

AValiação dos Efeitos de Atividades Antrópicas e Rebaixamento do Aquífero da Região Metropolitana de Maceió

Julio César Moura Menezes Junior¹; Helen Vieira da S. Xavier²; Cleuda Custódio Freire³; Carlos Ruberto Fragoso Júnior⁴

Resumo

A região hidrográfica do rio Pratagy é extremamente importante para a Região Metropolitana de Maceió, pois nela se localiza uma das principais fontes superficiais de abastecimento de água, no caso o rio Pratagy, e é a região com o maior número de captações subterrâneas do Estado. Devido à escassez do recurso hídrico superficial, é de fundamental importância o desenvolvimento de modelos que simulem situações reais para possibilitar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, incluindo sua proteção e descontaminação através da quantificação do fluxo e do transporte de contaminantes. Através do modelo hidrogeológico Visual MODFLOW foi realizada a calibragem dos parâmetros hidrológicos e ajuste das condições de contorno sendo o modelo utilizado para simulação dos fluxos e estimativa do rebaixamento do aquífero na região. Assim foram gerados mapas de fluxo para um cenário antes do bombeamento e um segundo cenário após o bombeamento. Com uma taxa elevada de bombeamento foi observado o rebaixamento do aquífero em alguns pontos e verificado a redução das cargas hidráulicas nesses pontos.

Palavras-Chave – MODFLOW; Rebaixamento; Região Metropolitana de Maceió.

Abstract

The river basin of the river Pratagy is extremely important for the Metropolitan Region of Maceio because in this basin is located one of the main surface sources of water supply: the river Pratagy. In this region is registered the largest number of groundwater wells due to scarcity of surface water. Therefore is importance ongoing development of mathematical models for simulating groundwater flow in order to planning and management of groundwater resources, including their protection and decontamination. In this study we used a groundwater hydrogeological model, named Visual MODFLOW. The model was calibrated by fitting of hydrological parameters and adjustment of the boundary conditions. After that, the model was used for simulation of groundwater flows to estimate drawdown zones. Flow maps were generated for scenarios before and after pumping. Our simulation indicated that high rates of pumping promoted drawdown zones of the aquifer at some point and also decreased the hydraulic heads at these points.

Keywords – MODFLOW; demotion; Metropolitan Region of Maceio.

1 – Introdução

O sistema produtivo e a sobrevivência humana estão condicionados a garantia da oferta e qualidade dos recursos hídricos, sejam eles superficiais ou subterrâneos. Assim o uso consciente através da gestão desses recursos é fundamental para garantir o bem-estar no presente e no futuro. E sua falta compromete não só uma vida saudável, mas também as possibilidades de desenvolvimento de uma região. O PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente), estima que até 2025 a disponibilidade per capita de água fique em torno de apenas 5 mil metros cúbicos, colocando 3 bilhões de pessoas em situação de grave estresse hídrico. Essa possibilidade de escassez se deve não só ao crescimento populacional, mas também ao mau uso e ao não gerenciamento da água disponível.

Com a alta vulnerabilidade dos recursos hídricos superficiais e conseqüentemente necessidade de tratamento, os mananciais hídricos subterrâneos estão cada vez mais sendo utilizados, pois são fontes de água com baixo custo de exploração, comparando os custos de bombeamento com os custos de tratamento da água superficial, e de boa qualidade, pois estão relativamente protegidos de contaminantes. O planejamento e a gestão desses recursos hídricos subterrâneos, incluindo sua proteção e remediação, dependem principalmente da quantificação do fluxo e do transporte de contaminantes em águas subterrâneas.

Muitas cidades brasileiras utilizam a água subterrânea como fonte de abastecimento em diferentes camadas (TUCCI e CABRAL, 2003), como é o caso de Maceió, onde as águas subterrâneas representam 60% da fonte de abastecimento (CASAL, 2010). Esse valor não expressa a realidade da exploração dos aquíferos subterrâneos da cidade, pois esse número se torna ainda maior quando considerados os poços clandestinos instalados por toda a região.

Esses mananciais estão sofrendo processo contínuo de degradação e diminuição de suas reservas devido ao uso insustentável e à falta de planejamento na exploração desse recurso.

A aplicação da modelagem matemática para representar a dinâmica do fluxo de água subterrânea permite avaliar o regime de exploração das águas subterrâneas, quanto à profundidade e abrangência de zona de captura dos poços, otimizar sistemas de rebaixamento de lençol freático, planejar e otimizar sistemas de abastecimento de água através da indicação das melhores localizações dos poços.

Quando é iniciado o bombeamento de um poço, ocorre neste o rebaixamento do nível da água, criando um gradiente hidráulico (uma diferença de pressão) entre este local e suas vizinhanças. Este gradiente provoca a vinda contínua de água do aquífero em direção ao poço, onde o nível em que se encontra a água dentro do poço quando este está sendo bombeado é chamado de nível dinâmico. Se o bombeamento parar, o nível d'água retorna ao nível original (recuperação).

O bombeamento gera um cone de depressão de água em direção ao poço. Esse cone pode atingir uma massa de água superficial que, se esta não estiver hidraulicamente isolada, haverá o início ou o aumento da infiltração destas águas em direção ao poço. Poços próximos a fontes de águas poluídas e próximos ao mar estão seriamente sujeitos a produzir água contaminada ou a ocorrência de intrusão salina. Mesmo fontes de poluentes situada a jusante do poço poderá contaminá-lo, pois com o bombeamento ocorre uma inversão do fluxo subterrâneo.

1.1 - Modelos matemáticos de fluxo e transporte de águas subterrâneas

Entre os modelos mais utilizados para a modelagem do fluxo subterrâneo e transporte de poluentes estão: ASM (AquiferSimulationsModel); FEFLOW (FiniteElementSubsurfaceFlow&TransportSimulation System); e MODFLOW (Modular Three-Dimensional GroundwaterFlowModel, desenvolvido pelo USGS).

ASM – O programa de modelagem numérico ASM (AquiferSimulationsModel), é utilizado pelos hidrólogos em geral para a modelagem do fluxo bidimensional (2-D) das águas subterrâneas, sendo possível também modelar o transporte dos poluentes (Monteiro, 1999). Ele utiliza o método das diferenças finitas para fluxo subterrâneo. O ASM permite modelar problemas 2-D; fluxos estacionários ou não estacionários; aquíferos homogêneos ou não homogêneos; aquíferos confinados, não-confinados ou semi-confinados; isotrópicos ou anisotrópicos; extração ou injeção de poços a uma taxa constante ou variável; recarga da água pela precipitação em função do tempo e do espaço, balanço hídrico; comparação das cargas hidráulicas observadas e calculadas; cálculo das linhas de fluxos; distribuições de concentrações dos poluentes; curvas de concentrações dos poluentes em locais ou poços selecionados.

FEFLOW – O programa FEFLOW (FiniteElementSubsurfaceFlow&TransportSimulation System) consiste num modelo interativo de simulação do fluxo subterrâneo variável em função da densidade e dos processos de transporte de massa e de calor nas águas subterrâneas, utilizando o método numérico de resolução por elementos finitos. Este programa traduz-se numa ferramenta eficiente para a modelação das águas subterrâneas que permite, entre outros aspectos: (1) a modelação de sistemas subterrâneos que se caracterizem pela existência (ou não) de superfícies livres, como é o caso de aquíferos freáticos, e aquíferos suspensos, implementando uma aproximação que permite a movimentação dos elementos da malha; (2) a solução de problemas nas zonas saturadas; (3) a modelação de fenômenos de transporte variável em função simultânea das densidades e da temperatura; (4) o transporte de contaminantes por convecção e por dispersão, no qual as espécies químicas podem estar sujeitas à adsorção, dispersão hidrodinâmica e reações químicas de 1º ordem (Diamantino e Ferreira, 2002).

MODFLOW - Dentre os modelos numéricos de fluxo de águas subterrâneas que tem tido uma aceitação mundial figura o MODFLOW (Modular Three-Dimensional GroundwaterFlowModel, desenvolvido pelo USGS) para o qual foram desenvolvidos pré- e pós-processadores (VISUAL MODFLOW PRO, PMWIN, etc.) (ABAS, 2009). O PMWIN (ProcessingModflow for Windows) é uma das várias versões existentes do programa clássico MODFLOW.

O Visual MODFLOW Pro é um programa utilizado para modelar e simular os fluxos de águas subterrâneas e processos de transportes por diferenças finitas. É o ambiente de modelagem mais completo para aplicações práticas no fluxo de águas subterrâneas e simulação de transporte de contaminantes, pois apresenta uma interface gráfica totalmente integrada através de aplicativos para auxiliar na calibração, entrada de dados integrada com a apresentação gráfica dos resultados e os parâmetros que definem o modelo são definidos tanto em plantas como em seções ou perfis. As ferramentas gráficas permitem:

- Dimensionar rapidamente o domínio do modelo e algumas unidades;
- Atribuir propriedades no modelo e condições de contorno;
- Executar simulações do modelo para o transporte de fluxo e de contaminantes;
- Calibrar o modelo, utilizando técnicas manuais ou automatizadas;
- Otimizar o bombeamento, recuperação e taxas locais;
- Visualizar os resultados utilizando gráficos 2D ou 3D.

Os parâmetros do modelo de entrada e os resultados podem ser visualizados em 2D ou 3D em qualquer momento durante o desenvolvimento do modelo ou na exibição dos resultados.

2 – Metodologia

O estudo desenvolveu-se através do projeto ASUB-AL. O projeto ASUB-AL apresenta-se como um sub-projeto integrante de um projeto maior desenvolvido em rede constituída pelas seguintes instituições: Universidade Federal de Campina Grande (Executora), Universidade Federal de Alagoas (Co-Executora) e Universidade Federal de Santa Maria (Co-Executora). O objetivo geral do projeto da rede é estabelecer critérios para a outorga dos direitos de uso da água, para o enquadramento dos corpos d'água e para a cobrança pelo uso da água, de forma integrada, com aplicação às águas subterrâneas em bacias costeiras e bacias interioranas. Para Alagoas, a UFAL foi estabelecida para o estudo a região hidrográfica do Pratagy com o título do sub projeto- Instrumentos de gestão para as águas subterrâneas na região hidrográfica do rio Pratagy.

Para a área de estudo foram analisados os aspectos hidrogeológicos, de recarga e a hidrologia superficial da região. Portanto, com o uso do Visual Modflow Pro foram gerados mapas de fluxo considerando as principais condições de contorno da região. Em seguida foram inseridos poços de bombeamento de maneira a abranger toda a área estudada, e posteriormente, gerado outro mapa de fluxo subterrâneo para essa nova condição. Na etapa seguinte foram extraídos dados de cargas hidráulicas nos poços de bombeamento antes e após o bombeamento.

2.1 - Área de estudo

De acordo com a geologia da região, o projeto ASUB-AL estabeleceu como área de estudo, parte da Região Metropolitana de Maceió - RMM (Figura 1), situando-se na bacia sedimentar de Alagoas, compreendida entre a Região Hidrográfica do Pratagy ao norte, a Bacia Hidrográfica do rio Mundaú e o Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba – CELMM ao sul, a oeste pela linha da falha principal no contato com o cristalino e a leste pelo oceano Atlântico. Esta região é conhecida como zona da mata de Alagoas, compreendendo os municípios de Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte.



FIGURA 1 - Região Metropolitana de Maceió (Adaptado de Xavier e Freire, 2010)

A escolha da região se justifica por ser a área de maior urbanização, concentrando a maior quantidade de focos com potencial de contaminação do aquífero e grande quantidade de pontos de captação de água subterrânea.

2.1.1 - Aspectos hidrogeológicos

A constituição litológica do sistema aquífero de Maceió compreende basicamente três formações: formação Barreiras, formação Marituba e Porção. As duas primeiras formações estão conectadas hidráulicamente formando um sistema aquífero e apresentam maior potencial em termos de transmissividade de fluídos (Nobre, 2006), apresentando-se como um sistema hidráulico heterogêneo e anisotrópico, comportando-se ora como semiconfinado, ora confinado.

O grande pacote sedimentar dos tabuleiros corresponde a formação Barreiras, de idade terciária, constituído por rochas clásticas continentais de coloração variada, ou seja, seixos e areias quartzosas de diversos tamanhos, com intercalações de argilas caulínicas e óxidos de ferro (Lima, 1990). A formação Barreiras cobre quase a totalidade da região de estudo, com exceção de alguns afloramentos situados principalmente nas margens das lagoas e rios e dos sedimentos quaternários. A drenagem que corta os sedimentos dessa formação produz, em geral, vales alongados de encostas abruptas (Schaller, 1969) que podem se abrir em compartimentos maiores na região do litoral alagoano, dando origem a extensas lagoas como, por exemplo, às do CELMM.

Já a formação Marituba ocorre principalmente na região dos tabuleiros. Grande parte dessa formação é formada por areias grosseiras, dando origem a um excelente aquífero. A formação Marituba encontra-se capeado pelos clásticos da formação Barreiras e, por conseguinte, apresenta-se totalmente saturado. Testes de aquífero atingem valores de produção da ordem de 300 m³/h. O sistema Barreiras/Marituba, formado pelos dois horizontes permeáveis, possui comportamento livre na zona superior e diversos horizontes confinados, com espessura que varia de 30 a 450 metros. As potencialidades hidráulicas verificadas são excelentes para o transporte da água, com valores de condutividade hidráulica que variam entre 10⁻³ a 10⁻¹ cm/s (Nobre, 2006).

Na região dos tabuleiros, a base da formação Barreiras encontra-se normalmente acima do nível do mar, e o aquífero apresenta-se parcialmente saturado. Nos níveis topográficos mais baixos, entretanto, a discordância entre essa formação e as formações cretáceas atinge profundidades de até 100 m abaixo do nível do mar (Saldanha et al, 1980). Nessas regiões, o aquífero Barreiras apresenta um melhor desempenho, pois seus sedimentos clásticos são, normalmente, espessos e saturados. Esse tem comportamento, em geral, livre e espessura homogênea, que pode alcançar até 150m.

2.1.2 – Recarga

Na RMM a recarga dos sistemas aquíferos ocorre, principalmente, pela infiltração direta das águas de chuva, favorecida pelo alto índice pluviométrico, e pela infiltração de parte das águas que escoam nas calhas fluviais, nos trechos em que os rios são influentes, favorecidas pela morfologia predominantemente de tabuleiros com drenagem pouco desenvolvida e incipiente (Lima, 1990). Além da precipitação, a recarga depende de outros fatores, tais como cobertura vegetal, uso do solo, condutividade hidráulica, topografia, tipo do solo e até mesmo infiltrações e vazamentos nas canalizações de água e esgoto.

Segundo Nobre (2006), para a Região metropolitana de Maceió a recarga nas áreas urbanas é de aproximadamente 590 mm/ano, considerando uma parcela de 30% de recarga artificial urbana. Nas demais áreas a recarga varia de 300 a 450 mm/ano.

2.1.3 - Hidrologia superficial

A rede hidrográfica é caracterizada pelo rio Mundaú e por pequenos riachos que deságuam na Lagoa Mundaú. Os demais cursos de água deságuam no oceano Atlântico, e incluem os riachos Reginaldo, Jacarecica, rio Pratygy. Os rios são perenes, na maioria, devido à alimentação das águas subterrâneas que afloram em vales mais profundos, sob a forma de exutórios naturais ou fontes. O escoamento superficial é pouco expressivo e o regime fluviométrico dessas bacias está diretamente ligado à recarga do escoamento de base (Nobre, 2006). Existe também como curso de água bastante representativo na parte alta da RMM, o rio Messias.

3 – Modelo utilizado

A versão do MODFLOW utilizada no estudo foi o Visual MODFLOW pro - A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model (McDonald & Harbaugh, 1988), desenvolvido pela United States Geological Survey (U.S.G.S.).

Este software simula o fluxo tridimensional em meios porosos por aproximação por diferenças finitas, atribuindo a variável no centro do bloco, podendo considerar simulações em aquíferos confinados, não confinados, ou uma combinação de confinados e não confinados. O modelo simula o fluxo através da solução da equação diferencial parcial em condições estacionárias ou transientes em meio anisotrópico e heterogêneo (Freire, 2002).

O MODFLOW integra os modelos MODFLOW-2000, SEAWAT-2000, MODPATH, MT3D99, RT3D, SAMG, GMG, WinPEST e VMOD 3D-Explorer.

MODFLOW-2000 foi lançado de uma pesquisa geológica nos EUA em 2000, e introduziu uma nova abordagem baseada em processos para a estrutura do programa MODFLOW, juntamente com recursos internos de estimação de parâmetros. A abordagem baseada em processo e estimação de parâmetros necessários resultou em algumas mudanças radicais nas estruturas de arquivo de entrada e de dados, sendo o mais significativo: O Fluxo de Bloco Centrada (BCF) foi substituído pela propriedade da camada de fluxo (LPF); Quando o pacote LPF é usado, as elevações superior e inferior de cada célula da grade deve ser definido explicitamente; As condições dos valores limite e valores de propriedade podem ser definidos em termos de valores de parâmetros e matrizes de multiplicadores. O Visual MODFLOW suporta e inclui tanto MODFLOW-96 e MODFLOW-2000 para executar a simulação do fluxo das águas subterrâneas. Idealmente, estes programas devem produzir resultados idênticos. No entanto, MODFLOW-2000 pode produzir algumas diferenças sutis em relação ao MODFLOW-96.

O SEAWAT introduz a capacidade de simular em três dimensões e com densidade variável. O conceito de SEAWAT é combinar um código de fluxo (MODFLOW) com um código de transporte de solutos (MT3DMS) para formar um único programa que resolve o fluxo acoplado e equações de transporte de solutos. Ele formula a equação de fluxo, utilizando massa em vez de volume. Além disso, SEAWAT-2000 contém opções explícitas e implícitas para resolver as equações de fluxo e transporte. No entanto, a opção de acoplamento implícito só pode ser usado quando um método das diferenças finitas é usado para resolver a equação de transporte de solutos.

MT3D99 é o sucessor do MT3D96, e incorpora muitas das mesmas funções que MT3DMS juntamente com algumas modificações e aperfeiçoamentos adicionais, incluindo: reações cinéticas de ordem zero e ordem mista; um pacote de reação para lidar com reações aeróbias e anaeróbias entre contaminantes hidrocarbonetos, qualquer receptores de elétrons especificado pelo usuário e reações em cadeia de compostos orgânicos e inorgânicos; opção de reinicialização automática, e célula detalhada por orçamentos em massa celular.

RT3D é um programa para simulação de transporte de massa reativa multi-espécies em aquíferos subterrâneos tridimensional. O RT3D contém os seguinte pacotes de reação: Decomposição aeróbia

instantânea de BTEX ; Degradação multi-caminho instantânea de BTEX; Taxa limitada de reações de sorção; Cinética limitada de degradação multi-caminho de BTEX; Modelo de degradação Seqüencial com reações de decaimento aeróbica / modelo anaeróbio para a degradação. Os principais parâmetros (taxas de reação, por exemplo) têm valores padrão com base nos dados relatados na literatura. No entanto, o usuário pode ajustar esses parâmetros para melhor ajuste com os dados de um site específico.

O MODPATH foi para calcular o rastreamento de partículas tridimensionais de linhas de fluxo em estado estacionário e saída de simulação de fluxo transiente obtido utilizando MODFLOW. MODPATH usa um regime semi-analítico de rastreamento de partículas. O método é baseado no pressuposto de que cada componente da velocidade direcional varia linearmente dentro de uma célula da rede em sua própria coordenada. Esta hipótese permite uma expressão analítica descrevendo o caminho do fluxo dentro de uma célula da grade. Dada a posição inicial de uma partícula em qualquer lugar em uma célula, as coordenadas de qualquer ponto ao longo de sua linha de caminho dentro da célula e o tempo de viagem entre eles, podem ser computados.

O SAMG (AlgebraicMultigridMethods for Systems) é um sistema de métodos algébricos para a resolução de equações, otimizado para MODFLOW, apresentando-se como um solucionador bastante rápido.

O GMG (GeometricMultigrid Solver) foi integrado com o MODFLOW-2000 e SEAWAT-2000. O pré-condicionamento em GMG é baseado no método geométrico solver multigrid. O GMG tem demonstrado reduzir significativamente os tempos de execução do modelo em relação a outros métodos usando uma quantidade comparável de memória.

O WinPEST é um programa que expressa os resultados da simulação através de gráficos informativos que permitem compreender os processos de calibragem e de análise de estimativas. Sendo utilizado para realizar inúmeros exercícios de calibragem e interpretação de dados em todos os campos da ciência e da engenharia. Ao longo da sua existência de seis anos sofreu já diversas melhorias, de modo a utilizar sempre a mais recente tecnologia de calibragem de modelos.

Visual MODFLOW 3D-Explorer (VMOD 3D-Explorer) é projetado para a visualização e animação 3D de projetos do Visual MODFLOW. VMOD 3D-Explorer pode ser iniciado diretamente a partir do ambiente Visual MODFLOW, ou sem aplicação do Visual MODFLOW.

VMOD 3D-Explorer permite variar o tempo dos resultados da modelagem a ser animada, a fim de mostrar as mudanças na carga, rebaixamento e concentração com o tempo. A ferramenta de animação mostra uma progressão sequencial dos dados do modelo desde os tempos de saída disponíveis para cada conjunto de dados. As ferramentas de animação podem ser ativados, destacando o tipo de dados desejado (cargas, rebaixamento ou concentrações) na Árvore Modelo.

No MODFLOW a equação geral do fluxo subterrâneo é dada conforme apresentada na Equação 1:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - w = S_s \frac{\partial h}{\partial t} , \quad (1)$$

Onde k_{xx} , k_{yy} , k_{zz} – condutividade hidráulica nas coordenadas x , y e z (m/s); h – carga potenciométrica (m); w – fluxo volumétrico (1/s); S_s – armazenamento específico do material poroso (1/m); t – tempo (t).

A região estudada é aproximada por uma malha uniformemente espaçada de nós. Em cada nó, cada derivada da expressão matemática do problema é aproximada por uma expressão algébrica com relação aos nós adjacentes (Freire, 2002).

Após a obtenção dos parâmetros físicos necessários para a resolução da equação acima, tais como: Condutividade hidráulica, Porosidade, Transmissividade e Coeficiente de Armazenamento, é aplicado o método das diferenças finitas para a obtenção de uma solução aproximada de uma EDP (Equação Diferencial Parcial) em alguns pontos existentes no domínio, por meio das expansões de Taylor. Na prática, substitui-se as derivadas parciais da expansão, por um valor aproximado (incremento), a partir dessa idéia, vai se obtendo a cada interação um valor aproximado da expansão, isto é, um refinamento da malha, representativa do modelo. Se houver participação de escoamento no subsolo, a aproximação é realizada com derivadas de segunda ordem, nesse caso leva-se em consideração, o segundo termo da expansão da série de Taylor (Wendland, 2003).

As condições de contorno são processadas separadamente através de sub-programas específicos para cada situação, seja ela um dreno, recarga, descarga ou um rio. Três módulos compõem o modelo: o primeiro, Input, são inseridos os dados de entrada representativos do aquífero, como dimensão da malha,

parâmetros físicos, condições de contorno e etc; o módulo chamado Run realiza os cálculos usados na simulação; e o módulo Output, que é o módulo de saída do modelo, os resultados são representados através de mapas e gráficos.

É possível inserir mapas e/ou polígonos para delimitar a área a ser trabalhada inativando as células fora dessa região. Logo, as células ativas serão as células representativas do aquífero onde serão inseridos os parâmetros físicos e as que possuem carga hidráulica conhecida onde será simulado o fluxo.

Existe a opção de inserir poços de observação de carga, poços de observação de concentração e poços de extração, possibilitando na simulação obter gráficos de comparação dos dados calculados pelo modelo e dados observados in situ. Através dessa análise é expresso o coeficiente de correlação alcançado. De acordo com os resultados obtidos é realizada a calibração do modelo, procurando a obtenção de um melhor coeficiente de correlação possível e um mapa de fluxo que expresse o fluxo da água subterrânea de acordo com as cargas hidráulicas e condições de contorno da área de estudo.

4 – Modelagem do fluxo

Para representar as condições hidrológicas e/ou químicas naturais de um determinado local são utilizados modelos matemáticos. Esses modelos utilizam dados de observações reais, informações e percepções da área analisada e através de equações descrevem o fluxo e conservação de massa nos aquíferos. Porém todos os modelos utilizados para a modelagem de águas subterrâneas necessitam caracterizar o sistema natural identificando o domínio e atribuindo propriedades e condições de contorno para a região.

Com a definição da área de estudo através do projeto ASUB-AL e com a escolha do Visual MODFLOWpro como processador do MODFLOW foi realizado um detalhamento dos dados de condutividade hidráulica, condições de contorno e recarga na região. Como etapa inicial, para a condutividade hidráulica foram levantados alguns dados dentro da região sendo utilizados para a espacialização dessa informação.

Em seguida foram definidas as condições de contorno baseado nas informações hidrogeológicas, definindo-se os principais cursos de água e os limites geológicos da região. Na última etapa recarga foi inserida de maneira espacializada baseada em informações de postos pluviométricos.

5 – Poços de bombeamento

Foram inseridos 10 poços fictícios, conforme Figura 2, distribuídos espacialmente na RMM com bombeamentos unitários e vazão constante. Foi utilizado um valor elevado de taxa de bombeamento com o propósito de estimar o rebaixamento gerado por essa atividade, pois além dos poços da Companhia de Abastecimento e Saneamento de Alagoas(CASAL) e dos poços particulares cadastrados, na cidade ainda existem diversos poços clandestinos bombeando e causando rebaixamento do aquífero na região. Com os poços de bombeamento foi realizada uma nova simulação e obtido um novo mapa de fluxo subterrâneo.

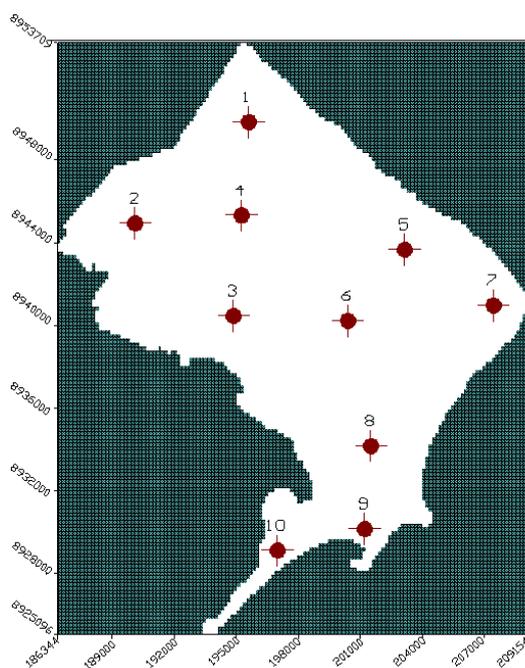


FIGURA 2 – Poços de bombeamento.

6 - Descobertas e Discussões

Através do estudo observou-se que o bombeamento da água subterrânea pode ocasionar rebaixamento nos aquíferos podendo causar, em casos extremos, a secagem de um poço. Altas taxas de bombeamento também ocasionam o processo de intrusão salina, onde a água do mar adentra nos aquíferos tornando a água salobra impactando na qualidade e conseqüentemente potabilidade dessa água. Observou-se também que a exploração desordenada desses mananciais pode modificar o sentido de fluxo subterrâneo possibilitando a captação de contaminantes com a água.

6.1 – Fluxo Subterrâneo

Através da modelagem do fluxo, obteve-se o mapa de fluxo para a região como segue na Figura 3. Para esse mapa não foi considerado nenhum poço de bombeamento.

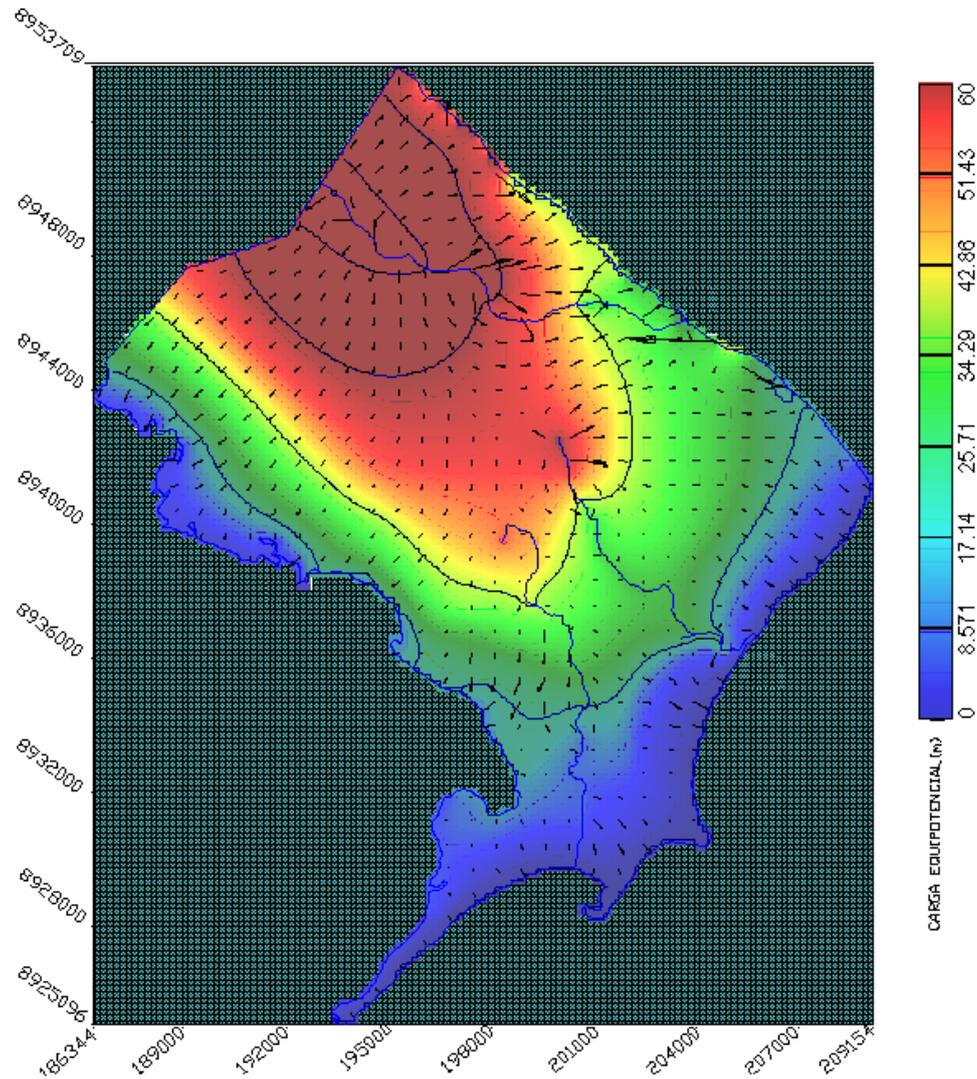


FIGURA 3 – Mapa de fluxo antes do bombeamento.

Com a inserção dos 10 poços de bombeamento obteve-se um novo mapa de fluxo como segue na Figura 4.

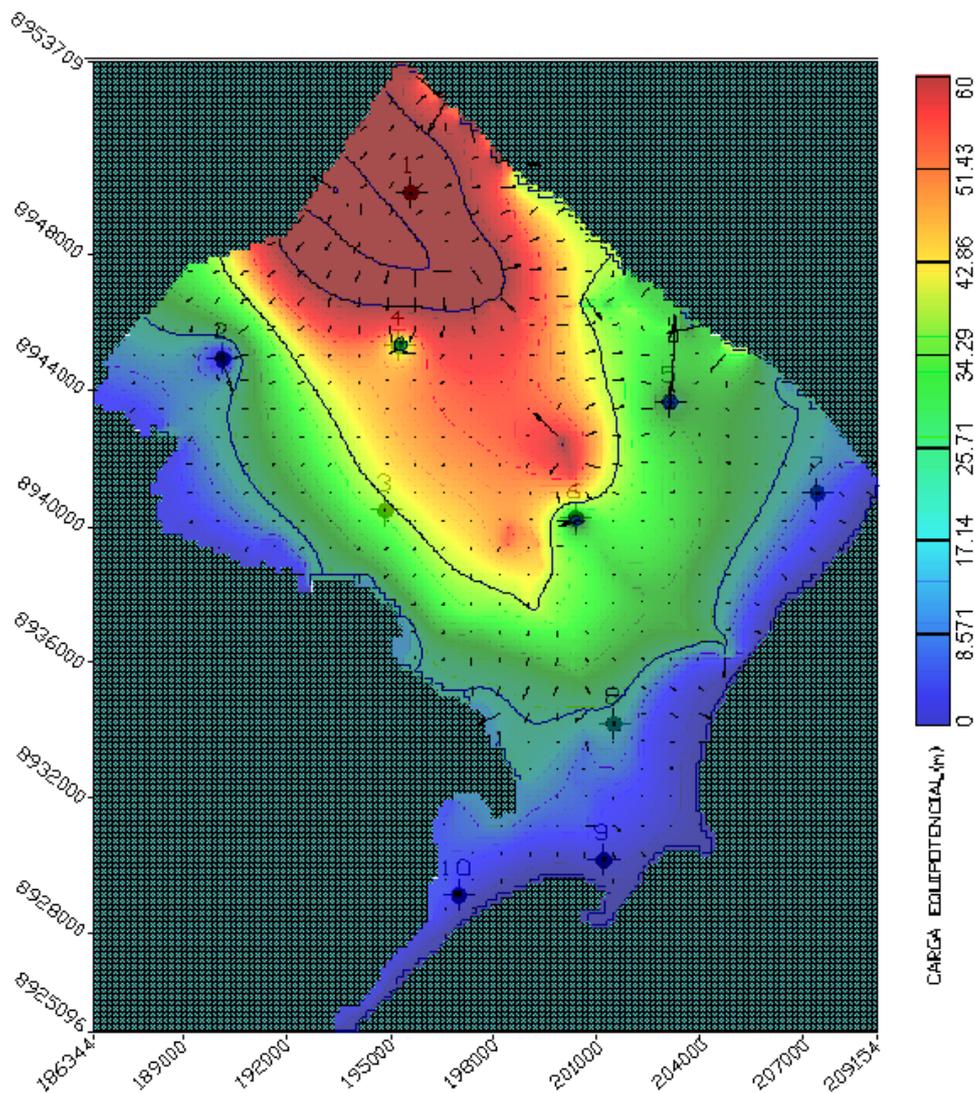


FIGURA 4 – Mapa de fluxo depois do bombeamento.

Após inserir os poços de bombeamento foi observado algumas modificações no mapa de fluxo. A região entre o poço 4 e o poço 6 sofreu uma redução significativa das suas cargas hidráulicas onde observa-se uma variação da cor vermelha, com carga hidráulica próxima de 60 metros, para a cor amarela com carga hidráulica de aproximadamente 45 metros.

Próximo a todos os poços de bombeamento a direção de fluxo foi alterada convergindo para esses pontos, como é observado na região próxima ao poço 2. As cargas hidráulicas próximas ao rio Mundaú em direção ao poço 2 sofreu uma redução significativa das cargas hidráulicas.

6.2 – Rebaixamento do aquífero

Com os poços inseridos no estudo foi possível obter resultados para a interferência e conseqüente rebaixamento dos aquíferos através das altas taxas de exploração. Os resultados mostraram que em todos os poços fictícios inseridos, a intensa exploração nestes causaram um grande rebaixamento.

A Figura 5 mostra um corte vertical do poço de bombeamento P6, sentido leste-oeste da RMM, onde é possível ver o cone de rebaixamento causado por um bombeamento excessivo neste poço.

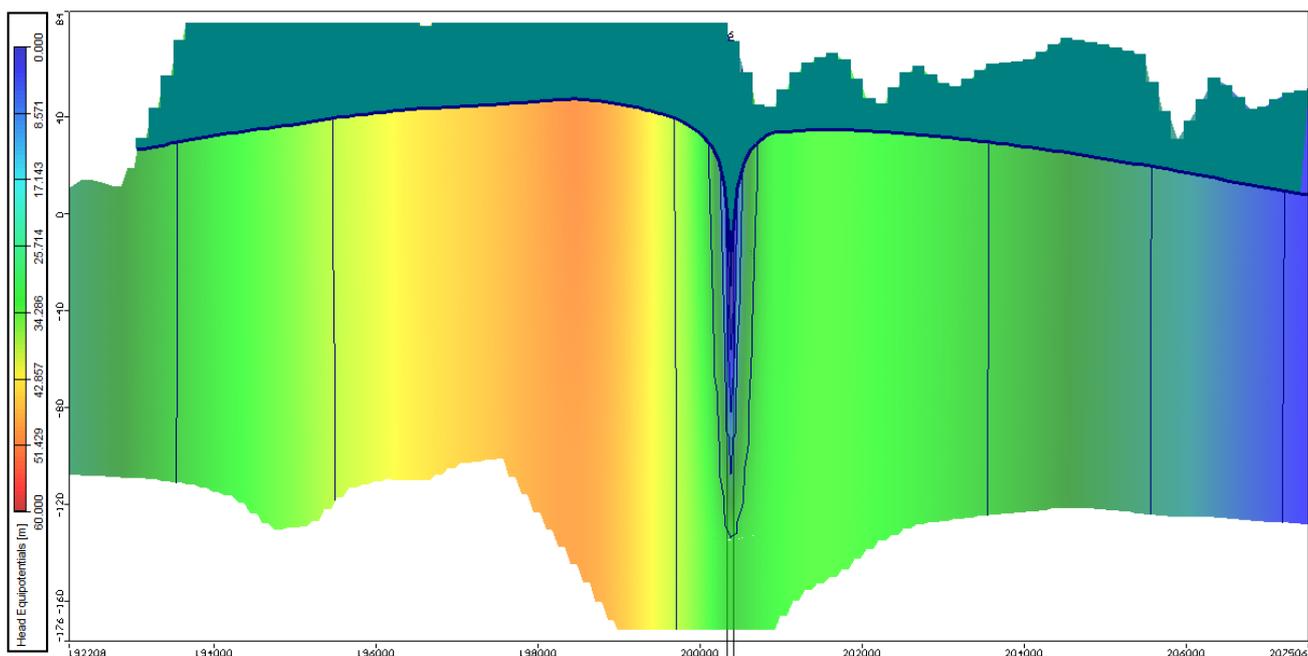


FIGURA 5 – Perfil do poço P6.

Deve-se levar em consideração que esta exploração desordenada compromete o aquífero, tanto em quantidade como em qualidade. Para que se imponham limites a extração deste recurso medidas de gestão poderiam ser adotadas, garantindo assim sua preservação e sustentabilidade. Por exemplo, deveria ser considerada uma medida onde o somatório das extrações numa região deve ser menor que a recarga na mesma, ou até que deveria haver um limite de rebaixamento em cada poço, onde este é diretamente relacionado ao bombeamento realizado pelo próprio poço e pelos poços vizinhos, impondo os rebaixamentos máximos permissíveis.

7 – Conclusões

Através do estudo realizado observou-se que o planejamento e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos é indispensável para a preservação e garantia de quantidade e qualidade desse recurso. Logo, a exploração desordenada e os efeitos antrópicos podem ocasionar impactos ambientais a esses mananciais.

Os resultados possibilitam conhecer o rebaixamentos dentro de um aquífero, alertando os órgãos gestores de recursos hídricos sobre as presentes e possíveis situações extremas resultantes da exploração desordenada desse recurso. Portanto esse estudo é de grande utilidade para os órgãos gestores de recursos hídricos para subsidiar as tomadas de decisão quanto às outorgas de direito de uso.

8 – Referências

- BARBOSA, C.F.(2005). Hidrogeoquímica e contaminação por nitrato em água subterrânea no bairro de Piranema, Seropédica-RJ. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.
- CASAL. (2009). Companhia de Saneamento de Alagoas: Áreas abastecidas. Disponível em: <<http://www.casal.al.gov.br/areas.abastecidas-capital-esgoto>>. Acessado em: 10 de abril de 2011.
- CASAL. (2010). Companhia de Saneamento de Alagoas: Áreas abastecidas. Disponível em: <<http://www.casal.al.gov.br/areas.abastecidas-capital-agua>>. Acessado em: 25 de Março de 2011.

CETESB (2010). Relatório de qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo: 2007 – 2009. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-subterraneas/111-publicacoes-e-relatorios> > Acesso em 10 de junho de 2011.

FREIRE, C. C. (2002). Modelo de gestão para a água subterrânea. Tese de doutorado – Programa de Pós - Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MCDONALD, M.C. AND AW.HARBAUGH (1988).MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model, Technical report, U.S. Geol. Survey, Reston, VA.

TUCCI, C. E. M.; CABRAL, J. J. S. P. (2003). Qualidade da água subterrânea. Disponível em < http://www.cgee.org.br/arquivos/a3b_agua_sub.pdf >. Acesso em 18 fev.2009.

WENDLAND, E. (2003) – Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Águas Subterrâneas, minicurso do XXVI Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional. São José do Rio Preto, SP.