



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Wendell José Soares dos Santos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELAGEM NUMÉRICA DA INTERAÇÃO RIO-
AQUÍFERO**

Caruaru, Janeiro / 2015

WENDELL JOSÉ SOARES DOS SANTOS

**MODELAGEM NUMÉRICA DA INTERAÇÃO RIO-
AQUÍFERO**

Proposta de trabalho a ser apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do Centro
Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco -
UFPE, como requisito para a disciplina
Trabalho de Conclusão de Curso II.

Área de concentração: Recursos Hídricos
Orientador: Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro
de Paiva

Caruaru, Janeiro / 2015

Catálogo na fonte:
Bibliotecária - Simone Xavier CRB/4-1242

S237m Santos, Wendell José Soares dos.
Modelagem numérica da interação rio-aquífero. / Wendell José Soares dos Santos. -
Caruaru: O Autor, 2015.
62f.: il.; 30 cm.

Orientador: Anderson Luiz Ribeiro de Paiva
Monografia (Trabalho de Conclusão de curso) – Universidade Federal de
Pernambuco, CAA, Engenharia Civil, 2015.
Inclui referências bibliográficas

1. Aquíferos. 2. Modelagem numérica. 3. Beberibe, Rio (PE). 4. Recursos hídricos. I.
Paiva, Anderson Luiz Ribeiro de. (Orientador). II. Título.

620 CDD (23. ed.)

UFPE (CAA 2015-036)

WENDELL JOSÉ SOARES DOS SANTOS

**MODELAGEM NUMÉRICA DA INTERAÇÃO RIO-
AQUÍFERO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como requisito para a disciplina **Trabalho de Conclusão de Curso II**.

Área de concentração: Recursos Hídricos

A banca examinadora composta pelos professores abaixo, considera o candidato ALUNO APROVADO COM NOTA_____.

Caruaru, 30 de janeiro de 2015.

Banca examinadora:

Prof. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Saulo de Tarso M. Bezerra _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Profa. Sylvana Melo dos Santos _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Profa. Sylvana Melo dos Santos: _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenadora da disciplina)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Aparecida Soares Silva e Fernando Alves dos Santos, bem como a toda a minha família, e em especial a minha tia Maria Soares da Silva.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por ter me orientado e me protegido, mostrando o caminho certo a seguir, me concedendo tal privilégio.

Aos meus pais Maria Aparecida e Fernando Alves, que nunca deixaram de acreditar em meus sonhos, com vocês aprendi o melhor desta vida. À minha mãe, obrigado pela educação, paciência, incentivo e contribuição, sem você eu não chegaria até aqui.

À minha vó Silene Bezerra da Silva, a quem durante minha graduação, recebeu novamente a graça da vida, que sempre me aconselhou e se preocupou comigo.

À minha tia e segunda mãe Maria Soares, pela força, incentivo e apoio, que foram de grande contribuição para conclusão deste curso.

Às minhas irmãs Lesly, Fernanda e Clara, por toda colaboração, como também aos meus primos, cunhados e demais familiares.

Aos meus amigos, os que nem sempre estavam presentes, mas sempre me incentivaram, e os que passaram muitas noites de estudos ao meu lado.

À todos os professores que contribuíram para minha formação e, que durante todos esses anos estiveram com total disponibilidade para passar o conhecimento, em especial ao professor Anderson Luiz Ribeiro de Paiva, pela paciência e disponibilidade, que mesmo com o seu tempo limitado, tinha a generosidade e dedicação para orientar e passar todos os conhecimentos, que comigo levarei sempre.

RESUMO

O racionamento de água potável é um problema de grande relevância a ser discutido. Pois os recursos hídricos são um fator limitante do desenvolvimento sustentável. A demanda é crescente e contínua, e uma grande fonte estratégica está nos mananciais subterrâneos. Pois, as fontes superficiais veem sendo cada vez mais comprometidas em sua qualidade. Em vários países do mundo, locais onde mananciais subterrâneos são conectados hidráulicamente às águas superficiais são preferenciais utilizados para exploração de água potável por diversas vantagens. Uma técnica antiga chamada Filtração em Margem (FM) já é usada diversas partes do mundo, como Alemanha, França, Suíça, Holanda, Hungria entre outros, que por meio da exploração de grandes quantidades de água pelos poços de produção próximos às margens dos rios, induz-se uma diferença de carga hidráulica entre o rio e o aquífero. A água superficial flui pelo meio poroso para o poço, e a água explotada chega pré-tratada, minimizando a necessidade de tratamentos convencionais. Sendo assim, é interessante simular o comportamento de aquíferos, por meio de códigos computacionais, que se baseiam em modelos numéricos associados à realidade observada em campo. O principal objetivo deste trabalho foi testar três códigos computacionais que possibilitem a análise da interação rio-aquífero como também fazer um comparativo entre eles, e construir um modelo numérico no estudo de caso do Rio Beberibe. O estudo de caso foi feito em uma área onde foi instalado um projeto piloto de filtração em margem em Olinda - PE, na qual já foram realizados estudos anteriores com medições de campo. Com as informações de publicações anteriores construiu-se modelos numéricos com os softwares PMWIN, Visual Modflow e GMS, que possibilitam simular o fluxo subterrâneo com a interação rio-aquífero. As respostas obtidas pelos modelos alcançaram resultados satisfatórios, calculando-se as cargas hidráulicas do fluxo subterrâneo, observando os rebaixamentos do lençol freático e influência do rio. Os valores calculados do rebaixamento nos poços de observação apresentaram erros da ordem de 0,4 m para o PMWIN, 0,6 m para o Visual Modflow e 0,3 m para o GMS. Comparando as saídas dos mapas potenciométricos dos três softwares, pode-se se dizer que se obtiveram resultados similares, como era de se esperar. No entanto, as facilidades de inserção dos dados de entrada, visualização dos dados e resultados são melhores com o software Visual Modflow e GMS. Apesar do PMWIN, ser menos sofisticado, apresentou uma modelagem relevante, além de ser um software gratuito.

Palavras-chave: filtração em margem; interação rio-aquífero; modelagem numérica; rio Beberibe.

ABSTRACT

The rationing of drinking water is a very important issue to be discussed. As water resources are a limiting factor for sustainable development. Demand is increasing and continuous, and a great strategic source is in the groundwater. Whatever, the surface sources are increasingly committed to its quality. In several countries of the world preferred locations for exploitation of potable water are where have hydraulically surface waters connected to groundwater. An old technique called bankfiltration (BF) is already used worldwide, which through the exploitation large amounts of water for production wells near the riverbank, induces a hydraulic load difference between the river and the aquifer. The surface water flows through the porous medium to the underground, and the water exploited arrives pre-treated, minimizing the need for conventional treatments. So it is interesting to observe the behavior of aquifers, by means of software, which are made through the use of numerical models which approximate the observed reality in the field. The main objective of this work was to test three softwares which allow the analysis of river-aquifer interaction but also make a comparison between them, and build a numerical model in the case study of the Beberibe river. The case study was done in an area where it was installed a bankfiltration pilot project in Olinda-PE, in which previous studies have already been carried out with field measurements. With the information of previous publications numerical models built with the softwares, Visual Modflow PMWIN and GMS, that make it possible to simulate subsurface flow with the river-aquifer interaction. The answers obtained by the models have achieved satisfactory results, calculating the underground flow hydraulic loads, observing the relegations of groundwater and influence of the river. The values calculated from relegation in observation wells showed errors on the order of 0.4 to 0.6, PMWIN for Visual Modflow and 0.3 for the GMS. Comparing the outputs of the potentiometric maps of the three softwares, you can say that if they obtained similar results, as was to be expected. However, the advantages of integration of input data, visualization of data and results are better with the Visual Modflow software and GMS. Despite the PMWIN, be less sophisticated, presented a relevant modeling, besides being a free software.

Passwords: bankfiltration; river-aquífer interaction; numerical modelling; Beberibe river.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama esquemático dos processos que ocorrem durante filtração em margens.	17
Figura 2 - Relação entre a 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.....	20
Figura 3 - Zona hiporreica e suas trocas de fluxo.....	22
Figura 4 - Etapas para a modelagem computacional.	27
Figura 5 - Localização da área da pesquisa (em vermelho).	29
Figura 6 - Médias mensais de precipitação e evaporação de 1961 a 1990 na Estação Meteorológica de Recife.....	30
Figura 7 - Médias mensais de temperatura e umidade relativa no período de 1961 a 1990 na Estação Meteorológica de Recife.....	31
Figura 8 - Médias mensais de insolação e precipitação de 1961 a 1990 na Estação Meteorológica de Recife.....	32
Figura 9 - Estação Elevatória de Caixa d'Água, Olinda – PE.....	36
Figura 10 - Imagem satélite, com maior detalhe da localização da área de estudo.....	37
Figura 11 - Localização dos furos de sondagem na E. E. de Caixa d' água, Olinda – PE.....	38
Figura 12 - Realização do ensaio SPT, para os furos de sondagens.....	39
Figura 13 - Perfil Litológico Transversal ao rio Beberibe na E. E. de Caixa d' água, Olinda – PE.....	40
Figura 14 - Perfil Litológico Paralelo ao rio Beberibe na E. E. de Caixa d' água, Olinda – PE.	40
Figura 15 - Localização dos poços já existentes, dos novos poços de observação (SP7 e SP8) e do poço de produção na E. E. de Caixa d' água, Olinda – PE.....	41
Figura 16 - Configuração final da malha (vista superior) por meio do Visual Modflow.	45
Figura 17 - Divisão do tempo de simulação em dois períodos utilizando o software GMS....	45
Figura 18 - Determinação das condutividades hidráulicas utilizando o software Visual Modflow.	46

Figura 19 - Configuração das zonas de recargas (vista superior) utilizando o Visual Modflow.	47
Figura 20 - Última calibragem do modelo computacional para o período seco (183 dias, imagem a esquerda) e o período úmido (365 dias, imagem a direita) com PMWIN.	50
Figura 21 - Última calibragem do modelo computacional para o período seco (183 dias, imagem acima) e o período úmido (365 dias, imagem abaixo) com Visual Modflow.....	51
Figura 22 - Última calibragem do modelo computacional para o período seco (183 dias, imagem acima) e o período úmido (365 dias, imagem abaixo) com PMWIN.....	52
Figura 23 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 1 com o PMWIN.	53
Figura 24 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 3 com o PMWIN.	53
Figura 25 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 1 com o PMWIN.	54
Figura 26 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 3 com o PMWIN.	54
Figura 27 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 1 com o Visual Modflow.	55
Figura 28 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 3 com o Visual Modflow.	55
Figura 29 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 1 com o Visual Modflow.	56
Figura 30 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 3 com o Visual Modflow.	56
Figura 31 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 1 com o Software GMS.	57
Figura 32 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 3 com o Software GMS.	57
Figura 33 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 1 com o Software GMS.	58
Figura 34 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 3 com o Software GMS.	58

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Dados dos poços de observação inseridos no modelo.....	47
Tabela 2 - Níveis potenciométricos observados e calculados com o software PMWIN.	59
Tabela 3 - Níveis potenciométricos observados e calculados com o software Visual Modflow.	59
Tabela 4 - Níveis potenciométricos observados e calculados com o software GMS.	59
Quadro 1 - Condições ou situações em que cada método é bem ou mal adaptado.	49

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Relevância do tema.....	14
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivos gerais	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2.	REFERÊNCIAL TEÓRICO	16
2.1	Filtração em margem.....	16
2.2	Interação rio-aquífero	19
2.2.1	Parâmetros hidráulicos da água subterrânea	21
2.2.2	Zona hiporreica.....	22
2.3	Monitoramento em água subterrânea	23
2.4	Aplicação de modelos em hidrogeologia.....	25
3.	METODOLOGIA	28
3.1	Avaliação das possíveis técnicas para medição dos parâmetros da zona hiporreica. 28	
3.2	Caracterização da área de estudo.....	28
3.2.1	Clima.....	30
3.2.2	Cobertura vegetal.....	32
3.2.3	Aspectos hidrográficos.....	33
3.2.4	Qualidade das águas superficiais	33
3.2.5	Geologia e hidrogeologia	34
3.2.6	Uso e ocupação do solo.....	35

3.3	Área experimental	36
3.3.1	Estação elevatória de caixa d'água	36
3.3.2	Implantação do projeto piloto.....	37
3.3.3	Implantação do poço de produção	41
3.4	Modelagem da área de estudo	42
3.4.1	Características do modelo	42
3.4.2	Softwares utilizados na modelagem do estudo de caso	42
3.4.3	Discretização da área e dados de entrada.....	44
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Apresentação e avaliação das possíveis técnicas para medição dos parâmetros da zona hiporreica.....	48
4.2	Modelagem da área de estudo	49
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
6.	REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

O volume total de água da Terra é de 1.386 milhões km³, onde cerca de 97,5% formam os oceanos, e que deste diz-se frequentemente ser muito pobre em água doce. Porém os processos naturais de transformação da água salgada dos oceanos ocasionam, principalmente, uma descarga de água doce nos rios da terra da ordem de 43.000 km³/ano. Sendo a demanda total de água da humanidade, atualmente, cerca de 14% dessa vazão (FEITOSA *et al.*, 2012).

Apesar do grande volume de água presente na Terra, é preocupante o fato da poluição nos corpos d'água vir se tornando cada vez maior. Com o decorrer dos anos, o processo de potabilização da água foi se tornando cada vez mais complexo, necessitando de uma série de operações como: coagulação/floculação, decantação, filtração e desinfecção com produtos químicos. Atualmente, para se obter uma melhor qualidade desse recurso, em alguns mananciais, são necessárias outras técnicas de tratamento mais modernas, que foram evoluindo e sendo adicionadas ao processo convencional de tratamento, como a oxidação química por ozonização, adsorção em carvão ativado e outras (RABELO, 2006).

Nesse quadro atual em que as fontes de águas se encontram, e a necessidade de uma maior atenção no que diz respeito à sua gestão, temos várias técnicas de tratamento de água disponíveis como a Filtração em Margem (FM) que já vem sendo utilizada em várias partes do mundo, principalmente na Europa, e apresenta bons resultados, como parte do tratamento de água. A FM é um processo onde grandes quantidades de água são exploradas por poços de produção próximos às margens dos rios, induz-se uma. A água superficial é induzida a fluir pelo meio poroso para o poço, pela diferença de carga hidráulica gerada entre o rio e o aquífero. A água explorada chega pré-tratada, minimizando a necessidade de tratamentos convencionais

Às águas subterrâneas constituem o maior volume de água doce líquida da Terra e, mantém uma relação com os mananciais superficiais por meio de conexões hidráulicas, sendo assim é de suma importância o estudo voltado para a mesma e as formas de captação.

A poluição e a superexploração são os principais problemas associados à água subterrânea. Para uma avaliação do estado atual do reservatório aquífero, tanto em termos de quantidade como em termos de qualidade, o monitoramento é um instrumento importante, que auxilia nas decisões relativas à exploração, desenvolvimento e gerenciamento das águas subterrâneas (FEITOSA *et al.*, 2012).

O monitoramento de águas subterrâneas é um processo sistemático que abrange a coleta, o armazenamento, a análise e a interpretação de dados. As redes de monitoramento

devem ter características próprias e adequadas visando os objetivos destinados. As principais dificuldades técnicas estão associados à heterogeneidade hidráulica do aquífero, ao posicionamento dos poços de observações em relação ao fluxo, às técnicas e análise da água, e ao custo envolvido. De forma geral, se desenha uma rede de monitoramento preliminar que evolui para uma rede permanente e operativa (FEITOSA *et al.*, 2012).

Para realizar análises complexas dos aquíferos e expandir a capacidade do hidrogeólogo de entender e gerenciar os recursos hídricos subterrâneos os modelos computacionais são extremamente úteis. Diversas etapas são envolvidas na modelagem do aquífero, onde a simulação computacional é apenas um dos passos. São elas: definição do objetivo, elaboração do modelo conceitual, formulação matemática do problema, escolha do pacote computacional, esquematização do modelo, calibração e verificação, previsão, apresentação de resultados e verificação em longo prazo.

A escolha do pacote computacional varia caso a caso, depende da disponibilidade dos softwares e se podem resolver o modelo conceitual e matemático proposto. Atualmente, já existem diversos programas com características diferentes, inclusive softwares que ajudam o modelador com interfaces gráficas simples, agilizando o processo (PAIVA, 2004). Para que possamos planejar as atividades relacionadas ao uso, controle e conservação da quantidade e qualidade da água subterrânea, é essencial o entendimento do movimento da água no solo e as equações que regem o seu fluxo (BAPTISTA *et al.*, 2001).

Em problemas que envolvem equações diferenciais parciais mais difíceis como é o caso da equação que rege o fluxo subterrâneo é comum o uso de ferramentas computacionais para sua resolução. A análise numérica e computacional é uma área da matemática onde se encontram vários métodos para se determinar, exata ou aproximadamente, soluções numéricas de problemas modelados matematicamente.

1.1 Relevância do tema

Suprimento de água potável tornou-se um ponto de discussão de grande importância no último século, atrelado aos novos meios de vida industrializados e urbanizados pelo mundo. A demanda por água é crescente, e esta precisa ser ofertada de forma permanente, tendo garantia de sua qualidade. Em muitos locais, aquíferos hidráulicamente conectados a fontes de água superficiais, geralmente de capacidade de produção elevada, são locais preferenciais para produzir água potável em vários países do mundo (HISCOCK & GRISCHEK, 2002). Da mesma forma que existe a preocupação da crescente demanda, encontram-se problemas de

bons mananciais; ora pelo quantitativo de água, constatado em diversas regiões do Brasil, ora pela qualidade, normalmente deteriorado pelo próprio homem.

Ao mesmo tempo, para analisar e monitorar esses recursos de água, uma variedade de técnicas e métodos têm sido desenvolvidos. Quantificar a conexão entre as águas superficiais e as águas subterrâneas também tornou-se mais importante, pois o uso de um desses recursos pode ter consequências inesperadas no outro (COMMITTEE ON HYDROLOGIC SCIENCE 2004 *apud* ROSENBERRY & LABAUGH, 2008).

Uma técnica antiga, com seu uso crescente em todo o mundo, vem sendo na última década discutida no Brasil, o método denominado Filtração em Margem (FM). Dois benefícios imediatos são observados no crescente uso da FM: minimização da necessidade do uso de produtos químicos como desinfectantes e coagulantes no controle de patógenos das águas superficiais; e diminuição dos custos para a comunidade sem aumento de risco à saúde humana (RAY, MELIN & LINSKY, 2002).

Na FM, cria-se uma diferença na carga hidráulica entre o rio e o aquífero, induzido pelo bombeamento de poços locados próximos às margens do rio, explorando grandes quantidades de água. A água superficial fluirá através do meio poroso para os poços de bombeamento. A água captada é na verdade um percentual de água subterrânea e outro de água superficial. Dependendo do uso final e do grau de filtração e atenuação dos contaminantes, podem ser necessários tratamentos adicionais. Porém, no mínimo servirá como pré-tratamento na produção de água potável.

Um dos pontos relevantes nesta temática é a construção de modelos computacionais que traduzam a realidade local, principalmente a interação rio-aquífero, que é o principal fator no contexto da técnica de FM. Existem diversos programas que tratam do problema de transporte de fluxo e solutos em meios porosos, no entanto, poucos analisam propriamente a interação com corpos hídricos superficiais.

Diante disso, a construção de modelos numéricos a partir de programas computacionais para analisar a interação rio-aquífero é de grande relevância. Tendo em vista que um projeto piloto de FM foi instalado no bairro de Caixa d'Água, na cidade de Olinda-PE, no terreno da COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento), contando com um poço de produção e poços de observação dispostos na área de estudo, com os quais são acompanhados os níveis potenciométricos semanalmente, pôde-se fazer o estudo e a construção do modelo dessa área. Vale ressaltar que o orientador do presente trabalho já realizou estudos anteriores também nessa região dentro do mesmo contexto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Construir um modelo numérico no estudo de caso Rio Beberibe, com softwares computacionais selecionados, analisando a interação rio-aquífero.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar possíveis técnicas para medição dos parâmetros da zona hiporreica, importante para a simulação da interação rio-aquífero.

- Realizar estudo comparativo entre os resultados de softwares selecionados para a modelagem numérica da interação rio-aquífero, a partir de um modelo conceitual simplificado.

- Construir um modelo numérico da interação rio-aquífero no estudo de caso – rio Beberibe.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Filtração em margem

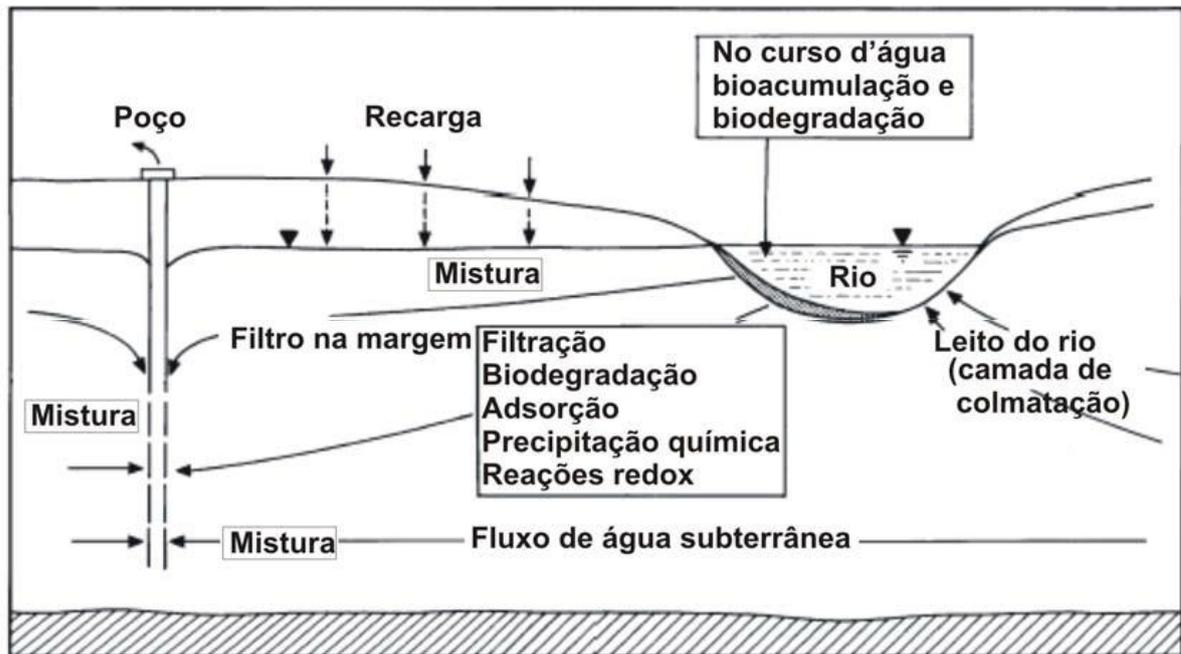
A necessidade por água potável, bem como o interesse por técnicas de tratamento natural da água, como a FM, tem aumentado. Por mais de um século a FM tem sido utilizada no fornecimento de água para abastecimento público, reconhecido como um eficiente processo natural de atenuação da poluição, assegurando sustentabilidade no fornecimento de água potável (FREITAS, 2010).

A FM pode ser natural ou casual, quando o nível do lençol freático for inferior ao nível d'água do corpo hídrico superficial, ou de forma artificial ou induzida pela locação de poços de bombeamento paralelos ao manancial, onde é utilizada como uma técnica na indústria de abastecimento de água (PAIVA, 2009). A FM artificial faz com que ocorra uma diferença de carga hidráulica entre o corpo d'água superficial e o lençol freático, ocorrendo uma indução da água através do meio poroso até o poço por percolação (Figura 1). Portanto, a água produzida pela FM é uma mistura da água infiltrada do manancial superficial e da água subterrânea presente no aquífero.

FM é um método de tratamento d'água alternativo eficiente e de baixo custo. Onde dois benefícios imediatos com o uso deste método são: minimização da necessidade do uso de

produtos químicos para o controle de patogênicos no tratamento das águas superficiais; e diminuição dos custos do tratamento, reduzindo riscos à saúde humana (PAIVA, 2009).

Figura 1- Diagrama esquemático dos processos que ocorrem durante filtração em margens.



Fonte: Paiva (2009).

Segundo Freitas (2010), a FM é utilizada em várias partes do mundo principalmente na Europa, em países como Alemanha, França, Suíça, Holanda e Hungria, sendo aplicada por mais de 100 anos, mais especificamente nos rios Reno, Elba e Danúbio.

No Brasil a FM vem sendo estudada pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) na Lagoa do Perí, na cidade de Florianópolis. Na UFSC, foram realizadas pesquisas que avaliaram a FM como pré-tratamento na remoção de cianobactérias e cianotoxinas, onde ambos tiveram 100% de remoção na utilização desta técnica (SENS *et al.*, 2006). A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) também começou a estudar, nas divisas de Recife e Olinda, o processo de FM, nas margens do rio Beberibe, como forma de avaliar a adequação da técnica às condições locais, e à qualidade da água advinda do poço de produção submetido à FM com fins de produção de água potável (PAIVA, 2009).

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 e da eficiência dos processos de purificação ocorrido durante o processo, ainda deve-se levar em conta a existência e o grau de contaminação da água subterrânea.

É importante ressaltar que os aquíferos são muito menos vulneráveis à poluição do que as águas superficiais. Porém, uma vez que eles são contaminados, a recuperação, dependendo do tipo de contaminante, pode levar anos e até mesmo torna-se inviável do ponto de vista econômico, ambiental e sanitário. Sendo assim, é importante considerar a qualidade tanto dos recursos hídricos superficiais como também subterrâneos na utilização da FM (FREITAS, 2010).

A mudança que ocorrerá na qualidade da água que percola o meio poroso terá vários processos naturais envolvidos, estes podem ser subdivididos em (DOUSSAN *et al.*, 1988 *apud* PAIVA, 2009):

- a) hidrodinâmicos: incluindo advecção, dispersão e difusão;
- b) mecânicos: filtração e colmatação das partículas nos espaços entre os poros;
- c) biológicos: degradação de matéria orgânica pelo metabolismo de microorganismos do solo e mineralização de substratos secundários; e
- d) físico-químicos: sorção, precipitação, complexação, floculação, coagulação, reações redox, e troca iônica.

O processo de remoção é mais eficiente quando a velocidade da água subterrânea é baixa e quando o aquífero é composto por material granular com espaços abertos para que o fluxo d'água passe por estes. A qualidade da água advinda da FM além de ser influenciada pelo material sedimentar do leito e do aquífero (interface água superficial e subterrânea), também é afetado pela velocidade de infiltração, tempo de residência no aquífero, distância dos poços ao corpo d'água, taxa de bombeamento, diluição com as águas subterrâneas, além de alterações na temperatura da água do manancial de superfície (FREITAS, 2010).

Segundo Melo (2006), essa técnica traz uma série de vantagens, como por exemplo:

- Remoção de contaminantes, causando um menor custo com saúde, aumentando o tempo de vida e melhorando o meio ambiente em geral.
- Manutenção mais simples que outros métodos de pré-tratamento, gerando assim uma redução dos custos com operação.
- Alternativa de abastecimento frente às estiagens, visto que ele utiliza água subterrânea como suprimento.
- Remoção dos sólidos totais dissolvidos, levando a uma menor deterioração das tubulações.

Por outro lado possui também alguns problemas associados (MELO, 2006):

- Quando a água contém compostos orgânicos persistentes, como pesticidas e farmacêuticos, esses podem não ser removidos, precisando de tratamentos adicionais.
- As substâncias húmicas presentes nos sedimentos podem ser dissolvidos na água, conferindo a ela cor marrom ou amarelada.

2.2 Interação rio-aquífero

As pesquisas realizadas sobre águas superficiais e subterrâneas são feitas tradicionalmente tratando os dois corpos d'água isolados um do outro. Isso se deve às diferenças de acessibilidade e natureza dos dois corpos d'água. Por exemplo, os rios são caracterizados por um fluxo criando forças hidráulicas turbulentas, variação de descarga, mudanças nas condições químicas, transporte unidirecional de material, transporte de fundo, e dinâmica morfológica do canal. Em contraste, as condições ambientais do ecossistema subterrâneo são mais estáveis, têm fluxo laminar, longos tempos de residência, estrutura sedimentar mais constante, e escuridão permanente (PAIVA, 2009).

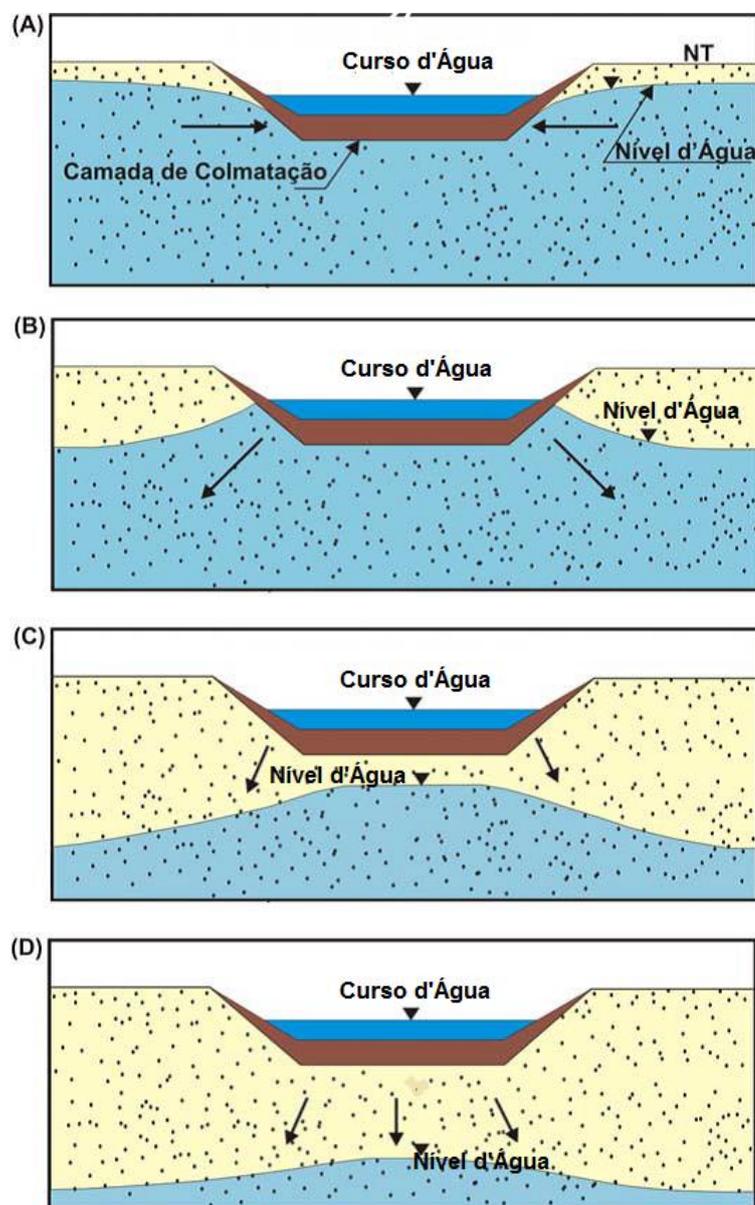
Porém os estudos passaram a contemplar as águas superficial e subterrânea simultaneamente, visto que esses dois mananciais se comunicam hidráulicamente e se casualmente for desenvolvidos contaminantes em um, comumente afetará o outro. Portanto, uma compreensão dos princípios básicos das interações entre as águas subterrâneas e superficiais é necessária para a gestão eficaz dos recursos hídricos.

A carga hidráulica em cada um dos meios superficial e subterrâneo é responsável pela variação da direção dos processos de trocas entre eles, enquanto o fluxo (volume/unidade de tempo) depende da condutividade hidráulica dos sedimentos. 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. Para o entendimento da complexa interação que há entre água subterrânea e superficial em relação aos fatores de clima, relevo, geologia, e biota, é necessária uma compreensão estruturada sobre todos eles (SOPHOCLEOUS, 2002).

A interação de mananciais superficiais com água subterrânea também é governada pela posição da água superficial com relação ao sistema de fluxo de água subterrânea. A perspectiva geomorfológica também ajuda a caracterizar esta interação, se o fluxo é dado do corpo d'água superficial para o subterrâneo ou o contrário, observando-se as características de declividade da margem, sinuosidade de rio, largura e profundidade do rio, e o sistema de deposição fluvial/lagunar.

As relações entre os corpos d'água superficial e subterrânea podem estar ocorrendo de duas formas distintas: quando há um contato direto entre os dois meios, podendo haver fluxo em direção ao manancial superficial ou em direção ao aquífero; e quando há descontinuidade entre os dois meios, podendo haver alimentação do manancial superficial para um aquífero freático raso, ou até mesmo mais profundo (PAIVA, 2009). A Figura 2 ilustra estas formas de interação. Vale ressaltar que estas formas de interação podem estar em constante modificação, até mesmo por variações sazonais ou interferências externas.

Figura 2 - Relação entre a 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.



Fonte: Paiva (2009).

2.2.1 Parâmetros hidráulicos da água subterrânea

O movimento da água subterrânea à um nível microscópico pode ser muito complexo. Por meio de experiências, o engenheiro Henry Darcy mostrou que existe uma relação entre o fluxo de água que atravessa uma camada de areia e o gradiente hidráulico, onde daí surgiu o conceito de condutividade hidráulica, sendo uma propriedade macroscópica do meio. Podendo a partir daí ser aplicado os princípios da hidrodinâmica, que tratam o meio como contínuo dotados de propriedades bem definidas, envolvendo três parâmetros fundamentais: porosidade, condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento (FEITOSA *et al.*, 2012). O engenheiro propôs a lei que pode ser expressa pela equação 1:

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (1)$$

Onde,

K: condutividade hidráulica;

A: área da seção transversal;

$(h_1 - h_2) = \Delta h$: diferença de cargas hidráulicas;

L: distância entre os pontos a ser medidos.

Onde pode-se chamar de gradiente hidráulico a diferença de carga hidráulica $(h_1 - h_2)$ dividida pela distância L, que pode ser entendido como a taxa de perda de carga por unidade de trajeto do fluido. Aplicando esta expressão na zona de transição do corpo d'água superficial e subterrâneo, pode-se medir o fluxo entre eles.

A condutividade hidráulica K que aparece na lei de Darcy, é a facilidade que um aquífero tem de transmitir água, e depende das características do meio, como a porosidade, o tamanho, a distribuição, a forma e o arranjo dos grãos, e das características do fluido que escoar, como a viscosidade e a massa específica (FEITOSA *et al.*, 2012).

A densidade e a viscosidade da água são dependentes da temperatura, sendo assim a condutividade hidráulica (K) também varia com a temperatura.

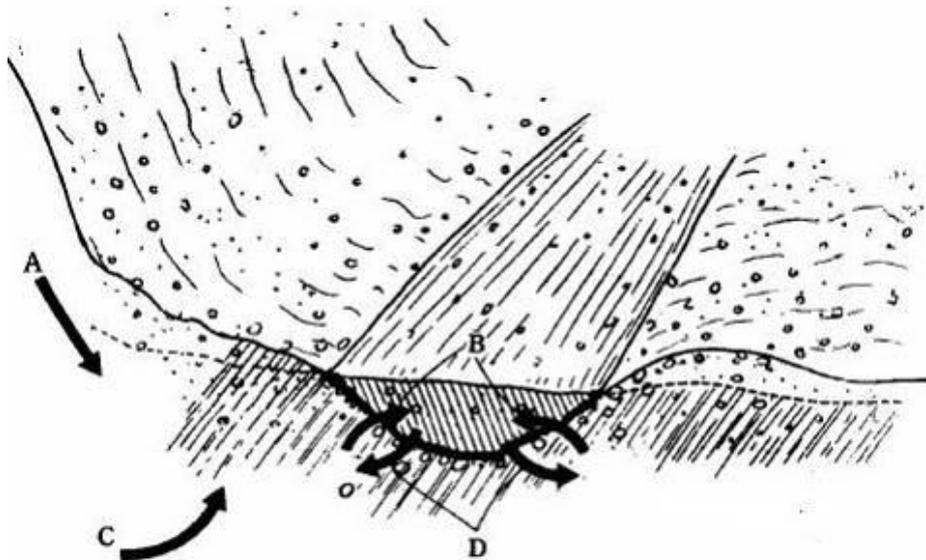
A porosidade é a razão entre o volume dos vazios pelo volume total de uma determinada amostra. A porosidade é determinada pelo tamanho, distribuição e forma dos grãos, rugosidade superficial e tipo de arranjo. A condutividade hidráulica e a porosidade estão relacionadas com a quantidade de vazios no meio poroso. No caso de depósitos fluviais,

estes parâmetros variam inversamente com o tamanho dos grãos. A porosidade aumenta com a diminuição do tamanho dos grãos, enquanto a condutividade hidráulica diminui (PAIVA, 2009).

2.2.2 Zona hiporreica

A zona hiporreica (Figura 3) é uma zona de interstícios saturados no leito e abaixo do leito do curso d'água, se aproximando das margens onde contém alguma parte de água de origem superficial, ou que tenha sido alterada por infiltração das águas superficiais e a condição hidráulica da água fica entre as das águas superficiais e subterrâneas. Segundo Freitas (2010), a profundidade é normalmente de 20 a 60 cm, porém sendo difícil determinar este valor na prática.

Figura 3 - Zona hiporreica e suas trocas de fluxo.



Fonte: Takaha e Otha, 1999 *apud* Freitas (2010).

Essa zona é composta por ambos os ecossistemas, subterrâneo e superficial, onde as mudanças na matéria orgânica, nutrientes e a água ocorrem como consequências dos gradientes hidráulicos e químicos, topografia e litologia dos sedimentos (PAIVA, 2009).

No processo de redução da massa e da concentração de substâncias químicas nessa zona, atuam fatores físicos, químicos e biológicos. Processos como a sorção, que não reduz a massa de poluentes, ajudam no retardo de metais e outras substâncias não degradáveis, outros processos como a biodegradação atuam nos poluentes orgânicos. Segundo Paiva (2009), os efeitos biológicos existentes estão atrelados à particularidade do meio ambiente na zona

hiporreica, onde não há luz, com uma fauna característica de microorganismos que atuam na biodegradação. Fauna esta constituída de bactérias, fungos, protozoários e invertebrados. As trocas entre as águas fluviais e subterrâneas podem ser um importante regulador da atividade biológica na zona hiporreica. Sem o fluxo de nutrientes para renovação do oxigênio e descarga dos resíduos, os sedimentos tornam-se impróprios para a maioria da vida que os habitam (FREITAS, 2010).

Apesar de a zona hiporreica ser um grande meio de atenuação da poluição, ela pode constituir uma barreira física e, conseqüentemente, reduzir a taxa de infiltração. Segundo Esquivel (2012), a colmatção do sistema pode ser devida a processos mecânicos (deposição de materiais finos como silte, argila, matéria orgânica particulada), químicos (precipitação de carbonato de cálcio) e biológicos (desenvolvimento de biomassa como algas, bactérias, substâncias poliméricas extracelulares).

No entanto existem processos que podem desobstruir as zonas de infiltração. Em reservatórios como lagos e rios, as forças das ondas e dos ventos atuam colocando as partículas finas novamente em suspensão. Como também o aumento da vazão em épocas de cheias faz com que o fluxo, realize a limpeza no fundo do canal. Além disso, existem pequenos organismos (que não são microscópicos) que habitam o fundo do canal e, por meio do consumo de matéria orgânica particulada, agem na regeneração das propriedades hidráulicas da zona hiporreica.

2.3 Monitoramento de água Subterrânea

A água subterrânea, além de ser um recurso precioso e limitado, é vulnerável a intervenção humana. A poluição e a superexploração são os principais problemas associados à mesma. Para uma avaliação do estado atual do reservatório aquífero, tanto em termos de quantidade como em termos de qualidade, o monitoramento é um instrumento importante, que auxilia nas decisões relativas à exploração, desenvolvimento e gerenciamento das águas subterrâneas (FEITOSA *et al.*, 2012). Segundo os mesmos autores, vários obstáculos são enfrentados para o planejamento de um programa de monitoramento, de ordens conceitual, técnica e financeira, causados pela falta de dados e pela heterogeneidade dos meios aquíferos.

As redes de monitoramento devem ter características próprias e adequadas visando os objetivos destinados. O custo de sua implantação é relativamente alto, e precisa ser otimizado. De forma geral, se desenha uma rede de monitoramento preliminar que evolui para uma rede permanente e operativa. As principais dificuldades técnicas estão associados à

heterogeneidade hidráulica do aquífero, ao posicionamento dos poços de observações em relação ao fluxo, às técnicas e análise da água, e ao custo envolvido.

A seleção de zonas prioritárias de monitoramento é feita de acordo com os seguintes critérios:

- modelo conceitual do regime de fluxo e sua interconexão com as águas ou ecossistemas superficiais;
- vulnerabilidade natural do aquífero à poluição;
- densidade dos postos de abastecimento;
- anomalias nas condições naturais.

No Brasil, é recente a implantação de redes de monitoramento. Os estados de São Paulo, Minas Gerais, Pernambuco e Rio Grande do Norte já têm sistemas de monitoramento com características próprias com diferentes finalidades. Em geral, foram implantadas para controlar o risco de contaminação causado pela superexploração (FEITOSA *et al.*, 2012).

Segundo Feitosa *et al.* (2012), em um monitoramento específico, costuma-se subdividir a área em quadrícula (25 - 500 km²), adotando critérios de vulnerabilidade, presença de fontes poluentes e disponibilidade de recursos, onde é alocado no mínimo um ponto por quadrícula. É aconselhável alocar pontos próximos a estações pluviométricas e fluviométricas, ou a montante e a jusante das áreas de recarga ou das fontes poluidoras.

Ainda segundo os mesmos autores, a frequência com que são coletados os dados dependem das características do aquífero, das fontes e dos usos da água. Devem ser o bastante para registrar as tendências dos parâmetros analisados, considerando as variações da extração e recarga a curto e longo prazo. De modo geral, após um período de controle (no mínimo um ano) a rede preliminar passa por uma reavaliação e os pontos sem variações têm suas frequências aumentadas.

Pode-se ter dois tipos de monitoramento: quantitativo e qualitativo. O primeiro consiste nas medidas dos níveis de água pelo menos uma vez por mês, podendo objetivar o acompanhamento e a recuperação de rebaixamentos e para determinar limites de exploração, como também ajudar na modelagem conceitual e numérica do aquífero. O segundo é voltado para o controle, diagnóstico e prognóstico do risco de contaminação.

Na fase de estruturação do projeto de monitoramento, é indispensável a definição clara dos objetivos, baseado nas respostas às seis perguntas: por que monitorar? (meta); quem irá monitorar? (responsável); quais os parâmetros de controle? (atividade e meio hidroquímico);

onde? (local); quando e com que frequência aferir as medidas? (prazo); com qual tecnologia deve-se medir? (métodos). (FEITOSA *et al.*, 2012).

O grande volume de dados gerados pelo monitoramento requer o uso de sistemas eficientes de armazenamento e disponibilidade de dados. O sistema de informações é um sistema de coleta, tratamento, armazenamento, recuperação e disponibilidade de informações sobre a qualidade e quantidade da água subterrânea e fatores que influenciam na sua gestão. O Serviço Geológico do Brasil – CPRM vem desenvolvendo e atualizando o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS.

2.4 Aplicação de modelos em hidrogeologia

Para que possamos planejar as atividades relacionadas ao uso, controle e conservação da quantidade e qualidade da água subterrânea, é essencial o entendimento do movimento da água no solo (BAPTISTA *et al.*, 2001). Por isso, a seguir é mostrada a equação 2 que rege o fluxo de água em meios porosos. Se considerarmos que os eixos coordenados coincidem com as direções principais do tensor de condutividade hidráulica, tornando-se nulos os elementos não pertencentes a diagonal principal, temos a equação 2:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R_v = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

Onde, R_v é o fluxo volumétrico por unidade de volume;

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} representam a condutividade hidráulica nas direções principais (com isto o tensor de condutividade hidráulica se reduz a 3 componentes);

S_s é o coeficiente de armazenamento específico.

Se a água é adicionada ao aquífero o valor de R_v será positivo, se é retirada será negativo.

Em problemas que envolvem equações diferenciais parciais mais difíceis, como é o caso da equação que rege o fluxo subterrâneo, é comum o uso de ferramentas computacionais para sua resolução. A análise numérica e computacional é uma área da matemática onde se encontram vários métodos para se determinar, exata ou aproximadamente, soluções numéricas de problemas modelados matematicamente. Os modelos computacionais auxiliam a sistematizar a informação de campo, e a detectar locais onde é necessário um maior estudo. E fornecem subsídios para fazer previsões sobre consequências das ações a serem realizadas nos recursos hidrogeológicos (FEITOSA *et al.*, 2012).

Um modelo computacional é a representação matemática de uma situação real do meio ambiente, de forma geral com simplificações. Os modelos comumente aplicados a hidrogeologia podem ser divididos em modelos de fluxo e modelos de transporte de massa. Os modelos de fluxo são utilizados para simular o escoamento da água levando em consideração os fluxos naturais dos aquíferos, suas recargas e os bombeamentos a que estão submetidos. Já os modelos de transporte na água subterrânea vêm sendo muito utilizados para propagação de poluentes, análise de opções de remediação e previsão de cenários de risco do transporte de contaminantes (PAIVA, 2009).

É fundamental ter visão dos objetivos que se pretendem com os modelos. Normalmente os objetivos são de previsão e de interpretação. No primeiro caso, o modelo é utilizado para prever o comportamento do aquífero devido à determinadas ações, e no segundo, procura-se estender o seu funcionamento e sistematizar as informações.

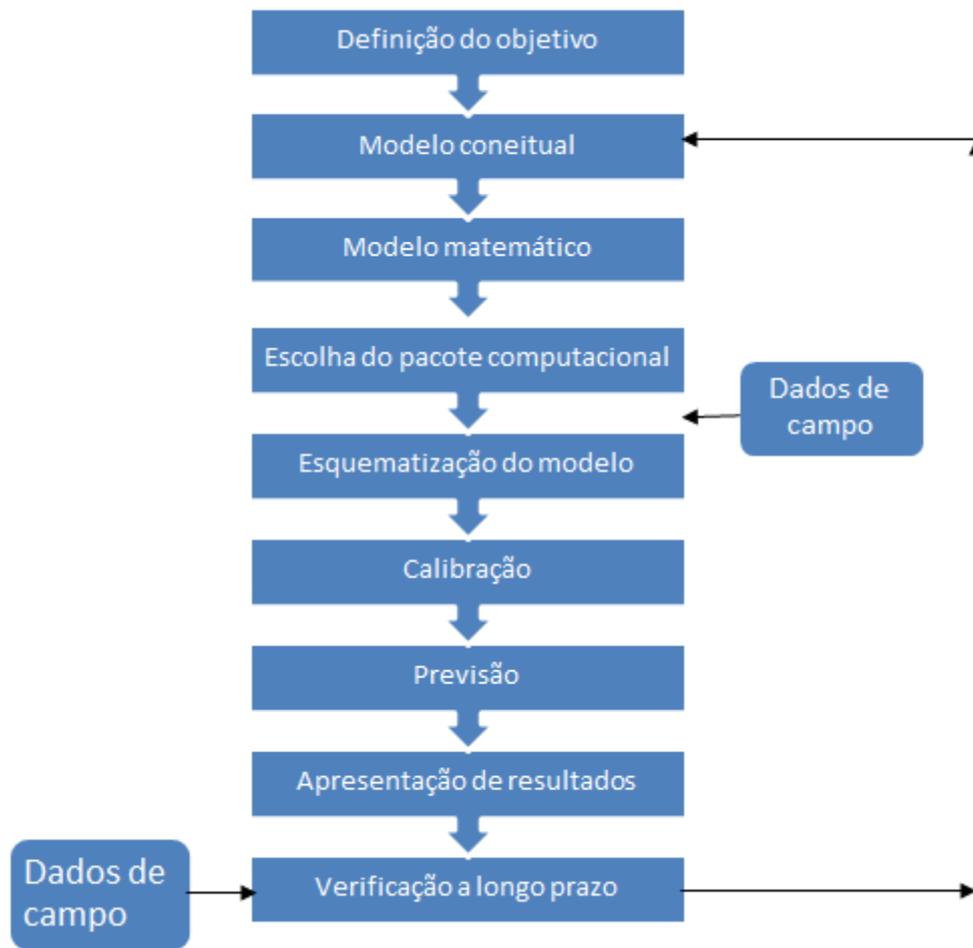
Segundo Feitosa *et al.* (2012), podemos classificar os modelos matemáticos em analíticos e numéricos. O primeiro usa soluções matemáticas deduzidas para situações simplificadas, um exemplo é um bombeamento transiente em um aquífero homogêneo e isotrópico. Porém na maior parte das vezes os aquíferos não são homogêneos e seus contornos não são polígonos retangulares, de modo que fica quase impossível obter uma solução analítica, surgiram então os métodos numéricos, em que as equações são resolvidas utilizando técnicas de aproximações numéricas.

Os modelos matemáticos aplicados na hidrogeologia podem ser classificados também de acordo com os critérios seguintes:

- Quanto à variação no tempo:
 - permanente – as cargas hidráulicas não variam com o tempo; e
 - transiente – as cargas hidráulicas variam com o tempo.
- Quanto a probabilidade de ocorrências:
 - determinísticos – os eventos não dependem da teoria das probabilidades; e
 - estocásticos – atribui uma probabilidade de ocorrência a cada evento.
- Quanto às equações:
 - linear – pode ser aplicado o princípio da superposição; e
 - não linear.

Diversas etapas são envolvidas na modelagem do aquífero, onde a simulação computacional é apenas um dos passos, que são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Etapas para a modelagem computacional.



Fonte: Adaptado de Feitosa *et al.* (2012).

Modelo conceitual: na sua elaboração procura-se determinar a geometria do sistema, desde suas camadas geológicas, seus contornos, suas interconexões hidráulicas, até suas recargas e bombeamentos.

Escolha do modelo computacional: depois da formulação matemática do problema deve-se escolher o pacote computacional a ser utilizado. Existem no mercado vários pacotes de fácil interação com o usuário.

Esquematização do modelo: abrange as atividades de escolha de como discretizar o problema, da seleção do intervalo de tempo de simulação, das condições de contorno, da seleção inicial dos parâmetros do aquífero e da verificação das recargas e bombeamentos.

Calibração: é o ajustamento dos parâmetros do modelo para produzirem as cargas hidráulicas e fluxos observados em campo.

Previsão: disponibiliza a resposta para entender o funcionamento do sistema aquífero submetido a futuros bombeamentos e recargas.

Verificação em longo prazo: é importante que se continue monitorando os aquíferos, fazendo simulações, ao longo do tempo, à medida que novos dados de campo sejam obtidos, corrigindo assim, as modelagens anteriores.

Para resolver a equação geral do fluxo subterrâneo, é necessário conhecer as condições de contorno, e para o caso transiente é necessário também conhecer as condições iniciais. A determinação das condições de contorno é um passo crítico, pois uma má determinação pode levar a sérios erros na solução do problema (FEITOSA *et al.*, 2012).

Segundo Paiva (2009), existem diversos métodos numéricos para resolver as equações diferenciais parciais que regem o problema: Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF), Método de Elemento de Contorno (MEC), Método das Características, Modelos de Caminhamento Aleatório, Método de Diferenças Finitas Integradas, Método dos Volumes Finitos, Método dos Elementos Analíticos, são alguns deles, onde os mais conhecidos e mais usuais são os MDF e MEF. Os programas computacionais resolvem bem as equações, contudo, é necessário conhecer bem o modelo para evitar erros devido à utilização inadequada.

3. METODOLOGIA

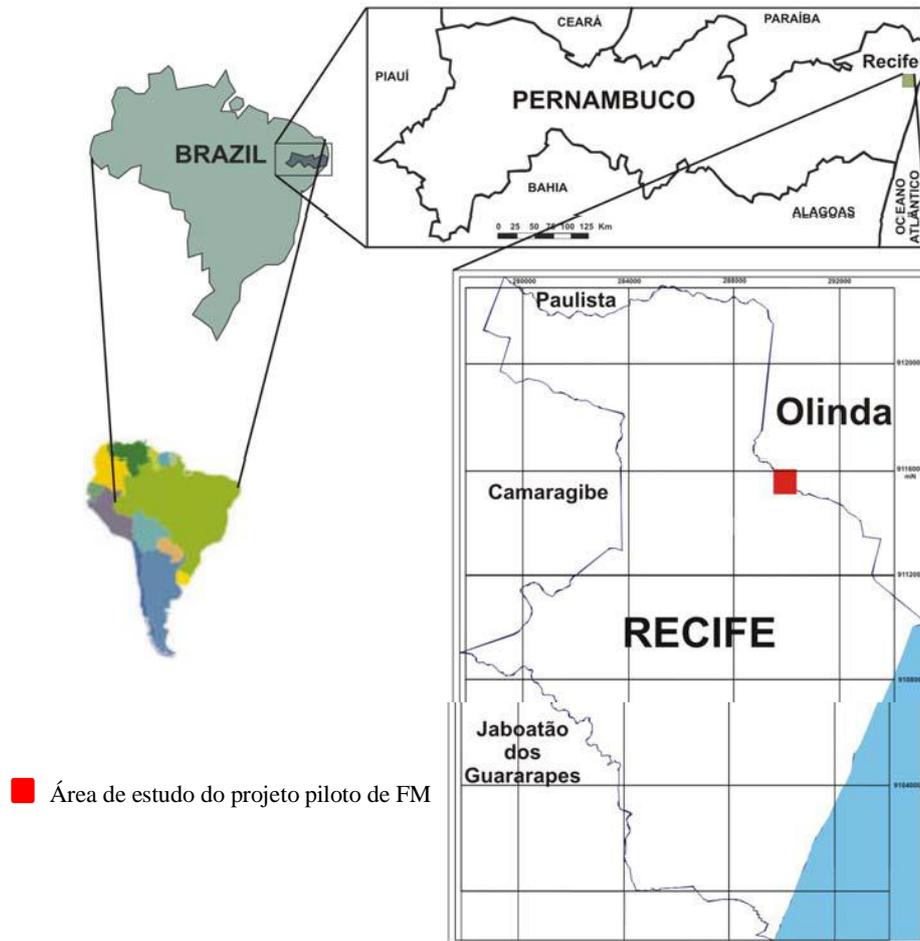
3.1 Avaliação das possíveis técnicas para medição dos parâmetros da zona hiporreica.

Foi feito um levantamento de algumas técnicas existentes para análise dos parâmetros da zona hiporreica, para ter conhecimento em que situações essas técnicas são aplicadas, e em quais elas não são bem adaptadas.

3.2 Caracterização da área de estudo

A área experimental do presente estudo encontra-se situada na Bacia Hidrográfica do Rio Beberibe, na Região Metropolitana de Recife (RMR), na divisa entre Olinda e Recife, limitada pelas coordenadas UTM 9115500 m a 9116000 m Norte e 289500 m a 290000 m Leste, MC -33° datum SAD69 (Figura 5).

Figura 5 - Localização da área da pesquisa (em vermelho).



Fonte: Paiva (2009).

O projeto piloto de Filtração em Margem foi desenvolvido nas margens do rio Beberibe, na Estação Elevatória de Caixa d'Água, que é propriedade da COMPESA (Companhia de Saneamento de Pernambuco), instituição que apoia esta pesquisa. Essa Estação Elevatória é situada no Bairro de Caixa d'Água na cidade de Olinda, sendo o rio Beberibe o divisor entre as cidades de Olinda e Recife, neste trecho da RMR.

A bacia hidrográfica do rio Beberibe é pertencente ao primeiro grupo de Bacias Hidrográficas Litorâneas do Estado de Pernambuco. A porção norte do citado grupo encontra-se inserida na microrregião da Mata Setentrional Pernambucana, abrangendo, ainda, toda a microrregião de Itamaracá e parte da microrregião do Recife.

A bacia do Beberibe encontra-se totalmente inserida na RMR com uma área de 75,45 km², onde esta área está distribuída nos municípios de Recife (64,51%), Olinda (21,29%) e Camaragibe (14,19%).

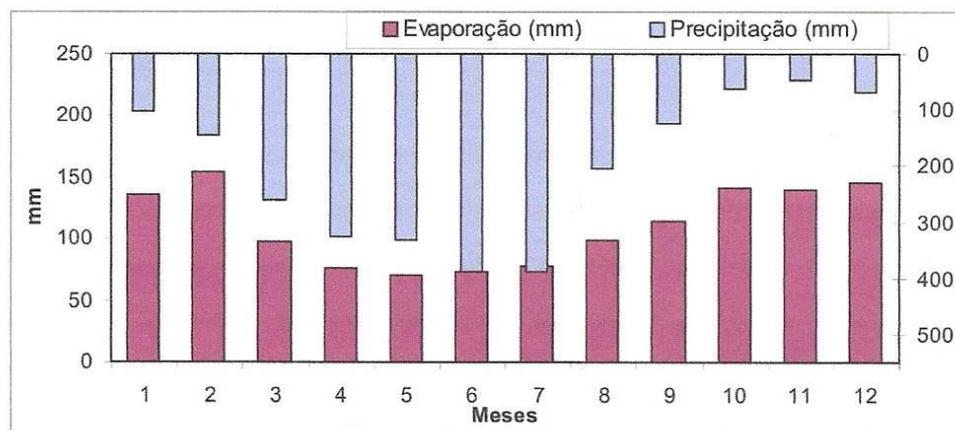
3.2.1 Clima

Foi utilizado uma série histórica de 30 anos, de 1961 a 1990 (INMET/3°DISME, 2003), para os dados de precipitação pluviométrica, evaporação, temperatura, umidade relativa e insolação, obtidos da Estação do Recife (Curado) que são apresentados na Figura 6.

Com média de 2.450,7 mm/ano, a precipitação pluviométrica mostra-se abundante em relação à região do Nordeste brasileiro, apresentando um período mais chuvoso que vai de março a agosto (seis meses), com valor máximo em julho (389,7 mm) e um período mais seco, de setembro a fevereiro (seis meses) com o valor mínimo em novembro (45,2 mm) e o valor médio mensal de 204,2 mm.

Para o total anual, a evaporação total chega à valores de 1.323,4 mm, superando a precipitação pluviométrica entre os meses de outubro a fevereiro, como se pode ver na Figura 6. Nota-se que o mês de fevereiro apresentou valor máximo de evaporação de 153,3 mm, sendo a média anual de evaporação de 110,3 mm.

Figura 6 - Médias mensais de precipitação e evaporação de 1961 a 1990 na Estação Meteorológica de Recife.

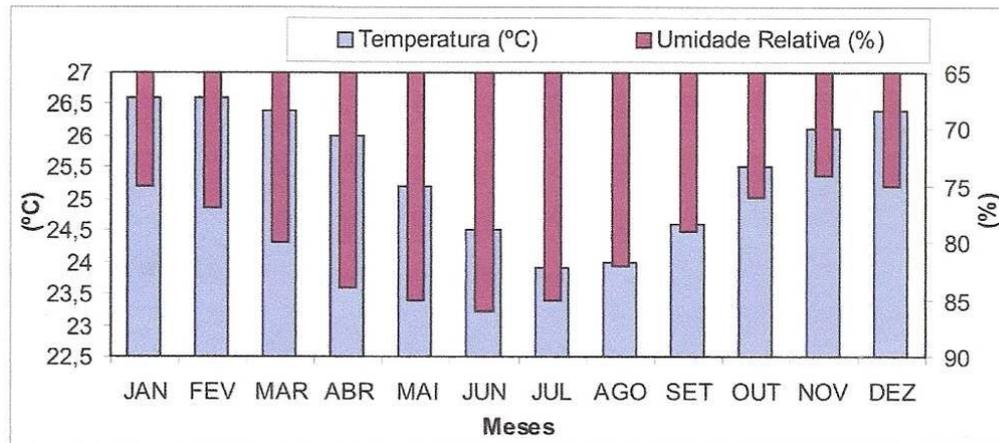


Fonte: (INMET/3ª DISME).

Para temperatura, o valor máximo médio mensal é de 26,6°C nos meses de janeiro e fevereiro, e média mínima mensal de 23,9°C no mês de julho, alcançando um valor médio anual de 26,6°C. O período mais frio inicia-se no mês de junho e alcança o valor mais baixo em julho (23,9°C). O período mais quente inicia-se em setembro, alcançando o auge nos meses de janeiro e fevereiro (Figura 7).

A umidade relativa do ar atinge um valor médio mensal de 79,8%. Este alto pode ser explicado pela proximidade da região com o oceano, recebendo as massas de ar úmido ali geradas e trazidas para a região costeira do continente (Figura 7).

Figura 7 - Médias mensais de temperatura e umidade relativa no período de 1961 a 1990 na Estação Meteorológica de Recife.

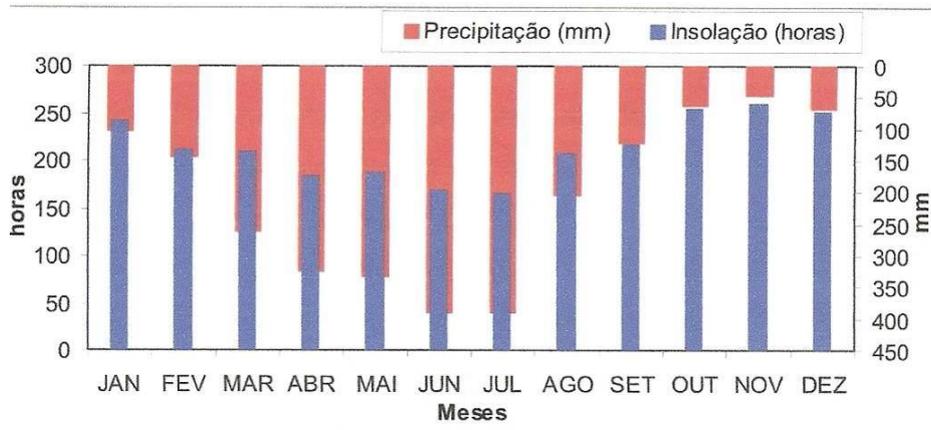


Fonte: (INMET/3ª DISME).

Um elevado valor é encontrado para a insolação total anual, de 2.556,4 horas. O valor máximo médio mensal foi observado no mês de novembro (260,9 horas) e valor mínimo médio mensal no mês de julho (165,4 horas) (Figura 8).

Uma forte correlação entre insolação e precipitação pode ser vista na Figura 8, onde os valores mais baixos de insolação coincidem com o período mais chuvoso e vice-versa. Observa-se também relação entre os valores referentes à insolação, evaporação e temperatura, em que os maiores índices de insolação coincidem com valores maiores de temperatura e conseqüentemente de evaporação.

Figura 8 - Médias mensais de insolação e precipitação de 1961 a 1990 na Estação Meteorológica de Recife.



Fonte: (INMET/3ª DISME).

3.2.2 Cobertura vegetal

A bacia do Beberibe apresenta duas porções bem distintas com relação à cobertura vegetal: a região à montante da BR-101, onde predominam as culturas em chácaras, sítios e granjas, encontrando-se ali resquícios da mata exuberante que constituía a vegetação original desta região; e a porção à jusante da BR-101, onde o processo de ocupação urbana tornou rarefeita a vegetação (PAIVA, 2009).

Os manguezais são encontrados em áreas restritas do litoral, isto é, nas reentrâncias da costa, nos contornos de baías, estuários outras regiões de águas pouco movimentadas (PAIVA, 2009).

Outros padrões vegetacionais identificados na bacia como os coqueirais, culturas de subsistência representam à vegetação cultivada, que substituiu a vegetação nativa (FREITAS, 2010).

No Norte e Leste da área de estudo, a região apresenta-se densamente urbanizada, sendo quase sua totalidade ocupada por edificações e ruas pavimentadas, com exceção da superfície formada pelos cursos de água e pequenas áreas verdes representadas por alguns parques e praças. No entanto, existem duas reservas ecológicas na direção Norte e Oeste, próximas a área de estudo: Mata de Passarinho, com 13,36 ha, e Mata de Dois Unidos, com 37,32 ha. Ambas são de domínio público/privado. Além disso, existem outros terrenos de grandes grupos econômicos, de modo que na redondeza da Estação Elevatória de Caixa d'Água há bastante área verde, incluindo os morros e as reservas ecológicas, que contribuem para uma boa recarga dos aquíferos da região.

3.2.3 Aspectos hidrográficos

A bacia do rio Beberibe, do ponto de vista hídrico, pode ser dividida em três compartimentos: o alto Beberibe, das nascentes até próximo 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 Morno até a foz conjunta com o Capibaribe. O principal critério para o dimensionamento desses compartimentos foi o da diversidade de relevo, com diminuição das cotas altimétricas para leste (PAIVA, 2009). Segundo o mesmo autor, a bacia do Beberibe representa cerca de 0,08% do estado de Pernambuco, possuindo uma área de drenagem de 81 Km². O rio Beberibe possui uma extensão de aproximadamente 19 km, desde a confluência com os rios Araçá e Pacas, pelos quais é formado, até a desembocadura no Oceano Atlântico. Em períodos normais, este rio é estreito, com largura em torno de 6 metros.

O segmento superior, com extensão de 7 km, vai da confluência dos seus formadores até a travessia sob a ponte da BR-101 Norte. Nos trechos próximos da BR-101 existem balneários naturais e pontos de lavagem de roupa, que são utilizados por moradores da região. Também ocorre a retirada comercial de areia do leito do rio e o uso da água para dessedentação de animais, irrigação e abastecimento doméstico.

O segmento médio do rio Beberibe, com extensão de cerca 3,5 Km, vai da BR-101 norte até o encontro com o rio Morno. Este trecho inclui a estação de bombeamento d'água da COMPESA (Companhia de Saneamento de Pernambuco), no bairro de Caixa d'Água, onde se localiza a área de estudo. No trecho inicial há predominância de sítios, com cultivos agrícolas e criação de animais e nos trechos seguintes a região torna-se mais densamente povoada, recebendo, em alguns pontos, despejos de esgotos domésticos e de lixo em suas margens.

O segmento inferior, com extensão de aproximadamente 8,5 Km que vai da confluência com o rio Morno até a foz é o mais crítico em termos de poluição: atravessa áreas densamente povoadas e recebe o deságue dos afluentes riacho Lava-Tripa, os canais do Vasco da Gama e da Malária e, ainda, despejos industriais. A partir daí o rio apresenta um quadro preocupante, pois se observa uma progressiva carga de poluentes domésticos e industriais.

3.2.4 Qualidade das águas superficiais

Com base no Decreto Estadual 11.760/86, em relação ao enquadramento dos cursos d'água, o rio Beberibe possui trechos com classe 1, 2 e 3, estando o trecho da área de estudo classificado como na transição das classes 2 e 3 (PAIVA, 2009). As classes 1 e 2 vão das nascentes do rio Beberibe, com afluentes, até a Estação Elevatória de Caixa d'Água. No

entanto, em 2005, uma nova resolução do CONAMA 357/05 trouxe diretrizes ambientais para o enquadramento de corpos d'água, sendo então no Estado de Pernambuco revogado os enquadramentos existentes até que seja aprovado novos enquadramentos para os rios em Pernambuco. Segundo o artigo 42 da Resolução CONAMA 257/05, enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, os rios de água doce ficam enquadrados como classe 2.

O rio Beberibe sofre impacto das seguintes atividades antrópicas: atividades industriais; atividades urbanas (esgoto doméstico, escoamento superficial); atividades agrícolas; desmatamento ciliar; construção de rodovias e pontes (escoamento pluvial); e lixões (PAIVA, 2009). Segundo o mesmo autor, a bacia do Beberibe possui 11 estações de amostragem da qualidade da água monitorados pela CPRH, algumas destas estações estão desativadas, restando cinco que mantiveram-se permanentemente inclusas na rede de monitoramento. Duas estações são de interesse maior para a área de estudo: BE 2- 11, na captação da COMPESA em Caixa d'Água onde ocorrem problemas de coliformes fecais, com pouco ou nenhum problema apresentado em relação a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e oxigênio dissolvido (OD); e BE 3-15, a jusante da Indústria Minerva S.A., antes de receber o afluente riacho Morno em Caixa d'Água, na rua Estepe, fundo da casa no 51, onde já ocorre problemas tanto para DBO, OD e coliformes fecais, extrapolando os limites de qualidade da água para as respectivas classes, nas quais estão enquadrando os trechos do rio na bacia.

3.2.5 Geologia e hidrogeologia

O Grupo de Pequenas Bacias Litorâneas - GL1 está situado predominantemente sobre rochas sedimentares da bacia Pernambuco-Paraíba e rochas do embasamento cristalino. A Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba, de idade Terciária apresenta-se, estruturalmente, com o embasamento cristalino mergulhando suavemente para leste, constituindo uma faixa continental de largura média em torno de 20 Km ao longo de todo o litoral norte da RMR, estreitando-se quase que abruptamente nas proximidades do Lineamento Pernambuco e abrange a unidade litoestratigráfica: Formação Beberibe do Cretáceo Superior.

A formação Beberibe é composta de uma sequência essencialmente arenosa, com uma espessura média de 200 m, em geral sem fósseis, constituindo-se de arenitos friáveis, cinzentos a cremes, mal selecionados, com componentes argilosos. Na base podem aparecer leitos conglomeráticos e intercalações de níveis argilosos, enquanto no topo predominam os arenitos médios a finos (PAIVA, 2009). Ainda segundo o mesmo autor, estes arenitos calcíferos representam uma fácies litorânea marinha e aparecem apenas em subsuperfície,

constituindo-se no Beberibe Superior, enquanto a seção inferior, de caráter arenoso, com algumas intercalações de silte e argila, denomina-se de Beberibe Inferior e apresenta-se como o principal aquífero na RMR. Estas intercalações de silte e argilas têm espessura média de 10 m. Regionalmente, este nível siltico-argiloso, funciona como aquífero, separando os dois subníveis e condicionando um comportamento de semi-confinado para o nível inferior. Acima da camada terciária localiza-se a formação Barreiras que compõe a cadeia de morros de Olinda e Recife e as camadas de aluvião nos vales dos cursos d'água.

3.2.6 Uso e ocupação do solo

O rio Beberibe está inserido no centro da RMR, entre os núcleos de Olinda e Recife, onde se originou a urbanização desde os tempos coloniais. Atualmente, o território da bacia do Beberibe reflete a diversidade dos aspectos físico-naturais peculiar à metade setentrional da RMR e reúne manifestações de degradação, resultantes do caráter permanentemente agressivo ao longo da história, do processo de ocupação do solo. Um ambiente extremamente artificial constitui grande parte da bacia do Beberibe, principalmente, a leste da BR-101, onde a maioria das áreas ribeirinhas e as encostas dos morros, encontram-se ocupadas por assentamentos espontâneos, favorecendo a ocorrência de áreas de risco de inundação e de movimentos de massa de solo (PAIVA, 2009).

Com 67% de seus domicílios situados em assentamentos espontâneos, a bacia do Beberibe, com cerca de 580.000 habitantes, apresenta a maior concentração de assentamentos de baixa renda na RMR. Há uma alta densidade populacional (6.750 hab/Km²) e pequenos índices de atendimento em termos de infraestrutura urbana e de serviços públicos (IBGE, 2001).

O crescente número de graves problemas sociais e ambientais da bacia está diretamente relacionado a esse estilo de urbanização. Sejam pelos elevados índices de doenças endêmicas e infecto-contagiosas, sejam pelos deslizamentos de encostas e das inundações, fenômenos naturais, que se tornam riscos na medida em que o homem utiliza o ambiente de forma negligente ou ignorante (FREITAS, 2010).

3.3 Área experimental

3.3.1 Estação elevatória de caixa d'água

No terreno da COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento), mais precisamente na Estação Elevatória de Caixa d'Água foi desenvolvido o projeto piloto de FM nas margens do rio Beberibe (Figura 9).

Figura 9 - Estação Elevatória de Caixa d'Água, Olinda – PE.



Fonte: Freitas (2010).

A localização da área de interesse é mostrada na Figura 10 através de imagem satélite obtida pelo Google Earth, para uma melhor visualização da área do entorno da Estação Elevatória Caixa d'Água (área do estudo de caso). Como comentado anteriormente, a área de estudo fica próximo as Reservas Ecológicas Mata de Passarinho e Mata Dois Unidos. Também aparece em destaque a BR-101 como referencial, cortando a bacia do rio Beberibe. As imagens de satélites são do ano de 2007.

Figura 10 - Imagem satélite, com maior detalhe da localização da área de estudo.



Fonte: Paiva (2009).

A Estação Elevatória de Caixa d' água bombeia água para duas Estações de Tratamento de Água (ETA), Alto do Céu e Caixa d'Água. A água bombeada é obtida de poços profundos e de água superficial do rio Beberibe captada mais a montante da sua área.

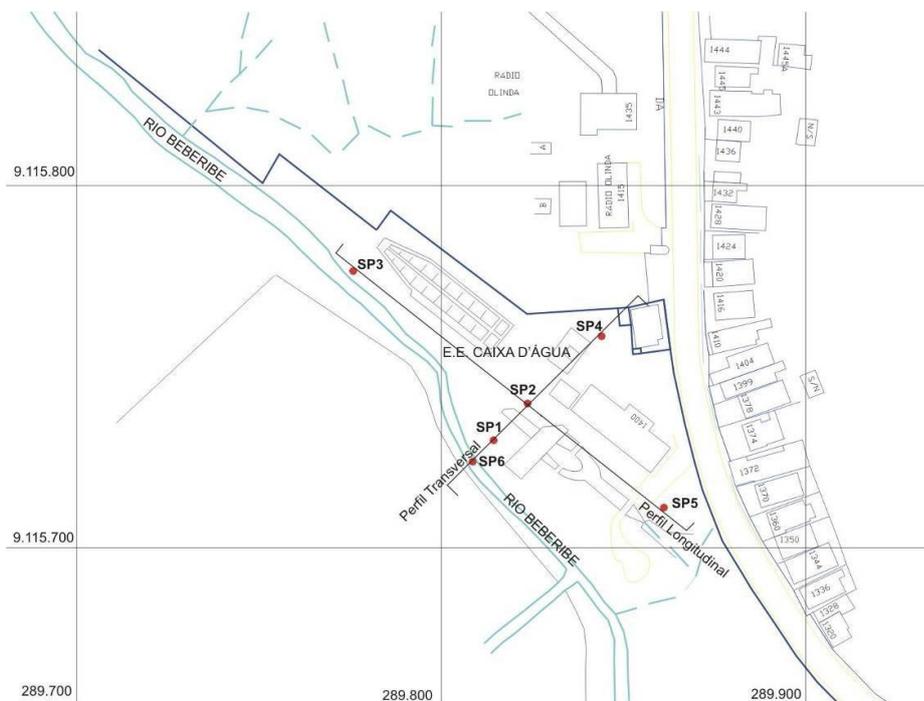
A área da Estação Elevatória de Caixa d' água foi escolhida para o desenvolvimento da pesquisa de FM no rio Beberibe por apresentar uma série de vantagens quanto à execução da mesma, por exemplo, o fato de o terreno ser de propriedade da COMPESA, incentivadora da pesquisa; segurança dos equipamentos instalados e realização dos trabalhos de campo; assim como fácil acesso ao rio Beberibe; formação sedimentar da área propícia à utilização de FM; além da possibilidade de incorporação da água advinda da FM ao próprio sistema de bombeamento da COMPESA.

3.3.2 Implantação do projeto piloto

Para dar início ao projeto piloto foi necessário buscar informações técnicas existentes sobre a área, tais como: dados hidrológicos, meteorológicos, geológicos e outras informações pertinentes para uma boa caracterização do local. Algumas dessas informações já foram apresentadas anteriormente na caracterização da área de estudo.

Segundo Paiva (2009), para buscar informações mais precisas sobre a geologia do local foram realizados 6 furos de sondagens (localização dos furos mostrados na Figura 11) por meio de sondagem à percussão para investigação do subsolo até a profundidade de 20 metros e com diâmetro de 4 polegadas (Figura 12), sendo um deles localizado no leito do rio com perfuração até 10 metros. Os furos foram realizados em outubro de 2007, com base nas informações das descrições litológicas de cada furo foi traçado uma seção vertical do subsolo no sentido transversal ao rio Beberibe e uma outra no sentido paralelo ao rio. Estas seções estão apresentadas na seção seguinte deste trabalho.

Figura 11 - Localização dos furos de sondagem na E. E. de Caixa d'água, Olinda – PE.



Fonte: Paiva (2009).

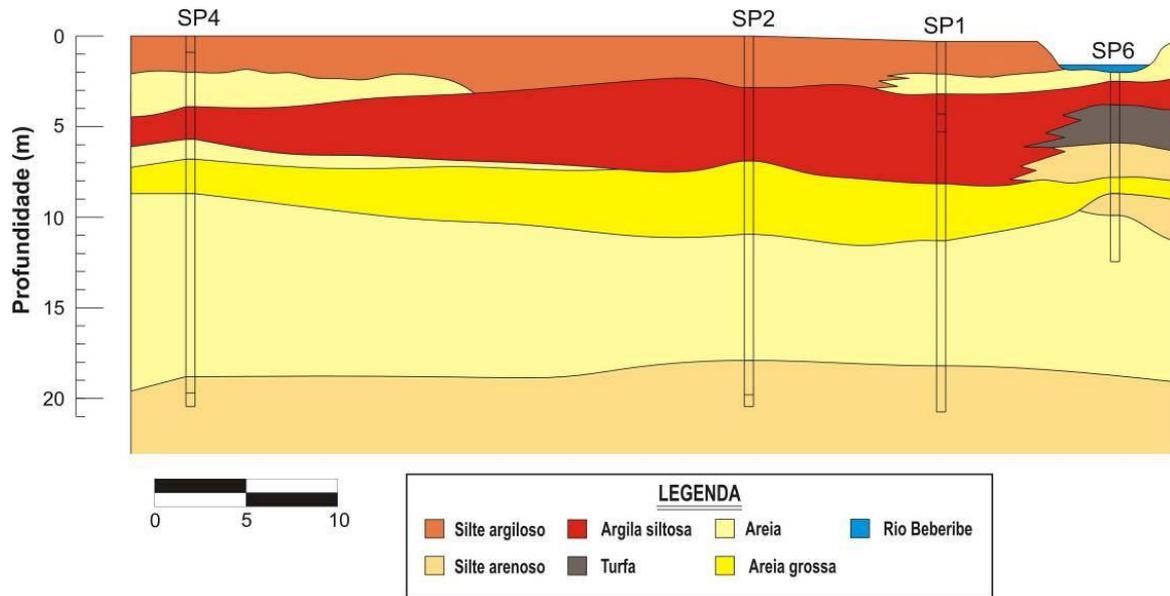
Figura 12 - Realização do ensaio SPT, para os furos de sondagens.



Fonte: Paiva (2009).

A partir das informações dos furos de sondagens SP4, SP2, SP1 e SP6 (leito do rio) foi estabelecida a seção transversal ao rio Beberibe (Figura 13). A seção inicia-se com material fino, silte-argiloso, graduando imediatamente para uma areia fina a média. Em seguida, há presença de um nível argiloso contínuo, argilo-siltoso (ao longo de toda a seção), com espessura variando entre 2 e 5 metros. Encontrando-se sob o leito do rio uma camada com turfa. Observa-se também sob a última camada argilosa uma camada com areia grossa contínua em toda a seção. (PAIVA, 2009).

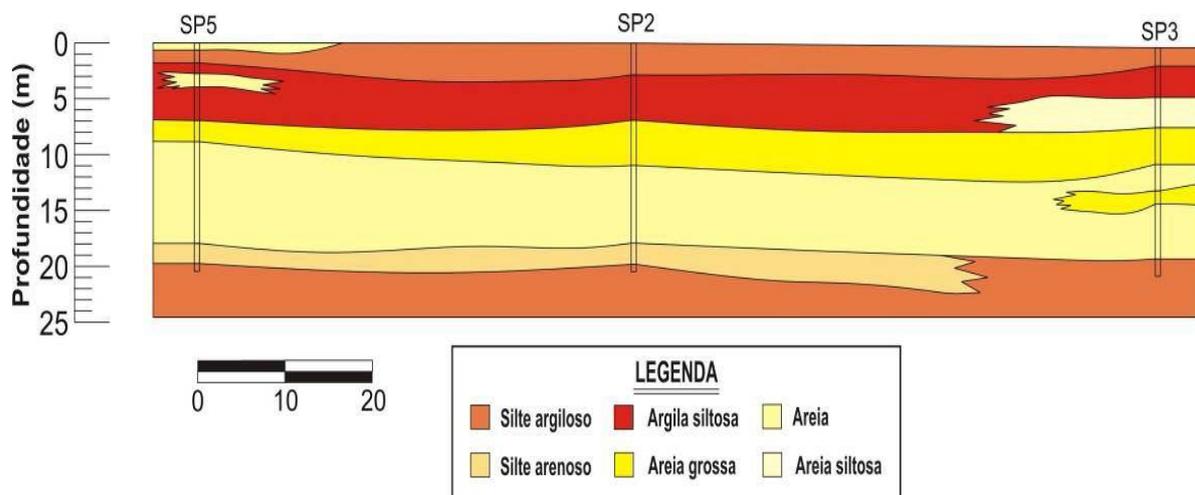
Figura 13 - Perfil Litológico Transversal ao rio Beberibe na E. E. de Caixa d'água, Olinda – PE.



Fonte: Paiva (2009).

A seção litológica paralela ao rio Beberibe foi constituída por meio dos furos SP5, SP2 e SP3, no trecho próximo a Estação Elevatória Caixa d'Água (Figura 14). De forma geral, esta confirma o padrão litológico estabelecido na área, evidenciando-se a alternância de material argiloso e arenoso, identificando e individualizando os diferentes níveis, inclusive o horizonte produtor (aquífero) (PAIVA, 2009).

Figura 14 - Perfil Litológico Paralelo ao rio Beberibe na E. E. de Caixa d' água, Olinda – PE.



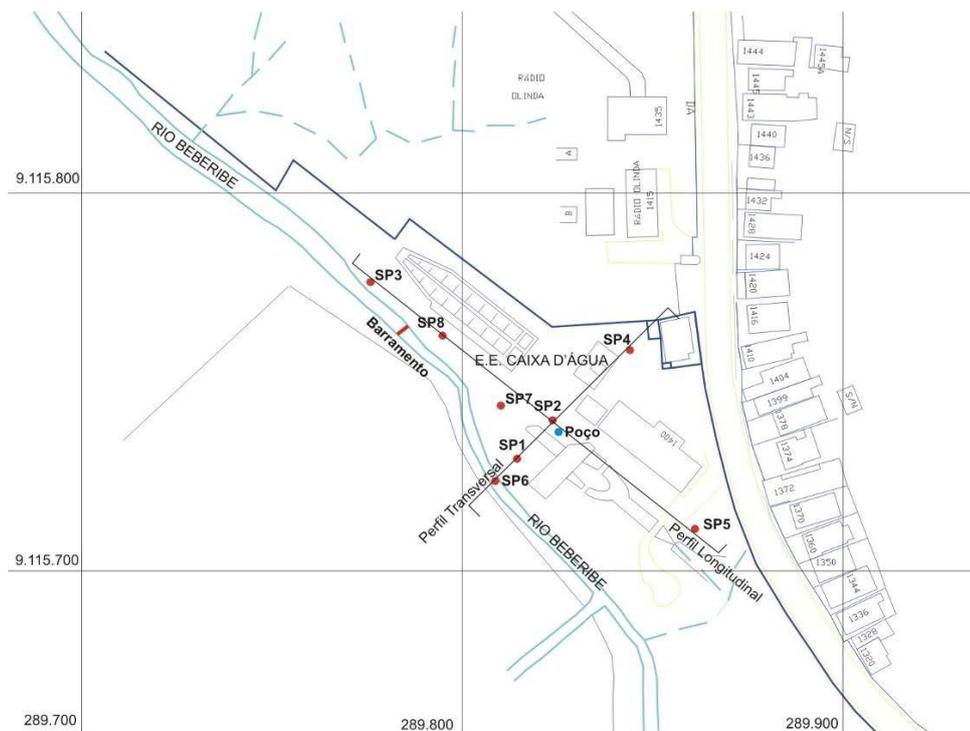
Fonte: Paiva (2009).

Ainda segundo o mesmo autor, logo após a conclusão dos furos de sondagem, os mesmos foram aproveitados como poços de observação. Para cada furo de sondagem foi

colocado tubo de PVC de 1 polegada com profundidade de 20 m, com o trecho de filtro iniciado a partir de 8 m, com ranhuras feitas a cada 10 cm ao longo de 10 m. Na parte superior do piezômetro foi colocada uma extremidade acima do solo protegida com tubo de aço de 1,20 m.

Vale salientar que posteriormente, foram feitos dois novos furos de sondagem (SP7 e SP8) em junho do ano de 2009, já com o poço de produção operante, os mesmos foram incorporados à bateria de poços de observação já existentes, possuindo a mesma configuração dos anteriores, porém com profundidades de 8 metros cada (Figura 15).

Figura 15 - Localização dos poços já existentes, dos novos poços de observação (SP7 e SP8) e do poço de produção na E. E. de Caixa d'água, Olinda – PE.



Fonte: Freitas (2010).

3.3.3 Implantação do poço de produção

Segundo Paiva (2009), Para escolha da localização do poço de produção, foi analisado as seções litológicas, e observado a existência de uma camada com características de areia média a grossa nas profundidades aproximadas de 6 a 10 metros. Com a camada de areia grossa haverá uma condução preferencial da água que infiltra-se do rio, sendo assim posicionou-se o filtro entre as profundidades de 7 e 13 m.

O poço de produção está localizado próximo ao furo de sondagem SP2, praticamente no centro da Estação Elevatória de Caixa d'água (Figura 15). A distância do poço de produção para o rio Beberibe é de aproximadamente 65 metros na direção do fluxo subterrâneo. O poço de produção tem 15 m de profundidade, diâmetro de 6 polegadas, tendo uma vazão média de 12,6 m³/h. Vale salientar que o poço de produção opera com regime de 24 horas de bombeamento sem interrupção.

3.4 Modelagem da área de estudo

3.4.1 Características do modelo

Segundo Paiva, Cabral & Freitas (2013), o modelo conceitual é constituído de três camadas, sendo a primeira a de menor permeabilidade, a segunda a de maior condutividade hidráulica e maior zona de captação, a terceira camada também contribui como zona de captação, porém com uma condutividade hidráulica mais baixa.

Além da precipitação em toda a área, a região em estudo sofre influências de recargas tanto do escoamento de base do rio, onde deve ocorrer a interação rio aquífero, quanto de áreas verdes. Com relação ao nível d'água, há uma pequena barragem de elevação de nível que ocasiona um desnível de cerca de 1,0 m nos níveis de montante e jusante do rio. Esta pequena barragem de elevação foi instalada pela COMPESA há algumas décadas quando se fazia a captação a fio d'água no rio Beberibe. Na região em estudo o rio tem uma largura de 4 m. As cotas do nível d'água no rio variaram para o período seco e chuvoso, trecho de jusante com cotas de -1,6 e -1,8 m, e trecho de montante com cotas de -0,3 e -0,8 m.

A área do modelo é de 260 m de comprimento por 116 m de largura, com uma profundidade de 18 metros, no centro da malha situa-se o barramento e o rio no centro paralelo ao comprimento.

3.4.2 Softwares utilizados na modelagem do estudo de caso

Dentre os diversos softwares disponíveis no mercado, foram escolhidos três para o presente estudo, o Processing Modflow (PMWIN), o Visual Modflow e o GMS (Groundwater Modeling System).

Os softwares PMWIN e Visual Modflow utilizam para resolução das equações que regem o fluxo subterrâneo o código computacional MODFLOW, mundialmente aceito e utilizado. O MODFLOW é um sistema de modelo tridimensional que utiliza o método de diferenças finitas publicado pela U. S. Geological Survey. A primeira versão pública do

MODFLOW foi lançada em 1988 e é referenciado como MODFLOW-88 (CHIANG, 2005). As aplicações de MODFLOW-88 para descrever e prever o comportamento de sistemas de fluxo subterrâneo aumentaram significativamente ao longo dos últimos anos, em parte devido a um gama códigos adicionais que foram desenvolvidos, tais como programas de estimativa de parâmetro e modelos de transporte de soluto, e parcialmente devido à disponibilidade de vários softwares de interfaces gráficas de fácil utilização.

A versão mais recente do MODFLOW-2000, segundo Chiang (2005), tenta incorporar a solução de várias equações relacionadas em um único código. Para atingir o objetivo, o código divide-se em entidades chamadas de processos. Cada processo trata de uma equação específica. Por exemplo, o processo de fluxo de águas subterrâneas (GWF) lida com as equações do fluxo de águas subterrâneas. O processo de observação (OBS) calcula valores que devem ser comparados com os mesurados em campo. O processo de estimativa de parâmetro (PES) busca encontrar os valores ideais dos parâmetros.

Embora os processos como OBS e PES permitam desenvolver uma calibragem do modelo satisfatória para o MODFLOW, haverá situações específicas que é preferível calibrar o modelo utilizando pacotes externos de estimativa de parâmetro como o PEST- ASP. Os pacotes são integrados com o MODFLOW, cada pacote lida com uma técnica particular para resolver equações das características específicas do modelo hidrológico, como por exemplo, o PMPATH que realiza rastreamento de partículas para mostrar as linhas do fluxo subterrâneo como também a sua velocidade.

O PMWIN é um programa ambiente Windows, foi escolhido pela fácil disponibilidade, pois é um software gratuito, porém é mais simplificado. O mesmo apresenta visualização de resultados apenas em 2D, suporta vários pacotes, permite sobreposição de mapas em Autocad (.dxf), permite facilmente o refinamento da malha do modelo, como também a colocação de parâmetros diretamente em cada célula da grade do modelo.

O Visual Modflow é um dos softwares bem conhecidos mundialmente, é mais sofisticado do que o PMWIN, apresentando visualização dos resultados em 2D e 3D, porém é um software comercial. Também permite a utilização de pacotes adicionais, possuindo uma interface gráfica de fácil utilização, que é dividida em três seções, Entrada, Execução e Saída. optou-se por este, por tê-lo disponível no Grupo de Recursos Hídricos da UFPE.

O GMS é um software ambiente Windows, permite a criação do modelo utilizando ligação direta com ArcGis, utilização de arquivos do Autocad, também tem visualização em 2D e 3D, é um software comercial. Utiliza ambos os métodos de elementos finitos e diferenças finitas, e possui incorporado os modelos MODFLOW 2000, MODPATH, MT3DMS,

SEAWAT, PEST entre outros. Também está disponível no Grupo de Recursos Hídricos da UFPE.

3.4.3 Discretização da área e dados de entrada

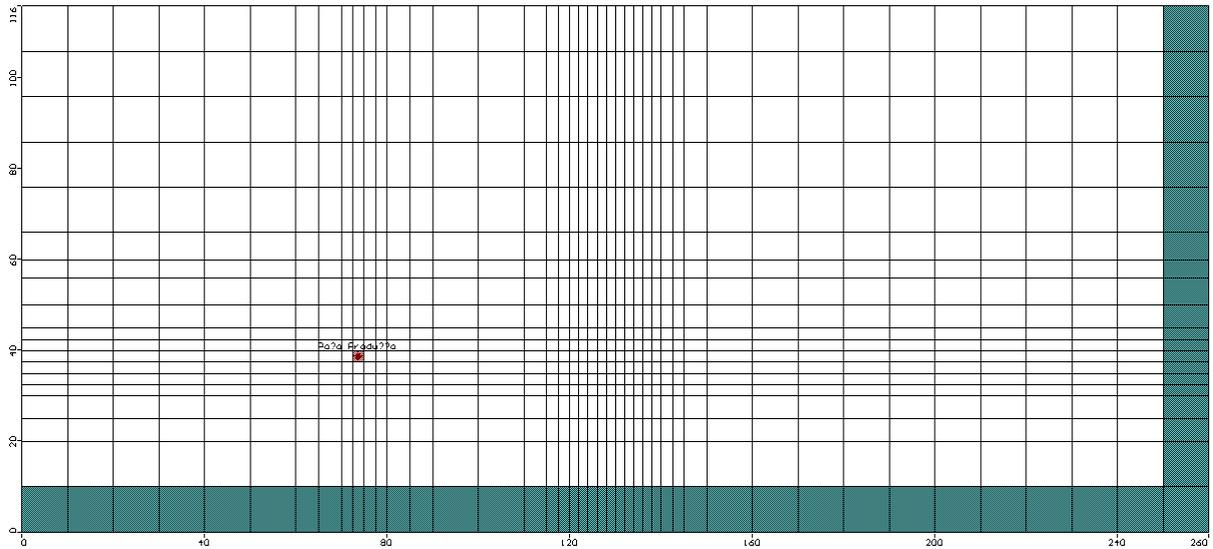
Foi criado um modelo da área de estudo para simulação computacional, para analisar o comportamento do fluxo subterrâneo, durante um período de 12 meses, com o poço de produção em operação.

Na modelagem foram consideradas as características da área de estudo anteriormente mencionadas, de forma a se obter uma aproximação razoável da realidade. As posições dos poços de observação, do poço de produção, como também do rio Beberibe, foram consideradas de forma a representar o ambiente simplificadamente.

A região modelada foi considerada de acordo com os perfis litológicos já citados, onde foram caracterizadas três camadas representativas, a primeira camada com cota superior igual a 0 e inferior igual a -6 m, a segunda com cota superior igual a -6 m e inferior igual a -9 m, e a terceira camada com cota superior igual a -9 m e inferior igual a -18 m. Porém, optou-se por subdividir a primeira e a última camada em duas subcamadas, aumentando assim a discretização, para uma melhor modelagem. A subdivisão das camadas foram feitas apenas para os softwares Visual Modflow e para o GMS, visto que o PMWIN é um software limitado, e só disponibiliza a utilização de três camadas em sua simulação.

Com relação à discretização da malha, inicialmente foi considerado células com tamanhos regulares 10 x10 m. Porém, optou-se por um refinamento em regiões que se julgou necessário uma melhor representação dos gradientes hidráulicos. Sendo assim, foi refinado em torno do rio, do poço de produção e do barramento existente no rio, chegando a uma configuração da malha com 19 linhas e 43 colunas. A seguir pode ser observada a configuração final da malha representada com o software Visual Modflow.

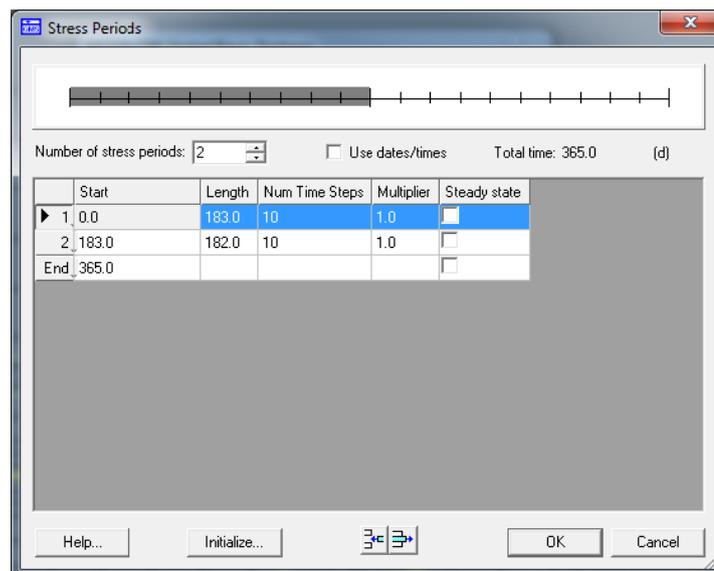
Figura 16 - Configuração final da malha (vista superior) por meio do Visual Modflow.



Abaixo da última camada é considerado o fluxo nulo, já nas laterais do modelo o Modflow assume implicitamente que não existe fluxo.

Com relação ao tempo de simulação, foi considerado um modelo de fluxo transiente, composto por dois períodos (Figura 17), um seco (0 a 183 dias) e um úmido (0 a 365 dias), onde cada um dos períodos foi dividido em 10 intervalos.

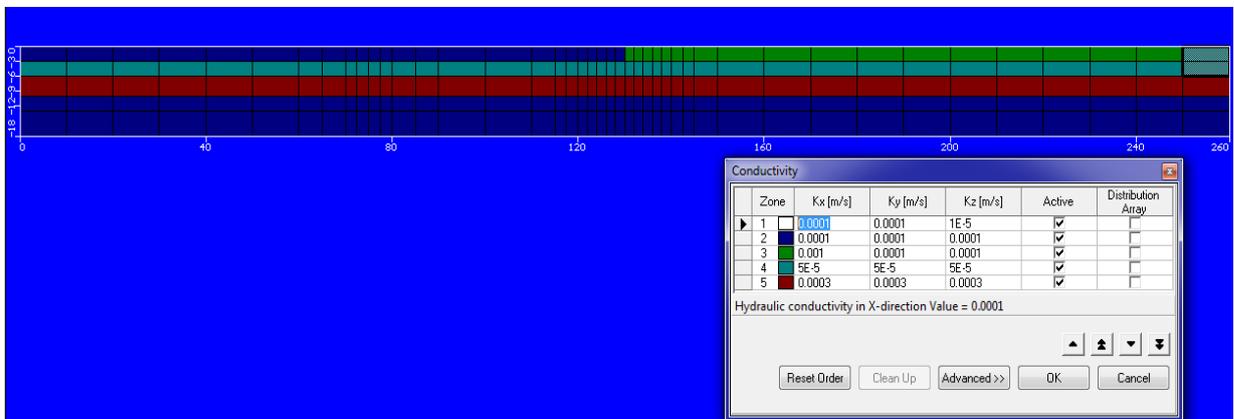
Figura 17 - Divisão do tempo de simulação em dois períodos utilizando o software GMS.



Os parâmetros de recarga, coeficiente de armazenamento, condutividade hidráulica, os do leito do rio, entre outros, foram retirados de estudos já realizados na mesma região por Paiva, Cabral & Freitas (2013).

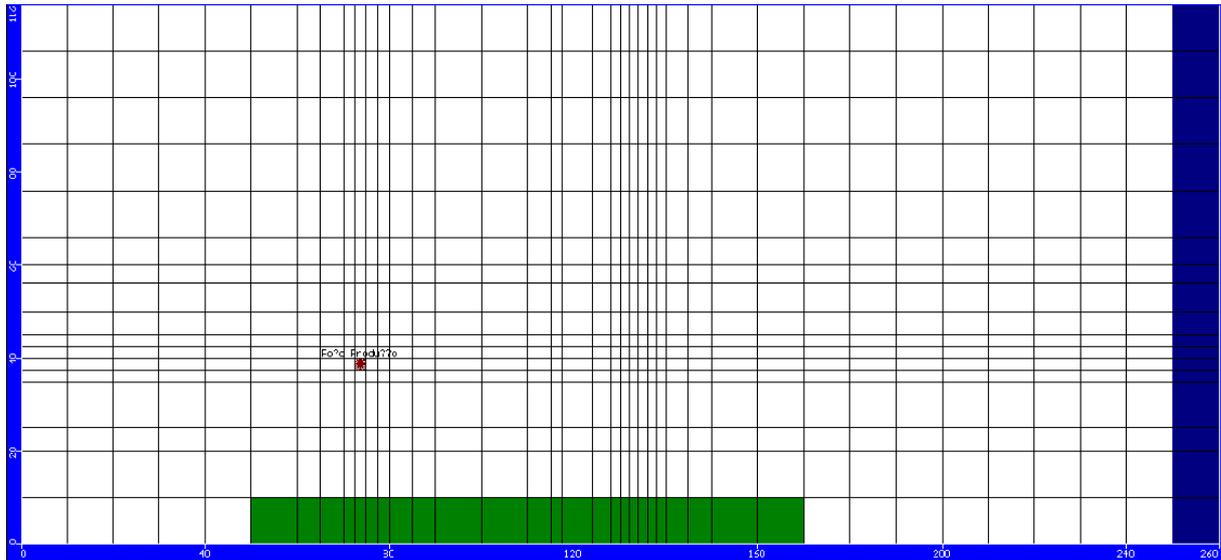
As camadas foram consideradas isotrópicas, onde na camada 1 a condutividade hidráulica foi de 1×10^{-4} m/s para sua primeira subcamada, e de 1×10^{-5} m/s para sua segunda subcamada, para a camada 2 foi considerado uma condutividade de 1×10^{-3} m/s e para a camada 3 a condutividade hidráulica foi de 1×10^{-4} m/s para suas duas subcamadas. Onde pode melhor ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 - Determinação das condutividades hidráulicas utilizando o software Visual Modflow.



Os valores de recarga considerados, foi de 218 mm/ano para o período seco e de 571 mm/ano para o período úmido. Além dessa recarga, foi considerada uma recarga adicional para representar as influências das zonas de áreas verdes com valores estimados de 25000 mm/ano na extremidade leste, e de 140000 mm/ano na extremidade sul, baseados em Paiva, Cabral & Freitas (2013). Essa recarga adicional foi colocada diretamente na segunda camada do modelo, com a utilização de células inativas na primeira camada, fazendo com que fosse melhor representado a influência dessas zonas de áreas verdes. A Figura 19 apresenta a configuração das zonas de recargas, onde as células em branco representam as recargas naturais, em azul temos a recarga de 25000 mm/ano e em verde temos a recarga de 140000 mm/ano.

Figura 19 - Configuração das zonas de recargas (vista superior) utilizando o Visual Modflow.



Os dados de campo, como por exemplo, as cargas hidráulicas dos poços de observação, foram retiradas do monitoramento feito no local, que foram apresentados por Paiva, Cabral & Freitas (2013), em estudos anteriores. As cargas hidráulicas iniciais foram de -1,15 m.

Quanto a posição do poço de produção, este foi inserido nas coordenadas, $X = 73,75$ m, e $Y=38,75$ m, ficando assim no meio da célula, e seu filtro foi colocado entre as cotas -6 e -13 m, possuindo uma taxa de bombeamento de $300 \text{ m}^3/\text{dia}$. Os poços de observação foram inseridos com a posição média do filtro na cota -13m, as coordenadas dos poços de observação e suas respectivas cargas hidráulicas observadas estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados dos poços de observação inseridos no modelo.

Poço	Coord. X (m)	Coord. Y (m)	Nível Potenc. (m)	
			Período seco	Período úmido
SP1	76,25	53,00	-1,63	-1,44
SP2	78,75	38,75	-2,11	-2,00
SP3	136,00	53,00	-0,67	-0,47
SP4	73,75	8,75	-1,20	-1,00
SP5	28,75	38,75	-1,45	-1,26

Foi considerado para o rio, dois trechos distintos, um antes do barramento e outro depois do barramento, onde os níveis potenciométricos variaram de -1,6 à -0,3 m no período

seco e de -1,8 à -0,8 m no período chuvoso. Como essa diferença de cota devido ao barramento é brusca, as duas células centrais no trecho do rio, que representa o barramento foram refinadas e essa diferença de nível foi suavizada com uma variação gradativa, de modo a evitar problemas numéricos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Apresentação e avaliação das possíveis técnicas para medição dos parâmetros da zona hiporreica.

Foram encontradas algumas técnicas que são apresentadas a seguir:

Medidas de nível de água e análise da rede de fluxo: neste método, uma combinação de medições de níveis de água nos poços perto da margem da água superficial e medições nos níveis de águas superficiais adjacentes são usadas para calcular os gradientes de carga hidráulica entre os poços e o corpo de água superficial.

Manômetro piezométrico e hidráulico: é uma sonda de unidade portátil ligada a um manômetro. O manômetro proporciona uma comparação entre o nível de um corpo de água superficial e a carga hidráulica abaixo do corpo de água superficial até uma profundidade em que a extremidade da sonda é colocada (ROSENBERRY & LABAUGH, 2008).

Medidores de infiltração: o medidor de infiltração é um dos dispositivos mais utilizados para fazer uma medição direta do fluxo de água através da interface água - sedimento.

Análise dos gradientes de temperatura: o calor flui continuamente entre águas superficiais e águas subterrâneas adjacentes, e, como consequência, proporciona uma oportunidade de usar o calor como traçador natural do movimento da água entre a superfície e os sedimentos subjacentes. A medição de gradientes de temperatura nos sedimentos é necessária para calcular a taxa de transferência de calor através do leito.

Corantes e traçadores testes: corantes e outros marcadores solúveis podem ser adicionados à água e, em seguida, "rastreados" para fornecer informação qualitativa direta sobre o fluxo de água subterrânea.

Segundo ROSENBERRY & LABAUGH (2008), as técnicas são bem ou mal adaptadas em situações que são resumidas no Quadro 1:

Quadro 1 - Condições ou situações em que cada método é bem ou mal adaptado.

Método	Bem adequado para	Mal adequado para
Medidas de nível de água e análise da rede de fluxo	<ul style="list-style-type: none"> -Quantificação em escala de bacia hidrográfica -Distinguir as áreas de entrada das áreas de saída -Determinar características dos aquíferos de grande escala. 	<ul style="list-style-type: none"> -Determinar o fluxo de algumas substâncias químicas que entram ou saem de um corpo de água superficial -Costas rochosas íngremes e (ou) onde a instalação de poços é difícil ou impossível
Manômetro potenciométrico e hidráulico	<ul style="list-style-type: none"> -Reconhecimento rápido para determinação qualitativa e noção de direção do fluxo -Determinar a variação de gradientes hidráulicos verticais com a profundidade 	<ul style="list-style-type: none"> -Costas rochosas ou rocha -Corpo de água de superfície com qualquer ação de onda apreciável -Água fluindo muito rápido Sedimentos ricos em gás orgânicos
Medidores de infiltração	<ul style="list-style-type: none"> -Medição direta do fluxo de infiltração -Distribuição real do fluxo de infiltração -Os sedimentos que variam de argilo-siltosos a cascalho médio -Configurações de águas calmas 	<ul style="list-style-type: none"> -Corpo de água de superfície com qualquer ação de onda apreciável ou correntes fortes e rápidas. -Sedimentos muito suave, de baixa densidade -Camas de sedimentos rochosos
Análise dos gradientes de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> -Determinar a taxa de fluxo vertical através de um leito de água superficial -Investigações de trocas entre córrego e água subterrâneas 	<ul style="list-style-type: none"> -Ambientes onde a instalação do equipamento é difícil -Áreas onde há altas vazões, pois pode ocorrer perda de equipamentos
Corantes e traçadores testes	<ul style="list-style-type: none"> -Determinar de forma qualitativa a direção do fluxo -Determinar o tempo de curso que as águas -Áreas onde se tem um conhecimento prévio de onde possivelmente pode ter troca de fluxo 	<ul style="list-style-type: none"> -Áreas onde não se tem conhecimento das possíveis zonas de troca de fluxos -Áreas onde a injeção de corantes é de difícil execução

4.2 Modelagem da área de estudo

Como já foi citado anteriormente o aquífero recebe recargas de zonas de áreas verdes. Foi necessário uma recarga adicional que foi colocada diretamente na segunda camada do modelo na extremidade sul e leste. Para esse fluxo adicional que chega no aquífero, foram

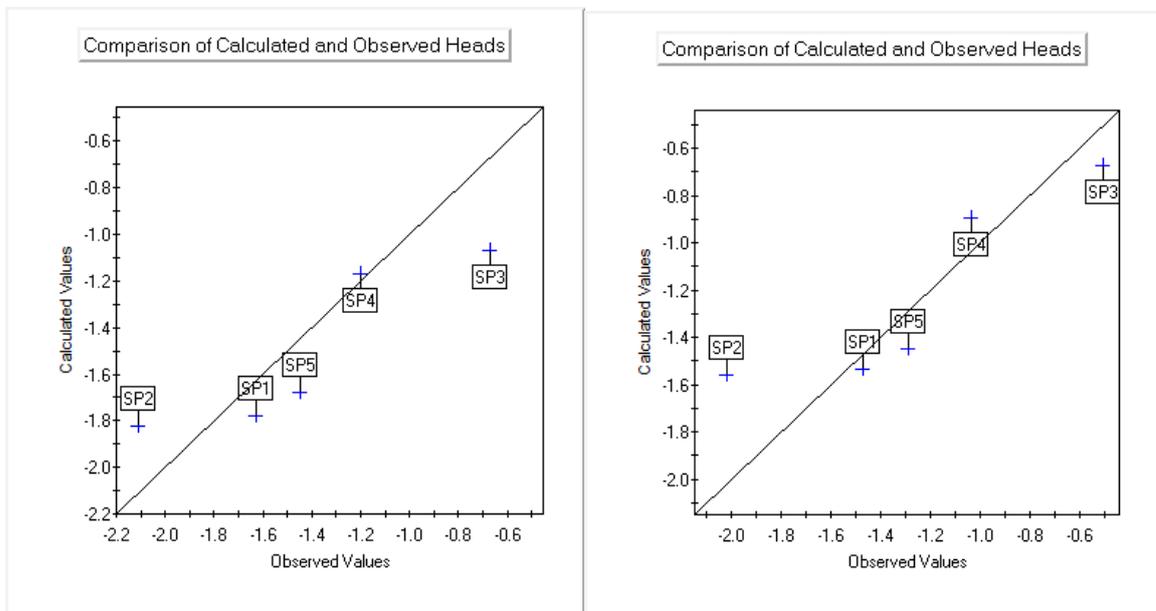
usados valores relativamente altos em relação à recarga uniforme da precipitação, para poder se aproximar do modelo observado em campo, representando o fluxo subterrâneo que alcança a área devido a zona de recarga.

A técnica de “tentativa e erro” foi utilizada para chegar na situação observada em campo, onde aumentou-se gradativamente o fluxo que chega das zonas de áreas verdes, até chegar em uma configuração aceitável. Ao final da calibragem com os três softwares, comparando-se os valores de cargas nos poços de observação com os calculados pelo modelo, obteve-se uma aproximação aceitável, comparados com o erro apresentado por Paiva, Cabral & Freitas (2013).

O erro observado foi da ordem de 0,4 m para o software PMWIN, onde o modelo apresentou para o primeiro período um rebaixamento um pouco superior nos poços SP1, SP3 e SP5 em relação ao observado em campo, e para o segundo período todos os valores calculados se apresentou abaixo dos valores observados.

Na Figura 20 são apresentados os valores calculados da última calibragem e os valores observados dos poços de observação com o software PMWIN.

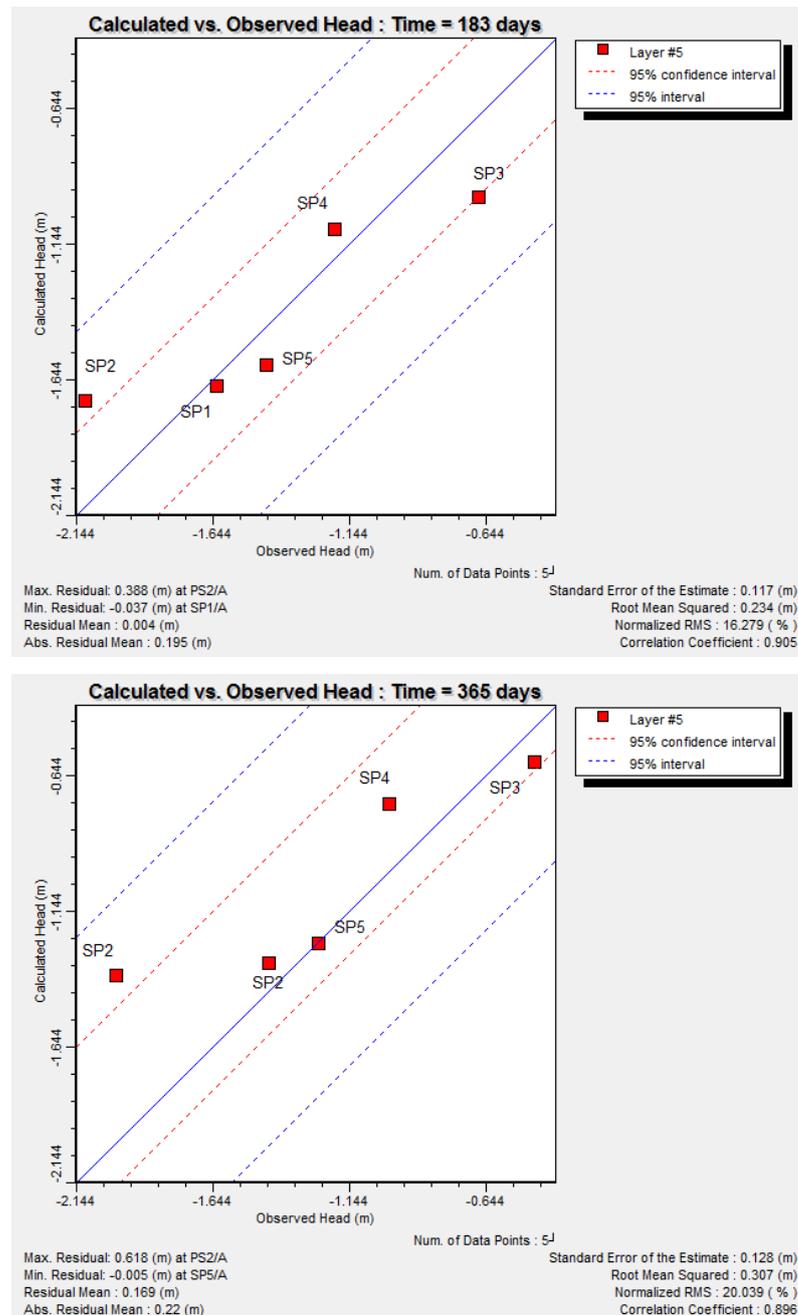
Figura 20 - Última calibragem do modelo computacional para o período seco (183 dias, imagem a esquerda) e o período úmido (365 dias, imagem a direita), com o PMWIN.



A simulação com o Visual Modflow chegou a resultados com erro da ordem de 0,6 m, na qual o rebaixamento do modelo também foi superior ao observado para os poços SP1, SP3 e SP5 no período de 183 dias. Já para o período de 365 dias esse rebaixamento do modelo se apresentou inferior ao observado em campo, exceto para o poço SP3. Na Figura 21 são

apresentados os valores calculados da última calibragem e os valores observados dos poços de observação com o software Visual Modflow.

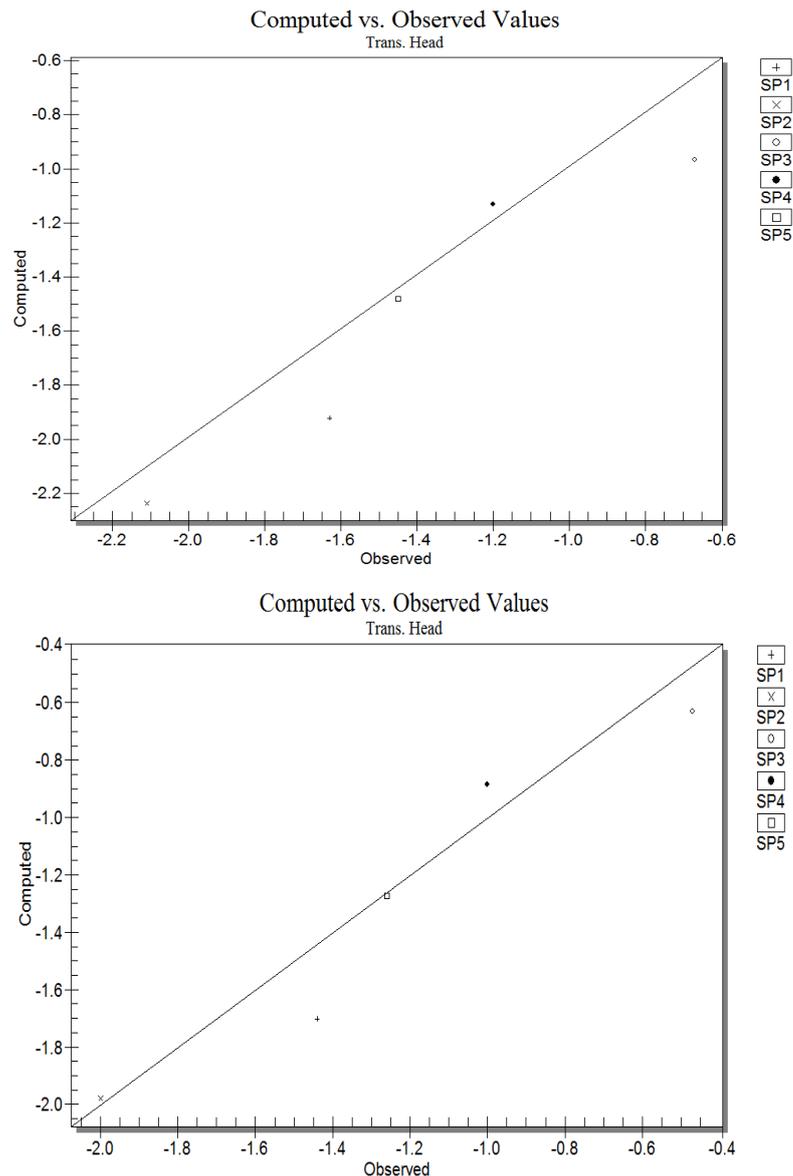
Figura 21 - Última calibragem do modelo computacional para o período seco (183 dias, imagem acima) e o período úmido (365 dias, imagem abaixo), com Visual Modflow.



Na Figura 22 são apresentados os valores calculados da última calibragem e os valores observados dos poços de observação com o software GMS, apresentando um erro da ordem de 0,3 m, onde podemos observar que para o primeiro período com exceção do SP4 os valores

calculados foram inferiores aos observados. Para o segundo período a situação foi praticamente a mesma, com uma variação do SP1 que se apresentou com valor calculado imediatamente superior ao observado.

Figura 22 - Última calibragem do modelo computacional para o período seco (183 dias, imagem acima) e o período úmido (365 dias, imagem abaixo), com PMWIN.



São apresentados nas Figuras 23, 24, 25 e 26 mapas potenciométricos das camadas 1 e 3 para o período seco e úmido com o software PMWIN, onde se observou que o fluxo se dá no sentido do escoamento do rio, com uma influência do fluxo das zonas de áreas verdes direcionado no sentido noroeste. Também foi verificado a contribuição do rio para a água bombeada pelo poço.

Em torno do poço de produção é verificado um rebaixamento acentuado do nível freático, onde no período seco em torno do poço se tem cotas inferiores a -2,0 m, para o período úmido chegou-se a cotas inferiores a -1,7 m.

Figura 23 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 1, com o PMWIN.

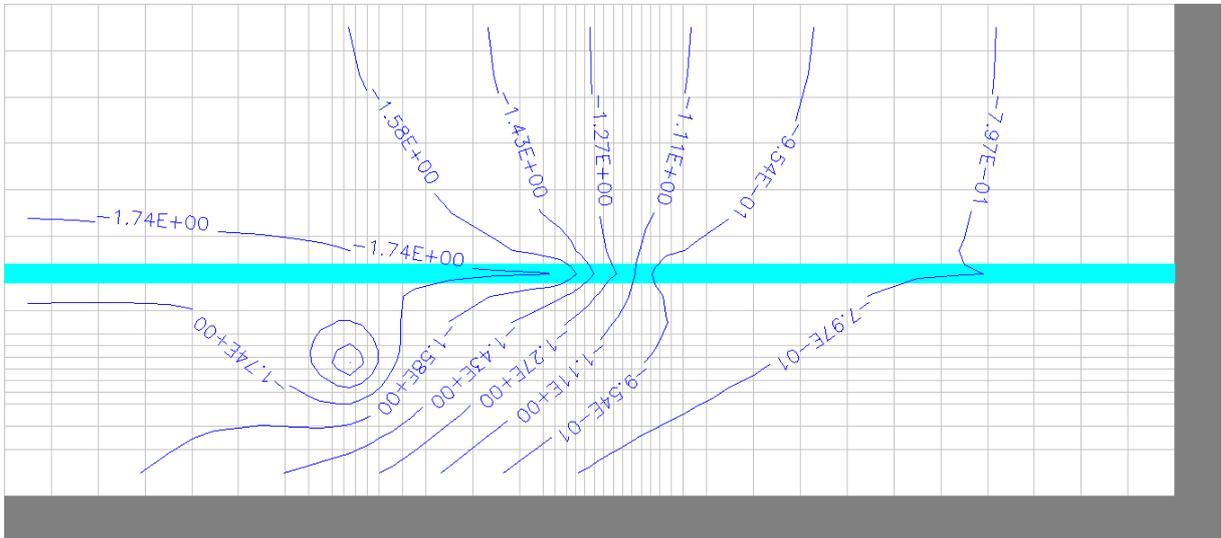


Figura 24 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 3, com o PMWIN.

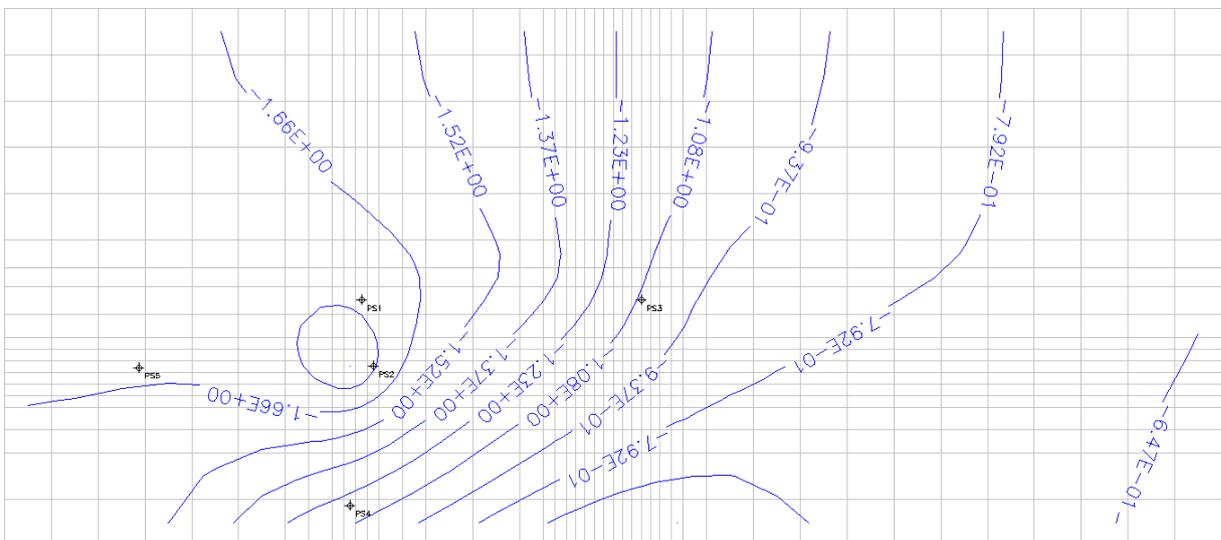


Figura 25 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 1, com o PMWIN.

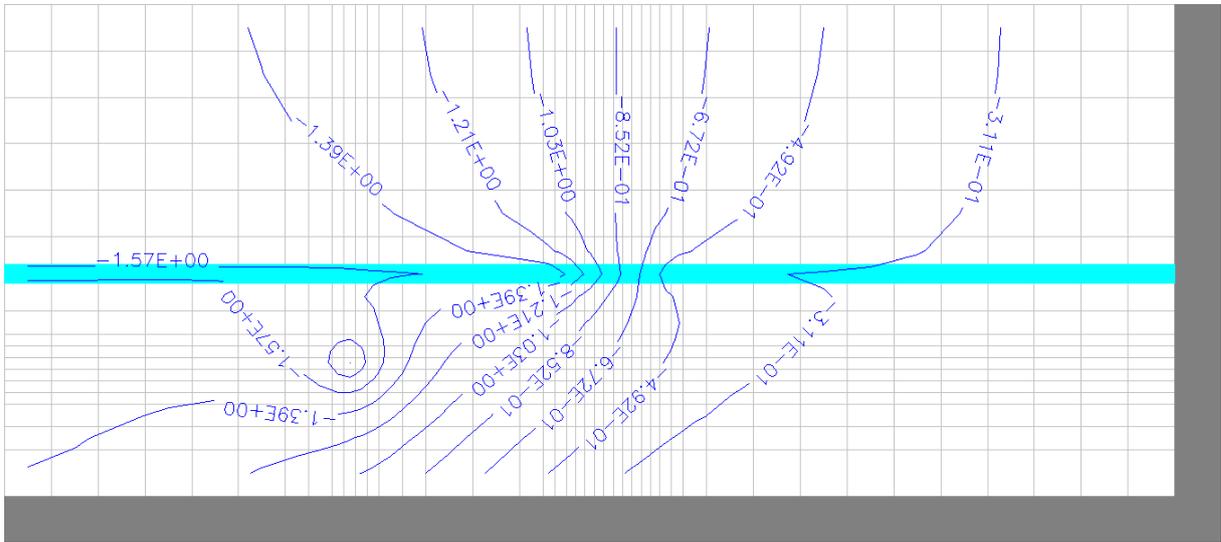
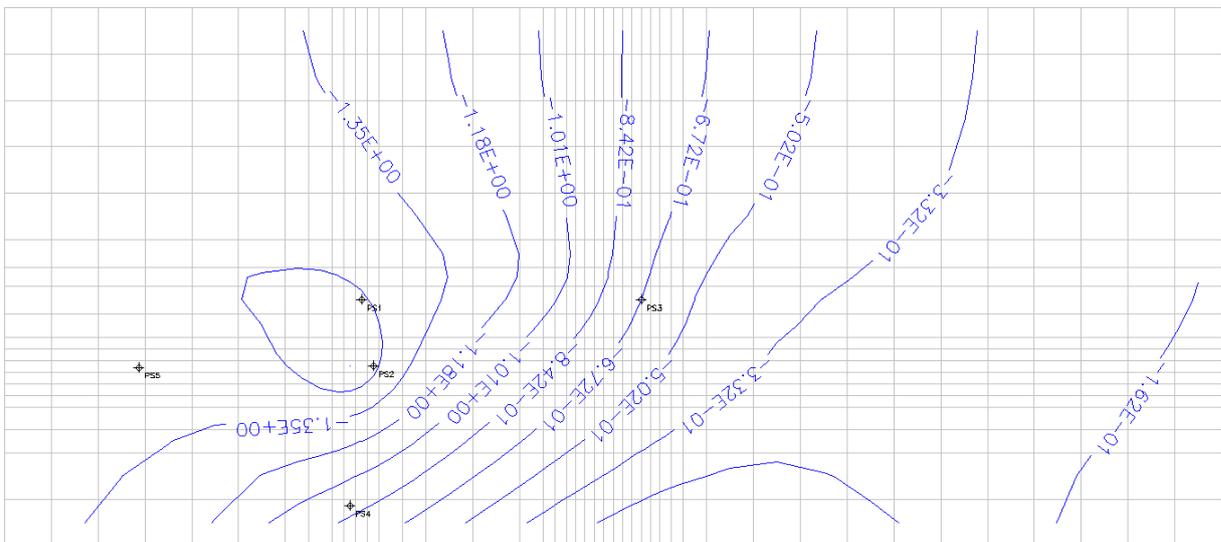


Figura 26 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 3, com o PMWIN.



Com a utilização do Visual Modflow, os mapas potenciométricos das camadas 1 e 3 para o período seco e úmido podem ser observados nas Figuras 27, 28, 29 e 30, onde também se observou que o fluxo se dá no sentido do escoamento do rio, sofrendo também influências do fluxo das zonas de áreas verdes direcionando o fluxo no sentido noroeste. Verificou-se também a contribuição do rio para a água bombeada pelo poço.

Em torno do poço de produção é visto um rebaixamento acentuado do nível freático, onde no período seco em torno do poço se tem cotas inferiores a -2,0 m, para o período úmido chegou-se a cotas inferiores a -1,6 m.

Figura 27 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 1, com o Visual Modflow.

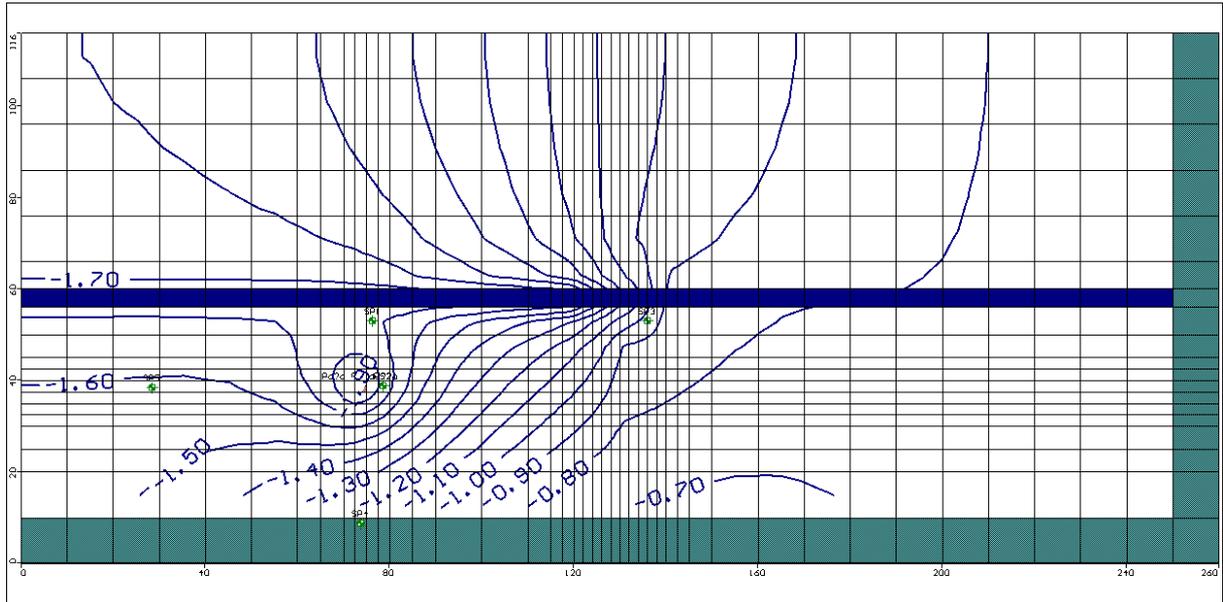


Figura 28 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 3, com o Visual Modflow.

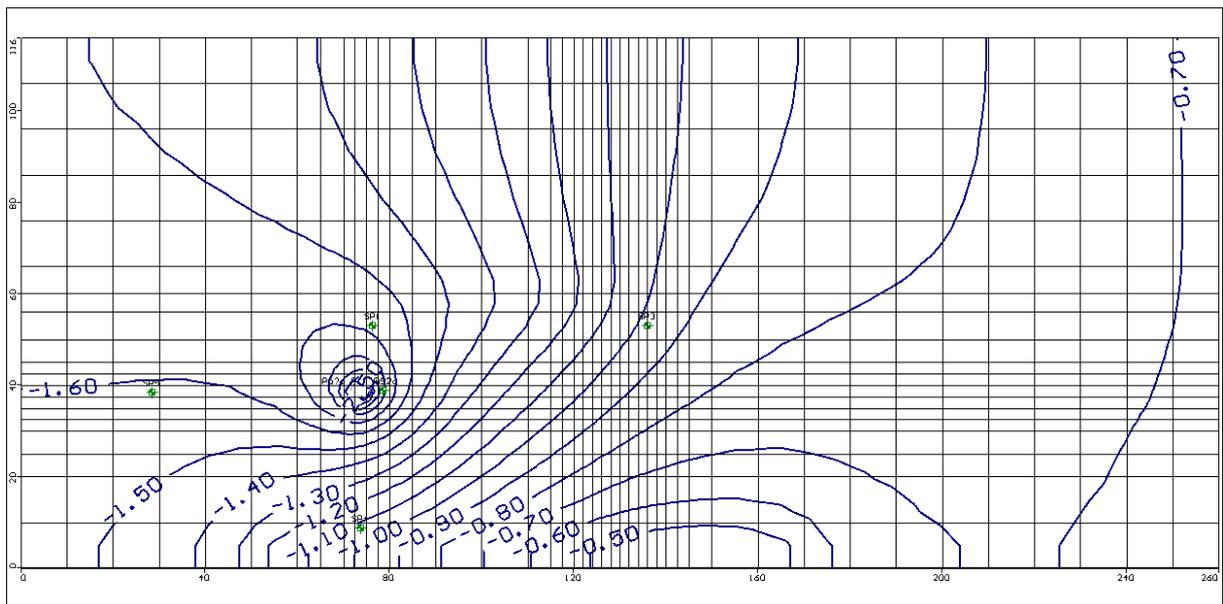


Figura 29 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 1, com o Visual Modflow.

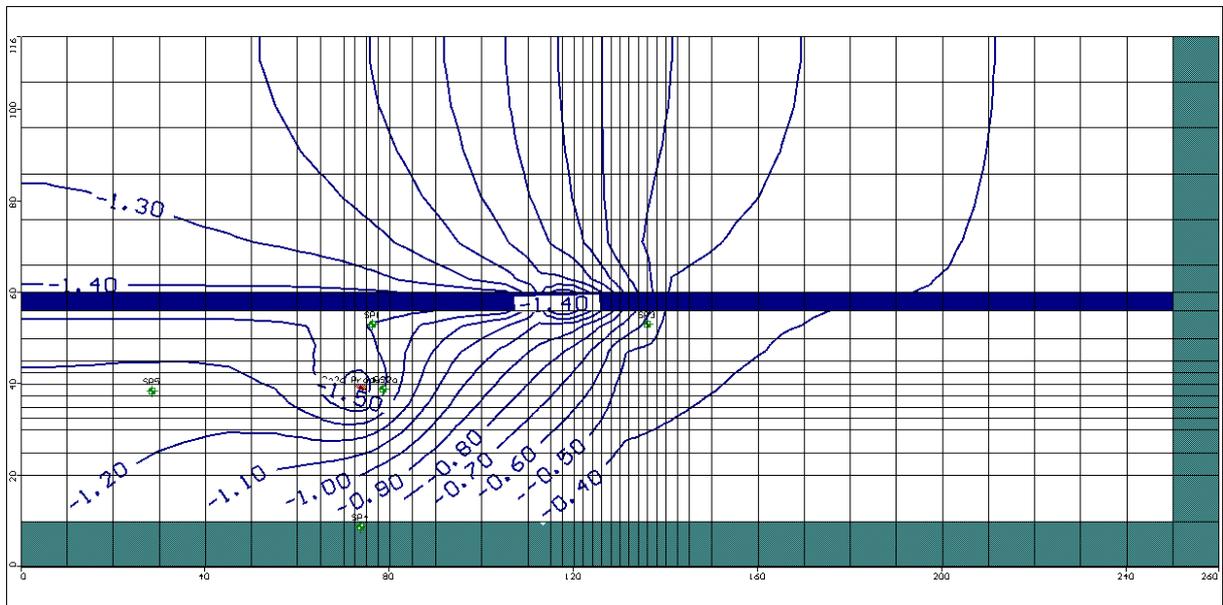
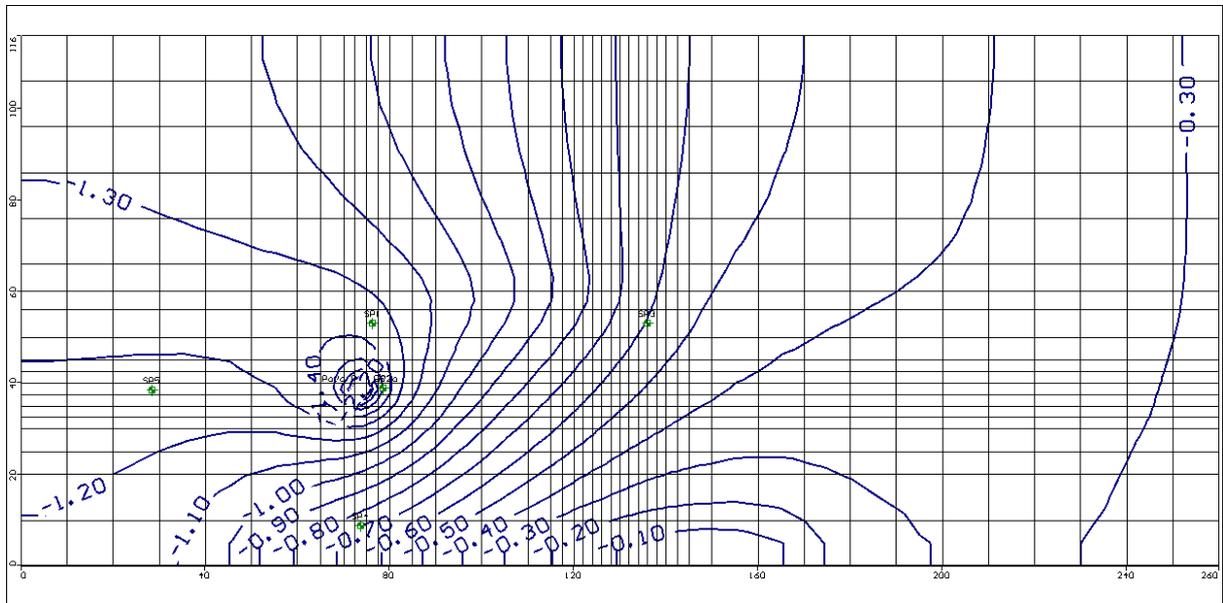


Figura 30 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 3, com o Visual Modflow.



Os mapas com as linhas de cargas das camadas 1 e 3 para o período seco e úmido gerados pelos software GMS podem ser observados nas Figuras 31, 32, 33 e 34, onde foi observado que o fluxo se comportou semelhante aos modelos anteriores.

Em torno do poço de produção é visto um rebaixamento acentuado do nível freático, onde no período seco em torno do poço se tem cotas inferiores a -2,3 m, para o período úmido chegou-se a cotas inferiores a -2,0 m.

Figura 31 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 1, com o Software GMS.

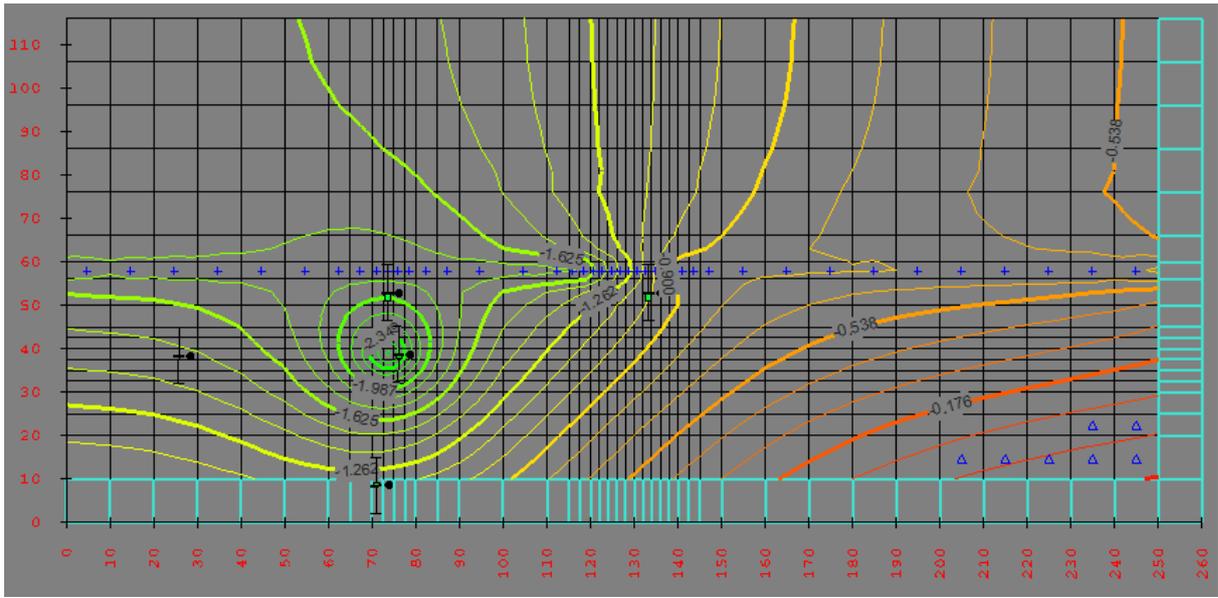


Figura 32 - Cargas hidráulicas em metros para o período seco (183 dias) da camada 3, com o Software GMS.

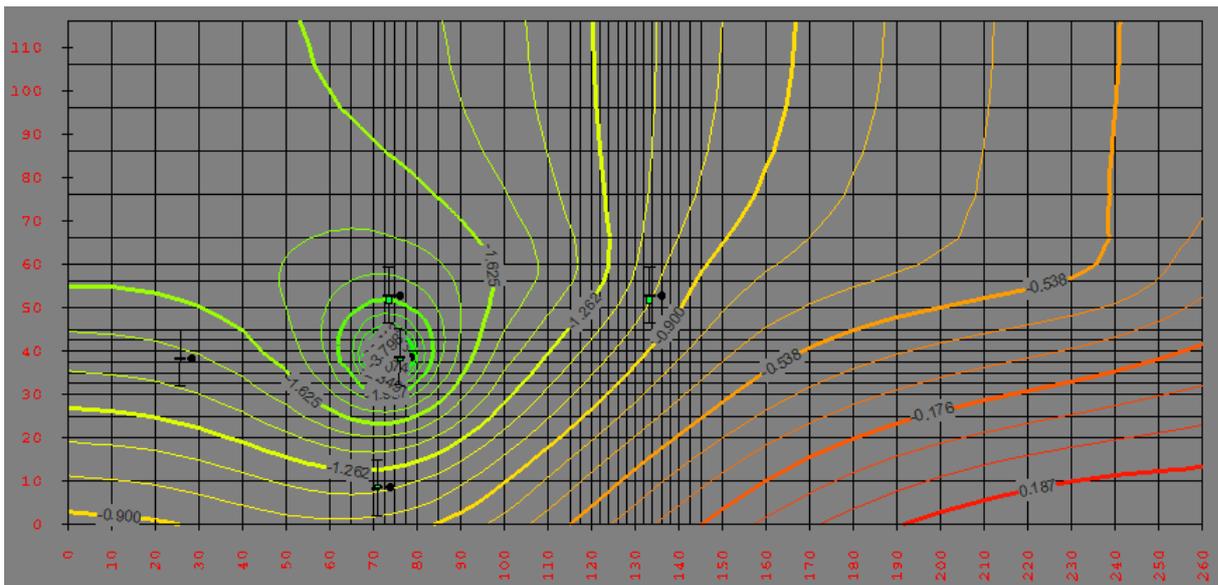


Figura 33 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 1, com o Software GMS.

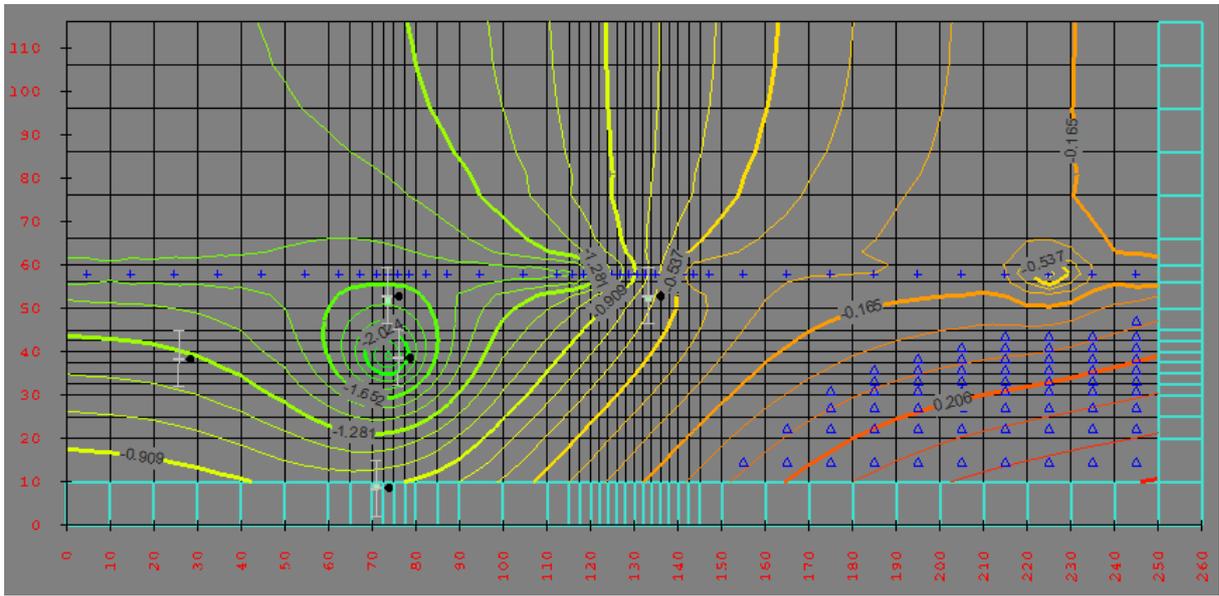
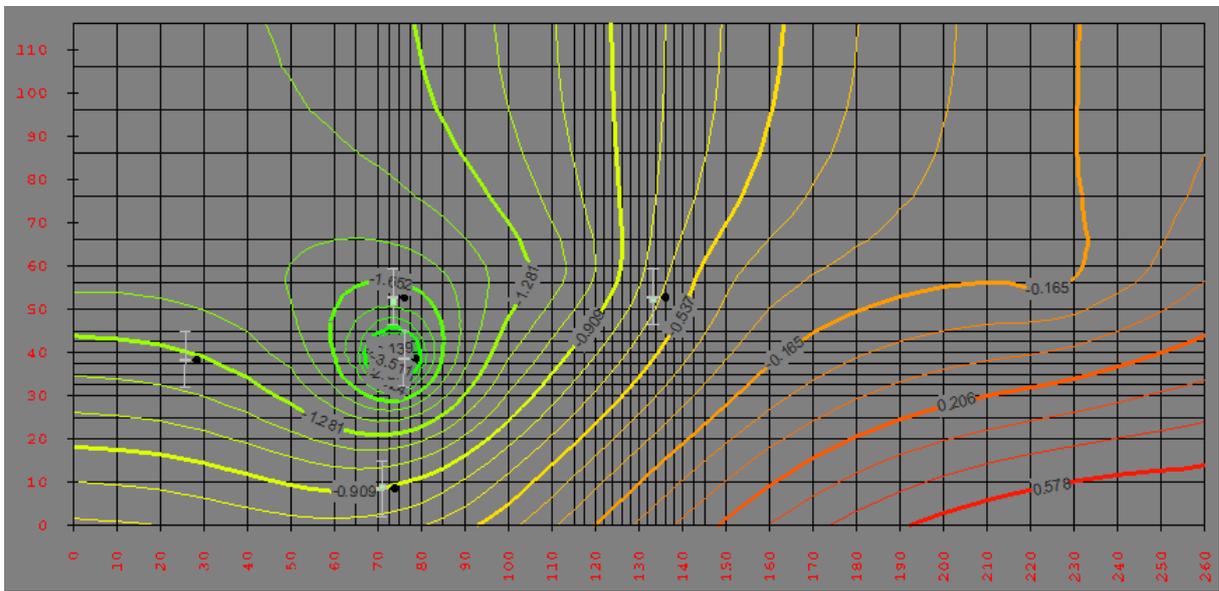


Figura 34 - Cargas hidráulicas em metros para o período úmido (365 dias) da camada 3, com o Software GMS.



Podemos observar nas Tabelas 2, 3 e 4 um comparativo dos níveis potenciométricos observados em campo e calculados por cada software nos 5 poços de observação. Vale ressaltar que os valores calculados se aproximam dos valores simulados na publicação de Paiva, Cabral & Freitas (2013) que usaram o software Visual Modflow, para criar um modelo da área em estudo.

Tabela 2 - Níveis potenciométricos observados e calculados com o software PMWIN.

Poço	Período Seco (valor observado) (m)	Período Seco (valor calculado) (m)	Período Úmido (valor observado) (m)	Período Úmido (valor calculado) (m)
PS1	-1,63	-1,78	-1,44	-1,53
PS2	-2,11	-1,82	-2,00	-1,56
PS3	-0,67	-1,07	-0,47	-0,67
PS4	-1,20	-1,17	-1,00	-0,89
PS5	-1,45	-1,68	-1,26	-1,44

Tabela 3 - Níveis potenciométricos observados e calculados com o software Visual Modflow.

Poço	Período Seco (valor observado) (m)	Período Seco (valor calculado) (m)	Período Úmido (valor observado) (m)	Período Úmido (valor calculado) (m)
PS1	-1,63	-1,67	-1,44	-1,33
PS2	-2,11	-1,72	-2,00	-1,38
PS3	-0,67	-0,97	-0,47	-0,59
PS4	-1,20	-1,09	-1,00	-0,75
PS5	-1,45	-1,59	-1,26	-1,26

Tabela 4 - Níveis potenciométricos observados e calculados com o software GMS.

Poço	Período Seco (valor observado) (m)	Período Seco (valor calculado) (m)	Período Úmido (valor observado) (m)	Período Úmido (valor calculado) (m)
PS1	-1,63	-1,93	-1,44	-1,70
PS2	-2,11	-2,25	-2,00	-1,98
PS3	-0,67	-0,67	-0,47	-0,63
PS4	-1,20	-1,14	-1,00	-0,89
PS5	-1,45	-1,49	-1,26	-1,27

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Obteve-se um levantamento de algumas das principais técnicas para medição dos parâmetros da zona hiporreica, onde cada uma tem características e aplicações específicas. Sendo assim, deve-se definir o objetivo para uma melhor escolha do método de medição a ser selecionado, onde muitas vezes um complementa o outro. Estes estão sendo avaliadas para possíveis aplicações no projeto piloto.

Foi possível com a modelagem desenvolvida pelos softwares selecionados (PMWIN, Visual Modflow e GMS) no estudo de caso – rio Beberibe, a construção de um modelo numérico representativo, onde foi calculado as cargas hidráulicas do fluxo subterrâneo da área

estudada, observando os rebaixamentos e influência do rio. Nestes modelos gerados ficou evidenciado que há a interação rio-aquífero, através das observações de fluxo subterrâneo.

Conseguiu-se chegar a valores calculados dos poços de observação bem próximos dos valores observados em campo, considerando assim que a modelagem foi satisfatória. Pequenos desvios podem ocorrer nas medições de campo, ou mesmo as variações pela homogeneidade adota no modelo computacional que são mais complexas. Sendo assim o modelo pode ser utilizado para entender o comportamento da área, em estudo se submetida diversas perturbações que venham a ocorrer. Vale ressaltar que o modelo deve ser constantemente alimentado por informações de monitoramento em longo prazo.

Comparando os três softwares, pode-se se dizer que se obtiveram resultados similares, como era de se esperar, devido a todos os softwares possuírem o mesmo código computacional. No entanto, as facilidades de inserção dos dados de entrada, visualização dos dados e resultados são melhores com os softwares Visual Modflow e GMS, por serem softwares mais sofisticados, podendo estes caracterizar melhor problemas mais complexos. Apesar do PMWIN não apresentar tantas facilidades comparados aos outros dois, este se apresentou um software de ótimo desempenho, chegando a resultados relevantes, apesar de ser um software mais limitado e com a vantagem de ser gratuito.

6. REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A. **Hidráulica Aplicada**. Porto Alegre: Ed. ABRH. 2001. 619p.

CHIANG. W. **3d-Groundwater Modeling With Pmwin**. 2. ed. Califórnia: Ed. Springer. 2005.

ESQUIVEL. L. G. R. **Remoção de Materia Orgânica Natural e Precursores de Trihalometanos por Filtração em Margem na Lagoa do Peri, Santa Catarina, Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2012.

FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM – LABHID. 2012. 812 p.

FREITAS, D. A. DE. **O emprego da técnica de filtração em margem para tratamento de água no rio Beberibe, Região Metropolitana do Recife**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2010.

HISCOCK, M.; GRISCHEK, T. Attenuation of groundwater pollution by bankfiltration. **Journal Hydrology**, v. 266, n. 3-4, p. 139-144. 2002.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico – Pernambuco, 2001**. Rio de Janeiro – RJ. 2001.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. 3º DISTRITO DE METEOROLOGIA (DISME). **Boletim com a Normal Climatológica no período 1961 a 1990**. 2003.

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

PAIVA, A. L. R. **Modelagem computacional e análise da salinização dos aquíferos na área central do Recife**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2004.

PAIVA, A. L. R. de; 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. **Revista Brasileira Recursos Hídricos**. Porto Alegre. vol. 18. n1. 2013.

RABELO, L. **Estudos Preliminares para Implantação da Filtração em Margem na Lagoa do Peri como Pré-Tratamento de Água para Remoção de Fitoplâncton**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006.

RAY, C.; MELIN, G.; LINSKY, R. **Riverbank Filtration: improving source-water quality**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 2002.

ROSENBERRY, O. D.; LABAUGH J. W. **Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water**. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4-D2, 128 p. Virginia. 2008.

SOPHOCLEOUS, M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. **Hydrogeologic Journal**, v10, p52-67. 2002.