochas quando expostas ao tempo. O material de origem é o precursor do sistema solo, isto é, o ponto inicial de sua formação (JENNY, 1941).

A erosão promove o desprendimento e deslocamento de materiais rochosos, onde a rigidez de sua estrutura é quem vai determinar o tempo desse processo. O processo erosivo pode ocorrer na bacia hidrográfica, no leito ou na margem. Ao se desprenderem, os materiais podem ficar acumulados no local de origem ou podem ser transportados pelo vento, água ou atividades humanas.

Os materiais carregados dos solos e rochas das bacias hidrográficas e dos rios durante o processo de erosão são os sedimentos. Em ocasiões de chuva, o escoamento superficial decorrente, transporta muitas partículas para o rio onde esse sedimento se move em suspensão ou no leito, rolando, deslizando ou em saltos (CARVALHO, 2000).

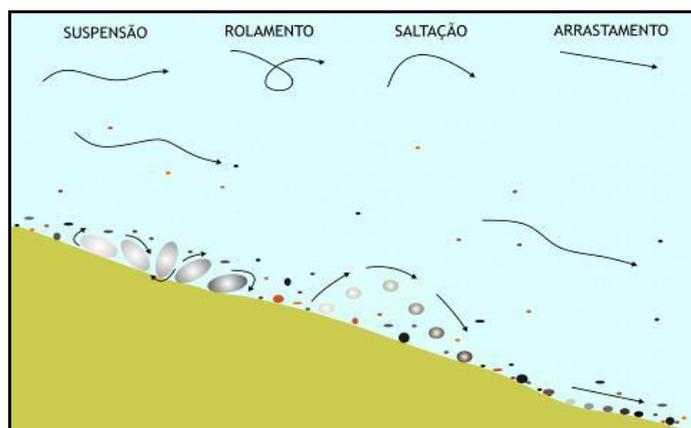
Os sedimentos finos se deslocam com velocidade tal qual a da água, enquanto que o sedimento mais grosseiro só pode se mover ocasionalmente, e ainda, permanecer muito tempo em repouso (EDWARDS & GLYSSON, 1999).

O transporte das partículas pelo rio é um tipo de seleção natural realizada pelo regime fluvial, pois a montante vão estacionando os detritos mais grosseiros e

sucessivamente os mais finos vão para a jusante. Ainda pode ocorrer a dissolução de algumas partículas, a suspensão de outras e algumas podem sofrer um tipo de tração de fundo formando a zona hiporreica.

Ao receberem as partículas que foram desagregadas em suas águas, os rios fazem o transporte desse material. Os movimentos realizados pelas partículas durante o transporte dos sedimentos no rio podem ser observados na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Transporte dos sedimentos de acordo com suas dimensões.



Fonte: Adaptado de Suguiú (2003).

A composição da zona hiporreica vai depender de vários fatores, pois as formas iniciais do material provavelmente serão alterados pelo atrito que sofrem durante o transporte. Além disso, durante o percurso nas águas do rio, alguns materiais vão se desgastando mais rapidamente outros são mais resistentes, ocorrendo assim uma seleção mineralógica das partículas.

Nesse contexto, entende-se que a formação da zona hiporreica depende de vários fatores e processos que não ocorrem isoladamente, pois são interdependentes. A compreensão desses mecanismos são muito relevantes para o entendimento da formação da zona hiporreica que na prática é formada pelo volume subsuperficial de sedimentos localizados no rio.

2.2.2 - Características de solo

O processo de interação água superficial e água subterrânea pode ser muito influenciado pela característica do solo que compõe a zona hiporreica, pois a quantidade elevada de certos materiais pode provocar uma obstrução exagerada dos vazios

existentes, conduzindo a uma diminuição da condutividade hidráulica dos sedimentos do leito do rio.

Várias características dos solos diferenciam os materiais encontrados no ambiente hiporreico, mas nem sempre é fácil identificar essas partículas. Por isso, ensaios granulométricos são fundamentais para uma identificação do material encontrado, onde através dele é possível estimar as percentagens correspondentes a cada fração granulométrica do solo.

O tamanho das partículas que compõe a interface rio-aquífero é umas das características que diferenciam o tipo de material encontrado nesse ambiente. Como exemplo, os grãos, seixos e cascalhos podem ser vistos a olhos nú, diferentemente de partículas menores de argilas que exigem um certo cuidado para serem identificadas.

Para propósitos práticos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/NBR 6502/95), de acordo com seus diâmetros, as partículas do solo são agrupadas em 3 frações do solo, cada uma incluindo partículas que pertencem a uma determinada faixa de tamanho (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Classificação das partículas do solo, conforme ABNT.

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

Com base na classificação da ABNT, observa-se que a diversidade do tamanho dos materiais que constituem o fundo dos mananciais é enorme. A interface entre água superficial e água subterrânea compreende uma zona extremamente rica em relação a sua composição, pois é possível encontrar vários tipos de materiais, desde cascalhos e areia que são considerados solos de granulação grosseira até solos de granulação fina, como o silte e a argila.

É bastante comum que os grãos encontrados no solo se organizem de certa forma que deixem espaços vazios entre eles, esses espaços são os poros. Os poros são classificados de acordo com o tamanho de seu diâmetro: macroporo – diâmetro maior que 100 μm ; mesoporo – diâmetro entre 30 e 100 μm e; microporo – diâmetro menor que 30 μm (LIBARDI, 2005).

Entre as partículas maiores, como de areia ou entre agregados, predominam poros grandes (macroporos); entre partículas pequenas, como a de argila, predominam poros pequenos (microporos) (VIEIRA, SANTOS & VIEIRA, 1988).

A diversidade que existe nos tamanhos dos poros interferem diretamente no seu comportamento, pois a granulometria dos sedimentos, sua forma e seu arranjo são características fundamentais no que diz respeito a porosidade e permeabilidade dos solos (Figuras 2.6 e 2.7).

Figura 2.6 - Ilustração de um solo com permeabilidade baixa.

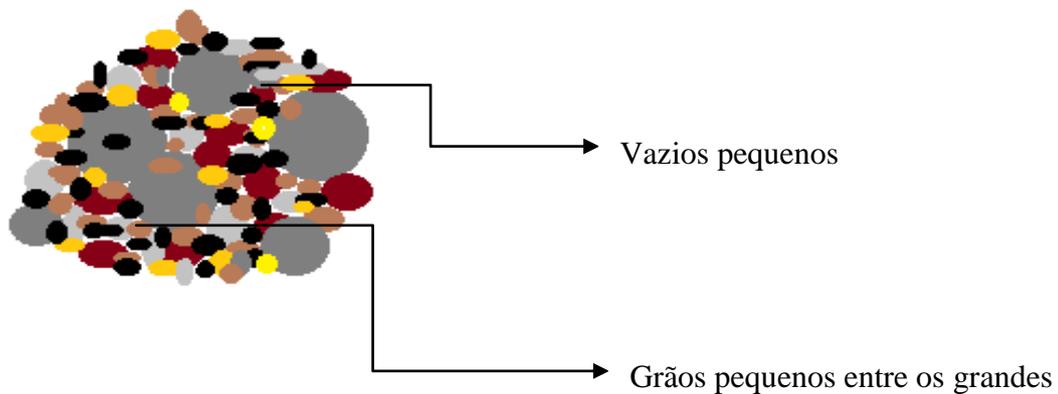
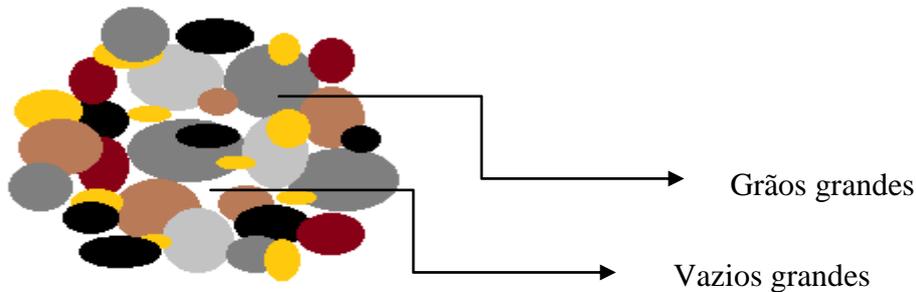


Figura 2.7 - Ilustração de um solo com permeabilidade alta.



Se em determinado local for encontrada uma quantidade de materiais de granulação fina como a areia num solo de maior granulação como o cascalho sua permeabilidade será afetada e terá um valor significativamente mais baixo do que o mesmo solo sem a fração de finos. Se essa condição não for natural, ou seja, não for a composição original do local, pode implicar no processo de colmatação e o movimento da água não será suficiente para limpar completamente os espaços entre os sedimentos.

No caso das areias o solo poderia ser visto como um material constituído por canalículos, interconectados uns aos outros, nos quais ou há água armazenada, em equilíbrio hidrostático, ou a água flui através desses canalículos, sob a ação da gravidade (VARGAS, 1977).

Então, solos compostos por uma quantidade maior de areia tem poros menores e normalmente a água encontra maior dificuldade de percolação do que no solo formado por uma quantidade maior de cascalho que são compostos por partículas maiores do que as areias.

No caso da argilas, o diâmetro diminuto que teriam tais canalículos e as formas exóticas dos grãos, intervém forças de natureza capilar e molecular de interação entre a fase sólida e a líquida (VARGAS, 1977). Quando ocorre a sedimentação da camada de argila, a mesma sofre uma pressão imposta pelo seu próprio peso e pelo peso das partículas localizadas acima, ocasionando uma expulsão natural da água que se encontrava nos seus grãos e causando um decréscimo do volume concentrado entre seus canalículos.

O material encontrado na zona hiporreica é muito variado, onde além da diversidade dos tamanhos das partículas também existe uma infinidade de sedimentos com constituições mineralógicas diferenciadas.

A composição do solo se dá pela desagregação do material originário por ações físicas e químicas, e por isso, as partículas dos solos tem composição química que depende da composição da sua rocha matriz. Além disso, algumas partículas são constituídas de um único material, em outros casos ocorrem agregações de minerais distintos.

É bastante comum, que os sedimentos que compõem a zona hiporreica sofram influências da composição do solo de sua bacia de drenagem, sendo esse aporte de material o responsável pela composição química de uma parcela dos seus sedimentos.

É importante considerar que a origem geogênica dos elementos no sedimento também contribui de forma significativa, embora seja certo que exista dificuldade em se estabelecer o percentual de contribuição de ambas as fontes para a composição química e mineralógica resultante do sedimento (BRERETON, 2003; HEIMBÜRGER *et al.*, 2012).

Dessa forma, Alba, Filho & Figueiredo (2008) afirmam que amostras de solo são frequentemente utilizadas para o estudo da mobilidade e distribuição de elementos

químicos não apenas para estudos de meio ambiente, mas também para uma avaliação do acúmulo de dados em sedimentos de corrente.

Uma adequada análise do solo pode fornecer subsídios importantes para uma melhor compreensão das suas características, onde pode ser possível traçar um melhor entendimento do caminho que cada espécie química desenvolve dentro do ciclo solo-sedimento.

Para traçar um melhor entendimento da natureza dos sedimentos envolvidos no sistema de interação água superficial e água subterrânea é de suma importância a realização de análises dessas partículas. Dessa forma é possível compreender as particularidades dos solos e materiais envolvidos nesse sistema e conseqüentemente explicar de forma mais satisfatória alguns processos que dependem diretamente desses aspectos, como a colmatação e a dinâmica do fluxo vertical da água no solo.

2.2.3 - Colmatação

A colmatação é um processo lento que ocorre ao longo do tempo e compromete a eficiência do sistema drenante (REMÍGIO, 2006). Consiste na redução da área transversal dos espaços vazios de um meio poroso, disponíveis ao fluido percolante.

Esse processo está atrelado ao entupimento da camada de topo dos sedimentos por processos que levam à redução do volume dos poros, e conseqüentemente a diminuição de permeabilidade do leito do manancial (BRUNKE & GONSER, 1997). Esse fenômeno afeta inteiramente a capacidade drenante do meio poroso, reduzindo significativamente o fluxo percolante a medida que os espaços porosos diminuem.

A queda da capacidade drenante ocorre através de um fenômeno puramente físico, porém a colmatação propriamente dita esta atrelada a uma série de fatores devido a causas físicas, químicas e biológicas de acordo com o material que está sendo drenado ou filtrado.

Palmeira (2003) ressalta que sistemas drenantes submetidos ao fluxo de fluidos contendo sólidos em suspensão, substâncias químicas ou orgânicas e fluidos, cujas características ou sentido de fluxo variam com o tempo, podem também ter sua vida útil consideravelmente reduzida.

Alguns fatores físicos podem aumentar a possibilidade da ocorrência do processo de colmatação, entre eles está o acúmulo de sólidos suspensos, de origem orgânica ou inorgânica, na água responsável pela recarga. Outro fator físico que pode

ser relacionado ao aumento da área colmatada é o movimento de algumas partículas que estavam suspensas na água ou no próprio solo, onde esses pequenos fragmentos ao descerem em movimento vertical vão se acumulando aos poucos a certa profundidade formando uma camada colmatada.

A colmatção decorrente de processos físicos normalmente ocorre quando existe a incompatibilidade entre as dimensões das partículas do solo e a dimensão dos poros do meio filtrante gerando uma redução da permeabilidade.

O processo de colmatção também pode ocorrer em consequência de alguns processos químicos, onde podem-se citar as reações químicas entre os elementos dissolvidos no fluido percolante, que resultam na formação de precipitados, diminuindo o espaço disponível para a passagem do fluido. Segundo Bouwer (2002), algumas vezes, essas precipitações são induzidas por aumentos no pH causados, por sua vez, por algas, ao passo que essas removem o CO₂ dissolvido na fotossíntese.

Alguns tipos de bactérias são produtoras de gases responsáveis pelo bloqueio de alguns poros, pois o gás produzido se acumula abaixo da área colmatada diminuindo a quantidade de água infiltrada.

Altas cargas de substâncias biodegradáveis na água bruta podem causar a chamada colmatção química na área de infiltração, devido a fortes mudanças no potencial redox e no pH, que podem causar precipitação de substâncias (FeCO₃) nos poros do aquífero, desta maneira, a qualidade da água deve ser considerada e cuidadosamente analisada (SCHUBERT, 2002).

O aquecimento da água do manancial superficial pelo solo ou pelo aquífero é outro exemplo de processo químico responsável pela colmatção, pois durante esse fenômeno formam-se bolsas de ar e muitas ficam presas no solo dificultando a passagem de água.

Os processos que provocam a colmatção podem ser diminuídos desde que ocorra a redução dos parâmetros que a causam. De acordo com Gale *et al.* (2002), como alternativa para redução da área colmatada devem-se considerar as seguintes ações: (a) aumentar o nível da água na bacia; (b) aplicar um sistema rotativo de descarga de água, secagem e subsequente raspagem do material depositado no fundo (a secagem elimina o crescimento microbiológico e este fenômeno juntamente com a raspagem do fundo da bacia reabre os poros do solo); (c) aplicar um tratamento mecânico da água de recarga que consiste primeiro numa sedimentação primária, para

remoção dos sólidos suspensos (a eficiência da deposição pode ser aumentada se adicionar um desfloculante químico); (d) adicionar cloro à água de recarga para prevenir a actividade microbiológica; (e) aplicar um tratamento mecânico do solo para aumentar a sua permeabilidade e (f) forrar a bacia com um nível de areia de calibre médio que funcionará como um filtro para remover os sólidos suspensos.

A remoção da camada colmatada também pode ser feita de maneira natural. Certos organismos bentônicos têm a capacidade de remover parte da camada colmatada através de sua alimentação ou de seus movimentos, esse processo ajuda na limpeza da camada aumentando o fluxo de água infiltrada. Esses organismos fazem uma auto-limpeza na zona hiporreica. Alguns tipos de peixes também fazem parte desse processo, como a carpa prateada que removem certa quantidade de sedimentos do local. O movimento das águas no manancial também contribui no processo de limpeza natural.

Os processos biológicos também são grandes responsáveis pela ocorrência da colmatação. A fauna subterrânea ocorre em todos os tipos de aquíferos, a porosidade e as características locais é quem vão determinar as espécies que serão encontradas. As causas biológicas são resultantes da colonização de microorganismos dentro ou fora do solo, onde ocorrerá a formação do biofilme ou biomassa minimizando a ocorrência ou o tamanho dos poros.

2.2.4 - Meiofauna

A meiofauna, definida por Mare (1942) como pequenos animais bentônicos que são retidos em peneiras com abertura de malha, entre 0,500 e 0,044 mm, e com representantes de quase todos os filos de invertebrados, ocorre em grande abundância em sedimentos de todo o mundo (SOLTWEDEL, 2000).

O meiofaunístico se distingue da macrofauna pelo seu tamanho diminuto. Porém, apesar de representar um grupo discreto pelo fato de serem pequenos, trata-se de um grupo ecologicamente heterogêneo. Além disso, a meiofauna possui curtos ciclos de vida (1 a 3 meses) o que faz com que mudanças na estrutura da comunidade possam ser observadas em estudos de curto prazo.

Diversos estudos demonstraram as complexas relações entre a meiofauna e variáveis ambientais, tais como: a degradação e remineralização da matéria orgânica detrítica (CARTES *et al.*, 2002; PFANKUCHE & SOLTWEDEL, 1998), interações com a macrofauna (DEBENHAM *et al.*, 2004; TITA *et al.*, 2000), temperatura,

concentração de oxigênio, as características e a composição geoquímica do sedimento (ARMONIES & HELLWIG-ARMONIES, 1987; GIÉRE, ELEFTHERIOU, & MURISON, 1988; CARTES *et al.*, 2002) e os processos hidrodinâmicos (PALMER, 1986).

O estudo da meiofauna é recente quando comparado com a macrofauna e envolve uma série de dificuldades associadas as técnicas de estudo, principalmente devido ao diminuto tamanho desses animais (SILVA, GROHMANN & ESTEVES, 1997).

É um grupo ecologicamente definido de organismos cuja morfologia, fisiologia e características de história de vida têm se desenvolvido para explorar a matriz intersticial dos sedimentos. As diferentes associações da meiofauna ocupam *habitats* diversos: as que vivem em lama diferem das que vivem na areia; as que vivem em baixa salinidade diferem das de alta salinidade, as que vivem sobre vegetais, das escavadoras de sedimentos (COULL, 1999).

A composição da zona hiporreica pode ser muito influente para a meiofauna, pois o tamanho e a forma das partículas sedimentares determinam o espaço intersticial. Ou seja, o tamanho da comunidade do meiofaunístico sofre restrições decorrentes ao tamanho do espaço que elas tem para viverem. Os interstícios de areias finas são pequenos demais, restringindo a maioria dos organismos intersticiais as areias mais grossas (SWEDMARK, 1964).

Os organismos que vivem na meiofauna sofreram uma série de adaptações em consequência das características do seu ambiente (GIÉRE, 1993).

Além disso, a ausência de fases larvares em grande parte dos grupos meiofaunísticos favorece a sobrevivência da espécie. As características granulométricas dos sedimentos de fundo além de influenciar a meiofauna no sentido de adaptações dos corpos desses organismos, também tem forte relação aos padrões de distribuição espaço-temporal.

A meiofauna geralmente mostra uma distribuição espacial agregada ao sedimento, tanto horizontal como vertical. As causas desses modelos são frequentemente complexas e envolvem variáveis biológicas, físicas e químicas, incluindo granulometria, salinidade, oxigênio, recurso alimentar e componentes químicos da água (STEYAERT *et al.*, 1999).

Para sobreviver na zona hiporreica a biota deve ser especializada em alguns traços biológicos, incluindo a capacidade de escavar através do substrato, navegar na ausência de luz, e obter o sustento das fontes alimentares relativamente limitadas disponíveis, tais como micróbios e matéria orgânica parcialmente deteriorada (BONADA, RIERADEVALL & PRAT, 2007; MUELLER, PANDER & GEIST, 2011; DATRY, 2012). As águas subterrâneas compreendem um ecossistema diferente dos ecossistemas das águas de superfícies, em particular pela ausência de luz e a quase total não ocorrência de produção primária, pois matéria orgânica (MO) e oxigênio são importados da superfície por infiltração das águas superficiais ou por percolação da precipitação. Como resultado, comida (matéria orgânica) e oxigênio são escassos na água subterrânea.

2.2.4.1- *Biofilmes*

Como já foi dito anteriormente, a formação do biofilme é uma das causas biológicas responsáveis pela colmatação dos sedimentos e conseqüentemente redução do tamanho dos poros comprometendo a eficiência do sistema drenante.

Os biofilmes, definidos como comunidades de microorganismos imobilizados em conjunto numa matriz polimérica extracelular, cuja estrutura, composição e propriedades dependem da idade do biofilme e das condições ambientais. Um biofilme forma-se naturalmente em uma superfície sólida em contato com água não esterilizada.

O biofilme representa uma comunidade microbiana sem mobilidade própria com vários habitantes como bactérias, protozoários, fungos, algas e substâncias poliméricas extracelulares; podendo ser encontrado em quase toda superfície exposta à água (FRASER & WILLIAMS, 1997).

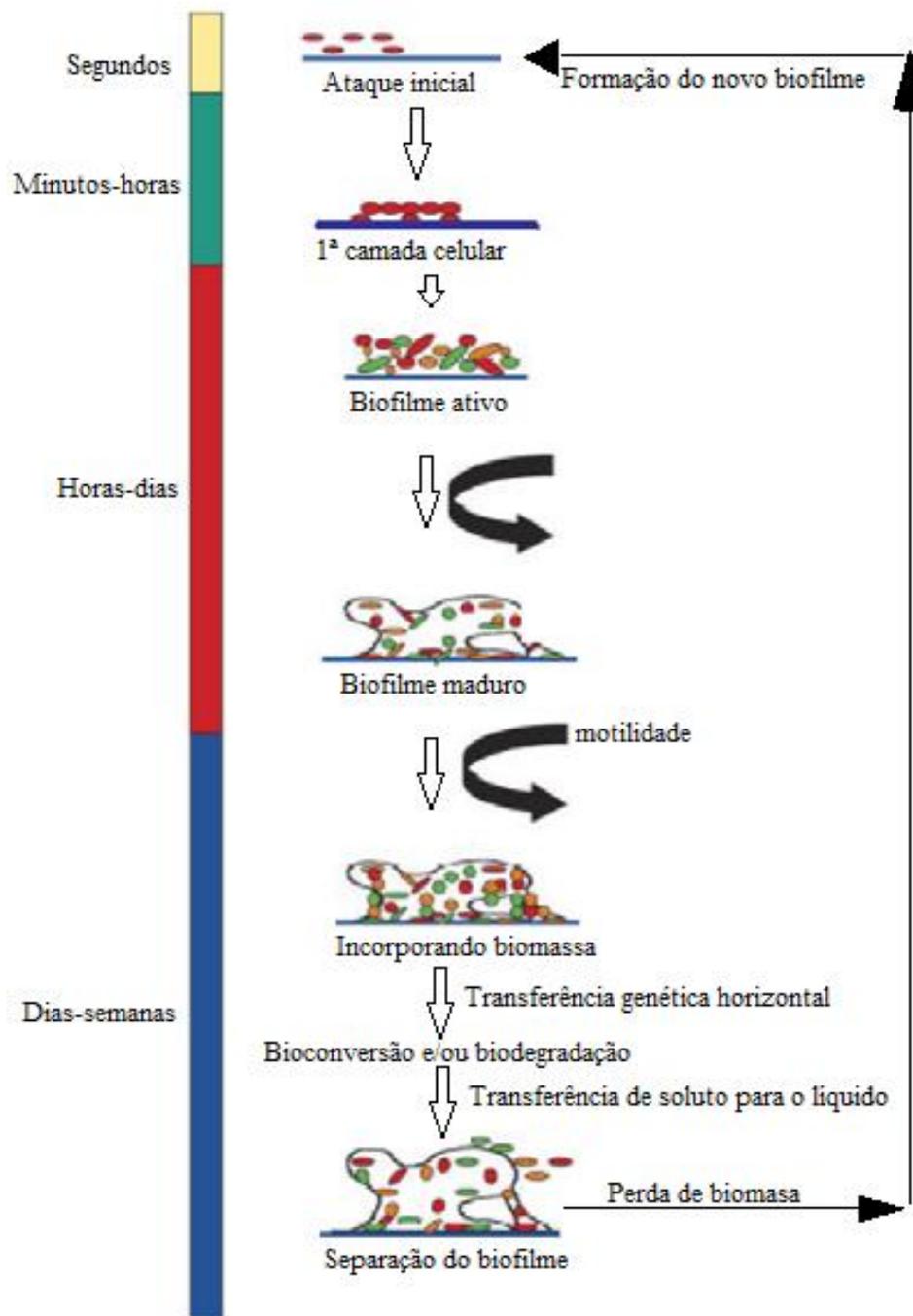
Eles têm uma matriz tridimensional que suporta comunidades interligadas de algas, bactérias e fungos (LEAR & LEWIS, 2009; AUGSPURGER *et al.*, 2010; POHLON, MARXSEN & KU^{SE} SEL, 2010).

A estrutura de biofilmes tem um papel muito importante na atividade dos mesmos. Segundo Xavier, Picioreanu & Van Loosdrecht, (2003), a formação e a acumulação de biofilmes é resultado de vários processos de natureza física e biológica.

Algumas etapas fazem parte do ciclo de formação dos biofilmes (Figura 2.8), onde no início ocorre a colonização microbiana que é caracterizada pela interação dos microorganismos da interface e sua subsequente fixação, em seguida ocorre o processo

de crescimento e divisão celular seguido da maturação e para finalizar o ciclo acontece o destacamento do material celular para uma formação de um novo biofilme. Estes processos englobam todos os fatores físicos envolvidos no desenvolvimento de biofilmes e alguns fatores biológicos.

Figura 2.8 - Ciclo de desenvolvimento de um biofilme.



Fonte: Adaptado de Singh, Paul & Jain (2006).

Evidências mostram que a acumulação de biofilme está atrelada ao acúmulo de substâncias extracelulares poliméricas, bem como bactérias e seus produtos gasosos de degradação, que podem reduzir a condutividade hidráulica das camadas de sedimentos (BAVEYE *et al.*, 1998 *apud* TUFENKJI, RYAN & ELIMELECH, 2002).

Quando ocorre o acúmulo de biofilme em um sistema de transporte de fluidos o atrito entre o fluido em movimento e o biofilme será maior em relação a um sistema sem biofilme. Sendo assim, entende-se que a colonização microbiana aumenta a resistência do fluxo, podendo acarretar na colmatação do sistema drenante.

2.2.5 - Dinâmica do fluxo vertical

A necessidade de informações adicionais descrevendo o papel da zona hiporreica em controlar o fluxo de interação entre águas subterrâneas com águas superficial tem sido bem reconhecida por diversos autores (CURRY *et al.*, 1994; ARNTZEN, GEIST & EVAN DRESEL, 2006; TALEB *et al.*, 2008).

Dependendo das características climáticas e fisiográficas da região as águas subterrâneas podem ser influenciadas por todos os tipos de corpos hídricos superficiais, pois se as condições forem favoráveis, ocorrerá à infiltração e os espaços vazios do subsolo serão ocupados abastecendo o corpo de água subterrânea. A zona hiporreica esta localizada na interface entre o manancial superficial e subterrâneo, onde ao mesmo tempo que é influenciada pode influenciar o fluxo de água.

O estudo do fluxo de água tem significativa relevância, onde pode representar uma grande oportunidade para se avaliar a eficácia da zona hiporreica na melhoria da qualidade de água ou servindo como uma barreira contra a contaminação do aquífero (LAWRENCE *et al.*, 2013).

Em um mesmo rio pode acontecer alterações hidrológicas em trechos diferentes, onde seu regime pode ser influente em um trecho e efluente em outro. No entanto, esta troca de água ocorre atravessando a zona hiporreica, a qual realiza um controle de fluxo e transporte de compostos, escoando direcionalmente rio abaixo.

A ocorrência de chuvas intensas em superfícies impermeáveis ou a descarga de águas residuais são alguns exemplos de atividades que podem gerar alterações significativas no regime de vazões de um manancial superficial conectado hidráulicamente a um aquífero, pois a carga hidráulica pode ser alterada induzindo algumas modificações nesse fluxo chegando a afetar padrões de infiltração e o fluxo de

água na zona hiporreica vai ser alterado. O regime do fluxo hiporreico pode ser alterado por uma variedade de atividades humanas, incluindo aquelas que mudam o regime de vazões ou altera a superfície do leito ou subsolo (BOANO, REVELLI & RIDOFI, 2010; MAIER & HOWARD, 2011).

A ocorrência de precipitações tem grande influência na variabilidade transversal do leito do rio, pois dependendo da intensidade do evento chuvoso existe a possibilidade de ocorrer alterações significativas na saturação do solo e/ou nas suas propriedades hidráulicas.

De maneira geral, em condições de ocorrência de chuva, no início do evento chuvoso o gradiente hidráulico praticamente permanece inalterado ou podem ocorrer pequenas variações.

Normalmente a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando consegue, apenas as camadas próximas a superfície, conformando um perfil típico onde o teor de água decresce com a profundidade (SILVEIRA, LOUZADA & BELTRAMR, 2000).

A ocorrência da infiltração no leito do rio fornece a umidade necessária para a vegetação ripária, além de fazer a reposição de aquíferos aluvionais. Quando ocorre infiltração no leito, significa que existe uma conexão hidráulica entre o rio e o aquífero. Essa conexão pode se caracterizar de maneiras diferentes, podendo ocorrer a descarga ou a recarga do fluxo vertical do rio. A água fluvial não se limita apenas ao abastecimento, uma vez que o rio também pode ser abastecido pelo lençol freático criando um fluxo vertical ascendente entre o rio e o aquífero.

O ganho ou perda do rio em alguns ambientes pode ser contínuo, onde o fluxo vertical de um rio pode ser sempre descendente ou sempre efluente. Também existem casos em que simplesmente não ocorre nenhum tipo de fluxo em determinados trechos do rio.

O curso de água tem seu fluxo não só superficialmente, mas também através dos interstícios dos sedimentos do canal de fluxo e das margens, criando assim uma zona de mistura entre a água do subsolo e águas de superfície (KOBAYAMA, 2003).

Essas zonas de mistura também são governadas por flutuações do nível do rio, onde sua dinâmica pode influenciar o entupimento dos poros do leito do rio, caracterizando uma camada de colmatação.

Nesse âmbito é importante conhecer a natureza dos sedimentos envolvidos no sistema tendo em vista os aspectos de colmatação e de permeabilidade.

A deposição de sedimentos no leito pode minimizar a troca hiporreica (PACKMAN & MACKAY, 2003), pois a retenção de partículas finas nesse ambiente diminui a ocorrência ou o tamanho dos poros que são formados no solo para facilitar o processo de interação entre águas superficiais e águas subterrâneas.

A dinâmica do fluxo também depende do grau de porosidade do solo, onde a dificuldade ou facilidade de percolação da água nesses poros é representada pela permeabilidade.

A condutividade hidráulica (K), também conhecida por alguns profissionais de coeficiente de permeabilidade, é uma propriedade do solo que representa a maior ou menor capacidade que o mesmo possui de permitir a passagem da água entre os seus espaços vazios.

Segundo Reichardt (1996), como a condutividade hidráulica depende do espaço poroso, ela varia enormemente de um solo para outro, e também dentro de um mesmo solo, devido a variações estruturais, compactação e espessura dos horizontes.

A condição de saturação do solo influencia no movimento de água em seu interior, por tanto se utiliza da equação de Darcy para quantificar o fluxo de água no meio saturado, sendo expressa pela equação: $q = K \cdot \Delta h / L$, onde K é a constante que representa a condutividade hidráulica do leito, Δh corresponde ao gradiente hidráulico, L representa a altura da coluna do solo e q seria o vetor de velocidade aparente.

A diminuição da condutividade hidráulica no meio poroso influencia na permeabilidade e coesão dos sedimentos, conseqüentemente a capacidade de infiltração fica limitada na zona superior dos interstícios (GOLDSCHNEIDER, HARALAMPIDES & MACQUARRIE, 2007; GUNKEL & HOFFMANN, 2009).

A zona hiporreica compreende um ambiente ativo por reunir uma série de características particulares dependentes de aspectos referentes à hidrologia, geologia e ecologia da região. De fato é uma zona de transição entre água superficial e subterrânea que atua.

2.3 - FILTRAÇÃO EM MARGEM

2.3.1 - A Filtração em Margem no Brasil e no Mundo

Por ser uma alternativa bastante promissora, a técnica de Filtração em Margem (FM) vem aumentando a quantidade de pesquisas por todo o mundo. Sua eficiência em sistemas de tratamento de água e principalmente seu baixo custo enfatizam a importância do processo.

A Companhia de Água do Reino Unido (Glasgow Waterworks) foi uma das primeiras a utilizar a técnica de Filtração em Margem, com o objetivo de abastecimento público das tubulações paralelas ao Rio de Clyde por volta de 1810 (RAY, MELIN & LINSKY, 2002).

De acordo com Ray, Melin & Linsky (2002), há mais de 100 anos, a FM vem sendo aplicada na Europa, com mais frequência ao longo do Reno, do Elba e do rio Danúbio, produzindo água para abastecimento. A primeira estação de tratamento que utilizava apenas a técnica FM foi construída em 1870 na Europa Ocidental, em Dusseldorf, na Alemanha. Nessa região, a quantidade de águas subterrâneas era pequena, sendo assim, o abastecimento de água passou a ser feito através da FM, suprimindo a necessidade de cerca de 600.000 habitantes.

Na metade do século XIX, a técnica de Filtração em Margem foi oficialmente adotada pela Europa no tratamento de água para abastecimento público (RAY, MELIN & LINSKY, 2002). A técnica de Filtração em Margem não se aplica apenas em rios, na Europa os lagos também são utilizados. Em Berlim, por exemplo, na Alemanha, são localizados grandes instalações de sistemas de FM nos lagos Müggelsee, Tegel e Wannsee (DASH *et al.*, 2008).

Os Estados Unidos tem despertado certo interesse em sistemas de tratamento natural de água pela sua eficiência e por se tratar de tecnologia limpa, sendo assim, algumas cidades americanas estão utilizando a técnica FM no abastecimento. Entre os estados que utilizam a FM destacam-se, Iowa, Kansas, Kentucky, Nebraska, New Jersey, New York, Ohio, Texas e Wyoming (VOGEL *et al.*, 2005).

Sem dúvidas a Filtração em Margem é uma técnica bastante promissora e cada vez mais vem sendo reconhecida por vários países. Por ser uma técnica de baixo custo suas vantagens também chamam a atenção de países em desenvolvimento.

Na Índia, a aplicação dos sistemas de Filtração em Margem tem o potencial de fornecer água potável a muitas cidades localizadas ao longo das planícies do rio Ganges (SANDHU *et al.*, 2011).

Na China, estão avaliando a efetividade da técnica de Filtração em Margem para remoção de nitrogênio, no rio Kuihe. Este rio reúne a maioria dos efluentes industriais e esgotos domésticos na cidade Xuzhou (WU *et al.*, 2006).

No Egito, no ano de 2004, nas margens do Rio Nilo foi implantado um sistema em escala real de FM na cidade de Sidfa, com o objetivo de atender 30.000 pessoas (SHAMRUKH & ABDEL-WAHAB, 2008). As condições em que se encontra o manancial superficial do rio Nilo está comprometendo cada vez mais o abastecimento da população, dessa forma a FM foi instalada para que a população receba água de melhor qualidade.

Os sistemas de FM têm aplicação também na Jordânia, Oriente Médio, nas margens de rio Zarqa como forma de proteger os recursos hídricos superficiais e subterrâneos (BLANFORD *et al.*, 2010).

O processo de Filtração em Margem tem sido aprimorado por vários países através de estudos e pesquisas, pois a técnica tem grande potencial. Apesar de ainda não ser utilizada para fornecer água a população brasileira, a técnica de Filtração em Margem tem sido bastante abordada em muitas pesquisas científicas por duas universidades do Brasil.

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) vem trabalhando de forma integrada em busca do aprimoramento da técnica na remoção de contaminantes a um baixo custo.

A UFSC, com a Lagoa do Peri, foi pioneira nas pesquisas sobre Filtração em Margem no Brasil apontando grandes resultados em relação à purificação da água. Como os resultados foram positivos, os estudos sobre vários aspectos referentes à eficiência da técnica continuam atualmente. O Programa de Pesquisas em Saneamento Básico - PROSAB, foi quem ofereceu condições para o início das pesquisas para analisar a eficiência do método FM na eliminação de cianobactérias (SENS *et al.*, 2006).

Romero *et al.* (2014), no estudo piloto de FM instalado na Lagoa do Peri, Florianópolis, estado de Santa Catarina, demonstraram a eficácia da FM na remoção de fitoplâncton e *Cylindrospermopsis raciborskii*, provando que a FM é uma barreira eficaz na remoção desses micro-organismos.

A UFPE, começou a estudar a FM, nas margens do rio Beberibe, na divisa entre as cidades de Olinda e Recife, onde o objetivo da pesquisa foi avaliar

experimentalmente o desempenho da técnica nas condições hidrológicas e geológicas locais (PAIVA, 2009).

Ainda no rio Beberibe, Freitas (2014), avaliou o projeto piloto de Filtração na remoção de *Cryptosporidium* spp., *Giardia* spp., e outros micro-organismos patogênicos e no fornecimento de água de melhor qualidade.

Santos (2012), na região Agreste de Pernambuco, aplicou em escala piloto, a tecnologia de Filtração em Margem no reservatório de Mundaú, Garanhuns, Pernambuco com o objetivo de remover espécies de cianobactérias e contaminantes físico-químicos presentes na água do reservatório obtendo resultados positivos.

Nesse contexto, é evidente que a Filtração em Margem apresenta um grande potencial na produção de água potável e que o entendimento dos processos que ocorrem no tratamento natural da água é um desafio. Portanto, a continuação de pesquisas relacionadas a tecnologia de Filtração em Margem podem ajudar a inserir essa técnica como uma alternativa na minimização dos custos das empresas responsáveis pelo abastecimento de água de vários países.

2.3.2 - A técnica FM

A contaminação dos mananciais superficiais vem gerando grandes problemas para o abastecimento público, pois mesmo diante de sua importância, as águas superficiais estão sofrendo um acelerado processo de degradação ambiental. Considerando interações água superficial com água subterrânea os sistemas de Filtração em Margem são caracterizados pela interação entre rio-aquífero (SOPHOCLEOUS, 2002).

A Filtração em Margem pode ocorrer de forma natural quando o nível do lençol freático for inferior ao nível d'água do manancial superficial ou por meio de indução através do uso de poços localizados próximos às margens de rios ou reservatórios. O bombeamento contínuo desses poços cria artificialmente uma diferença de nível entre o corpo hídrico superficial e o lençol freático, fazendo com que a água escoe em direção ao poço.

A água produzida pelos poços de produção submetidos às condições de FM é uma mistura da água infiltrada do manancial superficial e da água subterrânea presente no aquífero (TUFENKJI, RYAN & ELIMELECH, 2002; GRISCHEK *et al.*, 2010). A proporção dessa mistura é que nem sempre é a mesma, pois depende de alguns fatores

como: a distância do poço até a margem e de algumas características (vazão bombeada, condições hidrogeológicas locais, etc.)

De forma natural ou induzida ocorre o uso de materiais sedimentares da zona hiporreica como meio filtrante, esse filtro natural, remove os contaminantes encontrados na água superficial durante o processo de infiltração (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Esquema simplificado da técnica de Filtração em Margem.



Fonte: Freitas (2014).

Grande parte dos poços construídos para a tecnologia FM, distanciam-se das margens dos mananciais de 15 a 50 m, mas é possível encontrar poços com distâncias maiores de 100 a 150 m. A profundidade dos poços varia em relação ao nível do solo de 7 a 15 m, e a relação nível do solo/nível do lago é de 4 a 8 m, provocando um desnível entre o fundo do poço e o nível da água do lago de 3 a 7 m (MONDARDO, 2009). Em momentos de enchentes esses níveis podem aumentar, ou seja, os níveis não são fixos.

É importante considerar que a água advinda dos poços submetidos a FM pode apresentar relativa qualidade dependendo do nível de poluição a que o corpo d'água superficial foi exposto (KIM & CORAPCIOGLU, 2002); além disso, deve-se levar em conta a existência e o grau de contaminação da água subterrânea. A qualidade da água advinda da FM está atrelada a qualidade da água do corpo d'água superficial e da eficiência dos processos de purificação que ocorrem durante a FM, por outro lado, a qualidade da água subterrânea sofre forte influência do uso da terra na área, considerando as atividades agrícolas e urbanas (KUEHN & MUELLER, 2000; ECKERT & IRMSCHER, 2006). Dessa forma, é importante considerar a qualidade

tanto dos recursos hídricos superficiais como também subterrâneos na utilização da FM (HUNT, SCHUBERT & RAY, 2002; GRISCHEK *et al.*, 2010).

Em alguns casos, a água bombeada dos poços submetidos a FM pode ser direcionada para distribuição no sistema de abastecimento d'água, de acordo com a sua potabilidade (RAY, MELIN & LINSKY, 2002). Durante o processo de Filtração em Margem muitos contaminantes são removidos de forma eficiente pelos processos naturais de atenuação. Nesse contexto, as águas que são submetidas ao processo de tratamento natural pela Filtração em Margem, podem ou não ser distribuídas para o sistema de abastecimento público, isso dependerá da sua qualidade. Porém, no mínimo esta técnica servirá como um pré-tratamento da água superficial captada indiretamente.

No entanto, para que a técnica FM obtenha resultados positivos é imprescindível que o local ofereça algumas particularidades hidrogeológicas, por isso a técnica não pode ser aplicada em qualquer região.

Segundo Schubert (2001), informações hidrogeológicas devem ser consideradas para se conhecer a capacidade de infiltração de água no fundo do manancial e dessa forma entender os mecanismos que proporciona a colmatação do solo impedindo ou diminuindo a quantidade de água que chega ao lençol freático.

Alguns parâmetros devem ser levados em consideração antes da implantação do sistema FM (RAY, MELIN & LINSKY, 2002; SENS *et al.*, 2006; PAIVA, 2009) , tais como:

- A capacidade de indução de água no aquífero pelo manancial;
- A qualidade da água superficial a ser utilizada;
- As velocidades de escoamento da água, em caso de rio;
- Características geológicas do entorno e do fundo do manancial;
- Sazonalidade do escoamento;
- Estabilidade do leito do manancial.

Como condições prévias para a instalação dos sistemas de FM é necessário avaliar a heterogeneidade e a condutividade hidráulica de sedimentos necessários para a conectividade hidráulica entre o manancial superficial, o aquífero e a água subterrânea (FLECKENSTEIN, NISWONGER & FOGG, 2006).

Além dos parâmetros já abordados, a Filtração em Margem normalmente é instalada em áreas de aluviões ao longo das margens dos rios, esses reúnem características hidrogeológicas muito favoráveis a FM. Neste contexto de aluvião, água

subterrânea e rio, quando conectados hidráulicamente, atuam como único recurso (WINTER *et al.*, 1999), comprovando que a água advinda da FM é uma mistura destes três componentes, caracterizando a interação água superficial e água subterrânea.

O tipo de poço que será utilizado também é um fator que deve ser considerado na implantação da tecnologia FM, onde a escolha deve ser baseada nas características hidrogeológicas do local e nos custos do projeto. Historicamente, três tipos de poços têm sido usados para a FM desde que a tecnologia foi estabelecida: poços com coletores horizontais ou radiais, poços verticais ou tubulares, e poços escavados ou cacimbão (RAY, MELIN & LINSKY, 2002; SENS *et al.*, 2006).

Os poços verticais foram utilizados pela primeira vez para a Filtração em Margem, na década de 1890, na Europa e até hoje tem sido o poço mais utilizado para a aplicação da FM. Já os radiais tem propriedades hidráulicas de poços que podem desenvolver uma capacidade equivalente a múltiplos poços tubulares (RAY, MELIN & LINSKY, 2002; SENS *et al.*, 2006), são instaladas em locais com altas taxas de extração de água. No caso dos poços escavados, eram em forma cilíndrica e tinham diâmetros de 7 a 10 m, com a parede perfurada na parte mais baixa, com tijolos de alvenaria. A água subterrânea podia penetrar através da terra por meio da parede perfurada. (RAY, MELIN & LINSKY, 2002).

Como já foi dito anteriormente, os corpos hídricos superficiais como rios e lagos tem sido e continuam sendo uma grande fonte para o abastecimento de água. Porém, se encontram em constante contato com contaminantes de origens variadas podendo gerar muitas doenças se forem ingeridos. Nesse cenário, a técnica de Filtração em Margem pode ser uma ótima alternativa na remoção desses poluentes, pois reduzem consideravelmente a concentração de contaminantes presentes na água de superfície devido a processos físico-químicos e biológicos que conseqüentemente atuam na melhoria da qualidade da água (HISCOCK & GRISCHEK, 2002; SAHOO *et al.*, 2005; LORENZEN *et al.*, 2010; HOFFMANN & GUNKEL, 2011; STAUDER *et al.*, 2012).

A FM pode ser usada para remover partículas, bactérias, vírus, parasitas, poluentes, compostos orgânicos e inorgânicos (EPA, 2007).

O processo de remoção pode ser acelerado se a velocidade do fluxo subterrâneo for menor ou quando o material que compõe o aquífero for bem distribuído caracterizando uma camada semipermeável entre a água subterrânea e a água superficial.

Vários são os fatores que podem interferir na remoção dos microorganismos, para que esse processo seja eficiente algumas características devem ser levadas em consideração. O principal é compreender que a tecnologia de Filtração em Margem pode ser um passo importante para o pré-tratamento aos tratamentos convencionais de água para o abastecimento público (RAY, MELIN & LINSKY, 2002).

2.3.3 - Processos envolvidos

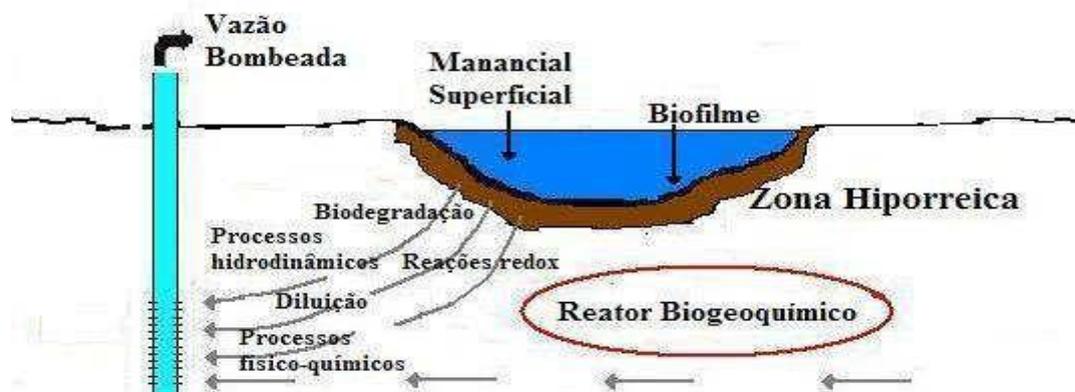
Por se tratar de um ambiente biogeoquímico ativo, a zona hiporreica apresenta um grande potencial na atenuação natural de compostos orgânicos, nutrientes e patógenos encontrados em mananciais urbanos muitas vezes impactados por modificações de fluxo e pela poluição hídrica (LAWRENCE *et al.*, 2013).

A ocorrência de alguns processos físico-químicos, hidrodinâmicos, mecânicos e biológicos na remoção de uma série de contaminantes potenciais presentes nos mananciais superficiais garantem o bom funcionamento da técnica de Filtração em Margem.

O sucesso dos processos que ocorrem durante a FM depende das características locais, pois cada ambiente tem suas próprias particularidades. Isso explica a importância da compreensão de cada processo.

Os processos que ocorrem durante a FM (Figura 2.10) atuam diretamente na atenuação natural dos poluentes, pois durante a percolação da água as substâncias tóxicas e os microorganismos patogênicos serão eliminados.

Figura 2.10 - Diagrama esquemático dos processos que afetam a qualidade da água durante o processo de Filtração em Margem.



Fonte: (Adaptado de Hiscock & Grischek, 2002 e Sens *et al.*, 2006).

Muitos contaminantes encontrados em fontes de água como fármacos, agrotóxicos, pesticidas, produtos industriais entre outros contaminantes antropogênicos tem o potencial de afetar fortemente o abastecimento de água potável podendo alcançar o lençol freático através da zona hiporreica. Ao atingir o ambiente hiporreico, alguns contaminantes ultrapassam essa camada e alguns resíduos ficam retidos nos sedimentos onde seus compostos químicos podem contribuir de forma significativa na qualidade do fluxo de água rio-aquífero.

Vários são os processos naturais que ocorrem durante a percolação da água no emprego da FM, entre eles destacam-se: os hidrodinâmicas, que incluem a adsorção, advecção, dispersão, diluição e difusão; os mecânicos, caracterizados pela filtração e colmatação; os biológicos que compreendem a degradação de matéria orgânica pelo metabolismo dos microorganismos presentes no solo, além de mineralização de substratos secundários; e os físico-químicos representados por sorção, precipitação, complexação, floculação, coagulação, reações redox e trocas iônicas (DONALD & GRYGASKI, 2002; TUFENKJI, RYAN & ELIMELECH, 2002; SENS *et al.*, 2006).

O tempo de retenção ou tempo de residência no aquífero é outro fator importante que controla a eficiência de remoção de contaminantes na FM (KUEHN & MUELLER, 2000; SONTHEIMER, 1980 *apud* TUFENKJI, RYAN & ELIMELECH, 2002). No entanto, a influência da diluição com as águas subterrâneas também deve ser considerada (SONTHEIMER, 1980 *apud* TUFENKJI, RYAN, & ELIMELECH, 2002).

Vários processos naturais agrupados como, por exemplo, a atividade biológica, filtração de partículas e reações redox, sob a designação de FM, são capazes de melhorar a qualidade da água de infiltração através da remoção de muitos compostos (KEDZIOREK, GEOFFRIAU & BOURG, 2008).

O estrato superior de sedimentos hiporreicos é tipicamente aeróbio por causa da infiltração de águas superficiais gaseificados, enquanto a degradação biológica consome O₂ e cria as condições de redução nos sedimentos mais profundos (LAWRENCE *et al.*, 2013). As reações redox variam significativamente no ambiente hiporreico, podendo afetar fortemente as atividades biológicas e conseqüentemente o sucesso da FM. As reações redox observadas durante FM são definitivamente o resultado da atividade microbiológica (KEDZIOREK, GEOFFRIAU & BOURG, 2008).

A remoção de contaminantes ocorre desde a infiltração da água superficial até a retirada da água do poço de produção. Na verdade cada processo ocorre em momentos diferentes e em locais diferentes, sendo cada um responsável pela remoção de contaminantes variados. Entre os contaminantes químicos estão a matéria orgânica natural, os orgânicos sintéticos, os inorgânicos, os constituintes farmacêuticos e outros. Em relação aos contaminantes biológicos estão os protozoários, bactérias e vírus.

A FM tem o potencial de remover a matéria orgânica, onde essa remoção é de grande importância na obtenção de água de boa qualidade, pois diminui a ocorrência de contaminantes tóxicos. Quando a MO é combinada com o cloro pode formar subprodutos cancerígenos como os trihalometanos e ácidos haloacéticos. Além disso, a mesma altera o sabor da água potável e provoca um odor diferenciado.

Alguns estudos também destacam a FM na remoção de resíduos farmacêuticos (VERSTRAENTEN, HEBERER & SHEYTT, 2002; HEBERER *et al.*, 2004; MASSMANN *et al.*, 2008; MAENG *et al.*, 2011). Em relação aos fármacos, muitos são eliminados e excretados com suas ações ainda ativas. Muitas dessas substâncias são encontradas em esgotos e despejadas em mananciais superficiais, onde a FM pode ser uma ótima alternativa na remoção desses produtos.

Atualmente existe uma grande preocupação em relação à floração de cianobactérias, pois esses organismos têm a capacidade de produzir e liberar toxinas (cianotoxinas), que podem afetar a qualidade da água alterando suas propriedades organolépticas, além de provocar danos à saúde humana. Pesquisas relatam a efetividade da FM na remoção de cianobactérias e suas cianotoxinas (CHORUS & BARTRAM, 1999, DILLON *et al.*, 2002, SENS *et al.*, 2006; SANTOS, 2012; SENS *et al.*, 2013), capazes de causar diversos danos ao homem e aos vertebrados em geral.

Muitos processos ocorrem durante a técnica de Filtração em Margem, promovendo a remoção de muitos contaminantes potenciais, sendo imprescindível conhecer localmente seus parâmetros que influenciam a purificação natural da água através da FM.

2.3.4 - Influência da zona hiporreica na FM

A zona hiporreica é praticamente responsável por todos os processos que ocorrem durante a técnica de Filtração em Margem. Sendo assim, o sucesso da FM

depende essencialmente das características do ambiente hiporreico, refletindo diretamente na produção do sistema e na velocidade de percolação da água.

A eficiência da Filtração em Margem depende de vários fatores, inclusive da velocidade de infiltração da água, onde quanto mais lenta for à percolação maior será a remoção dos poluentes. O arranjo e a composição do material filtrante que compõe a zona hiporreica vão influenciar diretamente na velocidade do processo de infiltração, ou seja, a qualidade e a quantidade do meio filtrado dependem das características dos sedimentos encontrados no leito. Onde, o maior problema dos sistemas de infiltração para recarga artificial de águas subterrâneas e de Filtração em Margem é a colmatação da superfície de infiltração (bases de bacias, paredes de trincheiras e poços de zona vadosa, e interfaces poço-aquífero em poços de recarga) (KUEHN & MULLER, 2000; BOUWER, 2002).

A redução da permeabilidade de parte do leito do rio durante a operação dos poços da filtração em margem é inevitável (SCHUBERT, 2002). A colmatação ocorre na zona hiporreica, mas vai influenciar diretamente o processo de Filtração em Margem, pois a condutância da interface provavelmente será afetada. Durante o processo de filtração em margem a obstrução do leito do rio é considerada normal, pois as partículas do rio se infiltram no leito durante a passagem da água para os poços.

O leito pode ser obstruído de formas diferentes: de forma mecânica, onde ocorre o arranjo inadequado das partículas ou de forma química através de reações biogeoquímicas formando um biofilme.

A atividade microbiana pode diminuir a permeabilidade da interface águas superficiais com as águas subterrâneas, o que afeta a taxa de infiltração, como resultado da formação do biofilme (TUFENKJI, RYAN & ELIMELECH, 2002).

Em relação ao processo FM a colmatação pode ter seu lado positivo, onde a obstrução pode aumentar a eficiência da filtragem, pois o tamanho, a quantidade e a distribuição dos sedimentos são fatores primordiais na permeabilidade e eficácia da filtragem. Sedimentos da margem proporcionam uma “filtração de taxa lenta” e a água pré-tratada é de melhor qualidade do que a captada diretamente do corpo hídrico (DILLON *et al.*, 2002 *apud* DONALD & GRYGASKI, 2002).

O lado negativo da colmatação em relação a Filtração em Margem seria um entupimento ou uma impermeabilização criada na interface entre água superficial e água subterrânea, devido a um crescimento elevado de matéria orgânica e depósito de

partículas finas dificultando o fluxo de água (SCHUBERT, 2002). Esse acontecimento acarretará numa queda de produção da água advinda do processo FM.

Em resumo, o sucesso do processo de Filtração em Margem depende das características da zona hiporreica. Ou seja, a sustentabilidade do abastecimento de água através da tecnologia FM é diretamente proporcional as atividades que ocorrem na zona hiporreica, onde o funcionamento dessas atividades dependem de características físicas, químicas e biológicas e podem variar de acordo com o local escolhido para aplicação do sistema.

CAPÍTULO 3

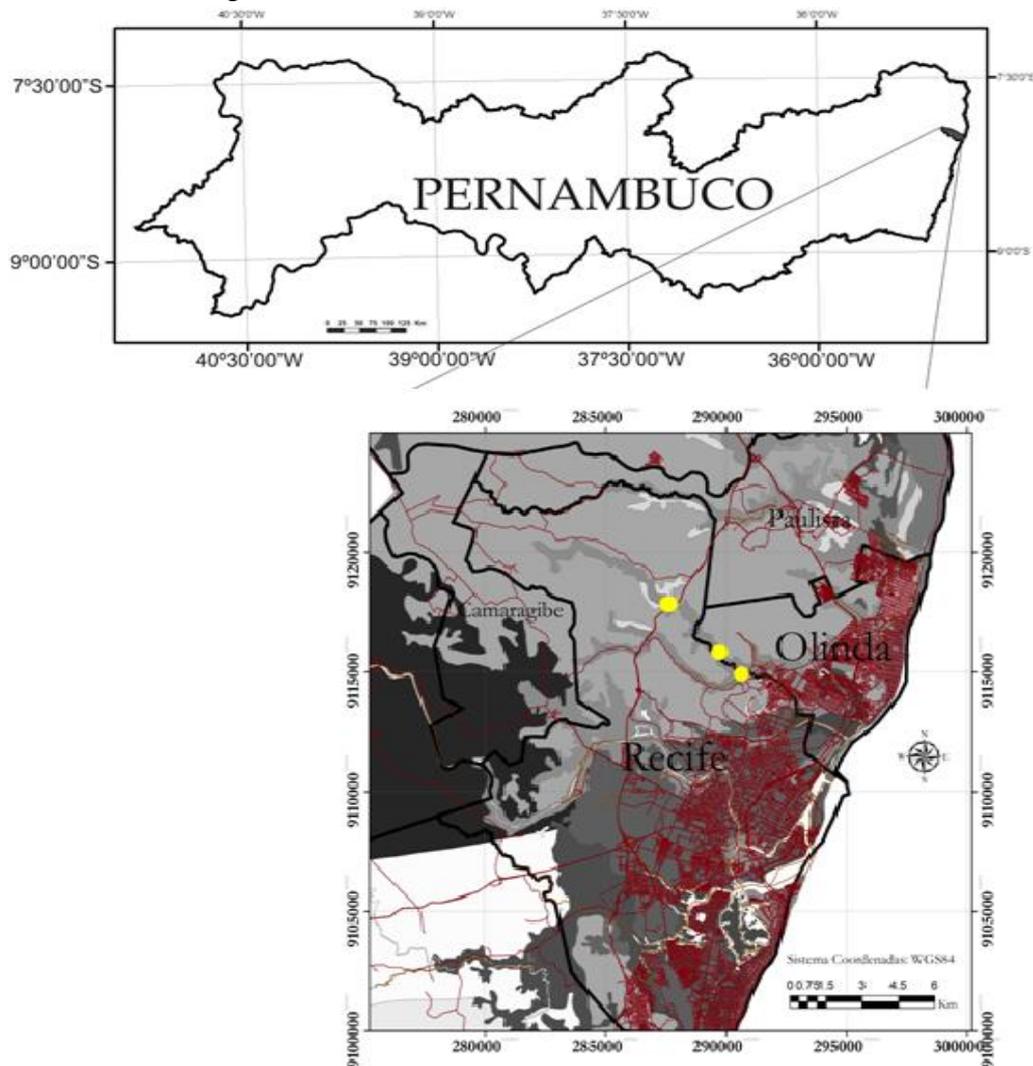
CARACTERIZAÇÃO

DA ÁREA DE ESTUDO

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O projeto de pesquisa foi desenvolvido nas margens do rio Beberibe localizado na divisa entre os municípios de Recife e Olinda (Figura 3.1). Sem dúvidas é um dos rios mais poluídos do estado de Pernambuco e atualmente encontra-se comprometido pelas ocupações informais localizadas próximo as suas margens.

Figura 3.1 - Bacia Hidrográfica do rio Beberibe - PE.



O rio Beberibe nasce no município de Camaragibe através da confluência com o rio Pacas e o rio Araçá. São aproximadamente 19 km de extensão, desde a sua nascente até desembocar no mar. O rio Morno é o seu principal afluente pela margem direita e na esquerda seus principais afluentes são o Córrego do Abacaxi e o Canal da Malária.

De acordo com a classificação das bacias hidrográficas do estado de Pernambuco, a bacia do rio Beberibe está inserida no Grupo 1 - GL 1, que corresponde ao grupo de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (APAC, 2014).

Normalmente na maior parte do seu percurso o rio Beberibe apresenta uma largura de aproximadamente 6 metros (PERNAMBUCO - SEPLAN, 2008), aumentando essa largura no seu trecho final e podendo ser alterada em períodos de enchentes.

A área da bacia do rio Beberibe apresenta hoje uma população total que se aproxima dos 590 mil habitantes distribuídos ao longo de seu pequeno território, transformando-a em uma área predominantemente urbana e de alta densidade demográfica, com cerca de 7.300 hab/km² (SRHE/PE, 2012).

De acordo com o GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO (2009), a bacia hidrográfica do rio Beberibe compreende uma área total de 81 km², sendo 64,5% em Recife, 21,29% em Olinda e 14,19% em Camaragibe.

O conhecimento das características da área de pesquisa é muito importante para a implantação do projeto de pesquisa. A seguir serão apresentadas alguns aspectos relevantes da área de estudo.

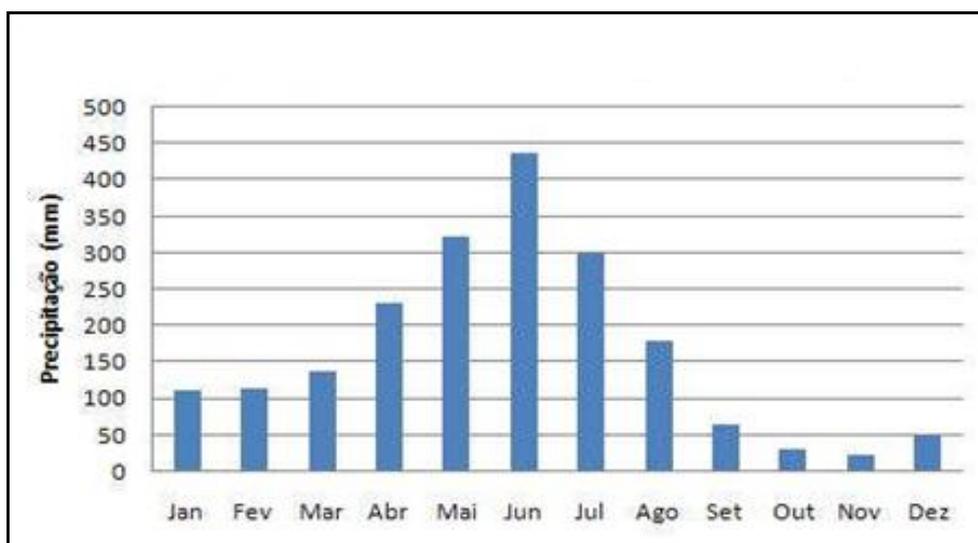
3.1 - CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Com relação ao clima a bacia do rio Beberibe não apresenta variações anuais de maior amplitude nos parâmetros climáticos mais expressivos como temperatura, umidade relativa, evaporação e insolação (SRHE/PE, 2012).

Até as estações do ano apresentam certa uniformidade entre primavera/verão (período seco) e outono/inverno (período chuvoso). A precipitação das chuvas podem traduzir alguma variação que são mais frequentes nas estações de outono e inverno, proporcionando o aumento da umidade relativa do ar e diminuição da temperatura ambiental.

Na Figura 3.2 é possível observar as médias mensais de precipitação (mm) dos últimos 10 anos de 2003 a 2013, onde fica evidente a sazonalidade do regime pluviométrico da região, com um período de estiagem e outro chuvoso. Os dados pluviométricos apresentados foram disponibilizados pela Agência Pernambucana de Água e Clima (APAC) do posto Olinda 199, localizado próximo a área de estudo.

Figura 3.2 - Média mensal da precipitação no Posto Olinda 199 (2003 – 2013).



Fonte: Freitas (2014).

De acordo com Freitas (2014), a precipitação pluviométrica na área de estudo é considerada abundante em relação a outras regiões do Nordeste do Brasil, tendo uma média de 2.002,6 mm/ano, no período de 2003 a 2013.

De acordo com INMET/3°DISME (2003), a área de estudo pode atingir valores de evaporação de 1.323,4 mm para o total anual, chegando a superar a precipitação pluviométrica entre os meses de outubro a fevereiro.

O INMET/3°DISME (2003), ainda informa que em relação à temperatura os meses de Janeiro e Fevereiro apresentam os valores máximos mensais aproximados de 26,6 °C e a temperatura mínima mensal normalmente é observada no mês de Julho com o valor aproximado de 23,9 °C. A amplitude térmica média anual é de apenas 2,7°C, tornando o clima da região agradável durante todo o ano.

3.2 - CONDIÇÕES GEOLÓGICAS

A bacia do rio Beberibe caracteriza-se como uma bacia hidrográfica litorânea, como já foi dito anteriormente, esta inserido no grupo de pequenas bacias litorâneas. Este grupo está situado predominantemente sobre rochas sedimentares da bacia Pernambuco-Paraíba, onde existem extensas exposições terciárias. Além disso, são encontradas algumas formações quaternárias representadas por aluviões e sedimentos de praia.

De acordo com Campos (2003), três unidades geomorfológicas constituem a bacia do Beberibe, que são os tabuleiros ou baixos platôs costeiros (topo), os domínios dos morros (encostas) e planície baixa. A bacia do rio Beberibe é praticamente formada por 15,70 km² de área de planície, 36,30 km² de área de morros e 29,00 km² de área de tabuleiros (GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO, 2009).

Na porção superior da bacia do rio Beberibe, a montante da BR-101, os tabuleiros são mais expressivos. A jusante a ocorrência dos morros é mais evidente e são densamente habitados.

3.3 - COBERTURA VEGETAL

Até o início do século passado, o rio Beberibe e seus afluentes eram margeados por florestas exuberantes. Atualmente as matas densas correspondem aos remanescentes de mata atlântica encontradas nas localidades de Passarinho, Dois Unidos e Dois Irmãos.

Estas unidades são muito valiosas para o meio ambiente e representam uma pequena parcela da vegetação nativa da bacia do rio Beberibe. Pequenos percentuais das matas de Dois Unidos e Dois Irmãos se transformaram em reservas ecológicas garantindo assim a integridade de uma pequena parcela da vegetação existente.

Apesar do desmatamento, do ponto de vista da cobertura vegetal, a área está inserida nos domínios da Mata Atlântica e dispõe do maior bloco de floresta Atlântica contínua da Região Metropolitana do Recife e, provavelmente, do estado de Pernambuco, além de vários fragmentos dispersos e com potencial para conectividade (SECTMA, 2009).

3.4 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Por suas características e, principalmente, por sua localização geográfica, em pleno centro da Região Metropolitana do Recife (RMR), foco de um intenso processo de urbanização, a bacia do Rio Beberibe passou a reunir as mais diversas manifestações de degradação, resultantes, em grande parte, do caráter agressivo e não planejado, ao longo da história do processo de ocupação do solo (CONDEPE/FIDEM, 2009).

Com aproximadamente 590.000 habitantes, registra a maior concentração de assentamentos de baixa renda da RMR, espalhada em áreas de risco, em morros e alagados e apresenta os menores índices de atendimento em infraestrutura urbana, caracterizando-se como um bolsão de pobreza encravado no centro da Região Metropolitana do Recife (SRHE/PE, 2012).

Os espaços destinados ao armazenamento natural de água atualmente estão ocupados pela urbanização. A precariedade dos assentamentos instalados em encostas e nas margens do rio Beberibe são de alta contribuição para a contaminação de suas águas e aumento de doenças de veiculação hídrica devido à falta de saneamento básico.

Atualmente o rio Beberibe apresenta um alto grau de degradação, com amontoados de lixo depositados pela população ao seu entorno e por pontos industriais dificultando a sua correnteza.

Para que algumas construções (parques, praças, shoppings, complexo viários, entre outros) fossem realizadas foi necessário fazer uma supressão da vegetação e aterrar algumas áreas da bacia. Em consequência dessas construções houve um estreitamento da seção do rio gerando problemas com inundações nas chuvas intensas.

Nota-se que na maior parte de sua história, a bacia do Beberibe foi pouco administrada, considerada como uma periferia longínqua e de pouco potencial pelos poderes municipais (CAMPOS, 2003).

A urbanização tomou conta da bacia hidrográfica do rio Beberibe gerando problemas como a impermeabilização do solo, aumento de resíduos sólidos e de lixo, menor área verde, problemas relacionados a drenagem e falta de saneamento. Enfim, uma verdadeira falta de estrutura e planejamento do uso e ocupação do solo que só aceleraram o processo de degradação do rio Beberibe.

3.5 - CONDIÇÕES HÍDRICAS

O aquífero Beberibe é o principal manancial hídrico subterrâneo de toda a faixa costeira do Estado de Pernambuco, onde a água captada é usada para fins domésticos, comerciais e industriais.

Na região norte da RMR, a empresa concessionária, a Companhia de Saneamento de Pernambuco - COMPESA, responsável pelos serviços de abastecimento público, vem se utilizando mais de poços tubulares do que dos mananciais de superfície,

perfurados para obter água na profundidade do Aquífero Beberibe (BORBA, FILHO & COSTA, 2010).

Compondo uma rede hidrográfica relativamente densa, as atividades antrópicas próximas ao rio Beberibe refletem diretamente na qualidade das águas superficiais, provocando um aumento considerável no nível de poluição.

Três compartimentos dividem a bacia do rio Beberibe no que diz respeito a questões hídricas, sendo o alto Beberibe, das nascentes até a BR-101; o médio Beberibe, a partir da BR-101 até o seu encontro com o rio Morno; e o baixo Beberibe, a partir da confluência com o rio Morno até a foz conjunta com o Capibaribe. A variação encontrada no relevo da área em consequência da diminuição das cotas altimétricas foi usada como critério para a divisão desses compartimentos.

O encontro com o rio Morno que é seu maior afluente acontece no baixo curso, logo após o rio Beberibe penetra na grande várzea, numa planície inundada, e vai se alargando até chegar ao litoral, onde suas águas se tornam mais abundantes. O canal Vasco da Gama também se une com esses rios, aumentando ainda mais a abundância de água.

O trecho inferior do Beberibe tem um acentuado nível de poluição, pois além do seu curso atravessar áreas povoadas, esse trecho recebe águas do riacho Lava-tripas, do canal Vasco da Gama, do canal da Malária e despejos industriais que são jogados diretamente no rio Beberibe.

A qualidade das águas superficiais das bacias pernambucanas são monitoradas pela Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (CPRH), onde a bacia do rio Beberibe é monitorada desde o ano de 1986.

A classificação da qualidade das Bacias Hidrográficas é feita com base nos usos preponderantes, de modo a atender ao uso mais restritivo estabelecido no grupo. O rio Beberibe é um dos mais poluídos do Estado de Pernambuco, em decorrência do déficit de saneamento básico de Olinda e Recife e tem seu curso comprometido pela ocupação informal das encostas (CAMPOS, 2003).

Em termos de monitoramento da qualidade de água realizados pela CPRH, desde 2008 a bacia do rio Beberibe compreende algumas estações onde os detalhes podem ser observados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Estações de amostragem da rede de monitoramento do Rio Beberibe.

Zona	Estação	Corpo d'água	Local	Coordenadas
Habitacional rarefeita	BE – 01	Rio Araçá	Na nascente do rio Beberibe, no açude no Clube Sete Casuarinas, em Aldeia, Camaragibe.	S 07°53'42,8" W34°54'27,8"
Habitacional rarefeita	BE – 09	Rio Beberibe	Na captação da COMPESA, em Guabiraba, Recife.	S 08°00'13,5" W34°54'27,8"
Habitacional densa	BE – 30	Rio Morno	Na ponte na estrada do Cumbe, acesso à Linha do Tiro, Recife.	S 08°00'14,9" W34°53'20,2"
Habitacional densa	BE - 45	Riacho Lava Tripa	Na ponte da Av. Presidente Kennedy, Olinda.	S 08°00'17,2" W34°53'08,7"
Habitacional densa	BE - 50	Rio Beberibe	Após receber o canal Vasco da Gama, na ponte de acesso a Peixinhos, divisa das cidades de Olinda e Recife.	S 08° 01'08,4" W34°53'08,72"

Fonte: CPRH (2011).

Conforme o exposto, a zona homogênea habitacional rarefeita com duas estações de amostragem (BE-01 rio Araçá e a BE-09 rio Beberibe) e a zona homogênea habitacional densa com três estações de amostragem (BE-30 rio Morno, BE-45 riacho Lava Tripa e BE-50 rio Beberibe) formam as estações monitoradas pela CPRH. A estação BE-09 é a atual área de captação da COMPESA, localizada a montante da área de estudo.

Os resultados do monitoramento da qualidade da água no rio Beberibe pela CPRH referentes a estação BE-09, que é o local de estudo da presente pesquisa, reporta que a qualidade é moderadamente comprometida. A estação BE-01 é poluída e as estações BE-30, BE-45 e BE-50 são classificadas como muito poluída.

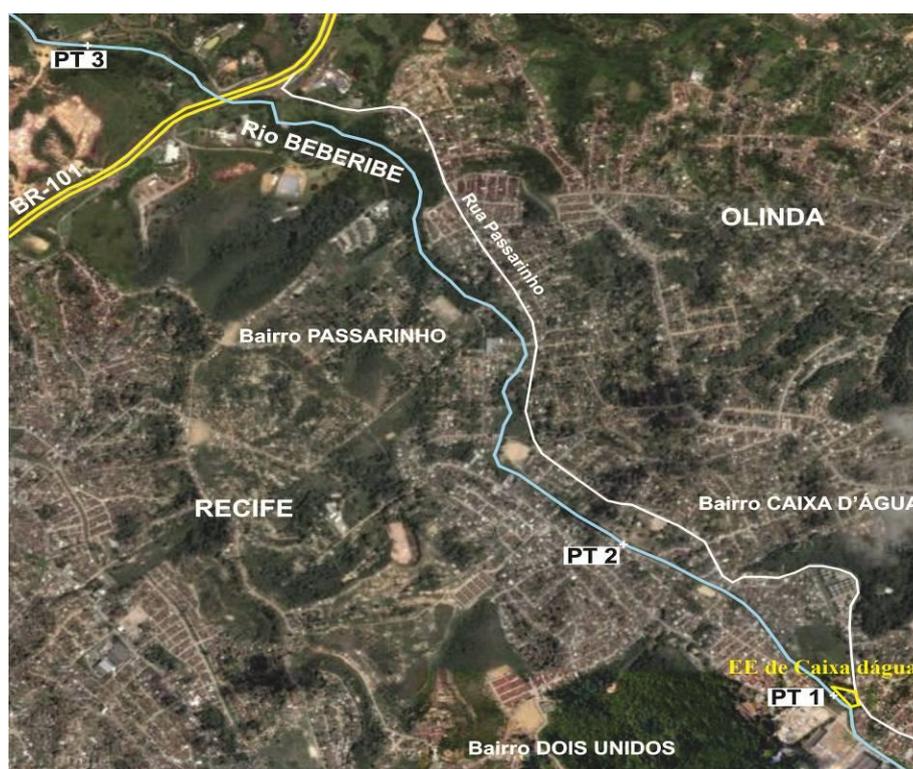
3.6 - ÁREA DE PESQUISA

O projeto de pesquisa foi desenvolvido em alguns pontos da margem do rio Beberibe e no terreno da Estação Elevatória (EE) de Caixa d'Água, propriedade da COMPESA, onde já existe um projeto piloto de Filtração em Margem.

3.6.1 - Pontos de estudo no rio Beberibe

Três pontos do rio Beberibe foram selecionados para fazerem parte do projeto de pesquisa. Os pontos foram selecionados estrategicamente para fornecer uma melhor cobertura representativa da área de estudo (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Localização dos pontos de pesquisa no rio Beberibe.



As coordenadas geográficas dos pontos que foram analisados foram coletadas com um GPS Garmin e podem ser observados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - 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´

O ponto 1 está localizado dentro dos limites da Estação Elevatória de Caixa d'Água (Figura 3.4), uma das unidades da COMPESA. Apresenta aproximadamente 6 m de largura e uma lâmina d'água média de 30 cm de profundidade.

Próximas ao ponto 1 existem áreas verdes, resquícios de Mata Atlântica, que são as Reservas Ecológicas de Passarinho com aproximadamente 14 ha de extensão e a de Dois Unidos com cerca de 52 ha. Essas são Unidades de Conservação e provavelmente são áreas de recarga dos lençóis freáticos da região.

Figura 3.4 - Ilustração do ponto 1.



O ponto 2 está situado próximo a Estação Elevatória de Caixa d'Água, apresenta 6 m de largura e uma lâmina d'água média de 30 cm de profundidade. Está localizado junto de áreas urbanas, onde o rio recebe muitos efluentes produzidos pela comunidade local. Sendo assim é um ponto que sempre apresenta uma quantidade razoável de lixo e dejetos humanos (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Ilustração do ponto 2.



Já o ponto 3 encontra-se a Oeste da BR 101, onde o local ainda é preservado e não apresenta urbanização (Figura 3.6). Apresenta uma largura média de 7 m e uma lâmina d'água de aproximadamente 20 cm. A água é clara e o local revela uma bela paisagem, onde muitas famílias aproveitam para o lazer.

Figura 3.6 - Ilustração do ponto 3.



Nos três pontos de estudo do rio Beberibe foi calculada a vazão a partir do molinete hidrométrico VALEPORT. As vazões dos pontos podem ser observados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Vazão média dos pontos de estudo num trecho do rio Beberibe.

PONTOS	01	02	03
VAZÃO (m ³ /s)	1,22	0,27	0,12

Lembrando que todas as medições (largura, profundidade e vazão) dos pontos analisados, foram realizadas após o processo de drenagem no rio Beberibe que ocorreu entre os anos de 2013 e 2014.

3.6.2 - EE de Caixa d'Água

A Estação Elevatória de Caixa d'Água também faz parte da área experimental da pesquisa, onde já existe um projeto piloto de Filtração em Margem realizado nas margens do rio Beberibe.

Na EE de Caixa d'Água a água bombeada é advinda de poços profundos e de água superficial do rio Beberibe captada mais a montante da sua área e segue para duas Estações de Tratamento de Água (ETA), Alto do Céu e Caixa d'Água.

Através da imagem abaixo é possível observar que o percurso natural do rio Beberibe passa no limite do terreno da EE de Caixa d'Água (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Imagem de satélite da EE de Caixa d'Água e visualização do rio Beberibe.



Alguns motivos foram relevantes na escolha da EE de Caixa d'Água para instalação do projeto piloto, tais como: incentivo da COMPESA, segurança dos equipamentos utilizados e dos pesquisadores, facilidade de acesso ao rio Beberibe, terreno propício para utilização da FM e possível fato da água advinda da tecnologia FM poder no futuro ser incorporada ao sistema de bombeamento da COMPESA.

3.6.2.1 - Projeto piloto

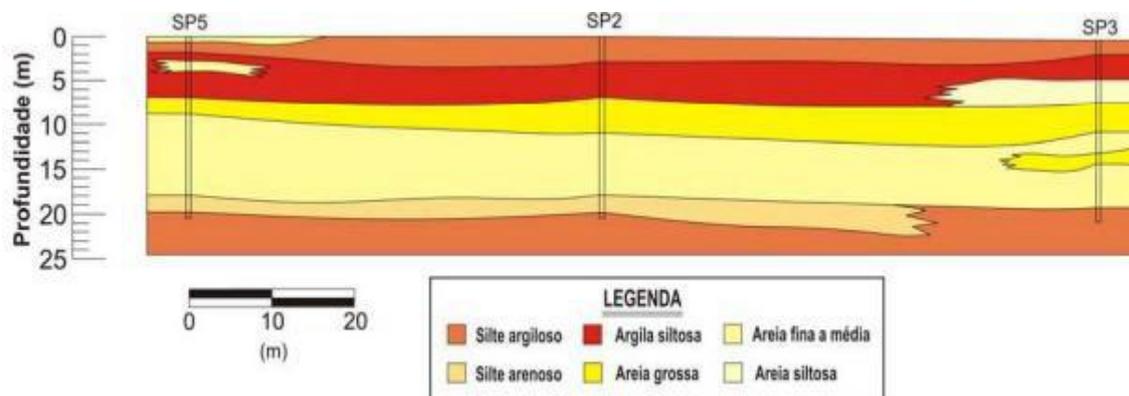
A implantação do projeto piloto foi iniciada em 2007, após algumas reuniões com a equipe da COMPESA para escolha do melhor local. Antes da instalação dos poços foram realizadas algumas análises com detalhes da área de estudo caracterizando o subsolo do local.

Informações mais detalhadas foram alcançadas após a perfuração de furos de sondagem por percussão, através de ensaios SPT (Standard Penetration Test). Inicialmente foram feitos 6 furos de sondagem (SP1, SP2, SP3, SP4, SP5 e SP6) com 20 m de profundidade e com diâmetro de 4 polegadas cada, sendo um dos furos no leito do rio Beberibe (SP6) com 10 m de profundidade.

A cada metro de perfuração amostras foram coletadas para elaboração dos perfis de sondagem. As análises granulométricas foram realizadas no Laboratório de Solos da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Através dessas análises foi possível traçar duas seções litológicas, uma transversal e outra paralela ao rio Beberibe.

Através das análises dos furos de sondagens SP5, SP2 e SP3, foi elaborada a seção litológica paralela ao Beberibe (Figura 3.8).

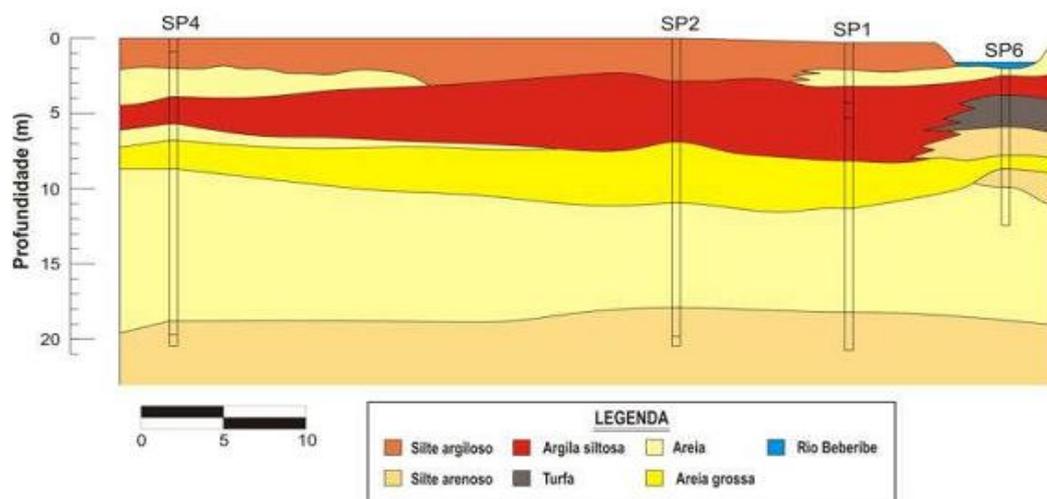
Figura 3.8 - Perfil litológico paralelo ao rio Beberibe no módulo experimental.



Fonte: Paiva (2009).

As informações dos furos SP4, SP2, SP1 e SP6 caracterizaram a seção litológica transversal ao rio Beberibe, lembrando que o SP6 está localizado no leito do rio (Figura 3.9).

Figura 3.9 - Perfil litológico transversal ao rio Beberibe no módulo experimental.



Fonte: Paiva (2009).

Na seção litológica paralela ao rio Beberibe no módulo experimental, observa-se que no topo encontra-se um material fino, compreendendo uma camada de silte-argiloso, e depois uma camada de material argilo-siltoso. A partir de 7 m encontra-se

um material mais grosso formado por areia e areia grossa. Já no leito do rio existe uma camada de material de origem vegetal, a turfa.

Os furos de sondagem foram devidamente equipados para após as análises serem utilizados como poços de observação. Cada furo recebeu um tubo de PVC de 1 polegada com profundidade de 20 m e ranhuras feitas a cada 10 cm. Os piezômetros foram protegidos na sua parte superior com um tubo de aço de 1,20 m.

A caracterização geológica do local a partir dos furos de sondagem forneceu informações suficientes para a construção do primeiro poço de produção em 2008 (Figura 3.10).

Figura 3.10 - Foto do poço de produção 1, na EE de Caixa d'Água.



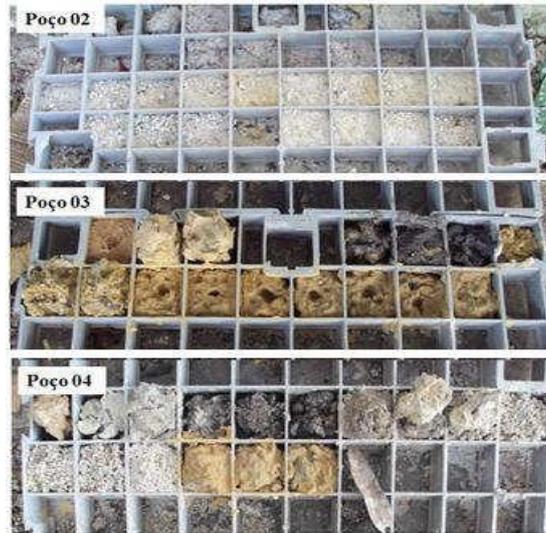
Com 15 m de profundidade (filtro fica entre 6 e 13 m) e 6 polegadas de diâmetros, o poço de produção 1 opera durante 24 h com uma vazão média de 12,6 m³/h. Está localizado quase ao centro da EE de Caixa d'Água à aproximadamente 65 m do rio Beberibe.

Depois da construção do poço de produção 01, em Junho de 2009 foram feitos mais dois furos de sondagem o SP7 e o SP8, esses foram incluídos aos poços de observação já existentes, a única diferença é que sua profundidade é de 8 m cada, já os antigos tinham 20 m de profundidade (filtro fica entre 2 a 7 m).

Em 2012, foram construídos mais três novos poços na EE de Caixa d'Água para complementar o projeto piloto de Filtração em Margem nas margens do rio Beberibe.

Durante o processo de perfuração foi coletado metro a metro amostras de sedimentos (Figura 3.11) para construção de um perfil litológico dos três novos poços.

Figura 3.11 - Amostras de sedimento coletadas a cada metro durante a perfuração dos poços de produção 02, 03 e 04 na área experimental de FM.



Fonte: Freitas (2014).

Os detalhes da construção e o método de perfuração dos três novos poços perfurados nas margens do rio Beberibe são similares ao método utilizado no poço de produção 01 (Figura 3.12).

Figura 3.12 - Instalação da bomba submersa para o poço 04.



Os poços 02, 03 e 04 possuem diâmetro de 150 mm, 15 m de profundidade, seção de filtro a partir dos 6 m até 12 m de profundidade, seção de pré-filtro

(encascalhamento) a partir dos 3 m até os 15 m, a cimentação foi feita dos 3 m de profundidade até a superfície de cada poço.

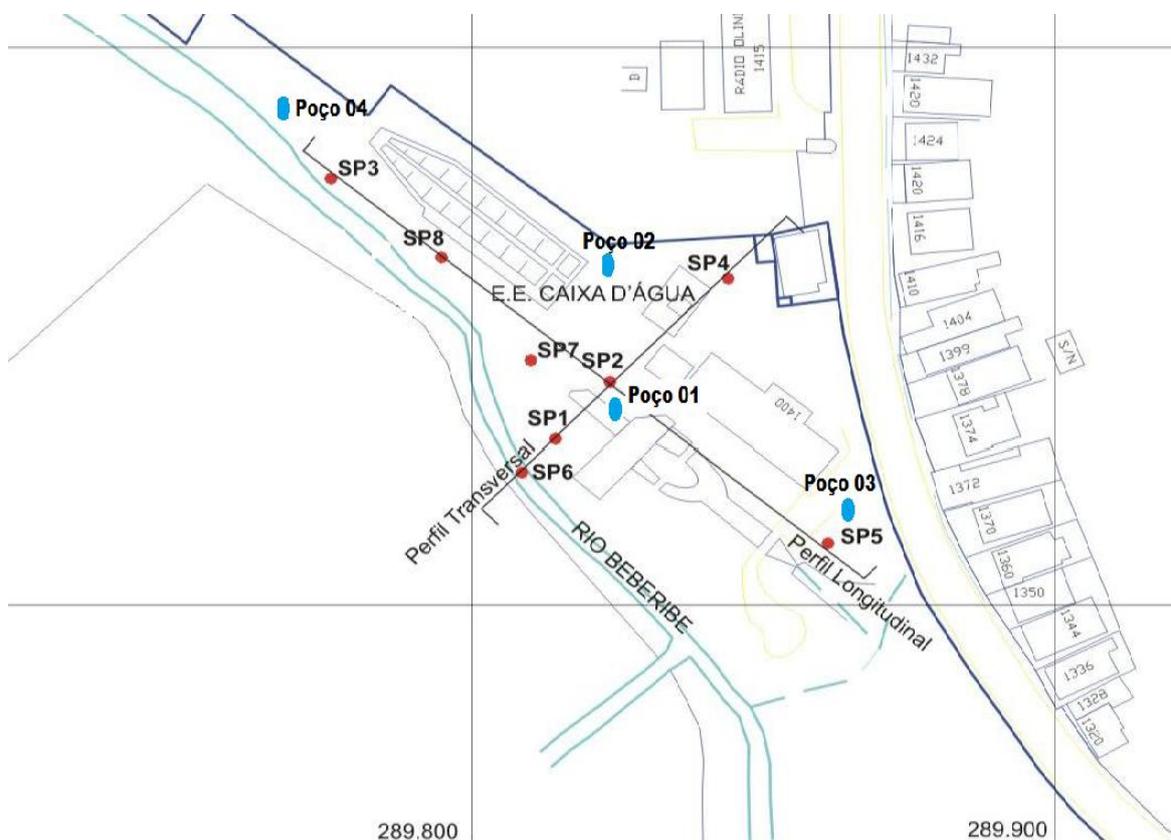
O poço de produção 01 opera em bombeamento contínuo desde março de 2009, o bombeamento do poço de produção 03 foi iniciado em março de 2013 e os poços 02 e 04 começaram a bombear em Setembro de 2014. A vazão média de operação dos poços pode ser observada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Vazão média de operação dos poços de produção da estação experimental.

POÇOS	01	02	03	04
VAZÃO (m ³ /h)	12,60	9,57	9,13	9,80

A Figura 3.13 apresenta a disposição dos poços de observação (SP1, SP2, SP3, SP4, SP5, SP7 e SP8) e dos poços de produção (01, 02, 03 e 04) instalados no projeto piloto de Filtração em Margem na Estação Elevatória de Caixa d'Água.

Figura 3.13 - Localização dos piezômetros e dos poços de produção na área experimental de Filtração em Margem no rio Beberibe – PE.



Toda água produzida pelos poços de produção no projeto piloto de Filtração em Margem são incorporadas ao sistema de tratamento convencional da COMPESA, passando por análises físico-químicas e bacteriológicas periodicamente.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA

4. METODOLOGIA

Uma parte do trabalho foi realizada em três pontos do rio Beberibe, conforme indicado na Figura 3.3, na divisa entre os municípios de Recife e Olinda. A outra parte da pesquisa foi realizada no terreno da EE de Caixa d'Água, onde existe um projeto piloto de FM com uma estrutura física montada com 7 poços de observação e 4 poços de produção.

Como já foi mencionado anteriormente esta pesquisa tem como objetivo principal caracterizar a zona hiporreica para aprofundar o estudo da interação entre águas superficiais e águas subterrâneas, visando a técnica de Filtração em Margem para o abastecimento público no Estado de Pernambuco. Pretendeu-se intensificar o estudo da zona hiporreica realizando uma caracterização física e biológica, a fim de entender qual é a sua verdadeira influência na técnica de Filtração em Margem. Além disso, foi realizado o monitoramento quantitativo e qualitativo do projeto piloto para avaliar a eficiência da técnica FM no tratamento de água do rio Beberibe.

Durante o período de monitoramento, também foram observadas as possíveis variações sazonais que poderiam ocorrer durante o emprego da FM, além de serem realizadas leituras do nível da lâmina d'água do rio Beberibe a partir da escolha de um ponto fixo.

4.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ZONA HIPORREICA

A caracterização da zona hiporreica foi realizada através de ensaios físicos e biológicos, salientando que foram analisadas amostras no período chuvoso e no período seco para uma melhor compreensão do comportamento dos agentes envolvidos no ambiente hiporreico.

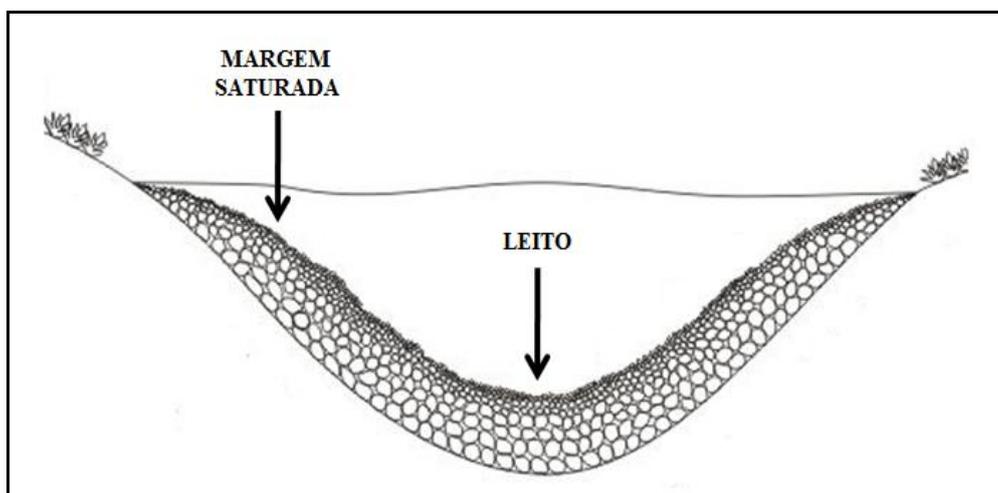
4.1.1 - Caracterização física

A caracterização física da zona hiporreica foi realizada em três etapas nessa pesquisa: ensaios de infiltração, variação da carga hidráulica e ensaios de granulometria.

4.1.1.1 - *Ensaio de infiltração*

Os ensaios de infiltração foram realizados quinzenalmente nos pontos 2 e 3 na margem saturada e no leito do rio Beberibe (Figura 4.1), lembrando que o ponto 1 não fez parte dos testes de infiltração pela dificuldade de acesso e falta de segurança.

Figura 4.1 - Detalhe dos locais onde foram realizados ensaios de infiltração no rio Beberibe.



Foi feito um sistema de referência nas margens, de modo que os pontos onde foram realizados os testes de infiltração embaixo da água nos diversos meses de pesquisa ficassem no mesmo local com discrepância máxima de 1,0 m entre um ensaio e outro. As condições de tempo e a presença de resíduos sólidos encontrados no rio influenciavam na variabilidade dos locais, pois dificultava a inserção do equipamento na zona hiporreica.

Os testes foram realizados quinzenalmente durante 10 meses no período de fevereiro a novembro de 2014, possibilitando uma adequada avaliação do fluxo vertical de água na zona hiporreica.

Com base no estudo de alternativas para a quantificação de trocas do fluxo vertical hídrico, decidiu-se utilizar um equipamento simples, adaptado ao apresentado por Lee (1977). Para realização dos ensaios de infiltração da zona hiporreica foram adotados infiltrômetros de cilindro (cilindros transparentes) e reservatórios de água (bolsas hospitalares) (Figura 4.2).

Figura 4.2 - Material utilizado para realização dos ensaios de infiltração.



Os cilindros têm a parte inferior aberta e são produzidos com acrílico, onde sua área transversal é de 50,265 cm². Para os reservatórios de água foram utilizadas bolsas hospitalares plásticas com capacidade para aproximadamente 2 L.

O primeiro passo para realização dos ensaios de infiltração é a fixação de aproximadamente 4 cm do cilindro na zona hiporreica (Figura 4.3), onde o equipamento é pressionado lentamente até que se forme uma coluna de sedimentos no interior do equipamento promovendo a fixação do mesmo no leito submerso.

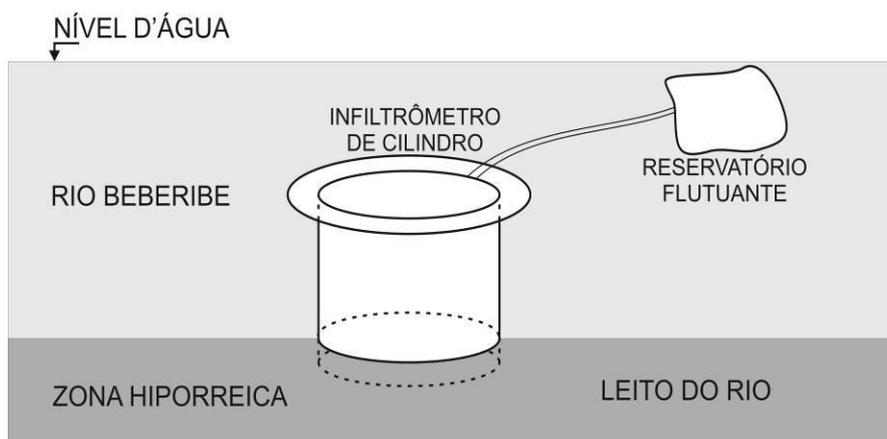
O cilindro é fixado no local do ensaio e posteriormente, quando necessário, entre o cilindro e os sedimentos do leito é aplicada uma mistura de bentonita e água na proporção de 1:1, pois a bentonita é um material que se expande quando entra em contato com líquido e funciona como um selante, impedindo a entrada ou o vazamento de água.

Figura 4.3 - Operação de fixação do cilindro na zona hiporreica.



Logo após, os reservatórios de água devidamente cheios (aproximadamente 2 L) são acoplados ao cilindro, sendo inserido nas condições ambientais locais como temperatura do rio, nível da lâmina d'água, possíveis correntezas e mesma carga hidráulica (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Esquema do sistema para os ensaios de infiltração.



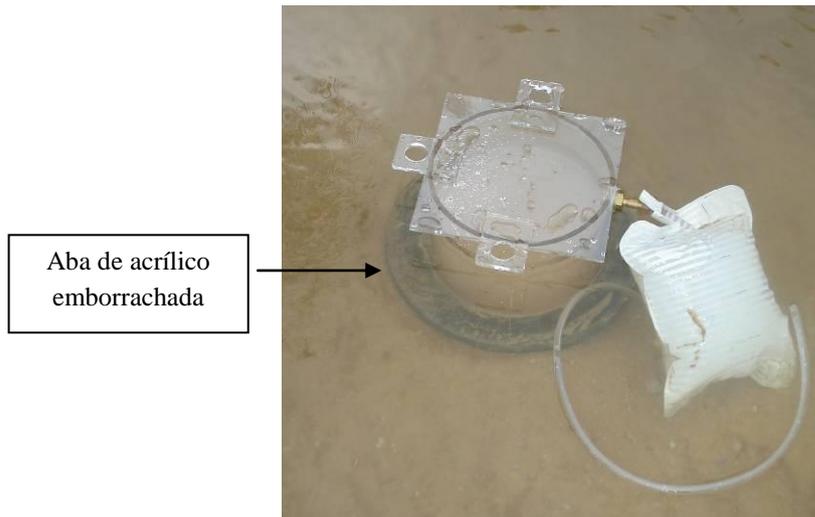
As bolsas de água são devidamente pesadas em campo com balança eletrônica antes de serem conectadas ao cilindro e após 20 minutos são retiradas e pesadas novamente ainda em campo. O tempo de 20 minutos foi determinado pela equipe de pesquisa, sendo considerado tempo suficiente para base de cálculos.

Para melhorar a precisão, a quantidade de água do reservatório foi medida em gramas e posteriormente transformada em mm^3 . Para base de cálculo, através da sua densidade, foi adotada a temperatura ambiente de 25°C , sendo a temperatura média medida no local nos períodos de testes, a massa específica da água de $0,997 \text{ g/cm}^3$ na temperatura ambiente local.

Para facilitar os ensaios de infiltração os infiltrômetros de cilindro foram aprimorados, onde foi acrescida uma aba de acrílico forrada com um material emborrachado na parte inferior do mesmo. O objetivo dessa aba é substituir o uso da bentonita, pois ela consegue deixar o infiltrômetro de cilindro bem fixado nos sedimentos, servindo como um selante (Figura 4.5).

Antes de usar o cilindro com a aba nos ensaios de infiltração, foram feitos testes com os dois tipos de cilindros (com aba e sem aba + bentonita) no mesmo local e os resultados foram coerentes.

Figura 4.5 - Infiltrômetro de cilindro aprimorado com aba lateral.



Durante os ensaios de infiltração a penetração do cilindro no solo, a vedação do cilindro nos sedimentos e a conexão dos reservatórios com os infiltrômetros de cilindro são verificadas antes de cada medição. Além disso, sempre é examinada a existência de bolhas de ar na mangueira de conexão, caso positivo as mesmas são retiradas antes de se iniciar o processo, pois as bolhas poderiam interferir no real tempo da infiltração no leito.

A partir dessa metodologia buscou-se calcular a taxa de infiltração da água no leito através da fórmula:

$$I_t = \frac{V}{t \cdot A} \quad (4.1)$$

Onde:

I_t = taxa de infiltração (mm/s);

V = volume infiltrado (mm³);

t = tempo (s); e

A = área do cilindro (mm²).

Esta expressão indica que a infiltração pode ser quantificada como o volume de água que penetra no solo, por unidade de área, por unidade de tempo.

Então, levando em consideração a variação do volume de água no reservatório durante o período de testes é possível aplicar a fórmula acima para quantificação da taxa de infiltração.

Alguns autores reportam o uso de infiltrômetros como método para estudar a troca entre águas superficiais e subterrâneas. O infiltrômetro desenvolvido por Lee (1977) teve grande utilização. Outro dispositivo apropriado para pequenos rios foi apresentado por Kaleris (1986), já Chekauer & Mcbride (1988) apresentaram um infiltrômetro para corpos de água com grandes superfícies.

A metodologia utilizada na presente pesquisa para caracterizar a interação entre o rio e o aquífero é bem semelhante a que foi utilizada por Arantes *et al.* (2006) na bacia do Ribeirão da Onça, localizado no município de Brotas - SP. Onde, concluiu-se que a utilização de infiltrômetros para determinação da taxa de troca entre rio e aquífero representa um procedimento adequado, desde que se tomem cuidados contínuos para se obterem resultados consistentes.

Para um melhor entendimento da correlação entre taxa de infiltração e pluviometria, durante o período de ensaios de infiltração, foram coletados dados de precipitação diários do posto do Alto da Bondade instalado em Olinda – PE, sendo este o posto pluviométrico mais próximo do local de estudo. Os dados de precipitação diária foram obtidos na Agência Pernambucana de Águas e Clima - APAC.

4.1.1.2 - *Leitura da diferença da carga hidráulica*

Vários dispositivos têm sido construídos para medir a diferença da carga hidráulica entre o rio e o aquífero, envolvendo uma variação entre o tipo de piezômetro utilizado, a maneira de medição ou ambos (LEE & CHERRY, 1978; WOESSNER & SULLIVAN 1984; CEY *et al.*, 1998;. WOESSNER, 2000; ARANTES *et al.*, 2006; KENNEDY *et al.*, 2007; CHEN *et al.*, 2003).

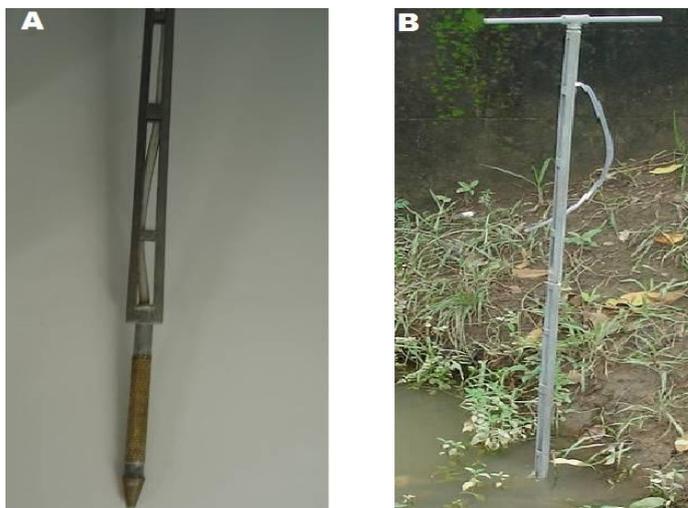
Na presente pesquisa, o equipamento utilizado para realização da leitura da carga hidráulica do aquífero foi desenvolvido na própria Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), baseado em Chen *et al.* (2003). Seu objetivo é determinar a variação do nível da água por meio de medição com escala graduada em centímetros entre o nível de água do rio e a carga hidráulica do aquífero.

As leituras foram realizadas nos mesmos pontos e no mesmo período da realização dos testes de infiltração, porém só no leito do rio Beberibe.

O aparelho denominado pela equipe de piezômetro diferencial é de simples manuseio e fácil interpretação, composto por duas hastes metálicas de 1 m cada (Figura 4.6).

Figura 4.6 - Piezômetro diferencial, aparelho usado para leitura do fluxo vertical do rio:

A) Detalhe do aparelho; B) Aparelho sendo usado no local.



No interior do mesmo existe uma mangueira plástica transparente que facilita a determinação do nível da água por meio visual. A extremidade do equipamento possui uma ponteira filtrante de 35 cm de comprimento recoberta por tela permitindo a passagem de água e impedindo a passagem de grãos do solo. A mangueira é inserida nessa ponteira e passa por todo o comprimento da haste do equipamento.

Nos pontos de ensaios o aparelho é pressionado verticalmente no leito submerso até uma profundidade de aproximadamente 45 cm ultrapassando a camada superficial do leito, dessa forma a água penetra na mangueira e a leitura do nível da água se torna visível.

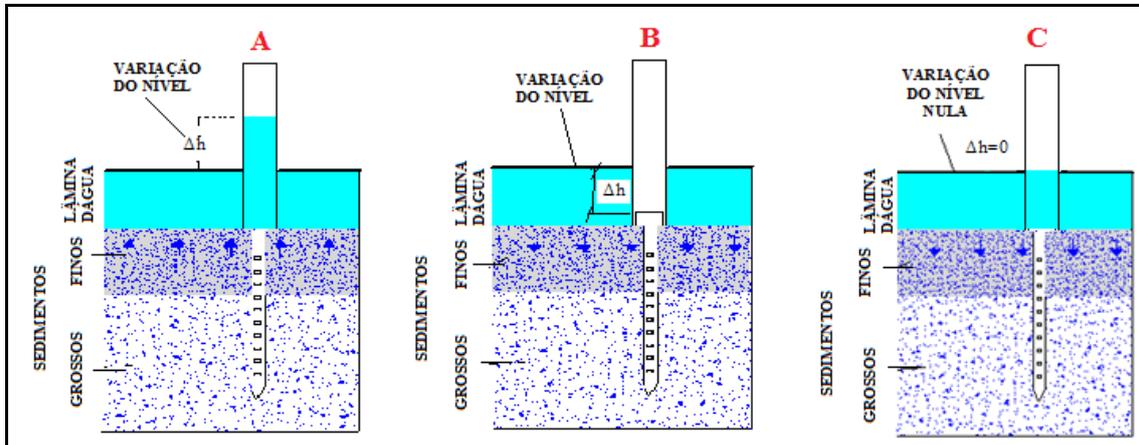
Faz-se a leitura a partir da diferença entre o nível da lâmina d'água do rio e o nível da água no aparelho, sendo três condições possíveis: se o nível da água do rio estiver abaixo do nível da água verificado na mangueira significa que o rio está sendo alimentado pelo aquífero no ponto da leitura (Figura A – fluxo ascendente +); se o nível do rio estiver acima do nível da água visualizado na mangueira é possível concluir que o rio está alimentando o aquífero (Figura B – fluxo descendente -); existe a possibilidade da água da mangueira e da água do rio estarem no mesmo nível, caracterizando um ponto onde não existe movimento vertical da água (Figura C – sem fluxo).

Foi determinado pelo grupo de estudo que um período de 30 minutos era o suficiente para que o sistema atingisse certo equilíbrio, pois o mesmo poderia ter sofrido algum tipo de agitação durante a penetração do aparelho na zona hiporreica. Após esse

tempo a leitura do fluxo vertical do rio era realizada e devidamente anotada na planilha de campo (Figura 4.7).

Figura 4.7 - Leitura do fluxo vertical do rio.

A) Fluxo ascendente; B) Fluxo descendente; C) Sem fluxo.



A partir dos dados obtidos nos ensaios de infiltração e da leitura da carga hidráulica, foi possível avaliar a capacidade de transporte de volumes hídricos entre o rio Beberibe e o aquífero, bem como compreender melhor a influência da zona hiporreica na interação rio-aquífero.

4.1.1.3 - Granulometria

Os ensaios de granulometria fazem parte da caracterização física da zona hiporreica. As coletas dos sedimentos hiporreicos para análise granulométrica foram realizadas em dois momentos diferentes: uma no verão (14 de novembro de 2014) e uma no inverno (12 de maio de 2015). É importante deixar claro que a pesquisa foi realizada no nordeste do país, onde as estações do ano praticamente são inverno e o verão. Nesse sentido, na presente pesquisa quando se faz referência ao verão significa os períodos de estiagem e o inverno significa os períodos chuvosos.

Foram coletadas amostras nos 3 pontos de estudo; na margem e no leito do rio; em duas profundidades diferentes; em duas estações do ano. Para facilitar a identificação das amostras segue uma legenda:

- P1 = ponto 1;
- P2 = ponto 2;
- P3 = ponto 3;

- M = margem;
- L = leito;
- 005 = 0 - 5 cm de profundidade;
- 510 = 5-10 cm de profundidade;
- V = verão (no Nordeste refere-se ao período de estiagem);
- I = inverno (no Nordeste refere-se ao período de chuvas).

Então as amostras são conhecidas por: P1005MV, P1510MV, P2005MV, P2510MV, P3005MV, P3510MV, P1005LV, P1510LV, P2005LV, P2510LV, P3005LV, P3510LV, P1005MI, P1510MI, P2005MI, P2510MI, P3005MI, P3510MI, P1005LI, P1510LI, P2005LI, P2510LI, P3005LI, P3510LI, totalizando 24 amostras (8 amostras para cada ponto com profundidades e estações do ano distintos).

As amostras foram coletadas com um amostrador tipo *corer* (Figura 4.8) com área total de 16,67 cm², ainda em campo foram refrigeradas para melhor preservação e foram levadas ao laboratório para posterior análise.

Figura 4.8 - Amostrador utilizado para coletar amostras para ensaios granulométricos.



As análises granulométricas dos sedimentos hiporreicos foram processadas na UFPE, no Laboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO) do Departamento de Oceanografia (DOCEAN). Inicialmente foi realizado um tratamento prévio para a queima da matéria orgânica contida nos sedimentos com hidrogênio peróxido a 10% (INGRAM, 1971), posteriormente foram efetuadas as análises granulométricas por meio das técnicas de peneiramento e pipetagem descritas em Suguio (1973) e ABNT (1984).

Pelo processo de peneiramento úmido foi feita a separação das partículas finas e grossas com peneira de 0,062 mm. Os sedimentos grossos são separados através do peneiramento seco utilizando-se peneiras com abertura de malhas conhecidas presas a

uma base vibratória do próprio equipamento, determinando assim a percentagem em peso que será retida em cada peneira. As malhas das peneiras utilizadas foram 2,000; 1,410; 1,000; 0,707; 0,500; 0,3354; 0,250; 0,177; 0,125; 0,088; 0,062 mm. Os sedimentos lamosos foram classificados pela técnica da pipetagem.

A partir dos resultados obtidos, os dados das frações granulométricas foram plotados no software SYSGRAN versão 3.0 (CAMARGO, 2006), obtendo-se os parâmetros estatísticos do diâmetro médio e grau de seleção segundo as equações de Folk & Ward (1957) e diagrama triangular de Shepard (1954). Através dos resultados é possível compreender melhor o comportamento da influencia das características do meio do fluxo vertical de água na zona hiporreica.

De acordo com a classificação granulométrica (WENTWORTH, 1922 *apud* SUGUIO, 1973), os sedimentos são classificados em grânulos/cascalhos (2 a 4 mm), areias (2 a 0,062 mm), siltes (0,062 a 0,004 mm) e argilas (< 0,004 mm).

O diagrama triangular de Shepard é descritivo e baseia-se num diagrama triangular em que são representados os conteúdos de areia, silte e argila. Além do diâmetro médio que classifica as areias, siltes e argilas de acordo com o tamanho médio das partículas, o grau de seleção das amostras (Tabela 4.1) também é encontrado a partir do tratamento usado, onde esses resultados são expressos na unidade phi (ϕ). Essa unidade é uma escala logarítmica negativa de base 2 ($-\log_2$ mm) para uniformizar valores de tamanho de grãos que variam de acordo com sua origem (256.000 microns - matações a argila 4 microns) em números inteiros na escala phi onde 8 são as argilas e -1 areias muito grossas.

Tabela 4.1 - Classificação do grau de seleção dos sedimentos de acordo com seus diâmetros.

GRAU DE SELEÇÃO	INTERVALOS (ϕ)
Muito bem selecionado	< 0,35
Bem selecionado	0,35 a 0,50
Moderadamente bem selecionado	0,50 a 0,71
Moderadamente selecionado	0,71 a 1,00
Mal selecionado	1,00 a 2,00
Muito mal selecionado	2,00 a 4,00
Extremamente mal selecionado	>4,00

Fonte: Folk (1968).

Os ensaios de granulometria são realizados para um melhor entendimento das características físicas da zona hiporreica que é tão importante para compreensão dos parâmetros da camada filtrante do leito. Além disso, através dos resultados é possível entender melhor o comportamento do fluxo vertical da água na zona hiporreica.

4.1.2 - Caracterização biológica

Várias comunidades de organismos compõem o biofilme, por isso a caracterização biológica da zona hiporreica foi realizada a partir do levantamento da abundância (indivíduos) e composição da meiofauna existente nesse ambiente.

As coletas foram realizadas em duas etapas: uma no período de estiagem (14 de novembro de 2014) e outra no período chuvoso (12 de maio de 2015).

Um grande número de indivíduos e espécies são encontrados em pequenos volumes de sedimento, sendo amostras pequenas suficientes para análises da comunidade da meiofauna (BETT, 1988). Sendo assim, a coleta das amostras foi feita com um amostrador cilíndrico (*corer*) de acrílico liso e transparente com área total de 261,31 cm², enterrado a 10 cm de profundidade no sedimento hiporreico (Figura 4.9).

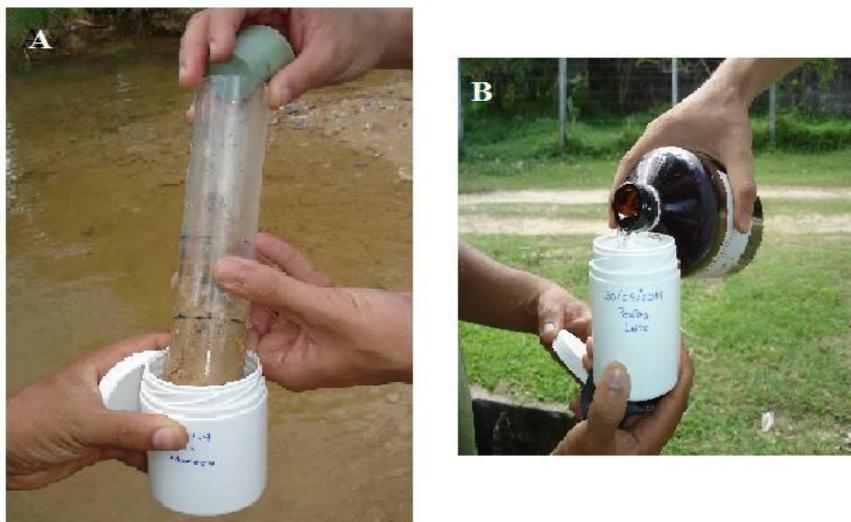
Figura 4.9 - Amostrador (*corer*) utilizado para coletar amostras da meiofauna.



Imediatamente após a extração dos sedimentos, todas as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos devidamente identificados e imersos no formaldeído a 4% para sua preservação até o momento de sua extração (Figura 4.10).

Figura 4.10 - Metodologia realizada em campo para a coleta das amostras da meiofauna.

A) Coleta da meiofauna hiporreica; B) Imersão no formaldeído 4%.



Foram coletadas amostras nos 3 pontos de estudo; na margem e no leito do rio; em duas profundidades diferentes; em duas estações do ano; réplicas e trélicas. Para facilitar a identificação das amostras segue uma legenda:

- P1 = ponto 1;
- P2 = ponto 2;
- P3 = ponto 3;
- M = margem;
- L = leito;
- 005 = 0 - 5 cm de profundidade;
- 510 = 5-10 cm de profundidade;
- V = verão (no Nordeste refere-se ao período de estiagem);
- I = inverno (no Nordeste refere-se ao período de chuvas).
- A = amostra
- B = réplica
- C = tréplica

Sendo assim, totalizou-se 72 amostras: P1005MVA, P1005MVB, P1005MVC, P1510MVA, P1510MVB, P1510MVC, P2005MVA, P2005MVB, P2005MVC, P2510MVA, P2510MVB, P2510MVC, P3005MVA, P3005MVB, P3005MVC, P3510MVA, P3510MVB, P3510MVC, P1005LVA, P1005LVB, P1005MVC,

P1510LVA, P1510LVB, P1510LVC, P2005LVA, P2005LVB, P2005MVC, P2510LVA, P2510LVB, P2510LVC, P3005LVA, P3005LVB, P3005MVC, P3510LVA, P3510LVB, P3510LVC, P1005MIA, P1005MIB, P1005MIC, P1510MIA, P1510MIB, P1510MIC, P2005MIA, P2005MIB, P2005MIC, P2510MIA, P2510MIB, P2510MIC, P3005MIA, P3005MIB, P3005MIC, P3510MIA, P3510MIB, P3510MIC, P1005LIA, P1005LIB, P1005MIC, P1510LIA, P1510LIB, P1510LIC, P2005LIA, P2005LIB, P2005MIC, P2510LIA, P2510LIB, P2510LIC, P3005LIA, P3005LIB, P3005MIC, P3510LIA, P3510LIB, P3510LIC.

Após as coletas as amostras foram levadas para UFPE e analisados no Laboratório de Dinâmica de Populações da UFPE (LABDIN) no Departamento de Zoologia do Centro de Ciências Biológicas (CCB). A meiofauna foi extraída durante a lavagem dos sedimentos hiporreicos com água filtrada sobre peneiras geológicas de aberturas de malha de 500 μm , 200 μm , 100 μm e 45 μm (Figura 4.11).

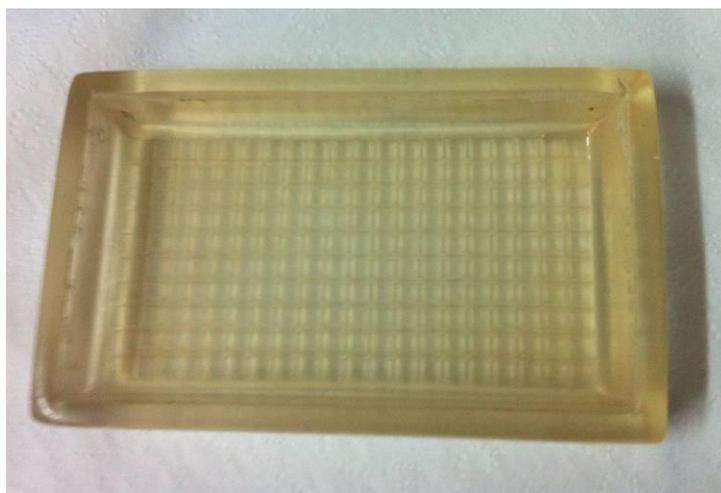
Figura 4.11 - Metodologia realizada para lavagem das amostras da meiofauna.



Os organismos retidos na malha de maior abertura foram desprezados por não fazer parte da meiofauna. Já, os organismos que foram retidos nas outras peneiras, foram acondicionados em recipientes plásticos com formol a 4 % e corados com Rosa de Bengala (para facilitar sua identificação e contagem), após o período mínimo de 24 h a coloração já era adequada para o processamento das amostras.

Cada amostra foi analisada em placa de Dollfus (Figura 4.12) com o auxílio de uma lupa com aumento de 4x. A identificação se deu a nível de grandes grupos. É importante salientar que os indivíduos encontrados só foram contabilizados quando encontrados com cabeça.

Figura 4.12 - Placa de Dollfus



A metodologia laboratorial e a análise de dados utilizada na presente pesquisa para análise da meiofauna já foi reportada por vários autores, porém em ambientes diferentes, como: ambientes recifais (BARRETO, 2014), canais (MOELLMANN, CORBISIER & CURVELO2001), área estuarina em plena zona urbana (CASTRO, 2003), praias (CHADDAD *et al.*, 2013).

Para base de cálculo das densidades foi utilizada a área referente ao círculo do *corer* (11,33 cm²). A densidade meiofaunística das amostras foi uniformizada para valores correspondentes a indivíduos/ 10 cm², a partir da fórmula:

$$D = (N / V) \times 10 \quad (4.2)$$

Onde:

D = densidade;

N = número total de organismos presentes na amostra;

V = volume da amostra (cm²).

Posteriormente calculou-se a densidade média das réplicas e tréplicas, através de média aritmética simples.

A partir dos resultados obtidos, as análises foram realizadas utilizando técnica multivariada. Pois, esta técnica é composta por métodos estatísticos apropriados para estudos em que várias variáveis são consideradas simultaneamente. A base dos métodos de análise multivariada são medidas de semelhança, estas avaliam objetivamente a similaridade e a dissimilaridade.

Na presente pesquisa a estrutura da comunidade da meiofauna foi investigada mediante a utilização da análise Permutational multivariate analysis of variance - PERMANOVA. Este programa computacional testa a resposta simultânea de uma ou mais variáveis e de um ou mais fatores com base em qualquer medida de distância, utilizando métodos de permutação (ANDERSON, 2005).

Primeiramente o programa calcula as distâncias entre cada par de unidades de observação (unidades de amostragem) para se obter uma matriz de distâncias. Em seguida, calcula as estatísticas do teste a partir da matriz de similaridade de acordo com o desenho experimental relevante (ANDERSON, 2005).

Segundo Gheller (2014), a PERMANOVA é uma análise de variância semi-paramétrica, baseada em permutações a partir de uma matriz de similaridade.

Para discriminar diferenças espaciais nas comunidades entre os tratamentos, utilizou-se uma matriz de similaridade de Bray-Curtis e a ordenação por escalonamento multidimensional (MDS).

A distância de Bray & Curtis (1957) é de uso frequente por ser disponibilizado na maioria dos pacotes estatísticos. Ela varia entre 0 (dissimilaridade) e 1 (similaridade). Esse índice é fortemente influenciado pelas espécies dominantes, as espécies raras acrescentam muito pouco ao seu valor (VALENTIN, 1995).

O MDS tem o objetivo de construir um "mapa" ou configuração das amostras, num determinado número de dimensões, para satisfazer todas as condições impostas pela matriz de similaridade (CLARKE & WARWICK, 2001).

As análises de dados multivariados foram analisados com o software Primer® (Plymouth Routines In Multivariate Ecological Researches) v.6., onde as análises multivariadas seguiram as recomendações de Clarke & Warwick (2001).

O software PRIMER-PERMANOVA é uma das ferramentas estatísticas mais comuns utilizadas e reconhecidas pela comunidade científica na análise de dados multivariados, sendo igualmente valorizado pelas revistas de investigação com arbitragem científica (SILVA, 2010).

Foi adotado o nível de significância de 5% para todas as análises. Sempre que necessário, os dados brutos foram transformados para $\log_{10}(x+1)$ e as análises multivariadas a raiz quarta.

4.2 - FILTRAÇÃO EM MARGEM

Parte da pesquisa foi realizada dentro dos limites do terreno da EE de Caixa d'Água, onde já existe um projeto piloto de FM que conta com com 7 poços de observação e 4 poços de produção.

A partir da estrutura já existente do projeto piloto de Filtração em Margem, foi realizado um monitoramento qualitativo e um quantitativo, onde foram realizadas análises e comparações da qualidade da água dos poços de produção e do rio Beberibe.

Além disso, o monitoramento quantitativo contou com a leitura dos níveis piezométricos dos poços de produção e poços de observação para caracterizar a interação rio-aquífero que é a base do sistema de Filtração em Margem.

4.2.1 - Monitoramento qualitativo

O monitoramento qualitativo foi realizado em três campanhas: outubro, novembro e dezembro de 2014, onde foram coletadas amostras dos 3 pontos de estudo para obter uma melhor avaliação da qualidade de água de diferentes pontos do rio e do poço de produção 1 instalado no terreno da EE de Caixa d'Água. As amostras foram coletadas em frascos de polietileno devidamente esterilizados descartando ao máximo a possibilidade de contaminação.

Após a coleta, as amostras foram encaminhadas ao SGCQ (Sistema de Gestão de Controle de Qualidade) que é um laboratório da COMPESA, onde foram processadas as análises físico-químicas e bacteriológicas. Essas amostras foram analisadas e comparadas para a avaliação da eficiência da técnica de Filtração em Margem.

Os parâmetros que foram analisados pelo SGCQ são: pH, condutividade elétrica, turbidez, cor aparente, alcalinidade total em CaCO_3 , dureza total em CaCO_3 , cloreto, amônia em NH_3 , nitrito em N e nitrato em N. Esses parâmetros foram analisados de acordo com o Standard Methods (APHA, 2005), sendo que alguns são considerados indispensáveis na avaliação da qualidade da água quanto a sua potabilidade.

Para as análises bacteriológicas também foram realizadas três campanhas, onde as coletadas das amostras foram realizadas nos mesmos dias das amostras físico-químicas. A coleta foi feita em frascos de polietileno devidamente esterilizados para evitar qualquer contaminação. Os parâmetros analisados foram coliformes totais e fecais ou termotolerantes.

As amostras bacteriológicas também foram processadas e analisadas no SGCQ, onde foi utilizada a técnica de tubos múltiplos com substrato cromogênico. A positividade do teste foi observada pelo aparecimento de um anel vermelho carmim na superfície dos tubos. O resultado das análises foi reportado em NMP (Número Mais Provável) / 100 ml.

Todos os resultados foram comparados com a portaria do Ministério da Saúde nº 2914 de 12 de dezembro de 2011 (MINISTÉRIO DE SAÚDE DO BRASIL, 2011) que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

O monitoramento qualitativo realizado na presente pesquisa foi uma continuidade do que pôde ser observado em Paiva (2009), Freitas (2010; 2014) e Veras (2011), onde os autores utilizaram da mesma metodologia do estudo aqui realizado, tanto para análises físico-químicas como para as análises bacteriológicas.

4.2.2 - Monitoramento quantitativo

O monitoramento quantitativo foi realizado desde fevereiro de 2014 até novembro de 2014 a partir de leituras piezométricas, realizadas quinzenalmente para a obtenção de uma boa base de dados.

Para obter o real nível freático dos poços de observação e do poço de produção foi necessário fazer a diferença de cotas topográficas entre a boca dos poços e da leitura de profundidade dos níveis piezométricos.

Os valores das cotas de cada poço estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Cotas da boca de cada poço de observação para o monitoramento piezométrico, adotando como cota 0,00m o piso da casa de bombas.

POÇOS	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP7	SP8	Poço 1	Poço 2
COTA (m)	-0,103	0,210	-0,142	0,202	0,250	0,197	-0,299	0,437	0,225

Fonte: Freitas, 2014.

Adicionalmente, estipulou-se um ponto de referência nas instalações da EE de Caixa d'Água comum para todos os piezômetros, adotando-se como cota 0,00 m o piso da casa de bombas da Estação Elevatória de Caixa d'Água (PAIVA, 2009).

As leituras dos piezômetros foram realizadas através de um medidor de nível de água de pulso elétrico com trena acoplada que funciona através de um sinalizador sonoro onde as leituras foram registradas quinzenalmente.

Além da leitura dos piezômetros, também foi realizada a leitura da lâmina d'água do rio Beberibe através de uma haste vertical e de uma trena milimetrada, onde as leituras são sempre no mesmo ponto. Posteriormente os dados são transcritos para a base de dados correspondente para assim serem efetuadas as análises.

CAPÍTULO 5

EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

5. EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL

5.1 - UNIVERSIDADE DE ÉVORA – PORTUGAL

Durante o período de novembro de 2012 a março de 2013, foi realizado um estágio de doutorado na Universidade de Évora (UE), Portugal, no Laboratório da Água, sob orientação da Profa. Manuela Morais. O referido estágio foi financiado pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e teve como objetivo estudar experiências desenvolvidas no Sul de Portugal e no Nordeste brasileiro, locais que apresentam características diferentes (vegetação e clima), porém sofrem com o mesmo problema que é a escassez hídrica.

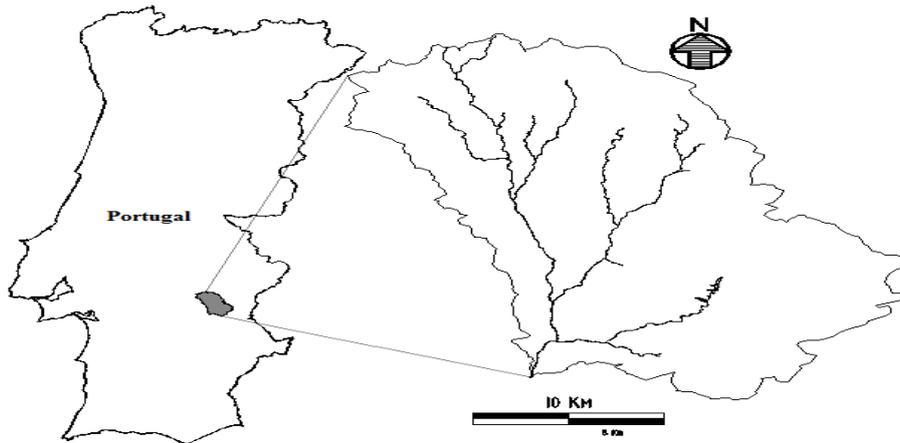
Vários ensaios analíticos são realizados pelo Laboratório, setorizados nas áreas de: físico-química, microbiologia, fitoplâncton e qualidade ecológica. Além disso, o Laboratório da Água da UE participa de projetos em áreas de dinâmica de nutrientes em rios temporários e avaliação da qualidade ecológica.

O estágio de doutorado na Universidade de Évora consistiu numa fase teórica através de pesquisa bibliográfica, onde foram buscadas informações relativas às técnicas utilizadas no Brasil e em Portugal para conviver com escassez de água. E também houve uma fase prática que consistiu em técnicas laboratoriais e trabalho de campo com periodicidade semanal.

O rio avaliado durante a pesquisa foi o rio Pardielas (Figura 5.1), pois a equipe do Laboratório da Água já realiza um monitoramento no mesmo.

O Pardielas é um rio temporário que forma uma bacia hidrográfica com 514 Km². Localiza-se no sul de Portugal (38° 26' N, 07° 41' W) e de acordo Lillebo *et al.* (2007), a temperatura média do ar varia de 9°C no inverno a 23°C no verão, com uma precipitação média anual de 600 mm.

Figura 5.1 - Localização na bacia do rio Pardiela em Portugal.



Foi escolhido um ponto do rio Pardiela para realização de ensaios de infiltração com o infiltrômetro de cilindro e coleta de água para análises qualitativas. O local é de fácil acesso (quando não ocorre precipitação), além disso a equipe do Laboratório da Água já realiza um monitoramento nesse ponto. Próximo ao local de pesquisa, existe um poço cacimba que fica a aproximadamente 55 m da margem do rio (Figura 5.2), onde o mesmo é utilizado pela equipe do Laboratório para realizar um monitoramento qualitativo da área.

Figura 5.2 - Localização do poço e do ponto de coleta do rio Pardiela.



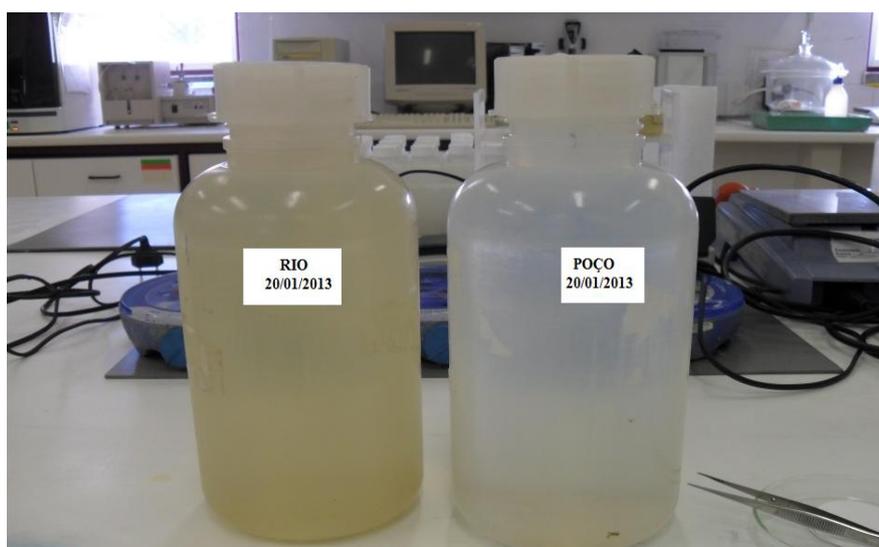
5.1.1 - Análises dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos

As coletas de amostras foram realizadas no poço e nas águas do rio Pardiela (Figura 5.3), sendo coletadas em frascos de polietileno devidamente esterilizados descartando ao máximo a possibilidade de contaminação (Figura 5.4).

Figura 5.3 - Operação de coleta da água das amostras do poço e do ponto do rio Pardiela.



Figura 5.4 - Amostras do rio Pardiela e do poço para análise físico-química.



Várias análises foram realizadas com as amostras coletadas, tais como: parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica, turbidez, cor, alcalinidade total em CaCO_3 , dureza total em CaCO_3 , nitrito com N, nitrato com N e fosfatos) e parâmetros bacteriológicos (coliformes totais e fecais).

As amostras foram processadas no Laboratório da Água da Universidade de Évora, onde o objetivo era o monitoramento ambiental da área.

5.1.2 - Ensaio de infiltração

A mesma metodologia já explicada na presente pesquisa para realização dos ensaios de infiltração no rio Beberibe- PE foi feita nas águas do rio Pardiela (Figura 5.5 e 5.6), com o objetivo de compreender melhor a capacidade de transporte de volumes hídricos entre o rio e o aquífero.

Figura 5.5 - Conexão do reservatório de água no cilindro.



Figura 5.6 - Ensaio de infiltração: margem e leito do rio Pardiela.



Além dos ensaios de infiltração também eram realizadas medições do nível do rio e da temperatura (Figura 5.7).

Figura 5.7 - Medições da lâmina d'água e temperatura do rio Pardiela.



Os resultados do experimento indicam que na época dos ensaios de infiltração existia uma pequena contribuição do rio na recarga do aquífero através do fluxo vertical, onde na margem saturada a média da taxa de infiltração foi de $5,3 \times 10^{-5}$ e no leito foi de $1,0 \times 10^{-4}$ mm/m. As análises laboratoriais foram positivas na comparação qualitativa da água superficial com a água subterrânea. Porém, é preciso dar continuidade as análises e aos ensaios por um maior período de tempo para fazer observações qualitativas e quantitativas em diferentes épocas do ano.

Essa metodologia é muito interessante para caracterização da zona hiporreica e para uma possível aplicação da tecnologia FM na área estudada.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados alcançados e as considerações pertinentes serão apresentados de acordo com cada etapa de realização do projeto.

6.1 - CARACTERIZAÇÃO DA ZONA HIPORREICA

6.1.1 - Caracterização física

A caracterização física da zona hiporreica foi realizada em três etapas diferentes: análises granulométricas, análises de infiltração e análise da variação da carga hidráulica.

6.1.1.1 - Granulometria

Os dados granulométricos dos pontos onde foram realizados os ensaios de infiltração e leitura do fluxo vertical do rio Beberibe, Olinda – PE, foram de muita importância para a compreensão do comportamento do fluxo vertical do rio.

Como já foi dito anteriormente, foram coletadas amostras no período de estiagem (novembro de 2014) e amostras no período chuvoso (maio de 2015).

Os resultados referentes às amostras do ponto 1 estão na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Análise granulométrica - PONTO 1.

PARÂMETROS	AMOSTRAS							
	P1005MV	P1510MV	P1005LV	P1510LV	P1005MI	P1510MI	P1005LI	P1510LI
%Grânulos/Cascalho	0,86	0,46	0,17	0,14	0,21	0,00	5,28	0,03
%Areia	98,48	82,77	99,83	99,57	82,87	77,35	94,20	98,92
%Silte	0,66	5,82	0,00	0,29	10,85	13,80	0,41	0,84
%Argila	0,00	10,95	0,00	0,00	6,07	8,85	0,10	0,21
Shepard (1954)	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia
Diâm. Médio (ϕ)	1,05-AM	3,17-AMF	0,91-AG	1,28-AM	2,14-AF	3,35-AMF	0,56-AG	1,19-AM
Grau de seleção (ϕ)	0,89-MS	1,96-PS	0,84-MS	0,66-MS	2,13-MPS	2,42-MPS	0,84-MS	0,63-MS
% Matéria Org.	3,50	4,63	0,40	0,87	34,87	34,33	0,80	1,60

ϕ (phi) – escala logarítmica negativa de base 2; Diâm. = diâmetro; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; AM = areia média; AG = areia grossa; MS = moderadamente selecionado; PS = pobremente selecionado; MPS = muito pobremente selecionado.

Na Tabela 6.1 observa-se que independente da estação do ano o ponto 1 é predominantemente arenoso, porém existe uma heterogeneidade entre seus diâmetros, caracterizando no mesmo ponto areias com granulometria bem distribuída.

O selecionamento ou grau de seleção é uma medida de dispersão da amostra, ou seja, o desvio padrão (σ) da distribuição do tamanho (BRIGGS, 1977). O desvio padrão, no ponto de vista geológico, significa a capacidade dos grãos de uma amostra se distribuírem em torno do valor médio. Ou seja, um sedimento bem selecionado significa, um sedimento com pequena dispersão dos seus valores granulométricos.

Conforme os dados obtidos, o valor do grau de seleção das amostras do ponto 1 apresentou variação de 0,63 ϕ a 2,42 ϕ , onde no leito os sedimentos são moderadamente selecionados e na margem existe uma variação entre moderadamente selecionados, pobremente selecionados e muito pobremente selecionados.

Em relação à matéria orgânica (MO), a margem apresenta um índice mais elevado do que o leito, pois normalmente quanto mais finos os sedimentos maior o percentual de matéria orgânica encontrado. Nas amostras de inverno os índices de MO ainda são mais elevados.

Os resultados da Tabela 6.2, referente aos dados granulométricos do ponto 2, mostram que realmente existe uma disparidade entre os diâmetros encontrados variando de 0,42 a 3,49 ϕ , representados de areia muito fina a areia grossa.

Tabela 6.2 - Análise granulométrica - PONTO 2.

PARÂMETROS	AMOSTRAS							
	P2005MV	P2510MV	P2005LV	P2510LV	P2005MI	P2510MI	P2005LI	P2510LI
%Grânulos/Cascalho	0,10	0,50	9,14	16,27	1,17	0,92	0,00	0,33
%Areia	99,84	81,63	90,79	83,59	84,71	89,67	56,19	95,24
%Silte	0,06	4,63	0,07	0,14	12,75	6,66	25,90	3,54
%Argila	0,00	13,24	0,00	0,00	1,37	2,76	17,91	0,89
Shepard (1954)	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia
Diâm. Médio (ϕ)	1,12-AM	2,80-AF	0,42-AG	0,44-AG	2,49-AF	2,03-AF	3,49-AMF	1,81-AM
Grau de seleção (ϕ)	0,76-MS	2,05-MPS	1,05-PS	1,28-PS	1,58-PS	1,70-PS	2,5-MPS	1,14-PS
% Matéria Org.	0,63	0,60	1,17	2,00	4,43	2,17	5,03	4,57

ϕ (phi) – escala logarítmica negativa de base 2; Diâm.= diâmetro; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; AM = areia média; AG = areia grossa; MS = moderadamente selecionado; PS= pobremente selecionado; MPS= muito pobremente selecionado.

O grau de seleção encontrado no ponto 2 alterna entre moderadamente selecionado, pobremente selecionado e muito pobremente selecionado. Em relação à

MO encontrada no ponto 2, observou-se que na estação chuvosa o percentual encontrado é maior do que nos períodos secos.

Os valores granulométricos referentes ao ponto 3 (Tabela 6.3) apresentam predominância de areia em sua composição, sendo assim são classificadas como amostras arenosas. Porém, de acordo com os diâmetros das partículas, as amostras da camada mais superficial da margem do ponto 3 está classificada em areia fina e areia muito fina, já no leito os sedimentos se classificam em areia grossa independente da profundidade e da estação do ano.

Tabela 6.3 - Análise granulométrica - PONTO 3.

PARÂMETROS	AMOSTRAS							
	P3005MV	P3510MV	P3005LV	P3510LV	P3005MI	P3510MI	P3005LI	P3510LI
%Grânulos/Cascalho	19,98	7,67	7,48	6,95	1,88	3,86	5,25	3,72
%Areia	58,21	92,05	84,36	92,99	72,53	74,66	93,47	89,50
%Silte	5,08	0,09	1,64	0,06	13,56	17,18	1,02	5,43
%Argila	16,73	0,00	6,52	0,00	12,03	4,29	0,25	1,35
Shepard (1954)	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia	Areia
Diâm. Médio (ϕ)	2,54-AF	0,86-AG	0,40-AG	0,78-AG	3,41-AMF	2,05-AF	0,82-AG	0,75-AG
Grau de seleção (ϕ)	3,81-MPS	1,20-PS	1,93-PS	1,10-PS	2,91-MPS	2,70-MPS	1,07-PS	1,45-PS
% Matéria Org.	1,30	2,13	1,47	1,00	3,27	0,73	0,70	0,50

ϕ (phi) – escala logarítmica negativa de base 2; Diâm.= diâmetro; AMF = areia muito fina; AF = areia fina; AG = areia grossa; PS = pobremente selecionado; MPS = muito pobremente selecionado.

Em relação ao grau de seleção, o leito do ponto 3 foi predominantemente classificado como pobremente selecionado, já a margem na camada mais superficial no verão foi classificada como muito pobremente selecionada e as outras amostras da margem foram classificadas como muito pobremente selecionados. O teor de matéria orgânica variou entre 0,50 e 3,27%.

Sedimentos mais homogêneos podem ser observados nos resultados texturais dos três pontos analisados. Onde, em geral, as análises revelaram que os sedimentos estudados não apresentam variação acentuada nas frações de areia, silte e argila, enquadrando-se na classe textural arenosa de acordo com a classificação de Shepard (1954). Ou seja, existe um percentual maior que 75% de areia na maioria das amostras dos três pontos analisados, tanto na margem saturada como no leito, independente da profundidade e da estação do ano. Porém, observou-se que no inverno os percentuais de finos e de matéria orgânica são maiores do que no verão na maioria das amostras dos

sedimentos hiporreicos. A maior ocorrência de chuva pode ser uma explicação para o enriquecimento de sedimentos finos e MO na zona hiporreica, pois as chuvas causam erosão e os sedimentos superficiais próximos ao rio são carregados para suas águas e descem rio adentro passando pelos três pontos de pesquisa.

De acordo com o diâmetro médio dos sedimentos a classe granulométrica de areia grossa predominou entre os pontos analisados variando entre 0,40 ϕ no ponto 3 e 3,49 ϕ no ponto 2.

Com relação ao grau de seleção das amostras do material analisado, apresentaram-se agrupados em três tipos: moderadamente selecionados, pobremente selecionados e muito pobremente selecionados, onde ocorreu uma maior quantidade de amostras classificadas em pobremente selecionadas. Esse resultado é esperado para um ambiente fluvial submetido a uma grande variação sazonal nos fluxos de corrente e volume de água.

Segundo Tyson (1995), os valores de matéria orgânica abaixo de 2% são considerados baixos, nesse contexto, grande parte das amostras analisadas tem um baixo teor de MO no verão, porém em grande parte das amostras de inverno esses valores aumentam.

Os resultados das amostras analisadas, mostraram que não existe uma variação granulométrica tão acentuada dos solos nos sedimentos arenosos que representam a área de estudo do rio Beberibe. Em condições naturais, a classe textural influencia na variação dos resultados das taxas de infiltração.

6.1.1.2 - *Taxa de infiltração*

Os resultados dos testes de infiltração são de fundamental importância para a compreensão do fluxo vertical do rio na zona hiporreica, onde a partir desses resultados foi feita a avaliação da capacidade de transporte de volumes hídricos entre o rio e o aquífero.

O comportamento da passagem da água do rio Beberibe pelos sedimentos hiporreicos foi analisado com base nos pontos 2 e 3, tanto na margem saturada como no leito, onde o tempo de infiltração da água foi estabelecido em 20 minutos para cada ensaio. Salientando que em cada ponto foram realizadas duas repetições e que o ponto 1 não fez parte dos testes de infiltração devido a dificuldade de acesso e falta de segurança.

Os valores dos ensaios de infiltração do ponto 2 estão na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Ensaios de infiltração realizados no leito e na margem saturada do rio Beberibe no tempo de 1200 s e área de $5,03 \times 10^3 \text{ mm}^2$ - PONTO 2.

DATA	MARGEM			LEITO		
	Massa Infiltrada (g)	Volume (cm ³)	Taxa de infiltração (mm/s)	Massa Infiltrada (g)	Volume (cm ³)	Taxa de infiltração (mm/s)
11/02/2014	66,5	66,7	0,011	93,5	93,8	0,016
27/02/2014	107,5	107,8	0,018	156	156,5	0,026
12/03/2014	36,5	36,6	0,006	74,0	74,2	0,012
26/03/2014	55,0	55,2	0,009	74,5	74,7	0,012
10/04/2014	127,0	127,4	0,021	173,5	174,0	0,029
24/04/2014	96,5	96,8	0,016	115,0	115,3	0,019
08/05/2014	62,0	62,2	0,010	105,0	105,3	0,017
22/05/2014	90,5	90,8	0,015	121,5	121,9	0,020
05/06/2014	81,0	81,2	0,013	94,0	94,3	0,016
18/06/2014	33,5	33,6	0,006	27,0	27,1	0,004
10/07/2014	76,0	76,2	0,013	103,5	103,8	0,017
31/07/2014	83,5	83,8	0,014	97,5	97,8	0,016
14/08/2014	71,0	71,2	0,012	84,0	84,3	0,014
28/08/2014	61,0	61,2	0,010	79,5	79,7	0,013
18/09/2014	41,0	41,1	0,007	71,0	71,2	0,012
30/09/2014	122,5	122,9	0,020	141,5	141,9	0,024
09/10/2014	87,0	87,3	0,014	96,0	96,3	0,016
23/10/2014	118,5	118,9	0,020	127,0	127,4	0,021
07/11/2014	97,5	97,8	0,016	105,5	105,8	0,018
(\bar{X})	79,6	79,9	0,013	102,0	102,4	0,017
DP	28,0	28,1	0,005	33,3	33,4	0,006

(\bar{X}) = média; DP = desvio padrão

Observa-se na Tabela 6.4 que existe uma pequena variação nas taxas de infiltração, principalmente quando comparamos as taxas de infiltração da margem e do leito. Durante o período de ensaios nota-se que a maior média registrada da taxa de infiltração na margem saturada foi de 0,021 mm/s que ocorreu no dia 10 de abril, onde nesse mesmo dia também ocorreu a maior média da taxa de infiltração no leito que foi de 0,029 mm/s. Além disso, o comportamento das taxas de infiltração dos dois pontos também foi sempre similar, onde os dias com maiores valores no leito também corresponde aos dias com maiores valores na margem saturada.

No dia 18 de junho, período que caracteriza o inverno na área de estudo, ocorreram as menores taxas de infiltração na margem e no leito do ponto 2, onde seus valores foram respectivamente 0,006 mm/s e 0,004 mm/s.

O valor médio da taxa de infiltração no leito foi de 0,017 mm/s já na margem foi de 0,013 mm/s, dessa forma é possível afirmar que o leito do ponto 2 tem uma maior contribuição na interação rio-aquífero do que a margem.

Em relação a variação do volume de água infiltrado, no tempo de 1200 s, na margem saturada ocorreu uma diferença de 93,8 cm³ já no leito a diferença foi de 146,9 cm³, onde fica claro que no leito a variação do volume infiltrado foi mais elevado do que na margem.

Considerando que o tempo de infiltração de água na zona hiporreica do rio Beberibe foi o mesmo nos ensaios do leito e da margem, é possível afirmar que no leito do ponto 2 ocorre uma infiltração suavemente maior do que na margem. Pois, as médias das taxas de infiltração e a variação do volume infiltrado comprovam que no período de realização dos ensaios de infiltração houve maior incidência de fluxo vertical de água na camada hiporreica no leito do ponto 2.

Os valores encontrados referentes ao desvio padrão da taxa de infiltração na margem e no leito mostram que ocorreu uma oscilação muito discreta em relação aos dois locais de ensaios, onde no leito o DP = 0,006 e na margem o DP = 0,005.

Na Tabela 6.5 é possível observar os dados referentes às taxas de infiltração do leito e da margem do ponto 3. Onde no dia 10 de abril foram registradas as maiores taxas de infiltração tanto no leito como na margem saturada do rio Beberibe, sendo os valores respectivamente 0,021 mm/s e 0,017 mm/s.

As menores taxas de infiltração da margem e do leito do ponto 3, não foram registradas no mesmo dia, onde no dia 18 de junho ocorreu a menor taxa de infiltração na margem que foi de 0,004 mm/s e no dia 12 de março ocorreu a menor taxa de infiltração no leito do rio Beberibe com o valor de 0,003 mm/s.

A maior variação de volume encontrada na margem saturada do ponto 3, no tempo de 1200 s, foi de 85,6 cm³ e no leito foi de 108,8 cm³, onde a partir desses dados é possível concluir que no leito ocorreu uma maior variação de volume infiltrado do que na margem.

Assim como no ponto 2, no ponto 3 também observa-se que no leito ocorre uma maior contribuição rio-aquífero, onde as médias das taxas de infiltração no leito é de

0,014 mm/s e na margem é de 0,010 mm/s. O desvio padrão também apresenta uma variação bem suave em relação ao leito e a margem.

Tabela 6.5 - Ensaio de infiltração realizados no leito e na margem do rio Beberibe no tempo de 1200 s e área de $5,03 \times 10^3 \text{ mm}^2$ - PONTO 3.

DATA	MARGEM			LEITO		
	Massa Infiltrada (g)	Volume (cm ³)	Taxa de infiltração (mm/s)	Massa Infiltrada (g)	Volume (cm ³)	Taxa de infiltração (mm/s)
11/02/2014	55,5	55,7	0,009	63,5	63,7	0,010
27/02/2014	89,5	89,8	0,014	107,5	107,8	0,017
12/03/2014	42,5	42,6	0,007	19,5	19,6	0,003
26/03/2014	44,0	44,1	0,007	66,5	66,7	0,011
10/04/2014	103,5	103,8	0,017	128,0	128,4	0,021
24/04/2014	47,5	47,6	0,007	101,0	101,3	0,016
08/05/2014	51,5	51,7	0,008	91,5	91,8	0,015
22/05/2014	76,0	76,2	0,012	114,5	114,8	0,019
05/06/2014	82,5	82,7	0,013	86,5	86,8	0,014
18/06/2014	29,0	29,1	0,004	25,0	25,1	0,004
10/07/2014	54,0	54,2	0,008	91,0	91,3	0,015
31/07/2014	64,5	64,7	0,010	78,0	78,2	0,012
14/08/2014	58,5	58,7	0,009	81,0	81,2	0,013
28/08/2014	51,5	21,7	0,008	66,0	66,2	0,010
18/09/2014	36,5	36,6	0,006	59,0	59,2	0,009
30/09/2014	99,0	99,3	0,016	121,0	121,4	0,020
09/10/2014	73,0	73,2	0,012	85,0	85,3	0,014
23/10/2014	107,0	107,3	0,018	114,5	114,8	0,019
07/11/2014	95,5	97,8	0,016	113,0	113,3	0,019
(\bar{X})	66,4	65,1	0,011	84,8	85,1	0,014
DP	24,0	24,1	0,004	35,0	30,2	0,005

(\bar{X}) = média; DP = desvio padrão

Ainda é possível observar que ao comparar as taxas de infiltração dos dois pontos em questão, nota-se que o ponto 3 apresenta taxas de infiltração levemente mais baixas do que as taxas de infiltração do ponto 2. Lembrando que o tempo de infiltração no rio Beberibe foi o mesmo para os dois pontos.

Entre tantas variáveis que podem influenciar o fluxo de água pela camada hiporreica, possivelmente a distribuição granulométrica das partículas do ponto 3 pode ser apontada como uma das causas da diminuição do fluxo hídrico na interface do local.

É provável que no ponto 3 ocorra uma maior dificuldade na passagem de água do rio Beberibe do que no ponto 2, pois de acordo com os resultados granulométricos já apresentados, existe uma maior quantidade de material lamoso (silte + argila) no ponto 3. Esse fato favorece o processo de colmatção, ou seja, afeta diretamente a capacidade drenante do meio poroso por onde o fluxo se dá, sendo esse mais um motivo para explicar o fato das taxas de infiltração serem inferiores no ponto 3.

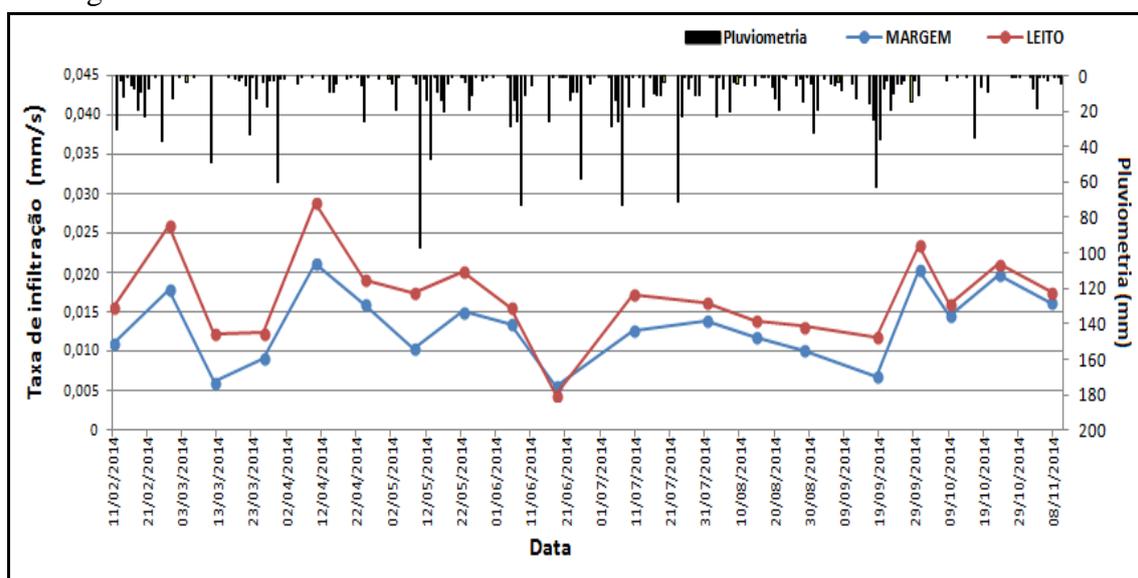
A obstrução causada por partículas muito finas tem grande importância porque pode ser decisivo na variação da condutividade hidráulica (ROSENBERRY & PITLICK, 2009; VELICKOVIC, 2005).

Durante os ensaios de infiltração, foi possível observar que nos períodos chuvosos, ou dias após a ocorrência de chuva, a maioria das taxas de infiltração se apresentavam menores que nos períodos de pouca ou nenhuma chuva. Talvez por existir um maior transporte de sedimentos finos durante períodos chuvosos.

Além da distribuição granulométrica, a ocorrência de precipitação durante o período de realização dos testes também pode ser considerado um fator de grande influência na quantidade de água infiltrada no leito do rio.

Para facilitar o entendimento e a análise do comportamento das médias das taxas de infiltração da água com o período chuvoso, as Figuras 6.1 e 6.2 ilustram graficamente os valores referentes às taxas de infiltração e a precipitação diária dos pontos 2 e 3, respectivamente, durante a realização dos testes de infiltração.

Figura 6.1 - Precipitação diária e médias das taxas de infiltração no ponto 2 localizado ao longo do rio Beberibe.

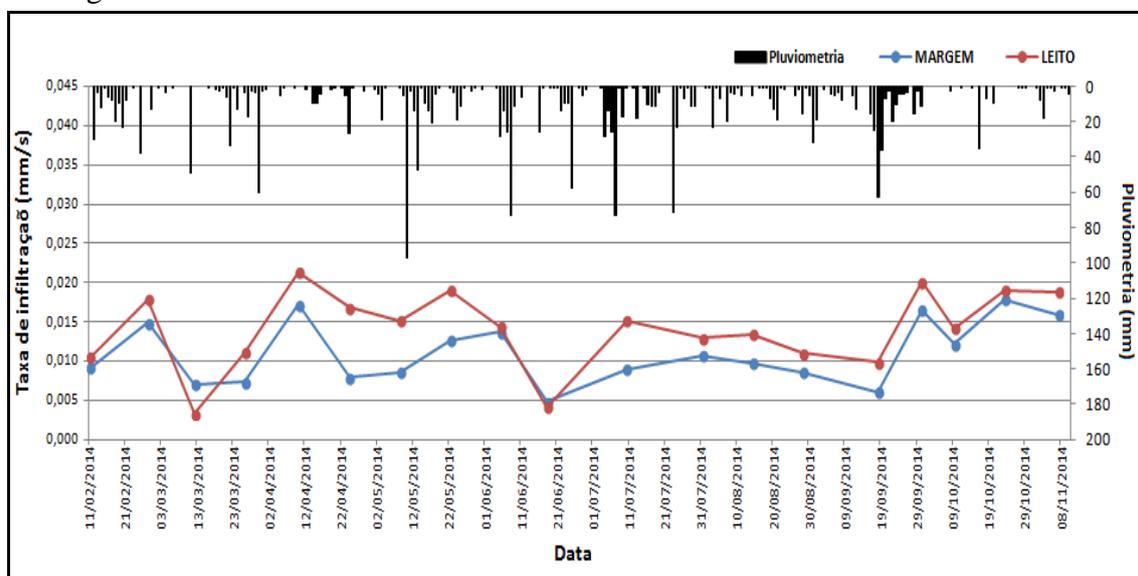


Através do gráfico acima, observa-se uma certa variação na quantidade de água infiltrada no rio Beberibe. No intervalo entre o dia 11 de junho e o dia 01 de julho, nota-se uma diminuição da contribuição superficial para o aquífero, provavelmente em consequência do período de precipitação intensa que ocorreu antes dos dias dos testes alterando a saturação do solo. Após esse período a quantidade de chuva diminuiu e aos poucos a taxa de infiltração aumentou, porém as chuvas voltaram e o volume infiltrado voltou a diminuir.

De maneira geral, através das chuvas a diferença da carga hidráulica entre o rio e o aquífero provavelmente foi modificada, promovendo alterações na configuração do fluxo de água. O que é preponderante, mesmo considerando que com o evento de chuva gera-se o transporte de materiais que parte deposita-se no leito alterando a composição da zona hiporreica, causando o efeito da colmatação.

Os dados da Figura 6.2 confirmam que em épocas de maiores precipitações a interação entre águas superficiais e subterrâneas é alterada, pois dependendo da intensidade da chuva a elevação do lençol freático reduz o gradiente hidráulico entre o rio e o aquífero, como já foi explicado anteriormente.

Figura 6.2 - Precipitação diária e médias das taxas de infiltração no ponto 3 localizado ao longo do rio Beberibe.



Durante o período de realização dos testes de infiltração, foi observado que realmente existe uma grande influência da precipitação na variação das taxas de infiltração.

do rio Beberibe. Onde, nos dias de chuva ocorre o transporte de água através da infiltração, porém, alguns dias após a chuva, a quantidade de água infiltrada é menor.

Na verdade, durante a realização dos ensaios de infiltração de água no rio Beberibe, a relação entre o corpo de água superficial e o subterrâneo, na maioria das vezes tinha uma condição influente que é caracterizada pelas águas superficiais alimentarem o fluxo subterrâneo.

Diante dos resultados das taxas de infiltração é possível compreender que o trecho do rio Beberibe na área experimental contribui para a recarga do aquífero freático, ainda que seja numa quantidade pequena em relação a vazão do rio. Onde no ponto 2 a vazão é de $0,027 \text{ m}^3/\text{s}$ e no ponto 3 é de $0,012 \text{ m}^3/\text{s}$.

Através do infiltrômetro de cilindro é possível identificar zonas de maior recarga de aquíferos, possibilitando o uso sustentável dos recursos hídricos através da preservação dessas áreas. A influência da diferença de carga hidráulica entre o aquífero e a água superficial ficou evidenciada com os eventos de chuva, sendo mais relevante na observação de eventos pontuais do que a colmatção que é um processo de longo prazo.

6.1.1.3 - *Leitura da diferença da carga hidráulica*

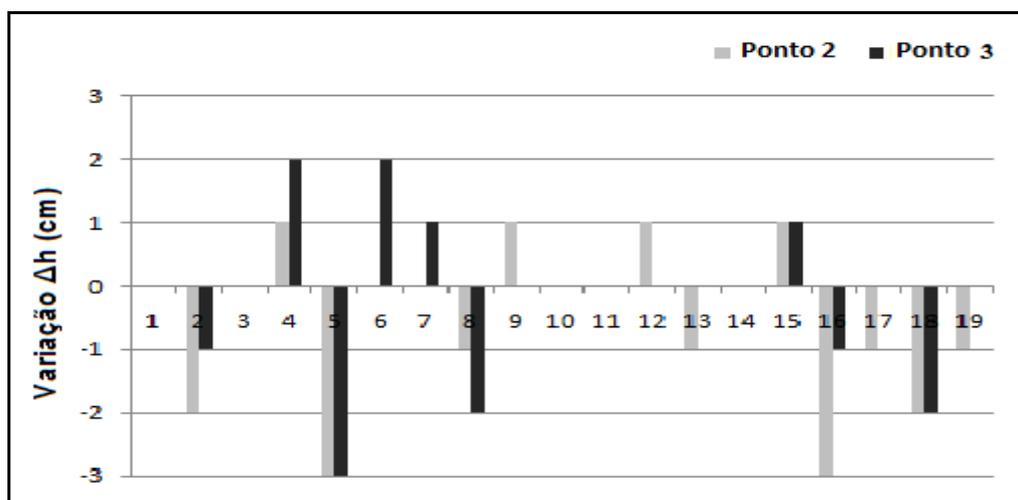
A leitura da carga hidráulica através do piezômetro diferencial foi realizada com o intuito de facilitar a compreensão do fluxo vertical hiporreico.

A determinação da leitura foi realizada a partir da diferença entre o nível da lâmina d'água do rio e o nível da água no aparelho, onde foi utilizado um método alternativo através do infiltrômetro diferencial.

É importante salientar que a orientação do fluxo vertical do rio nem sempre é a mesma, pois o mesmo ponto pode apresentar variação no seu comportamento de um dia para o outro.

Na Figura 6.3 é possível observar o resumo dos resultados da variação do comportamento do fluxo vertical nos dois pontos de estudo no trecho do rio Beberibe, onde zero indica um ponto com fluxo nulo, valores positivos indicam pontos com fluxo ascendente e valores negativos significam que o ponto tem fluxo descendente.

Figura 6.3 - Leituras quinzenais da carga hidráulica no leito do rio Beberibe em relação ao nível do rio no período entre 11/02/2014 e 07/11/2014.



*quando não aparece a barra significa que o fluxo é nulo.

Na Tabela 6.6 observa-se os resultados da variação do comportamento do fluxo vertical nos dois pontos pré-definidos ao longo do leito do rio Beberibe.

Tabela 6.6 - Diferença de carga hidráulica no leito do rio Beberibe, em cm, em relação ao nível d'água no rio.

DATA	PONTO 2	PONTO 3
11/02/2014	0	0
27/02/2014	-2	-3
12/03/2014	0	0
26/03/2014	1	2
10/04/2014	-3	-3
24/04/2014	0	2
08/05/2014	0	1
22/05/2014	-1	-2
05/06/2014	1	0
18/06/2014	0	0
10/07/2014	0	0
31/07/2014	1	0
14/08/2014	-1	0
28/08/2014	0	0
18/09/2014	1	1
30/09/2014	-3	-1
09/10/2014	-1	0
23/10/2014	-2	-1
07/11/2014	-1	0

Na Tabela 6.6 é possível observar que os dois pontos analisados apresentam uma variação de comportamento em seu fluxo, porém sempre no mesmo sentido. Essa mudança ocorre tanto temporalmente quanto entre um ponto e outro.

Em relação às oscilações que ocorreram na leitura do fluxo vertical entre os pontos analisados, observa-se que o ponto 3 apresenta maior ocorrência de fluxo nulo do que o ponto 2. Este fato comprova que existe uma interação entre a água superficial e a água subterrânea maior no ponto 2 do que no ponto 3 que fica mais a montante.

A diferença da carga hidráulica entre o aquífero e o rio Beberibe apresentaram três comportamentos distintos. Possivelmente, as variações que foram encontradas nas leituras da carga hidráulica ocorreram em consequência de eventos chuvosos. Sabe-se que o comportamento do fluxo vertical hiporreico sofre alterações em decorrência de intensas precipitações, que recarregam o aquífero.

Quando a chuva é intensa pode provocar uma saturação no solo, nesse momento é muito provável que o aquífero abasteça o rio num movimento ascendente. Em outros casos, não vai existir fluxo em nenhum sentido, caracterizando um fluxo nulo.

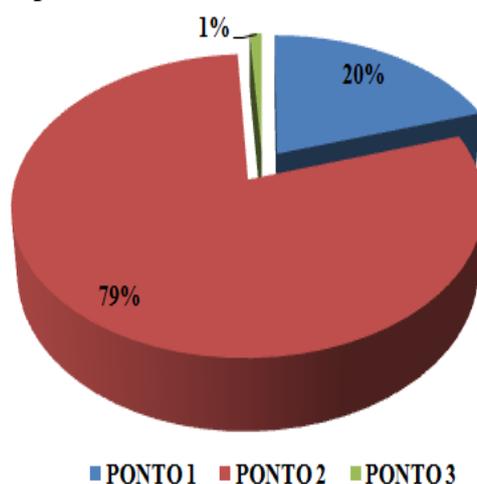
Através dos resultados obtidos com a leitura do fluxo vertical, observou-se que em períodos chuvosos a maior parte do fluxo na zona hiporreica apresentou-se ascendente ou simplesmente não ocorria fluxo. Já em períodos de seca, onde existia fluxo, observou-se uma maior contribuição de água no sentido rio aquífero. Esse fato pode ser explicado pela maior recarga do lençol freático em períodos chuvosos.

6.1.2 - Caracterização biológica

Para fazer a caracterização biológica da zona hiporreica foi feita uma investigação da estrutura da comunidade da meiofauna, através da avaliação do número total de indivíduos (abundância total) e da identificação dos *taxa*, considerando que a classificação dos indivíduos ficou em níveis taxonômicos superiores. A diversidade taxonômica e o número total de indivíduos podem ser considerados atributos da estrutura de uma comunidade (RICKLEFS & MILLER, 1999).

Conforme a metodologia já descrita, na presente pesquisa, foram analisados 3 pontos do rio Beberibe, na margem e no leito; em duas profundidades diferentes; em duas estações do ano e foram usadas réplicas e tréplicas. A distribuição do número total de indivíduos nos pontos analisados pode ser observados na Figura 6.4.

Figura 6.4 - Percentual de abundância da meiofauna dos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe distribuídos nos pontos de estudo.



Durante as análises dos três pontos de estudo, foram identificados um total de 7804 indivíduos, distribuídos em oito *taxa*, sendo nemátoda, anelídeo e rotífera os grupos mais representativos, responsáveis por mais de 96% de dominância.

De acordo com o a Figura 6.4 é possível observar que o ponto 3 apresenta um menor percentual de indivíduos, já o ponto 2 representa o local com maior abundância. A densidade total de organismos variou entre 457,50 indivíduos/10 cm² no ponto 1, 1807,00 indivíduos/10 cm² no ponto 2 e de 30,60 indivíduos/10 cm² no ponto 3. Cabe ressaltar que essas densidades são referentes ao total de indivíduos encontrados nos três pontos de estudo, sem divisão de local, profundidade e estação do ano.

Talvez o fato do ponto 2 apresentar uma vazão relativamente baixa (0,27m³/s) refletindo um menor hidrodinamismo, seja uma das respostas para este ponto apresentar uma maior densidade de organismos.

Além disso, comparando os três pontos de estudo, o ponto 2 apresenta uma maior quantidade de vegetação no ambiente hiporreico, aumentando a disponibilidade de alimento e estabilidade a sedimentar.

Através da Figura 6.5 observa-se que na meiofauna dos pontos analisados do rio Beberibe o grupo taxonômico dos rotíferas foi amplamente dominante, representando 82% do total de indivíduos contados. Destacando que somente foram contados os indivíduos que apresentavam pelo menos a cabeça. Em seguida os nematódeos (10%), os anelídeos (4%) e outros (4%), levando em consideração que o grupo de outros foi

formado pelo percentual de indivíduos representados por: ácaros, colembolas, nauplius, copépodos e larvas de insetos.

Figura 6.5 - Percentual de abundância dos grupos mais representativos da meiofauna dos sedimentos hiporreicos para o conjunto de pontos analisados do rio Beberibe.

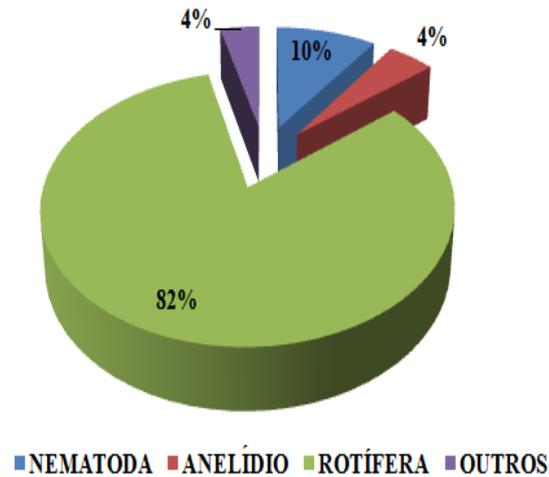


Figura 6.6 - Amostra devidamente corada da meiofauna hiporreica dos sedimentos do rio Beberibe, com o aumento de 4x com auxílio da lupa e destaque aos grupos mais representativos com aumento de 40x com auxílio do microscópio estereoscópico.



ANELÍDIO



ROTÍFERA

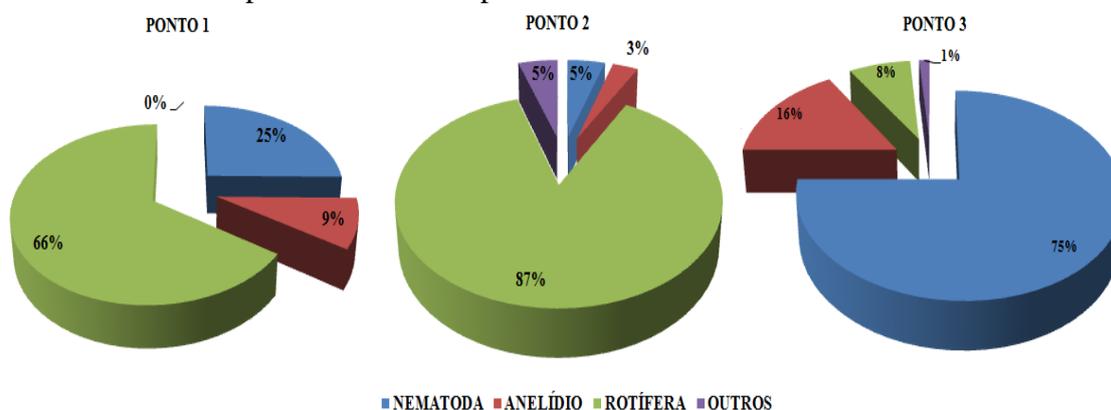


NEMÁTODA

Nota-se na Figura 6.7 que nos pontos 1 e 2 o grupo taxonômico mais abundante foi o rotífera representando 66% no ponto 1 e 87% no ponto 2. Já no ponto 3 o grupo mais abundante foi o nematódea que representou 75% dos indivíduos do ponto 3.

O ponto 2 apresentou maior riqueza, onde dos oito grupos encontrados nos três pontos, sete foram encontrados no ponto 2. No ponto 1 foram encontradas apenas 3 grupos e no ponto 3 foram localizados 5 grupos distintos.

Figura 6.7 - Percentual de abundância dos grupos mais representativos da meiofauna dos sedimentos hiporreicos nos três pontos analisados do rio Beberibe.



Nas Tabelas 6.8, 6.9 e 6.9 é possível observar os detalhes dos valores médios de abundância encontrados em cada ponto (1, 2 e 3), em cada local (margem (M) e leito (L)), em cada profundidade (0-5 cm (005) e 5-10 cm (510)) e em estações do ano diferentes (inverno (I) e verão (V)).

Tabela 6.7 - Abundância média (indivíduos) e desvio padrão (DP) dos grandes grupos da meiofauna encontrados no ponto 1 do rio Beberibe.

GRUPOS	AMOSTRAS							
	P1005MV	P1510MV	P1005LV	P1510LV	P1005MI	P1510MI	P1005LI	P1510LI
Nematoda	7	1,7	29	6	17,3	45	3,7	20,3
DP +/-	2	0,6	3,6	2,6	4	19,7	2,9	8,7
Anelídeo	3,3	6	32,3	5,7	0	0	0	0
DP +/-	0,6	6,2	8	6,4	0	0	0	0
Rotífera	58	3,5	153,3	4	3,7	114	5	2,7
DP +/-	32,2	2,1	7,8	2,3	2,5	53	1	1,2
Outros	0	0	0	0	0	0	0	0
DP +/-	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	68,3	11,2	214,7	15,7	21	159,7	8,7	23

A partir da Tabela 6.7 foi possível observar que o ponto 1 não obedeceu nenhum padrão específico na variação de indivíduos quando relacionados com as variáveis estudadas. Em relação a profundidade nos primeiros centímetros (0 - 5) foram contados 312 indivíduos e nas amostras mais profundas (5-10) contabilizou-se 209,6 indivíduos. A abundância média no ponto 1 do rio Beberibe em relação a margem e ao leito foram encontrados valores bem aproximados (260,2 e 262,1 indivíduos respectivamente). No verão foram encontrados mais indivíduos do que no inverno, com uma variação de 309,9 indivíduos para 212,4 indivíduos, respectivamente.

Os dados relacionados ao ponto 2 podem ser observados na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 - Abundância média (indivíduos) e desvio padrão (DP) dos grandes grupos da meiofauna encontrados no ponto 2 do rio Beberibe.

GRUPOS	AMOSTRAS							
	P2005MV	P2510MV	P2005LV	P2510LV	P2005MI	P2510MI	P2005LI	P2510LI
Nematoda	18,7	28,7	27	12,7	3	2,3	1,5	2,7
DP +/-	6,1	22,1	14,8	11	1,4	1,5	1	2,1
Anelídeo	19	5	39,7	8,7	0	0	1	0
DP +/-	17	2,8	8,7	11,5	0	0	0,6	0
Rotífera	0	0	1298,7	477	0	4,5	3	7,7
DP +/-	0	0	246,1	200,5	0	3	1	1,5
Outros	0	0	57,3	35	7	2	0	0
DP +/-	0	0	22,7	9,5	4	1,5	0	1,2
TOTAL	37,7	33,7	1422,7	533,3	10	8,8	5,5	12,3

Em relação ao ponto 2 as três variáveis analisadas foram representativas, pois a abundância dos indivíduos sofreram variação significativa. Em relação a profundidade foram encontrados 1475,9 indivíduos de 0 - 5 cm e 588,1 indivíduos de 5-10 cm, indicando que os organismos do ponto 2 estão mais concentrados na superfície dos sedimentos hiporreicos. Talvez a granulometria do leito do ponto 2 tenha alguma influência, pois como já foi comentado, os sedimentos do leito no ponto 2 variam entre areia e silte grosso. Em estuários geralmente com substrato composto por sedimentos silte-argilosos a meiofauna concentra-se nos primeiros centímetros (TIETJEN, 1969; BOUCHER, 1979; WARWICK, 1971; HEIP *et al.*, 1985; VANHOVE, 1993) estando, desta forma, submetida à ação da dinâmica das águas. Os parâmetros granulométricos contribuem fortemente para quali-quantificar a meiofauna, uma vez que a sua

composição potencializa maior ou menor quantidade de água retida, oxigênio, matéria orgânica e outros fatores indispensáveis a esses organismos (CASTRO, 2003).

Se observarmos os valores referentes a margem e ao leito também é possível distinguir variações importantes, sendo contabilizados 490,2 indivíduos e 1973,8 indivíduos respectivamente. Em relação as estações do ano estudadas, também ocorre uma grande disparidade entre a abundância de indivíduos, onde no verão foram contabilizados 2027,4 indivíduos e no inverno 36,6 indivíduos. A hidrodinâmica diferenciada entre o inverno e o verão pode ser uma explicação para a diferença entre o número de indivíduos, pois no inverno as correntezas movimentam os sedimentos hiporreicos e os organismos são levados na correnteza da água.

Na Tabela 6.9 podem ser observados os dados referentes ao ponto 3.

Tabela 6.9 - Abundância média (indivíduos) e desvio padrão (DP) dos grandes grupos da meiofauna encontrados no ponto 3 do rio Beberibe.

GRUPOS	AMOSTRAS							
	P3005MV	P3510MV	P3005LV	P3510LV	P3005MI	P3510MI	P3005LI	P3510LI
Nematoda	1	3	2	3,7	3,7	5,7	2	7
DP +/-	0,6	1	1	2,1	2,1	6,4	1,2	2,6
Anelídeo	2	1	0	1	0	1,7	0	0
DP +/-	1,5	0,6	0	0,6	0	1,2	0	0
Rotífera	0	0	0	0	0	2	0	2,3
DP +/-	0	0	0	0	0	1,5	0	0,6
Outros	0	0	0	0	0	0	0	0
DP +/-	0,6	0	0	0	0	0	0	0,6
TOTAL	3,0	4,0	2,0	4,7	3,7	9,3	2,0	9,3

O ponto 3 não mostra muita variação quando relacionados com as variáveis estudadas na presente pesquisa. Em relação a profundidade na parte mais superior foram encontrados 10,7 indivíduos e na parte mais profunda 27,3 indivíduos. O número de indivíduos contabilizados na margem e o leito quase não sofreu nenhuma variação, onde 20 indivíduos foram encontrados na margem e 18 no leito. O verão e o inverno pouco modificou a quantidade de indivíduos, sendo 13,7 indivíduos contabilizados no verão e 24,3 indivíduos no inverno.

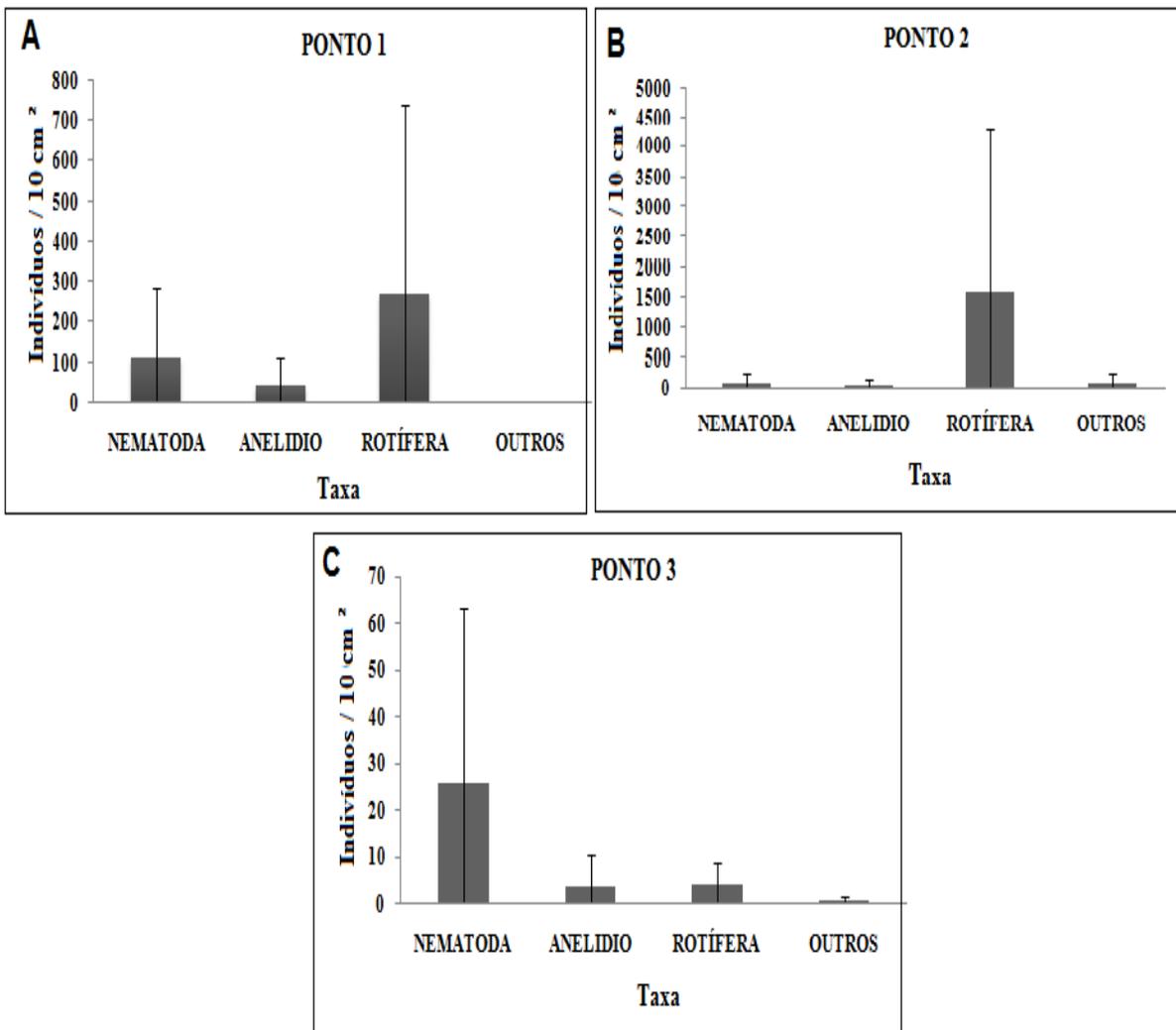
A densidade da composição dos grupos faunísticos da meiofauna variou entre os três pontos analisados (Figura 6.7). No ponto 1 a taxa que apresentou maior densidade foram os rotíferas que atingiu um valor médio de 271,50 indivíduos/10 cm², seguido dos nematódeas com 112,70 indivíduos/10 cm² e os anelídeos com 41,78 indivíduos/10 cm².

No ponto 2 os rotíferas alcançaram um valor médio de densidade de 1582 indivíduos/10 cm², os nematódeas 85,25 indivíduos/10 cm², os anelídeos 57,08 indivíduos/10 cm² e o grupo dos outros taxa foram representados por 87,33 indivíduos/10 cm².

O ponto 3 apresentou a menor densidade total entre os três pontos analisados, onde o taxa dominante foram os nematódeos com 25,79 indivíduos/10 cm², em seguida os anelídeos representados por 3,83 indivíduos/10 cm², os rotíferas com 4,1 indivíduos/10 cm² e os outros taxa apresentaram os valores mais baixos do ponto 3 que foram representados por 0,86 indivíduos/10 cm².

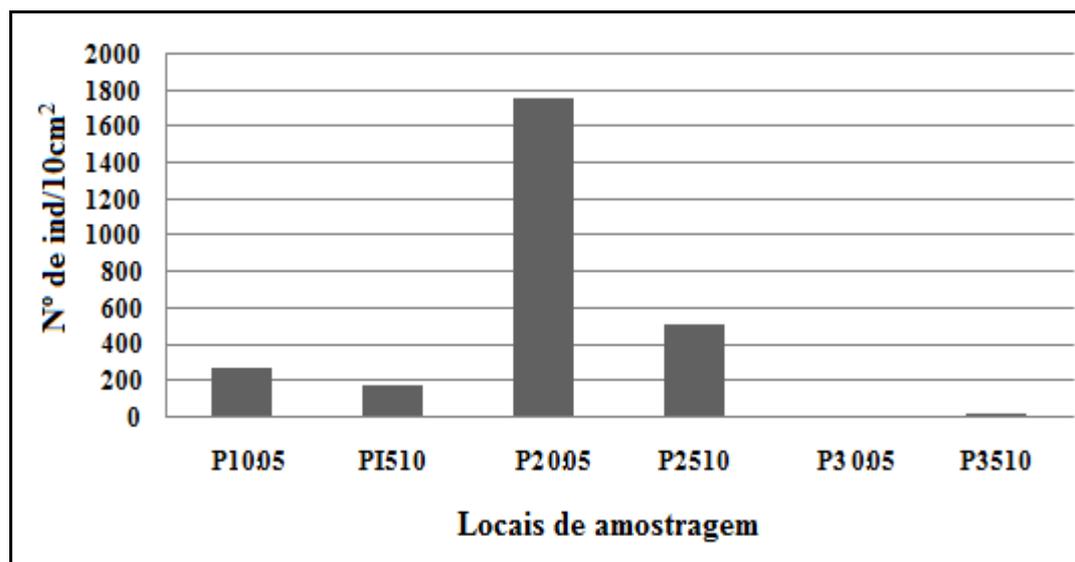
Figura 6.8 - Densidades médias da taxa da meiofauna presente nos sedimentos hiporreicos dos três pontos analisados. As barras representam a média ± intervalo de confiança de 95%.

A) ponto 1; B) ponto 2; C) ponto 3.



Quando comparamos as variáveis envolvidas nos três pontos de estudo, podemos observar que em relação a distribuição dos grupos taxonômicos por estratos, o ponto 1 e o ponto 2 apresentam maior densidade de indivíduos na camada mais superficial dos sedimentos hiporreicos (Figura 6.9).

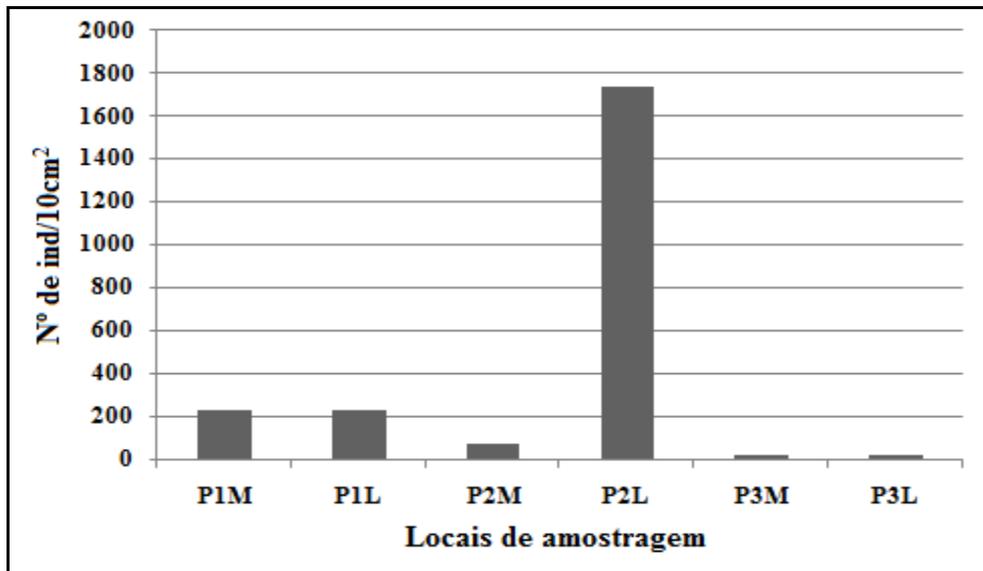
Figura 6.9 - Densidade média (indivíduos/10 cm²) em relação as profundidades analisadas dos três pontos de estudo do rio Beberibe.



Em análise geral, a distribuição vertical da meiofauna dos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe, seguiu o padrão já mencionado por diversos autores para outras localidades que afirmam diminuir a abundância de organismos com a profundidade (DE LA CRUZ e VARGAS, 1987; DALTO e ALBUQUERQUE, 2000). Segundo Coll & Bell (1979), Ansari & Parulekar (1993) e Smol *et al.* (1994) esta distribuição dos organismo no sedimento é determinada principalmente pela profundidade da camada de descontinuidade do potencial de óxido-redução, que é o limite entre a zona aeróbica e anaeróbica, servindo como uma barreira para os organismos e pela clorofila-a (recurso alimentar).

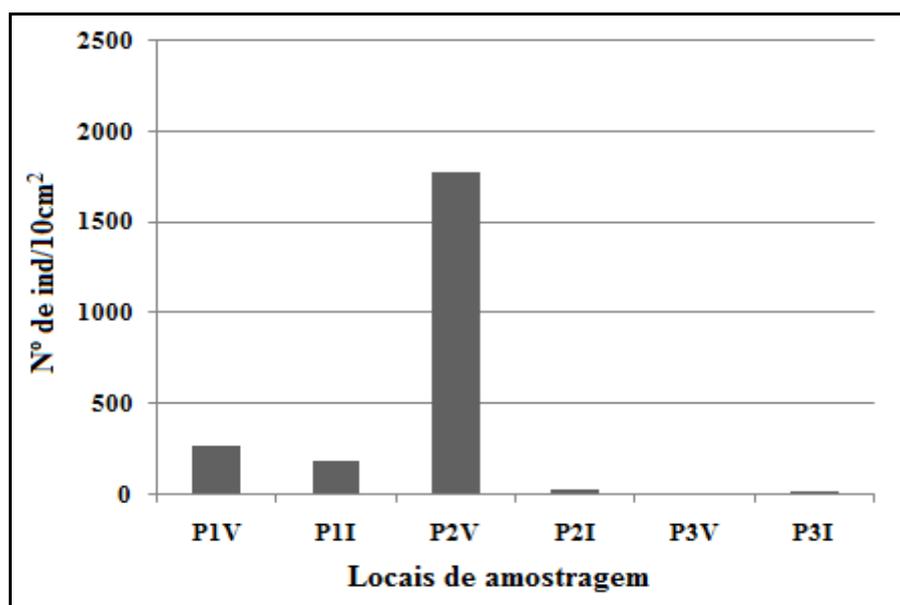
Na Figura 6.10 nota-se que no ponto 1 e no ponto 3 quase não existe variação na quantidade de indivíduos em relação ao local analisado. Já no ponto 2 ocorre uma grande variação na densidade encontrada, pois no leito foram contabilizados quase 1800 indivíduos/10 cm² e na margem não chegou a 80 indivíduos/10 cm².

Figura 6.10 - Densidade média (indivíduos/10 cm²) em relação aos locais analisados (leito e margem) dos três pontos de estudo do rio Beberibe.



Na Figura 6.11 é possível observar o comportamento da abundância da meiofauna dos pontos analisados do rio Beberibe em relação as estações do ano analisadas (verão e inverno).

Figura 6.11 - Densidade média (indivíduos/10 cm²) em relação as estações analisadas (verão e inverno) dos três pontos de estudo do rio Beberibe.



Na Figura 6.11 é possível observar que os pontos 1 e 2 apresentam maior densidade de indivíduos no verão do que no inverno. Já no ponto 3 foram contabilizados uma maior quantidade de indivíduos no inverno, mesmo considerando que no ponto 3 a abundância total da meiofauna é bem menor em relação aos outros pontos. Além disso, quando se compara a quantidade de indivíduos no verão e no inverno do ponto 3 observa-se que ocorre uma diferença insignificante.

De acordo com Sampaio (2012), é normal existir uma presença maior de organismos bentônicos no verão devido as condições favoráveis. A transparência da água pode ser um fator levado em consideração, pois no inverno a própria hidrodinâmica da água é alterada, onde é possível encontrar um maior movimento de correntezas dispersando alguns sedimentos e diminuindo a transparência da água. De acordo com Bergesch *et al.* (1995), a baixa profundidade da coluna de água em conjunto com uma alta transparência favorecem o aparecimento da clorofila-a. Ansari & Parulekar (1993) evidenciaram correlação positiva entre a distribuição da meiofauna com esse parâmetro.

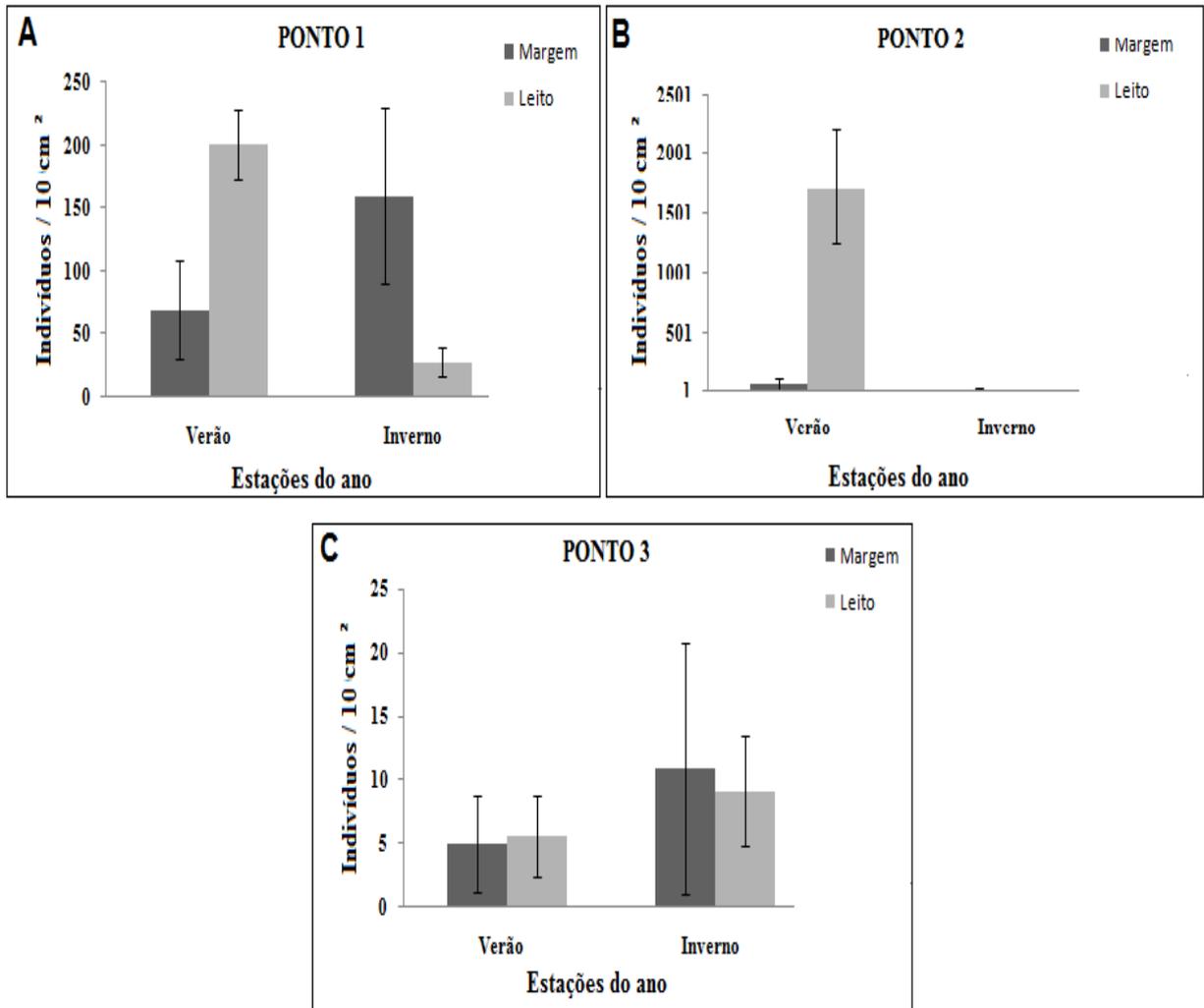
A perturbação física do sedimento é maior durante o inverno, quando a quantidade de água é maior e as correntezas também, gerando o revolvimento e redistribuição dos sedimentos. Distúrbios físicos no sedimento em função do hidrodinamismo podem causar a ressuspensão dos mesmos para a coluna d'água e conseqüentemente a remoção da meiofauna. A meiofauna presente nas camadas superficiais do sedimento facilmente passa para a coluna d'água, podendo até ser transportada para outros locais (PALMER, 1988).

Ainda levando em consideração a densidade dos grupos faunísticos, é possível observar que houve variações consideráveis entre os pontos e entre as variáveis: estações do ano e locais (Figura 6.12). Na estação seca o leito do ponto 1 apresentou maior densidade (200,94 indivíduos/10 cm²), já na estação chuvosa a maior densidade foi contabilizada na margem (159,46 indivíduos/10 cm²). O período seco do ponto 2 apresentou um comportamento semelhante ao ponto 1, onde no leito foi encontrada uma densidade maior do que na margem (1723,74 indivíduos/10 cm² e 57,89 indivíduos/10 cm² respectivamente). No período chuvoso não houve variação considerável na densidade da meiofauna do ponto 2, onde a margem apresentou 13,83 indivíduos/10 cm² e o leito 13,53 indivíduos/10 cm². A densidade da meiofauna não sofreu muita influência na estação chuvosa e na estação seca do ponto 3, onde no verão a margem e o

leito apresentaram densidades de 5,0 indivíduos/10 cm² e 5,6 indivíduos/10 cm² respectivamente. No inverno a margem apresentou uma densidade de 10,9 indivíduos/10 cm² e o leito 9,12 indivíduos/10 cm².

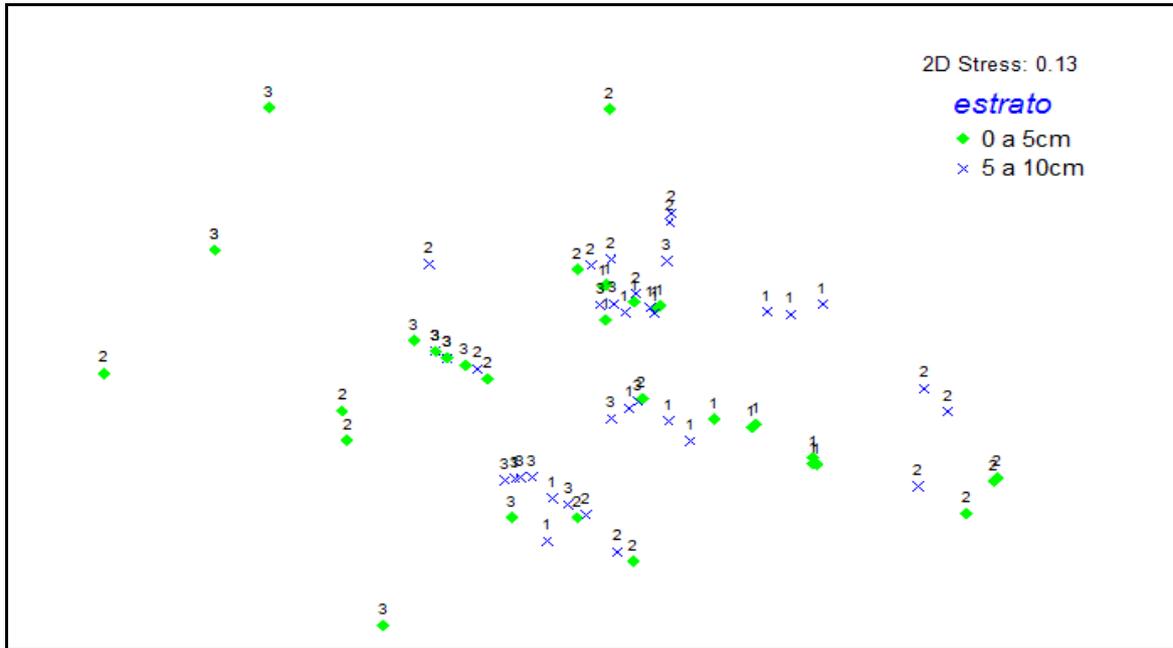
Figura 6.12 - Densidades médias da meiofauna presente nos sedimentos hiporreicos dos três pontos relacionadas com as estações do ano e os locais analisados. As barras representam a média ± intervalo de confiança de 95%.

A) ponto 1; B) ponto 2; C) ponto 3.



A estrutura da comunidade de meiofauna dos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe pode ser observada nas representações em MDS realizadas para comparar os pontos de coleta para cada variável separadamente. Os resultados da análise multivariada PERMANOVA, comprovaram que existe diferença significativa entre os pontos nas diferentes profundidades analisadas ($p = 0,001$) (Figura 6.13).

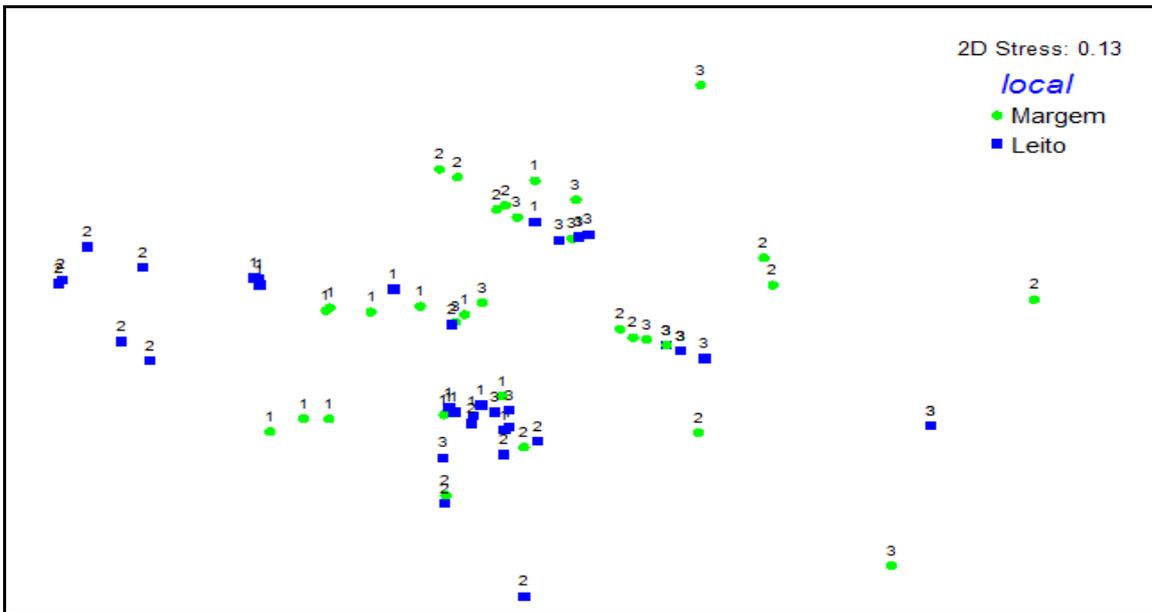
Figura 6.13 - Ordenação MDS da estrutura da comunidade da meiofauna para as profundidades analisadas nos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe.



É possível observar que os pontos que representam a profundidade de 5 - 10 cm estão mais concentrados do que os pontos que representam a camada mais superficial. Ou seja, a estrutura da comunidade é mais similar nos sedimentos hiporreicos mais profundos. Também é possível verificar que os pontos 1 e 3 apresentam maior similaridade em relação aos estratos do que o ponto 2.

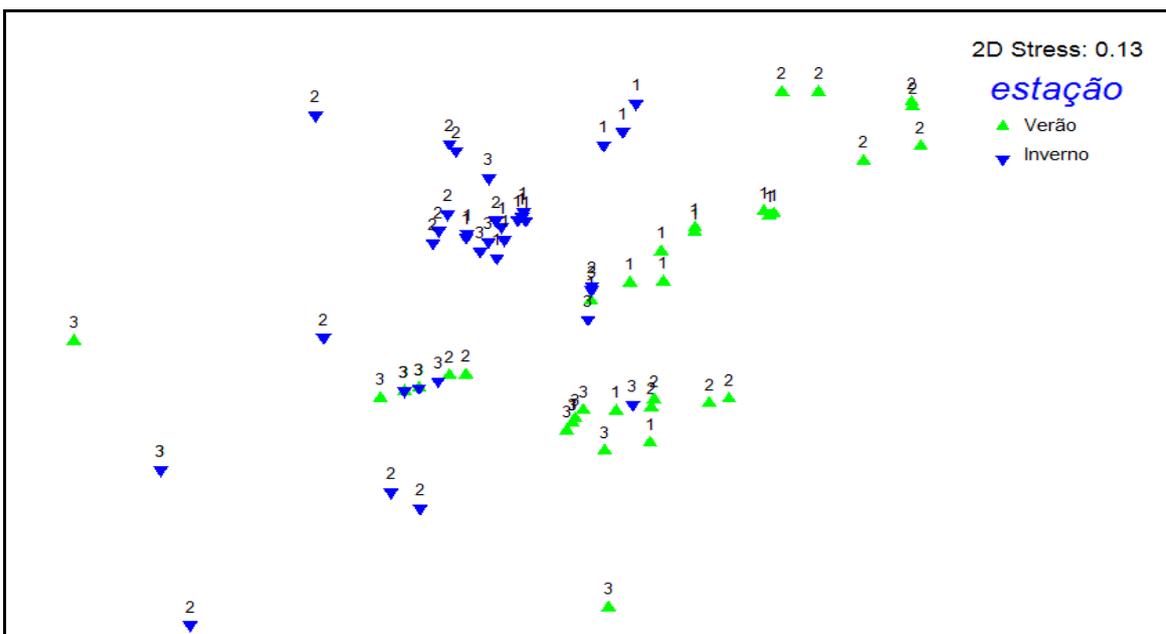
De acordo com o resultado da PERMANOVA foi comprovado que existe diferença significativa na estrutura da comunidade entre os pontos para cada local ($p = 0,001$). Esse resultado fica evidenciado no MDS da Figura 6.14, onde é possível observar que no ponto 2 existe uma grande dissimilaridade entre a margem e o leito. Uma tendência semelhante ocorre nos pontos 1 e 3, entretanto com menor intensidade.

Figura 6.14 - Ordenação MDS da estrutura da comunidade de meiofauna para os locais analisados (leito e margem) nos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe.



Em relação às estações analisadas o MDS (Figura 6.15) indica uma clara separação entre os pontos no inverno e no verão. Entretanto, os pontos 1 e 2 são mais similares entre si do que o ponto 3 para as duas estações. Os resultados da PERMANOVA confirmam esse resultado com $p = 0,001$.

Figura 6.15 - Ordenação MDS da estrutura da comunidade de meiofauna para as estações do ano analisadas (verão e inverno) nos sedimentos hiporreicos do rio Beberibe.



Nos resultados aqui apresentados, houve diferenças significativas nas densidades dos grupos mais representativos entre as variáveis analisadas e entre os pontos estudados. Entretanto, a estrutura da comunidade da meiofauna do ponto 2, apresentou maior sensibilidade para as variáveis investigadas. Talvez o fato do ponto 2 estar localizado num trecho médio entre os pontos analisados favoreça a diversidade de espécies apresentada no seu comportamento.

Também existe o fato do ponto 2 apresentar uma vazão relativamente baixa (0,27 m³/s), refletindo um menor hidrodinamismo no local. Além do fato desse mesmo ponto apresentar uma maior quantidade de planta aquáticas enraizadas no leito do rio do que os outros pontos, aumentando a disponibilidade de alimento e estabilidade sedimentar.

6.2 - FILTRAÇÃO EM MARGEM

6.2.1 - Monitoramento qualitativo

Para comprovar a eficiência da técnica de Filtração em Margem foram realizadas três campanhas de análises físico-químicas e bacteriológicas da água advinda do poço de produção comparada com a água do rio Beberibe.

6.2.2.1 - Análises bacteriológicas

Para avaliar a eficiência da Filtração em Margem, foram realizadas análises bacteriológicas para determinação de coliformes totais e termotolerantes.

Os resultados da análise das amostras do poço de produção 1 e dos pontos do rio Beberibe, coletadas em outubro, novembro e dezembro de 2014 para determinação de coliformes totais e concentrações de Coliformes totais e *Escherichia coli*, estão relacionados na Tabela 6.10.

Através da análise realizada, observa-se que as amostras do poço 1 atendem o padrão microbiológico estabelecido pela Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde, que determina que a água para o consumo humano deve apresentar ausência em 100 mL para *Escherichia coli* ou coliformes termotolerantes. Com esses resultados é possível destacar o potencial da técnica de Filtração em Margem como um minimizador dos micro-organismos existentes nos mananciais.

Tabela 6.10 - Concentrações de Coliformes totais e *Escherichia coli* no rio Beberibe e no poço de produção.

DATA	Coliformes totais (NMP/ 100 ml)				<i>Escherichia coli</i> (NMP/ 100 ml)			
	POÇO 1	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3	POÇO 1	PONTO 1	PONTO 2	PONTO 3
Out	ausência	>1600	>1600	>1160	ausência	>60	>1600	140
Nov	ausência	>1600	>1600	>1600	ausência	>1600	>90	280
Dez	ausência	>1600	>1600	>1160	ausência	>1600	>1600	140

Resultados positivos quanto à redução/eliminação de coliformes totais e *Escherichia coli* pela técnica de Filtração em Margem no rio Beberibe foram reproduzidos por Veras (2011), onde ocorreu uma redução de praticamente 100% dos coliformes totais e fecais das amostras do poço de produção analisado. Resultados semelhantes foram reportados por Freitas (2014), onde as concentrações de coliformes totais no rio Beberibe variaram de > 1.600 a ≥ 160.000 NMP/100 mL, já para *Escherichia coli* a variação foi de 280 a ≥ 160.000 NMP/100 mL e nas amostras dos dois poços analisados coliformes totais e *Escherichia coli* estiveram ausentes.

As amostras analisadas do rio Beberibe, apresentaram elevada presença de coliformes em suas águas, indicando existir uma contribuição de esgoto doméstico ao corpo receptor.

6.2.1.2 - Análises físico-químicas

A seguir serão apresentados os resultados das análises físico-químicas das amostras dos 3 pontos de estudo do rio Beberibe e do poço 1. As coletas foram realizadas em outubro, novembro e dezembro de 2014 e infelizmente, não foi possível coletar amostra dos poços 2, 3 e 4, pois os mesmos estavam desativados no período de realização das coletas.

Na Tabela 6.11 é possível observar os resultados referentes ao monitoramento qualitativo (físico-químico), além dos valores padrões estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde 2914/11.

Tabela 6.11 - Parâmetros físico-químicos mensurados do poço de produção 1 e nos 3 pontos do rio Beberibe durante amostras de outubro, novembro e dezembro de 2014.

PARÂMETROS	POÇO 1		PONTO 1		PONTO 2		PONTO 3	
	Mín - Máx	Média ± DP	Mín - Máx	Média ± DP	Mín - Máx	Média ± DP	Mín - Máx	Média ± DP
pH	5,8-6,3	6 ± 0,25	7,2-7,9	7,5 ± 0,38	7,1-7,5	7,2 ± 0,23	7,2-7,4	7,3 ± 0,10
Condutividade eléct. (µmho/cm)	220 - 222	220,1 ± 1,85	317 - 340	321 ± 17,35	307-320	312,3 ± 6,81	50-55	52,3 ± 2,52
Turbidez (uT)	0,2-0,7	0,4 ± 0,25	17-34	25,3 ± 8,5	27-30	28,7 ± 1,53	40-49	43,7 ± 4,73
Cor uH	0	0	227-290	252,3 ± 33,26	255-280	266,3 ± 12,66	190-207	199,3 ± 8,62
Alcalinidade (mg/L de CaCO₃)	17,1-19,5	18,3 ± 1,20	91-104,2	101,8 ± 9,82	103,2-115	107,7 ± 6,36	3-9	5,7 ± 3,06
Dureza (mgCaCO₃/L)	39,5-53,09	45,6 ± 6,90	81,1-90	87,6 ± 2,72	77,94-82	80,2 ± 2,06	7-9	8,1 ± 1,01
Cloreto (mg/ L)	36,5	34,1 ± 2,10	39,9-42	40,1 ± 1,81	36,7-42	39 ± 2,71	8,8-10,7	9,5 ± 1,04
N amoniacal (mg/L de N)	0,1-0,2	0,2 ± 0,06	0,9-1,2	1,1 ± 0,15	0,4-1	0,7 ± 0,31	0,1-0,7	0,4 ± 0,30
Nitrito (mg/L de N)	0	0	0	0	0	0	0	0
Nitrato (mg /L de N)	0,7-0,9	0,8 ± 0,10	2-5	3,3 ± 1,53	1-4	2,3 ± 1,53	1,1-1,4	1,3 ± 0,15

Mín = mínimo; Máx = máximo; DP = desvio padrão

Em relação aos padrões de condutividade elétrica e alcalinidade a Portaria 2914/11 do Ministério da Saúde não faz referências. Os valores referentes ao pH, tanto do rio como do poço 1, em sua maioria, concentram-se na faixa de atuação ótima estabelecida pela portaria em questão que é de 6 a 9,5. Esse fato é muito importante, pois a variação do pH pode influenciar algumas etapas do tratamento de água.

A condutividade elétrica está relacionada com a presença de íons dissolvidos na água, onde o tipo de mineral dissolvido e a sua concentração vão influenciar na condutividade elétrica das amostras. Os resultados encontrados mostram que os pontos 2 e 3 do rio Beberibe apresentam médias de 321,0 e 312,3 µ mho/cm, respectivamente, sendo valores mais altos do que o poço 1 que apresentou média de 220,1 µ mho/cm, já o ponto 3 apresenta um valor médio de 52,3 µ mho/cm que está bem abaixo das outras amostras. Esse resultado pode ser explicado pelo fato do ponto 3 não ter despejo de esgoto doméstico como acontece nos pontos 1 e 2.

Os níveis de turbidez encontrados nas amostras do rio Beberibe apresentam-se mais elevados do que o valor encontrado na amostra referente ao poço 1, comprovando a eficiência da FM na redução da turbidez.

Em relação a cor, nota-se que o poço 1 apresenta ausência em seus valores. Já as amostras do rio Beberibe retratam valores altos, onde a média da cor dos pontos 1, 2 e 3 são respectivamente 252,3, 266,3 e 199,3. Esses valores não se enquadram no padrão da legislação vigente que faz referência ao valor de ≤ 15 para a aceitação da cor aparente da água para uso humano. Esses resultados podem ser explicados pela quantidade de despejos nas águas dos pontos de estudo do rio Beberibe.

Para alcalinidade, os valores encontrados nos pontos 1 e 2 são bem mais altos do que os valores referentes ao poço 1 e ao ponto 3. Esses resultados podem ser consequência da ação antropogênica que ocorre nos pontos 1 e 2.

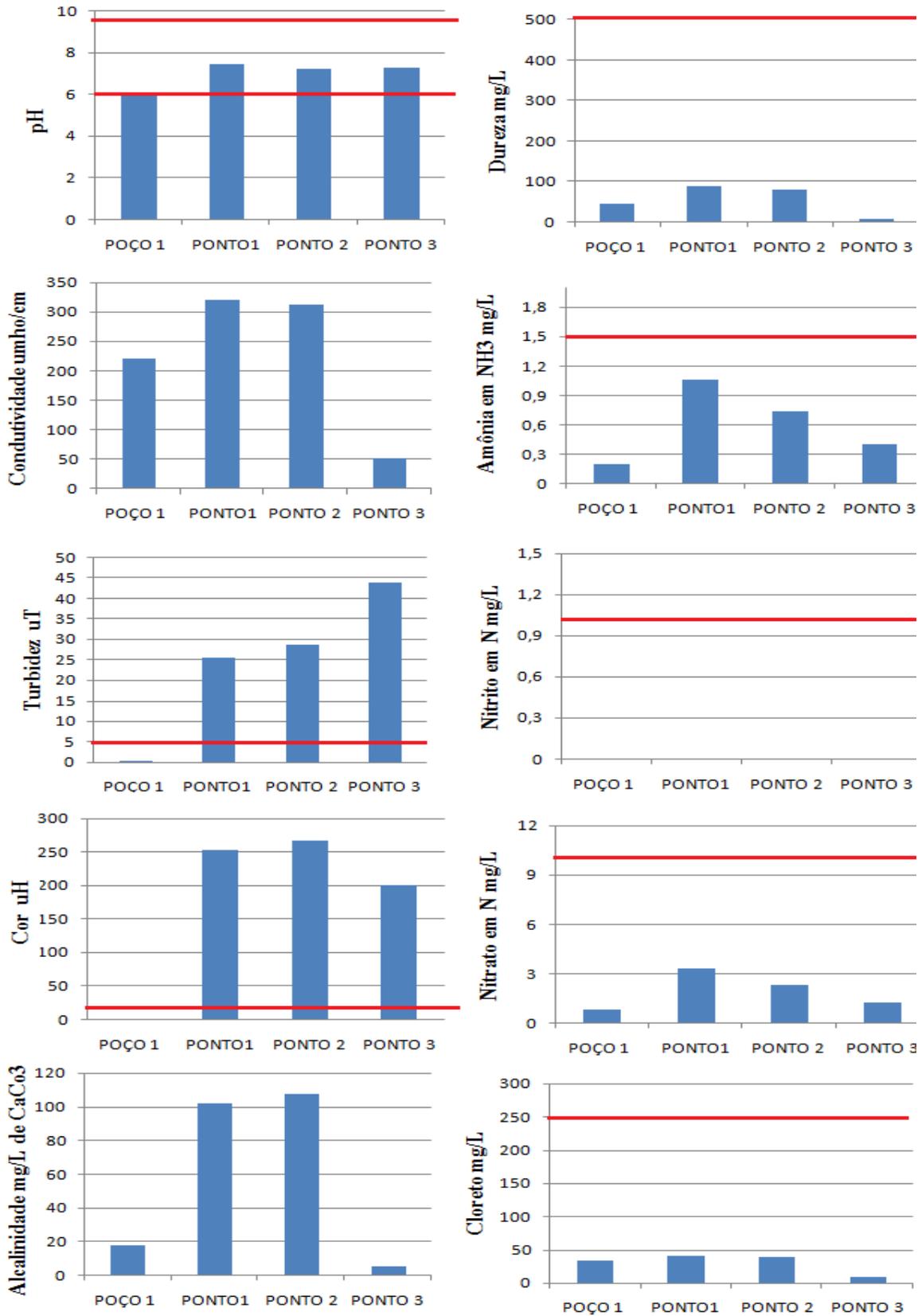
Os compostos nitrogenados fazem parte dos parâmetros físico-químicos avaliados e durante o monitoramento foram analisados as formas de nitrogênio como amônia em NH_3 , nitrito em N e nitrato em N.

Nos processos de redução dos níveis de concentração da amônia como NH_3 , nitrito em N e do nitrato em N, comprovados através dos resultados, fica evidenciado a eficiência da técnica de Filtração em Margem na remoção dos elementos analisados.

Análises de parâmetros físico-químicos do projeto piloto de Filtração em Margem no rio Beberibe podem ser observados em Paiva (2009), Freitas (2010; 2014), onde em termos de qualidade ficou comprovado que a água advinda do poço de produção apresentaram-se qualitativamente superior em relação à água do rio Beberibe.

Para uma melhor compreensão, os resultados das médias das análises dos parâmetros físico-químicos e os valores estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde 2914/11 estão ilustrados nos gráficos da Figura 6.16.

Figura 6.16 - Gráficos do monitoramento físico-químico da água do rio Beberibe e do poço de produção realizado na área de estudo, Olinda-PE.



Em relação a qualidade de água, de acordo com a Figura 6.16 a água advinda do poço 1 submetido às condições de Filtração em Margem, apresenta resultados bem melhores do que em relação a água do rio Beberibe. A técnica FM diminuiu as concentrações de todos os parâmetros físico-químicos analisados: pH, condutividade elétrica, turbidez, cor aparente, alcalinidade total em CaCO_3 , dureza total em CaCO_3 , cloreto, amônia em NH_3 , nitrito em N e nitrato em N. Porém, uns com bastante eficiência, outros nem tanto.

A partir desses resultados pode-se afirmar que a técnica de Filtração em Margem pode ser utilizada no mínimo como pré-tratamento na produção de água para consumo humano. Mas, seria necessário avançar numa gama maior de parâmetros para a potabilidade.

Nesse contexto, é possível afirmar que a técnica de Filtração em Margem apresentou boa eficiência no tratamento da água, pois a água do poço de produção após ser submetida à FM apresentou uma qualidade muito superior a água do rio Beberibe.

6.2.2 - Monitoramento quantitativo

6.2.2.1 - *Piezometria*

Para uma melhor análise dos níveis do lençol freático, foram registrados dados relacionados às medições dos piezômetros dispostos ao longo da área de estudo na Estação Elevatória de Caixa d'Água, Olinda-PE.

Todos os dados foram analisados e as variações encontradas foram relacionadas com a ação do bombeamento dos poços de produção, além das variações sazonais dos níveis piezométricos.

Em todo o período de monitoramento piezométrico, observou-se que existe uma conexão hidráulica entre o rio e o aquífero, pois a lâmina d'água do rio Beberibe, dos poços de observação e dos poços de produção demonstram uma harmonia em seus movimentos de aumento e redução nos níveis de água.

O acompanhamento dos níveis piezométricos dos poços em estudo foi realizado durante um período de 10 meses, entre fevereiro e novembro de 2014. Os valores relacionados a leitura piezométrica podem ser observados na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Monitoramento piezométrico realizado entre fevereiro e novembro de 2014, no módulo experimental de FM em Olinda - PE.

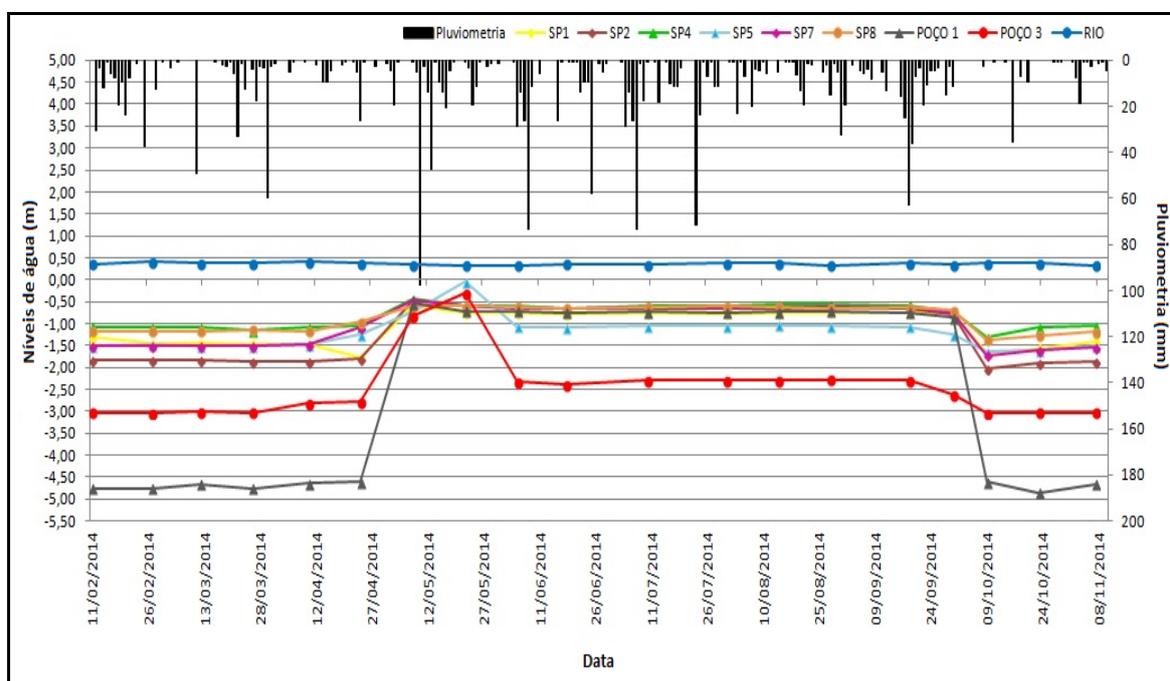
LEITURA PIEZOMÉTRICA								
DATA	SP1	SP2	SP4	SP5	SP7	SP8	POÇO 1	POÇO 3
11/02/2014	-1,32	-1,85	-1,08	-1,51	-1,51	-1,17	-4,76	-3,03
27/02/2014	-1,45	-1,84	-1,09	-1,49	-1,52	-1,18	-4,76	-3,04
12/03/2014	-1,45	-1,85	-1,10	-1,52	-1,52	-1,18	-4,66	-3,02
26/03/2014	-1,47	-1,87	-1,16	-1,51	-1,52	-1,15	-4,76	-3,03
10/04/2014	-1,46	-1,86	-1,10	-1,49	-1,48	-1,18	-4,64	-2,82
24/04/2014	-1,78	-1,79	-1,06	-1,25	-1,08	-0,97	-4,61	-2,79
08/05/2014	-0,59	-0,45	-0,43	-0,74	-0,45	-0,60	-0,53	-0,84
22/05/2014	-0,76	-0,61	-0,10	-0,03	-0,60	-0,61	-0,71	-0,30
05/06/2014	-0,77	-0,62	-0,69	-1,07	-0,66	-0,63	-0,72	-2,34
18/06/2014	-0,79	-0,66	-0,65	-1,09	-0,67	-0,65	-0,74	-2,39
10/07/2014	-0,77	-0,66	-0,59	-1,06	-0,62	-0,62	-0,73	-2,30
31/07/2014	-0,78	-0,66	-0,59	-1,05	-0,63	-0,61	-0,74	-2,29
14/08/2014	-0,77	-0,65	-0,57	-1,04	-0,61	-0,63	-0,73	-2,30
28/08/2014	-0,74	-0,64	-0,58	-1,05	-0,61	-0,65	-0,72	-2,28
18/09/2014	-0,77	-0,66	-0,59	-1,07	-0,62	-0,64	-0,74	-2,29
30/09/2014	-0,77	-0,79	-0,74	-1,25	-0,76	-0,71	-0,87	-2,63
09/10/2014	-1,67	-2,03	-1,32	-1,65	-1,72	-1,37	-4,61	-3,04
23/10/2014	-1,56	-1,91	-1,10	-1,6	-1,60	-1,28	-4,86	-3,03
07/11/2014	-1,40	-1,86	-1,05	-1,52	-1,55	-1,19	-4,66	-3,03

No período entre 11 de junho e fim de setembro, nossos poços de produção não estavam em funcionamento. Com a ausência do bombeamento dos poços de produção o comportamento dos níveis piezométricos foram recuperados, onde a partir de outubro os poços de produção voltam a funcionar e rapidamente nota-se respostas dos rebaixamentos pelo cone de depressão nos poços de observação.

Esse fato pode ser melhor observado na Figura 6.17 que representa a Tabela 6.12, onde o gráfico relaciona a cota da lâmina d'água do rio Beberibe com a cota do nível d'água dos poços de observação, dos poços de produção e dados de precipitação diários do posto do Alto da Bondade instalado em Olinda – PE, sendo este o posto pluviométrico mais próximo do local de estudo. Os dados de precipitação diária foram obtidos na Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2014).

Ao analisar os dados da Figura 6.17, observa-se claramente uma conexão hidráulica comprovando que existe a interação rio-aquífero-poços na área de estudo.

Figura 6.16 - Gráfico do monitoramento dos níveis piezométricos dos poços de observação, dos poços de produção, da lâmina d'água do rio Beberibe e da precipitação diária no módulo experimental, Olinda-PE, entre fevereiro e novembro de 2014.



A conexão hidráulica entre o rio e o aquífero pode ser observada em todas as leituras do gráfico, pois as cotas d'água dos poços de produção e dos poços de observação estão sempre em sincronia com a lâmina d'água do rio Beberibe.

Acredita-se que as leituras realizadas entre 27 de abril e o início de junho sofreram alterações em consequência da dragagem do rio e retirada de um barramento, como consequência houveram algumas alterações no comportamento hídrico local. Devido a problemas técnicos, os poços de produção estavam desligados no começo do mês de junho e foram ligados no início de outubro.

Nesse mesmo gráfico é possível notar a influência das estações chuvosas sobre os níveis potenciométricos, onde os períodos de chuva apresentam os níveis potenciométricos suavemente mais elevados do que os períodos de estiagem. Fato este explicado pela recarga do lençol freático ser mais acentuada em meses chuvosos.

Esse fato pode ser observado na leitura que se inicia no período de 24 de outubro de 2014, onde ocorre uma suave diminuição dos níveis piezométricos e da lâmina d'água em decorrência das poucas chuvas que ocorreram um pouco antes desse período.

Já nos períodos em que ocorreram chuvas, os níveis piezométricos e a lâmina d'água do rio Beberibe tende a subir.

Freitas (2014) e Paiva (2009) realizaram monitoramento piezométrico dos poços de produção e de observação correlacionados com a lâmina d'água do rio Beberibe e conseguiram evidenciar a conexão hidráulica entre os poços de produção e o rio Beberibe, caracterizando assim uma interação rio-aquífero, característica premissa para o uso da técnica.

Na mesma área de pesquisa, Paiva *et al.* (2013) utilizando o software Visual Modflow constatou que a contribuição do rio Beberibe para o aquífero duplica durante as estações chuvosas.

CAPÍTULO 7

CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Nos últimos anos tem sido crescente o interesse sobre a temática relacionada à qualidade de água, onde a técnica de Filtração em Margem vem respondendo positivamente no tratamento de água em várias partes do mundo. Nesse contexto, a zona hiporreica merece grande destaque por ser o local de grande influência nessa interação.

Visto que o entendimento da zona hiporreica é essencial para compreensão dos processos que ocorrem durante a Filtração em Margem, a presente Tese de doutorado teve como objetivo caracterizar esta interface nos seus aspectos físicos e biológicos para aprofundar o estudo da interação rio-aquífero visando o uso dessa tecnologia no abastecimento de água para o estado de Pernambuco. Além disso, o estudo aqui exposto forneceu informações sobre algumas características referentes ao processo de Filtração em Margem instalado ao longo das margens do rio Beberibe, dentro dos limites do terreno da EE de Caixa d'Água, propriedade da COMPESA, localizada na cidade de Olinda – PE.

A caracterização física da zona hiporreica foi realizada através da investigação da capacidade de transporte de volumes hídricos entre o rio e o aquífero, onde foram realizados ensaios de infiltração e leituras da carga hidráulica de dois pontos ao longo do rio Beberibe. Foi observado que o rio no seu curso médio colabora no abastecimento do aquífero através do fluxo vertical descendente na zona hiporreica do rio, com exceção de alguns dias que o fluxo apresentou ascendência após longos períodos de chuva. A maior taxa média de infiltração nos ensaios realizados foi de 0,017 mm/s, encontrada no leito do ponto 2 e a menor taxa média de infiltração foi encontrada na margem saturada do ponto 3 com o valor de 0,011 mm/s.

A diferença da carga hidráulica entre o aquífero e o rio Beberibe apresentaram três comportamentos distintos: fluxo nulo, ascendente e descendente. Provavelmente, essas variações ocorreram em consequência de eventos chuvosos, pois o fluxo vertical hiporreico sofre alterações em decorrência de intensas precipitações, que recarregam o aquífero. Além disso, também se observou que o movimento hídrico pode ser influenciado pelos sedimentos hiporreicos, pois o fluxo vertical de água foi

potencializado pela característica arenosa do local que foi confirmada através de ensaios granulométricos, facilitando a percolação de água entre os vazios dos sedimentos.

A caracterização biológica do ambiente hiporreico consistiu na quantificação e identificação da meiofauna presente nesse ambiente envolvendo variáveis distintas: margem e leito; profundidades de 0-5 cm e de 5-10 cm; período de estiagem e período chuvoso. Foram identificados um total de 7804 indivíduos, distribuídos em oito *taxa*, sendo nemátoda, anelídeo e rotífera os grupos mais representativos, responsáveis por mais de 96% de dominância. A maioria dos organismos foram encontrados no verão, no ponto 2 e nas camadas mais superficiais do leito do rio. Já no ponto 3 existe uma menor quantidade de organismos independente da variável envolvida.

A composição meiofaunística da zona hiporreica, ainda é pouco estudada devido a sua complexidade. Acredita-se que os organismos da meiofauna demonstram complexas relações com algumas variáveis ambientais, nesse sentido, esses conhecimentos são bastante relevantes pois envolve informações sobre a importância desses organismos na atenuação de contaminantes durante a passagem da água na interação das águas superficiais e águas subterrâneas.

Em relação ao monitoramento piezométrico, os resultados encontrados evidenciaram a relação entre os poços de observação, o poço de produção e a lâmina d'água do rio, pois quando o nível do rio Beberibe aumentava ocorria uma maior recarga no aquífero. Esse resultado é satisfatório para um bom funcionamento do processo de Filtração em Margem no módulo experimental instalado.

Os parâmetros bacteriológicos analisados comprovaram a redução de bactérias coliformes fecais e termotolerantes, pois na maior parte das análises de água do poço houve uma diminuição desses organismos confirmando a eficiência da Filtração em Margem. Os resultados também foram satisfatórios para as amostras do poço de produção que foram submetidas ao monitoramento físico-químico, onde a maioria das amostras do poço de produção estão enquadradas nos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde 2914/11.

Através dos resultados obtidos, o projeto piloto de Filtração em Margem instalado nas margens do rio Beberibe, no estado de Pernambuco, comprovou a eficiência da tecnologia de Filtração em Margem através de resultados positivos no tratamento natural da água. Além disso, os ensaios de infiltração e as leituras do fluxo

vertical de água realizados em campo possibilitaram uma melhor compreensão da troca hídrica que ocorre na interação rio-aquífero num trecho do rio Beberibe.

Compreender as características do ambiente hiporreico e a dinâmica do fluxo de água nessa interface é de grande importância para uma melhor aplicação da técnica de Filtração em Margem. As pesquisas relacionadas a essa interface estão evoluindo em todo o mundo e recomenda-se uma investigação mais aprofundada das variáveis que influenciam a zona de transição podendo refletir nos resultados da eficiência do processo de Filtração em Margem.

Também recomenda-se a continuação do estudo da meiofauna hiporreica, pois os resultados de duas amostragens não deve ser considerados como padrão de comportamento, pois os ciclos desses organismos são altamente variáveis.

Além disso, sugere-se a avaliação do sistema piloto de Filtração em Margem instalado no rio Beberibe, na remoção de contaminantes emergentes, principalmente os fármacos, visto que a contaminação dos mananciais por fármacos tem ocorrido em todo o mundo tornando-se um grande desafio para os sistemas produtores e distribuidores de água.

Também, espera-se que os 4 poços de produção instalados na área experimental de Caixa d'Água, Olinda-PE, brevemente estejam em pleno funcionamento e no futuro ser incorporada ao sistema de bombeamento da COMPESA.

CAPÍTULO 8

REFERÊNCIAS

8. REFERÊNCIAS

- ABELL, R.; ALLAN, J. D.; LEHNER, B. Unlocking the potential of protected areas for freshwaters. *Biological Conservation*, v.134, p.48-63, 2007.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6502: Rochas e solos. Rio de Janeiro. 18p, 1995.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 7181: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro. 13p, 1984.
- AGNEW, L. J.; LYON, S.; GÉRARD-MARCHANT, P.; COLLINS, V.B.; LEMBO, A.J.; STEENHUIS, T.S.; WALTER, M.T. Identifying hydrologically sensitive areas: bridging the gap between science and application. *Environmental Management*, v.78, p.63-76, 2006.
- ALBA, J. M. F., FILHO, C. R. S., FIGUEIREDO, B. R. Análise da assinatura geoquímica de solos e de sedimentos de corrente no Vale do Ribeira (SP) por meio de um sistema de informação geográfica. *Revista Brasileira de Geociências*. 38(1): 66 - 77, 2008.
- ALBUQUERQUE, T. B. V.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; BARCELLOS, R. L.; FREITAS, D. A. Uso do infiltrômetro de cilindro na investigação do fluxo vertical de água na zona hiporreica: estudo de caso no rio Beberibe - PE. In *Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, Natal, Nov. 2014, pp. 1 – 10, 2014.
- ALLAN, C. J.; VIDON, P.; LOWRANCE, R. Frontiers in riparian zone research in the 21st century. *Hydrological Processes*, v.2, p.3221-3222, 2008.
- ANDERSON, M. J. PERMANOVA Permutational multivariate analysis of variance. A computer program by Marti J. Anderson. Department of Statistics, University of Auckland - New Zealand, 2005.
- ANSARI, Z. A.; PARULEKAR, A. H. Distribution, abundance and ecology of the meiofauna in a tropical estuary a long the west coast of India. *Hydrobiologia*, 262: 115 - 126, 1993.
- APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. Dados climatológicos. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/>. Acesso em: 20 de setembro de 2014.
- APHA, AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21 ed. Washington: APHA, 2005.
- ARANTES, E. J.; FAZAL HUSSAIN 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.

ARMONIES, W.; HELFWING - ARMONIES, M. Synoptic patterns of meiofaunal and macrofaunal abundances and specific composition in littoral sediments. *Helgoländer Meeresunters*, 41:83-111, 1987.

ARNTZEN, E. V.; GEIST, D. R.; EVAN DRESEL, P. Effects of fluctuating river flow on groundwater/surface water mixing in the hyporheic zone of a regulated, large cobble bed river. *River Research and Applications*, 22, p.937–946, 2006. DOI: 10.1002/rra.947

ATTANASIO, C. M.; GANDOLF, S.; ZAKIA, M. J. B.; JUNIOR, J. C. T. V.; LIMA, W. P. A importância das áreas ripárias para a sustentabilidade hidrológica do uso da terra em microbacias hidrográficas. *Bragantia*, Campinas, v. 71, n. 4, p.493-501, 2012.

AUGSPURGER, C., KARWAUTZ, C., MÜßMANN, M., DAIMS, H., AND BATTIN, T. J. Drivers of bacterial colonization patterns in stream biofilms. *FEMS Microbiol. Ecol.* 72, 47, 2010.

BARRETO, A. F. S. Viabilidade da UAS (Unidade Artificial de Substrato) na avaliação do efeito da pressão antrópica sobre a associação de meiofauna e Copepoda Harpacticoida em ambientes recifais. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Biológicas, Departamento de Zoologia, Pós em biologia Animal - Dissertação de Mestrado. Recife-PE, 2014.

BARTON, J. L.; DAVIES, P. E. Buffer strips and stream water contamination by atrazine and pyrethroids aerially applied to Eucalyptus nitens plantations. *Australian Forestry*, 56 (3): p. 201-210, 1993.

BERGESCH, M.; ODEBRECHT, C.; ABREU, P. C. Microalgas da lagoa do estuário dos Patos: interação entre o sedimento e a coluna da água. *Oecol Brasil*, 1: 273 - 239, 1995.

BETT, B. Monitoring with meiofauna. *Marine Pollution Bulletin*, 19 (6): 293-294, 1988.

BIANCHIN, M. S.; SMITH, L.; BECKIE, R. D. Defining the hyporheic zone in a large tidally influenced river. *J. Hydrol.* 406, 16, 2011.

BISHOP, K.; BUFFAN, I.; ERLANDSSON, M.; FOLSTER, J.; LAUDON, H.; SEIBERT, J.; TEMNERUD, J. *Acqua Incognita: the unknown headwaters*. *Hydrological Processes*, v.22, p.1239- 1242, 2008.

BJARNI, K.; KRISTJÁNSSON, B. K.; SVAVARSSON, J. Subglacial refugia in Iceland enabled groundwater amphipods to survive glaciations. *Am Nat* 170: p. 292-296, 2007.

BLANFORD, W.; BOVING, T.; AL-GHAZAWI, Z.; SHAWAQFAH, M.; ALRASHDAN, J.; SAADOUN, I.; SCHIJVEN, JACK.; ABABNEH, QOTAIBA. *River*

Bank Filtration for Protection of Jordanian Surface and Groundwater. World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change. © 2010 ASCE.

BOANO, F.; REVELLI, R.;RIDOFI, L. Effect of streamflow stochasticity on bedform-driven hyporheic exchange. *Adv. Water Resour.* 33, 1367, 2010.

BONADA, N.; RIERADEVALL, M.; PRAT, N. Macroinvertebrate community structure and biological traits related to flow permanence in a Mediterranean river network. *Hydrobiologia* 589, 91, 2007.

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

BOUCHER, G. Les nematodes libres des sables fins infralittoraux. Étude in situ et expérimentale de la communauté. Paris (Docteur Es-Science Naturelles). Univ. de Paris-Sud. 236p + annexe. 1979.

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* 40: p. 229–243, 1998.

BOURG, A. C. M.; BERTIN, C. Biogeochemical processes during the infiltration of river water into an alluvial aquifer. *Environmental Science Technology.* 27, p. 661–666, 1993.

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

BRAY, J. R.; CURTIS, J. T. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, v.27, p. 325 - 349, 1957.

BRERETON, R. *Chemometrics: Data Analysis for the Laboratory and Chemical Plant.* John Wiley & Sons, Ltd. London, 2003.

BRIGGS, D. *Sediments.* _Fakenham, Norkfolk: Fakenham Press limited, p.192, 1977.

BRUNKE, M.; GONSER, T. The ecological significance of exchange processes between rivers and ground-water. *Freshwater Biol* 37, p.1–33, 1997.

BURKHARD, B.; PETROSILLO, I.; COSTANZA, R. Ecosystem services – bridging ecology, economy and social sciences. *Ecological Complexity*, v.7, p.257-259, 2010.

CAMARGO, M.G. SYSGRAN: um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 36, n. 2, p. 371-378, 2006. Disponível em: <http://200.17.232.45/sysgran?action=AttachFile&do=get&target=sysgran.pdf>.

- CAMPOS, H. L. Processo Hidrológico de Gestão na Bacia Hidrográfica do Rio Beberibe (PE): Uma Retrospectiva. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro – RJ. 226p., 2003.
- CARTES, J. E.; GRÉMARE, A.; MAYNOU, F.; VILLORA-MORENO, S. & DINET, A. Bathymetric changes in the distributions of particulate organic matter and associated fauna along a deep-sea transect down the catalan sea slope (Northwestern Mediterranean). *Progress in Oceanography*, 53:29-56, 2002.
- CARVALHO, N. O. Guia de Práticas Sedimentométricas. Brasília: ANEEL, p. 116, 2000.
- CASTRO, F. J. V. Variação temporal da meiofauna e da nematofauna em uma área mediolitorânea da bacia do pina (Pernambuco, Brasil). Universidade Federal de Pernambuco, Mestrado em Oceanografia. Tese de Doutorado. Recife-PE, 2003.
- CASTRO, N.M.; HORNBERGER, G.W. Surface subsurface water interaction in an alleviated mountain stream channel. *Water Resources Research*, v. 27, n. 7, p.1613-1621, 1991.
- CEY, E. E.; RUDOLPH, D. L.; PARKIN, G. W.; ARAVENA, R. Quantifying groundwater discharge to a small perennial stream in southern Ontario, Canada. *J Hydrol* 210 (1-4) :21-37, 1998.
- CHADDAD, P. A. S., ALVES, P. S., GOMES, C. R., SOUSA, A. M., NUNES, V., LIMA, P. M. S., GUILHERME, B. C. Meiofauna da praia arenosa de serrambi (Pernambuco – Brasil). XIII Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão – JEPEX – UFRPE: Recife, 09 a 13 de dezembro, 2013.
- CHEKAUER, D. A.; MCBRIDE, J. M. A remotely operating seepage meter for use in large lakes and rivers. *Ground Water*, v. 26, n. 2, p. 165-171, 1988.
- CHEN, X.; SONG, J.; & CHENG, C.; WANG, D.; LACKEY, S.O. A new method for mapping variability in vertical seepage flux in streambeds. *J Hydrol* 17: 519 - 525, 2003.
- CHORUS, I.; BARTRAM, J. Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management. London: E & FN Spon, p.416,1999.
- CLARKE, K. R.; WARWICK, R. M. Ordination of samples by Mult- Dimensional Scaling (MDS). In: Change in marine communities: An approach to Statistical Analyses and Interpretation. 2nd edition, PRIMER -E Ltd - Plymouth Marine Laboratory, UK, 2001.
- CONDEPE-FIDEM, Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. Programa de Infra-Estrutura em Áreas de Baixa Renda da RMR – Prometrópole, 2009.
- COSTA, M. L. M.; MEDEIROS, C. M-; LOUREIRO, L. C. B.; RIBEIRO, M. M. Análise da integração das águas superficiais e subterrâneas no aparato legal de recursos

hídricos do Brasil e do estado da Paraíba. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Natal, RN, 2008.

COULL, B.C. Role of meiofauna in estuarine soft-bottom habitats. *Austral. J. Ecol.*, v. 24, p. 327–343, 1999.

COULL B.C., BELL S.S. Perspective of marine meiofauna ecology. In: Livingston R.J., editor. Plenum Publishing Corporation; 1979. pp. 189–216. (Ecological Processes in Coastal and Marine System).

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Relatórios de Monitoramento Ambiental das Bacias Hidrográficas do Estado de Pernambuco. Disponível em: <www.cprh.pe.gov.br>. Acesso em: 10 de Março de 2014, às 14:15h.

CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Relatórios de Monitoramento Ambiental das Bacias Hidrográficas do Estado de Pernambuco. Disponível em: <www.cprh.pe.gov.br>. Acesso em: 10 de Março de 2011, às 14:15h.

CURRY, R.A.; GEHREL, S. J.; NOAKES, D.L.G.; SWAINSON, R. Effects of river flow fluctuations on groundwater discharge through brook trout, *Salvelinus fontinalis*, spawning and incubation habitats. *Hydrobiologia* 227, p.121–134, 1994.

DAE - Departamento de Água e Esgoto de Bauru. Distribuição de água no mundo. Disponível:<http://www.daebauru.com.br/2014/ambiente/ambiente.php?secao=hidrico&pagina=2#>. Acesso em: 09 de Setembro de 2014.

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.

DALTO, A. G. & ALBUQUERQUE, E. F. Meiofauna distribution in a Tropical Estuary of the South-Western Atlantic (Brazil). *Vie et Milieu*, 50 (3): 151-162, 2000.

DASH, R. R.; MEHROTRA, I.; KUMAR, P.; GRISCHEK, T. Lake bank filtration at Nainital, India: water quality evaluation. *Hydrogeology Journal*, 10.1007/s10040-008-0295-0. Springer-Verlag, 2008.

DATRY, T. Benthic and hyporheic invertebrate assemblages along a flow intermittence gradient: Effects of duration of dry events. *Freshw. Biol.* 57, 563, 2012.

DEBENHAM, N. J.; LAMBSHEAD, P. J. D.; FERRERO, T. J. & SMITH, C. R. The impact of whale falls on nematode abundance in the deep sea. *Deep-Sea Reseach*, 51:701-706, 2004.

DE LA CRUZ, ELBA & J.A. VARGAS. Abundancia y distribución vertical de la meiofauna en la play a fangosa de Punta Morales, Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 35(2) : 363-367, 1987.

DILLON, P. J.; MILLER, M.; FALLOWFIELD, H.; HUTSON J. The potential of riverbank filtration for drinking water supplies in relation to microcystin removal in brackish aquifers. *Journal of Hydrology*. Vol 266, p. 209–22, 2002.

DONALD, D.; GRYGASKI, T. Development of a Sustainable Potable Water Supply for Rural Villages in the Coastal Region of Tanzania, Africa, 2002.

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

EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D. Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment. In: *Techniques of Water- Resources Investigations of the U.S. Geological Survey (USGS)*. Reston, Virginia, 1999.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Office of Ground Water and Drinking Water. Effect of Treatment on Nutrient Availability. Total Coliform Rule Issue Paper. p.45, 2007.

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

FERAL, D., CAMANN, M. A., AND WELSH, H. H., JR. *Dicamptodon tenebrosus* larvae within hyporheic zones of intermittent streams in California. *Herpetol. Rev.* 36, 26, 2005.

FLECKENSTEIN, J.; NISWONGER, R.; FOGG, G. River-aquifer interactions, geologic heterogeneity, and low-flow management. *Ground Water*, v.44, n.6, p. 837–852, 2006.

FOLK, R. L. & W. C. WARD. Brazos River Bar: Study of the Significance of Grain Size Parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 : p.3-27, 1957.

FOLK, R. L. *Petrology of Sedimentary Rocks*: Austin, University of Texas Publication, 1968.

FRASER, B. G.; WILLIAMS, D. D. Accuracy and precision in sampling hyporheic fauna. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 54, 1135, 1997.

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*. Universidade Federal de Pernambuco, Doutorado em Engenharia Civil – Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Tese de Doutorado, Recife – PE , 2014.

FREITAS, D. A. *O emprego da técnica de filtração em margem para tratamento de água no rio Beberibe, Região Metropolitana do Recife*. Universidade Federal de Pernambuco, Mestrado em Engenharia Civil – Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Dissertação de Mestrado. Recife – PE, 2010.

FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M. F.; SERJO, A. N. Isotope study of wells in crystalline rock of the semi-arid northeast of Brazil. In: *Regional seminar for latin*

america on the use of isotope techniques in hydrology, Ciudad de México. Abstracts... Cidade de México, OIEA, p. 73-89, 1989.

GENEREUX, D. P.; LEAHY, S.; MITASOVA H.; KENNEDY, C. D.; CORBETT, D. R.; Spatial and temporal variability of streambed hydraulic conductivity in West Bear Creek, North Carolina, USA. *Journal of Hydrology* 358:332-353, 2008.

GHELLER, F. G. A meiofauna da baía do Almirantado e áreas adjacentes no estreito de Bransfield (Antártida) com ênfase em nemátoda. Universidade de São Paulo. Instituto Oceanográfico, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Biológica - Tese de Doutorado, 2014.

GREGORY, S. V.; SWANSON, F. J.; MCKEE, W. A.; CUMMINS, K. W. An ecosystem perspective of riparian zones. *BioScience*. v.41, p.540-551, 1991.

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

GIBERT, J., M. J. DOLE-OLIVIER, MARMONIER, P.; VERVIER, P. Surface water–groundwater ecotones. In: R.J.H. Naiman and H. De´camps (eds.), *The ecology and management of aquatic–terrestrial ecotones*. UNESCO and The Parthenon Publishing Group, London, England, p.199–225, 1990.

GIBERT, J.; DEHARVENG, L. Subterranean ecosystems: A truncated functional biodiversity. *Bioscience* 52, 473, 2002.

GIERE, O.; ELEFThERIOU, A.; MURISON, D. J. Abiotic Factors. IN: HIGGINS, R.P. & THIEL, H. (eds). *Introduction to the Study of Meiofauna*. Washington, D. C: Smithsonian Institution Press, p. 61-78, 1988.

GIERE, O. *Meiobenthology : the microscopic fauna in aquatic sediments*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany 328p, 1993.

GOLDSCHNEIDER, A.; HARALAMPIDES, K; MACQUARRIE, K. River sediment and flow characteristics near a bank filtration water supply: implications for riverbed clogging. *Journal Hydrology*, v.344, n.1–2, p.55–69, 2007.

GOMES, C.C. Modelagem Matemática para Estudo de Comportamento de Aquifero Aluvial Represado por Barragem Subterrânea. Dissertação de Mestrado, Depto. de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 1990.

GOOSEFF, M. N. Defining hyporheic zones—advancing our conceptual and operational definitions of where stream water and groundwater meet. *Geogr. Compass* 4, 945, 2010.

GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. Revitalização dos rios da região metropolitana do Recife. Projeto: Bacia do rio Beberibe - Caracterização da Área, Programas em Andamento e Levantamento de Dados. Recife – PE. v.1, Setembro de 2009.

- GRÜNHEID, S. T., AMY, G. & JEKEL, M. Removal of dissolved organic carbon (DOC) and trace organic compounds by bank filtration and artificial recharge. *Water Research*, v.39, n.14, p.3219–3228, 2005.
- GUNKEL, G.; HOFFMANN, A. Bank filtration of rivers and lakes to improve the raw water quality for drinking water supply. In: Gertsen N, Sønderby L (eds) *Water purification*. Nova Science Publishers Inc., New York, pp 137–169, 2009.
- HANCOCK, P. J. Human Impacts on the Stream–Groundwater Exchange Zone. *Environmental Management* v. 29, n.º. 6, p. 763–781, 2002.
- HARVEY, J. W.; WAGNER, B. J.; BENCALA, K. E. Evaluating the reliability of the stream tracer approach to characterize stream-subsurface water exchange. *Water Resources Research*, v. 32, n. 8, p. 2441- 2451, 1996.
- HATCH, C. E.; FISHER, A. T.; REVENAUGH, J. S.; CONSTANTZ, J.; RUEHL, C. Quantifying surface water-groundwater interactions using time series of streambed thermal records: Method development. *Water Resour. Res.* 42, W10410, 2006.
- HEBERER, T.; MECHLINSKI, A.; FANCK, B.; KNAPPE, A.; MASSMANN, G.; PEKDEGER, A.; FRITZ, B. Field Studies on the Fate and Transport of Pharmaceutical Residues in Bank Filtration. *Ground Water Monitoring & Remediation.*, v.24, n.2, 2004.
- HEIMBÜRGER, L. E., COSSA, D., THIBODEAU, B., KHRIPOUNOFF, A., MAS, V., CHIFFOLEAU, J. Natural and anthropogenic trace metals in sediments of the Ligurian Sea (Northwestern Mediterranean). *Chemical Geology*. 291: 141–151, 2012.
- HEIP, C.; VINCX, M.; VRANKEN, G. The ecology of marine nematodes. *Oceanography and Marine Biology. Annual Review*, v. 23, p. 399-489, 1985.
- HINKEL, R. Vegetação Ripária: Funções e Ecologia. I Seminário de Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias – Alfredo Wagner/SC – 22 de Setembro de 2003.
- HISCOCK, K. M.; GRISCHEK T. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration. *Journal of Hydrology*. Vol 266, pag 139–144, 2002.
- HOFFMANN, A. & GUNKEL, G. Bankfiltration in the sandy littoral zone of Lake Tegel (Berlin): structure and dynamics of the biological activefilter zone and clogging processes. *Limnologia*, v.41, n.1, p.10–19, 2011.
- HUMPHREYS, W. F. Rising from down under: developments in subterranean biodiversity in Australia from Groundwater fauna perspective. *Invert Syst* 22 (Spec pub): p.85-101, 2008.
- 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.
- INGRAM, D. R. The concept of accessibility: a search for an operational form. *Regional Studies*. v.5 (2), 1971.

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

JENNY, H. Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology. Dover Press, New York. 1941.

JORDAN, P.R. Stream-flow transmission losses in Western Kansas. Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, 103 (HY8), p. 905-919. 1977.

KALERIS, V. Erfassung des Austausches von Oberflächen – und Grundwasser in horizontalebene Grundwassermodellen. Mitteilungen, Heft 62, Institut für Wasserbau, Univ. Stuttgart. 1986

KALERIS, V. Quantifying the exchange rate between groundwater and small streams. Journal of Hydraulic Research, v. 36, n. 6, p. 913-932, 1998.

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

KENNEDY, C.D.; GENEREUX, D.P.; CORBETT, D.R.; MITASOVA, H. Design of a light-oil piezomanometer for measurement of hydraulic head differences and collection of groundwater samples. Water Resour Res 43, W09501. doi:10.1029/2007WR00590, 2007.

KILEY, D. K.; SCHNEIDER, R. Riparian roots through time, space and disturbance. Plant and Soil 269: p. 259–272, 2005.

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

KOBIYAMA, M. Conceitos de Zona Ripária e seus Aspectos Geobiohidrológicos. I Seminário de Hidrologia Florestal: Zonas Ripárias - Alfredo Wagner - SC – 22 de Setembro de 2003.

KRAUSE, S., HANNAH, D. M.; FLECKENSTEIN, J. H. Hyporheic hydrology: Interactions at the groundwater-surface water interface. Hydrol. Process. 23, 2103, 2009.

KUEHN, W.; MULLER, U., Riverbank filtration: an overview. J. Am. Water Works Assoc. 92 (12), p.60–69, 2000.

LANE, L.J. Transmission losses. United States Department of Agriculture, Washington, D.C. 1983.

LAPWORTH, D. J.; GOODDY, D. C.; ALLEN, D.; OLD, G. H. Understanding groundwater, surface water and hyporheic zone biogeochemical processes in a chalk

catchment using fluorescence properties of dissolved and colloidal organic matter. *J. Geophys. Res.* 114, G00F02, 2009.

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

LAWRENCE, J. E., SKOLD, M. E., HUSSAIN, F. A., SILVERMAN, D. R., RESH, V. H., SEDLAK, D. L., LUTHY, R. G., AND MCCRAY, J. E. Hyporheic Zone in Urban Streams: A Review and Opportunities for Enhancing Water Quality and Improving Aquatic Habitat by Active Management. *Environmental Engineering Science* V. 30, N. 8, 2013.

LEAR, G.; LEWIS, G. D. Impact of catchment land use on bacterial communities within stream biofilms. *Ecol. Indic.* 9,848, 2009.

LEE, D. R. A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnology Oceanographic*, v. 22, n. 1, p. 140-147, 1977.

LEE, D. R.; CHERRY, J. A. A field exercise on groundwater flow using seepage meters and minipiezometers. *Journal of Geology*, v. 27, p. 6-10, 1978.

LENCIONI, V; SPITALE, D. Diversity and distribution of benthic and hyporheic fauna in different stream types on an alpine glacial floodplain. PRIMARY RESEARCH PAPER, *Hydrobiologia* V. 751:73–87, 2015.

LEYS, R.; WATTS, C. H. S.; COOPER, S. J. B. Evolution of subterranean diving beetles (Coleoptera: Dytiscidae: Hydroporini, Bidessini) in the arid zone of Australia. *Evolution* 57: p. 2819-2834, 2003.

LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 339p, 2005.

LIKENS, G. E. *The ecosystem approach: its use and abuse*. Excellence in Ecology 3. Otto Kline (Ed.). Ecology Institute, Germany. 166 p, 1992.

LILLEBO, A.I; MORAIS, M.; GUILHERME, P.; FONSECA, R.; SERAFIM, A.; NEVES, R., Nutrient dynamics in Mediterranean temporary streams: A case study in Pardiela catchment (Degebe River, Portugal). *Limnologica*, 2007.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Hidrologia de matas ciliares. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO, H.F.(Ed.). *Matas ciliares: conservação e recuperação*. São Paulo: EDUSP/ Fapesp, 2000.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. O papel do ecossistema ripário. In: LIMA, W. P.; ZAKIA, M.J.B. (Org.). *As florestas plantadas e a água: Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento*. São Carlos: RiMa, p. 77-87, 2006.

LIMA, C. H. R.; FRISCHKORN, H.; BURTE, J. Avaliação da Interação Rio-Aquífero a Partir de Dados Experimentais e de um Modelo Analítico. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 12 n.1, 217-230, 2007.

LO´PEZ-RODRI´GUEZ, M. J.; TIerno DE FIGUEROA, J. M., FENOGLIO, S.; BO, T.; ALBA-TERCEDOR, J. Life strategies of 3 Perlodidae species (Plecoptera) in a Mediterranean seasonal stream in southern Europe. J. N. Am. Benthol. Sci. 28, 611, 2009.

LORENZEN, G., SPRENGER, C., TAUTE, T., PEKDEGER, A., MITTAL, A. & MASSMANN, G. Assessment of the potential for bank filtration in a water-stressed megacity (Delhi, India). Environmental Earth Science, v.61, n.7, p.1419–1434, 2010.

MAENG, S. K.; SHARMA, S. K., LEKKERKERKER-TEUNISSEN, K.; AMY, G. L. Occurrence and fate of bulk organic matter and pharmaceutically active compounds in managed aquifer recharge: A review. Water Research, v.45, p.3015-3033, 2011. doi:10.1016/j.watres.2011.02.017

MAIER, H. S.; HOWARD, K. W. F. Influence of oscillating flow on hyporheic zone development. Ground Water 49, 830, 2011.

MARE, M. F. A study of marine benthic community with special reference to the microorganisms. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, v. 25, p. 517–554, 1942.

MARMONIER, P.; VERVIER, P.; GIBERT, J.; DOLE-OLIVIER, M. J. Biodiversity in ground waters. Trends in Ecology and Evolution 8: p. 392–394, 1993.

MASSMANN, G.; NOGEITZIG, A.; TAUTE, T.; PEKDEGER, A. Seasonal and spatial distribution of redox zones during lake bank filtration in Berlin. Germany Environmental Geology, v.54, n.1, p.53–65, 2008.

METGE, D.; HARVEY, R.; AIKEN, G.; ANDERS, R.; LINCOLN, G.; JASPERSE, J. Influence of organic carbon loading, sediment associated metal oxide content and sediment grain size distributions upon *Cryptosporidium parvum* removal during riverbank filtration operations, Sonoma County, CA. Water Research, v. 44, n.4, p.1126–1137, 2010.

MINISTÉRIO DA SAÚDE DO BRASIL. Portaria 2.914 / 12 de dezembro de 2011.

MOELLMANN, A. M.; CORBISIER, T. N.; CURVELO, R. R. Variação espacial entre verão e inverno da meiofauna do Canal de São Sebastião - SP. Rev. bras. oceanogr., 49(1/2): 75 - 85, 2001.

MONDARDO, R. I. Avaliação da filtração em margem como pré-tratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas. Tese de Doutorado em Engenharia Sanitária e ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2009.

- MORRICE, J. A.; DAHM, C. N.; VALETT, H. M.; UNNIKRIISHNA, P. V.; CAMPANA, M. E. Terminal electron accepting processes in the alluvial sediments of a headwater stream. *Journal of the North American Benthological Society* 19: p. 593–608, 2000.
- MUELLER, M.; PANDER, J.; GEIST, J. The effects of weirs on structural stream habitat and biological communities. *J. Appl. Ecol.* 48, 1450, 2011.
- NAIMAN, R. J.; DÉCAMPS, H. The ecology of interfaces: riparian zones. *Annual Review Ecological System*, v.28, p.621-658, 1997.
- OLIVEIRA, J. B. *Pedologia Aplicada*. 4 ed. FEALQ. 592 p. 2011.
- PACKMAN, A. I.; MACKAY J. S. Interplay of stream–subsurface exchange, clay particle deposition, and stream bed evolution. *Water Resources Research* 39: 4-1–4-9. DOI: 10.1029/2002WR001432, 2003.
- PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; FREITAS, D. A. Interação Rio-Aquífero com Bombeamento em um Poço Próximo ao Rio num Sistema de Filtração em Margem. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 18 n.1 –Jan/Mar ,235-247, 2013.
- PAIVA, A. L. R. O processo de Filtração em Margem e um Estudo de Caso no rio Beberibe. Universidade Federal de Pernambuco, Doutorado em Engenharia Civil – Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Tese de Doutorado. Recife – PE, 2009.
- PALMEIRA, E. M.; & GARDONI, M. G. Geotêxteis in Filtration: a state of the art review and remaining challenges. *International Symposium on Geosynthetics, GeoEng'2000*, Melbourne, Austrália, pp. 85-110, 2000.
- PALMEIRA, E. M. Fatores Condicionantes do Comportamento de Filtros Geotêxteis. *IV Simpósio Brasileiro de Geossintéticos*, Volume 1, Porto Alegre, pp. 49-67, 2003.
- PALMER, M. A. Hydrodynamics and structure: interactive effects on meiofauna dispersal. *Journal of Experimental*, 1986.
- PALMER, M. A. Dispersal of marine meiofauna: a review and conceptual model explaining passive transport and active emergence with implications for recruitment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 48(1):81- 91, 1988.
- PERT, P. L.; BUTLER, J. R. A.; BRODIE, J. E.; BRUCE, C.; HONZAK, M.; KROON, F. J.; METCALFE, D.; MITCHELL, D.; WONG, G. A catchment-based approach to mapping hydrological ecosystem services using riparian habitat: a case study from the Wet Tropics, Australia. *Ecological Complexity*, v.7, p.378-388, 2010.
- PFANNKUCHE, O.; SOLTWEDEL, T. Small benthic size classes along the N.W. European Continental Margin: spatial and temporal variability in activity and biomass. *Progress in Oceanography*, 42:189– 207, 1998.

- POHLON, E.; MARXSEN, J.; KUSEL, K. Pioneering bacterial and algal communities and potential extracellular enzyme activities of stream biofilms. *FEMS Microbiol. Ecol.* 71, 364, 2010.
- RAU, G. C.; ANDERSON, M. S.; MCCALLUM, A. M.; ACWORTH, R. I. Analytical methods that use natural heat as a tracer to quantify surface water-groundwater exchange, evaluated using field temperature records. *Hydrogeol. J.* 18, 1093, 2010.
- RAY, C.; MELIN, G.; LINSKY, R. B. *Riverbank Filtration: improving source-water quality.* Kluwer Academic Publishers. California, USA, p. 1 – 17, 2002.
- REBOUÇAS, A. C. Condições de uso e proteção das águas subterrâneas. Seminário sobre Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo. ABAS, ABGE, SBG/SP. Atas. p. 77-87, 1992.
- REICHARDT, K. Dinâmica da matéria e de energia em ecossistemas. 2ª ed., Piracicaba – SP. USP/ESALQ. p.505, 1996.
- REMÍGIO, A. F. N. Estudo da colmatção biológica de sistemas filtro-drenantes sintéticos de obras de disposição de resíduos domésticos urbanos sob condições anaérobias. Universidade de Brasília, Doutorado em Geotecnia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Tese de Doutorado, Brasília – DF , 2006.
- RESH, V. H.; ROSENBERG, D. M. Recent trends in lifehistory research on benthic macroinvertebrates. *J. N. Am. Benthol. Sci.* 29, 207, 2010.
- REYNOLDS, S. K., JR.; BENKE, A.C. Chironomid production along a hyporheic gradient in contrasting stream types. *Freshw. Sci.* 31, 167, 2012.
- RICKLEFS, R. E.; MILLER, G. L. *Ecology.* 4 th. Ed. Library of Congress Cataloging-in Publication Data. Printed in U.S.A, 1999.
- ROMERO, L. G.; MONDARDO, R. I.; SENS, M. L.; GRISCHEK, T. Removal of cyanobacteria and cyanotoxins during lake bank filtration at Lagoa do Peri, Brazil. *Clean Technologies Environmental Policy.* DOI 10.1007/s10098-014-0715-x, 2014.
- ROSENBERRY, D.O.; PITLICK, J. Effects of sediment transport and seepage direction on hydraulic properties at the sediment-water interface of hyporheic settings. *Journal of Hydrogeology*, v. 373, p. 377-391, 2009.
- SAHOO, G. B.; RAY, C.; WANG, J. Z.; HUBBS, S. A.; SONG, R.; JASPERCE, J.; SEYMOUR, D. Use of artificial neural networks to evaluate the effectiveness of riverbank filtration. *Water Research*, v. 39, p. 2505 – 2516, 2005.
- SAMPAIO, E. A. S.; Comparação da diversidade e estrutura das comunidades de macroinvertebrados bentônicos associados ao bioinvasor *Corbicula fluminea* na área estuarina de água doce dos rios Minho e Lima. Universidade do Porto – PT, Mestrado em Ciências do Mar. Dissertação de Mestrado. Porto – PT. 146P, 2012.

SANDHU, C.; GRISCHEK, T.; KUMAR, P.; RAY, C. Potential for Riverbank filtration in India. *Clean Technology Environmental Policy*, v.13, p.295–316. DOI 10.1007/s10098-0100298-0, 2011.

SANTOS, L. L. Filtração em Margem para Remoção de Cianobactérias e Contaminantes Físico-Químicos em um Reservatório de Abastecimento Público no Semiárido Pernambucano. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2012.

SANTOS, L. L.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; ZUCCHI, M. R. Utilização de isótopos estáveis para análise da interação da água superficial e água subterrânea num estudo de filtração em margens. In: XVI Congresso Brasileiro de águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. São Luis, MA, 2010.

SAUVAGE, S.; GAGNEUR, J. The role of the hyporheic zone in the nitrogen dynamics of a semi-arid gravel bed stream located downstream of a heavily polluted reservoir (Tafna Wadi, Algeria). *Rivers Research Applications*, v.24, p.183–196, 2008. doi: 10.1002/rra.1039

SAWYER, A. H.; CARDENAS, M. B.; BOMAR, A.; MACKKEY, M. Impact of dam operations on hyporheic exchange in the riparian zone of a regulated river. *Hydrol. Process.* 23, 2129, 2009.

SCHIVEN, J. F.; BERGER, P.; MIETTINEN, I. *Bank Filtration for Water Supply*. Ed.; Kluwer Academic Publishers: Norwell, MA, in press, 2002.

SCHMIDT, C.; BAYER-RAICH, M.; SCHIRMER, M.. Characterization of spatial heterogeneity of groundwater-stream water interactions using multiple depth streambed temperature measurements at the reach scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 10, 849, 2006.

SCHUBERT, J. Hydraulic aspects of riverbank filtration – Field studies. *Journal of Hydrology*, v. 266, n.3-4, p.145-161, 2002.

SECTMA - Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco. Proposta Técnica para a criação da Área de Proteção Ambiental – APA do Beberibe, 2009. Recife/PE. Disponível em: <[http:// www.proptcapabeberibe-090817172813-phppapp02.pdf](http://www.proptcapabeberibe-090817172813-phppapp02.pdf)> Acesso em: 11 de Abril de 2011, às 10:20h

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

SENS, M. L.; PIZZOLATTI, B.S.; MONDARDO, R. I.; ROMERO, L. G. La filtración inducida como una alternativa de tratamiento de agua para remover cianobacterias y cianotoxinas. *Interciência*, v.38, n.04, p. 253-259, 2013.

SEPLAN - Secretaria de Planejamento e Gestão. *Urbanização da Bacia do Rio Beberibe*. Apresentação Técnica, Recife - PE. 2008.

SHAMRUKH, M.; ABDEL-WAHAB A. Riverbank filtration for sustainable water supply: application to a large-scale facility on the Nile River. *Clean Technologies and Environmental Policy*. DOI 10.1007/s10098-007-0143-2, 2008.

SHEPARD, F.P. Nomenclature Based on Sand-Silt-Clay Ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 24 (3): p.151-158, 1954.

SINGH, R.; PAUL, D.; JAIN, R. K. Biofilms: Implications in Bioremediation. *Trends in Microbiology*, v.14, p. 389-397, 2006.

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

SILVIA, V. M. A. P.; GROHMANN, P. A.; ESTEVES, A. M. Aspectos gerais do estudo da meiofauna de Praias arenosas. *Oecologia Brasiliensis*, Rio de Janeiro, v.3, n. 1, 1997.

SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J. A.; BELTRAMR, L. F. Infiltração e armazenamento no solo In: TUCCI. C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*, 2ºed. Porto Alegre: Ed. Universidade, ABRH EDUSP, p.335-72, 2000.

SMOL, N., WILLEMS, K.A., GOVAERE, J.C.R. & SANDEE, A.J.J. Composition, distribution and biomass of meiobenthos in the Oosterschelde estuary (SW Netherlands). *Hydrobiologia*, 282/283:197-217, 1994.

SOLTWEDEL, T. Metazoan meiobenthos along continental margins: a review. *Prog. Oceanogr.*, v. 46, p. 59–84, 2000.

SOMERFIELD, P. J.; WARWICK, R. M. Meiofauna in marine pollution monitoring programmes: A laboratory manual. Lowestoft: Directorate of Fisheries Research (MAFF), 71p, 1996.

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

SOULSBY, C.; MALCOLM, I. A.; TETZLAFF, D.; YOUNGSON, A. F. Seasonal and inter-annual variability in hyporheic water quality revealed by continuous monitoring in a salmon spawning stream. *River Res. Appl.* 25, 1304, 2009.

SRHE/PE - Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco. Projeto de dragagem do rio Beberibe no trecho entre a BR-101 e a ponte da avenida Olinda (trechos 1 a 5), volume 1, 2012.

STAUDER, S.; STEVANOVIC, Z.; RICHTER, C.; MILANOVIC, S.; TUCOVIC, A.;PETROVIC, B. Evaluating bankfiltration as an alternative to the current water supply from deeper aquifer: a case study from the Pannonian Basin, Serbia. *Water Resources Management*, v.26, n.2, p. 581–594, 2012.

- STEYAERT, M.; GARNER, N. GANSBEKE, VAN D.; VINCX, M. Nematode communities from the North Sea: environmental controls on species diversity and vertical distribution within the sediment. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, v. 79, p. 253-264, 1999.
- STUBBINGTON, R.; WOOD, P. J.; REID, I. Spatial variability in the hyporheic zone refugium of temporary streams. *Aquat. Sci.* 73, 499, 2011.
- SUGUIO, K. *Introdução à Sedimentologia*. São Paulo, Ed. Edgard Blücher/EDUSP. p.317, 1973.
- SUGUIO, Kenitiro. Ambiente de sedimentação e fácies sedimentares. *Geologia sedimentar*. Ed. Blucher. São Paulo, p 205-208. 400 p, 2003.
- SWEDMARK, K. B. The interstitial fauna of marine sand. *Biol. Rev.* v. 39, p. 1-42, 1964.
- TALEB, A.; BELAIDI, N.; SÁNCHEZ-PÉREZ, JOSÉ-MIGUEL; VERVIER, P.; TITA, G.; DESROSIERS, G.; VINCX, M. & NOZAIS, C. Predation and sediment disturbance effects of internal polychaeta *Nereis virens* (Sars) on associated meiofaunal assemblages. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 243:261- 282, 2000.
- TIETJEN, J. H. The ecology of shallow water meiofauna in two New England estuaries. *Oecologia*, v. 2, p. 251-291, 1969.
- TRAUB, R. “Austausch zwischen oberflächen – und grundwasser”. 4 Fortbildungslehrgang “grundwasser” in darmstadt, dvwk, bonn, 1982.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia – Ciência e Aplicação*. 3º edição. Porto Alegre: Editora da UFRGS, p. 943, 2004.
- TUINHOF. A.; DUMARS, C; FOSTER, S.;KEMPER, K; GARDUÑO, H.; NANNI, M. Groundwater Resource Management: an introduction to its scope and practice. GW-MATE Briefing Note n.1, 2003.
- 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.
- TYSON, R.V. *Sedimentary Organic Matter: Organic facies and palynofacies*. 1ª ed. Londres, Chapman & Hall, p.615, 1995.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Groundwater Information, 2009. Disponível em: <<http://water.usgs.gov/ogw/gwsw.htm>>. Acesso em: 02 de Fevereiro de 2011, às 23:15h.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Analytical Solutions and Computer Programs for Hydraulic Interaction of Stream-Aquifer Systems. By P. M. Barlow and A. F. Moench. Open-file Report 98 - 415A. Marlborough, Massachusetts, United States, 98p. 1998.

VAITSMAN, D. S.; VAITSMAN, M. S. Água mineral. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

VALENTIN, J. L. Agrupamento e Ordenação. Oecologia Brasiliensis. Vol 2: Tópicos em tratamento de dados biológicos, p. 27-55, 1995.

VANHOVE, S. Size spectra of nematode assemblages in east African mangrove. Academiae Analecta – AWLSK, Klasse der Wetenschappen, Paleis der Academien, Brussel, v. 55, n. 2, p. 129-142, 1993.

VARGAS, M. Introdução à Mecânica dos Solos - Ed. da USP/ McGraw Hill do Brasil Ltda, p.107, 1977.

VELICKOVIC, B.. Colmation as one of the processes in interaction between the groundwater and surface water. Facta 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. Universidade Federal de Pernambuco, Mestrado em Engenharia Civil - Área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Dissertação de Mestrado. Recife-PE, 2011.

VERAS, T. B.; CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; FREITAS, D. A.; SANTOS, L. L. Avaliação da capacidade de transporte de volumes hídricos na interação rio-aquífero. In: XI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste , João Pessoa, 2012.

VERSTRATEN, I. M; HEBERER, T.; SHEYTT, T. Occurrence, characteristics, and transport and fate of pesticides, pharmaceutical active compounds, and industrial and personal care products at bank filtration sites. In: Riverbank Filtration – Improving sourcewater quality, Chapter 9, ed. C Ray, G Melin, R. B. Linsky. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academics Publishers, 2002.

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

VIEIRA, L. S.; SANTOS, P. C. T. C. dos; VIEIRA, N. F. Solos: propriedades, classificação e manejo. Brasília: MEC/ABEAS, 1988.

VOGEL, J. R. , HARRIS, S. I., COPLEN, T. B., RICE, E.W., AND VERSTRAETEN, I. M. Microbe Concentrations, Laser Particle Counts, and Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Ratios in Samples from a Riverbank Filtration Study, Platte River, Nebraska, 2002 to 2004: U.S. Geological Survey, Data Series 133, 68 p. 2005.

WALKER, J.; ALEXANDER, D.; IRONS, C.; JONES, B.; PENRIDGE, H.; RAPPORT, D. Catchment health indicators: as overview. In: WALKER, J.; REUTER, D. J. (Ed.). Indicators of catchment health: a technical perspective. Melbourne: CSIRO, p.3-18,1996.

WALTERS, M.O. Transmission losses in arid regions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (1), p. 129-139. 1990.

WARWICK, R.M. Nematode association in the Exe estuary. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, v. 51, p. 439–454, 1971.

WEBB, B. W.; HANNAH, D. M.; MOORE, R. D.; BROWN, L. E.; NOBILIS, F. Recent advances in stream and river temperature research. *Hydrol. Process.* 22, 902, 2008.

WEISS, W.; BOUWER, E.; ABOYTES, R.; LECHEVALLIER, M.; O'MELIA, C.; LE, B.; SCHWAB, K. Riverbank filtration for control of microorganisms: results from field monitoring. *Water Research*, v.39, n.10, p.1990–2001, 2005.

WHITE, D. S. Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. *J. N. Am. Benthol. Sci.* 12, 61, 1993.

WILLIAMS, D. D.; FEBRIA, C.M.; WONG, J.C.Y. Ecotonal and other properties of the hyporheic zone. *Fund. Appl. Limnol.* 176, 349, 2010.

WILLIAMS, D. D. Towards a biological and chemical definition of the hyporheic zone in two Canadian rivers. *Freshw.Biol.* 22, 189, 1989.

WINTER, T. C.; HARVEY, J.W.; FRANKE, O. L.; ALLEY, W.M. *Ground Water and Surface Water. A Single Resource.* USGS Circular 1139; U.S. Geological Survey: Denver, CO, 1999.

WOESSNER, W. W. Stream and fluvial plain groundwater interactions: rescaling hydrogeologic thought. *Ground Water* 38(3): 423–429, 2000.

WOESSNER, W. W.; SULLIVAN, K.E. Results of seepage meter and mini-piezometer study, Lake Mead, Nevada. *Ground Water* 22 (5):561–568, 1984.

WOOD, P. J., BOULTON, A.J., AND STUBBINGTON, R. Is the hyporheic zone a refugium for aquatic macroinvertebrates during severe low flow conditions? *Fund. Appl. Limnol.* 176, 377, 2010.

WU, Y. ; HUI, L.; WANG, H.; LI, Y.; ZENG, R. Effectiveness of riverbank filtration for removal of nitrogen from heavily polluted rivers: a case study of Kuihe River, Xuzhou, Jiangsu, China. *Environmental Geology International Journal of Geosciences*, 10.1007/s00254-006-0445-4, 2006.

XAVIER, J. B.; PICIOREANU C.; VAN LOOSDRECHT M. C. M. “Assessment of three-dimensional biofilm models through direct comparison with confocal microscopy imaging.” *Wat Sci Technol* (Accepted for publication), 2003.

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