

# A UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: UMA PROPOSTA PARA O MUNICÍPIO DE ARARAQUARA-SP

Carlos André Bonganha<sup>1</sup>

Maria Lúcia Ribeiro<sup>2</sup>

Nilson Guiguer<sup>3</sup>

## RESUMO

A avaliação do potencial hídrico subterrâneo passível de exploração por parte dos municípios permite que os mesmos possam tomar ações preventivas de preservação da quantidade e da qualidade destes recursos. O município de Araraquara foi escolhido para este trabalho, por estar localizado na área de abrangência do Aquífero Guarani e por possuir uma tradição na utilização dos recursos subterrâneos. As etapas para a construção do modelo obedeceram a seguinte seqüência: definição de objetivos, levantamento de dados, identificação das condições de contorno, construção do modelo conceitual, criação do banco de dados, sistema de informações geográficas, modelo matemático e calibração. O presente estudo comprovou a viabilidade da aplicação da modelação matemática tridimensional para a determinação das zonas de captura das captações de água subterrânea, que pode servir de base para o Plano Diretor Municipal e a simulação de cenários. Analisando a simulação considerando o dobro da vazão atual, nota-se que os rebaixamentos podem chegar a 22 metros regionalmente.

Palavras chave: recursos hídricos subterrâneos, modelagem matemática.

## ABSTRACT

The evaluation of the ground hydric potential subject to exploration by the cities possibility that those same can take preventing actions of preserving of the quantity and quality of those resources. The city of Araraquara was chosen for this work because it is located in the area of reaching of the "Aquífero Guarani" (Aquifer Guarani), and because it has a tradition in the utilization of groundwater. The steps for the construction of the models obeyed a following sequence: Definition of the objectives, Data Collecting, Identification of the Contour Conditions, Construction of the Conceptual Models, Creation of a Data Bank, System of Geographical Information, Mathematical Model and Calibration. The current study proved the viability of the application of three-dimensional mathematical modeling to the determination of pathlines that can serve as base for the City Director Plan and simulate scenery. When the simulation is analyzed considering the double of the current outflow, it's noticeable that lowering can reach 22 meters regionally.

Key words: groundwater, mathematical modeling.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, MsC Centro Universitário de Araraquara-UNIARA, Rua Voluntários da Pátria 1309-Araraquara-S.P. e-mail: rtc.pirassununga@cccsp.com.br

<sup>2</sup> Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup>, Centro Universitário de Araraquara-UNIARA, Rua Voluntários da Pátria 1309-Araraquara –S.P. e-mail: mestrado@uniara.com.br

<sup>3</sup> Prof. Dr., Centro Universitário de Araraquara-UNIARA, Rua Voluntários da Pátria 1309-Araraquara –S.P. e-mail: nguiguer@flowpath.com

## 1 - INTRODUÇÃO

Uma das principais razões para o crescimento explosivo do uso das águas subterrâneas a partir de 1950 foi a utilização na agricultura. A água irrigada representa cerca de dois terços da água captada de rios e poços a cada ano. Na Índia, líder mundial em área irrigada e o terceiro produtor mundial de grãos, o número de poços tubulares rasos passou de 3.000 em 1950, para 6 milhões em 1990, com os aquíferos abastecendo mais da metade de suas terras irrigadas. Cerca de 40% da produção agrícola são provenientes de áreas irrigadas, com a água subterrânea representando cerca de 9% de seu Produto Interno Bruto. Os Estados Unidos, com a terceira maior área de terra irrigada do mundo, utilizam água subterrânea para 43% de suas terras agrícolas irrigadas (BROWN, 2001).

Na Europa, 75% dos sistemas públicos de abastecimento se utilizam de água subterrânea, chegando a 90% em países como: Dinamarca, Suécia, Bélgica, Alemanha e Áustria (DAEE, 1999).

No Canadá, aproximadamente um quarto da população depende diretamente da água subterrânea para suas necessidades domésticas.

No Brasil observa-se uma falta de controle na sua utilização, não permitindo estimativas corretas, porém segundo o DAEE (1999), 61% da população é abastecida por este recurso, sendo 43% por poços profundos, 12% por fontes ou nascentes e 6% por poços escavados. Conforme dados da ANA (2002), 3.125 municípios têm pelo menos como uma das alternativas de captação de água, o poço profundo. Situação similar ocorre em relação aos poços rasos, sendo uma alternativa utilizada em 605 municípios.

O crescimento da utilização deste recurso no Brasil ocorreu a partir da década de 70, acentuando-se o desenvolvimento da exploração das águas subterrâneas, onde se estima a existência de 200.000 poços tubulares ativos (além de milhões de poços rasos, escavados) que fornecem água para diversos fins, sobretudo para o abastecimento urbano (SÃO PAULO, 1997). Em estudos mais recentes, porém, segundo Relatório da ANA (2002), existe cerca de 300.000 poços tubulares em operação, sendo perfurados mais de 10.000 poços anualmente.

Se por um lado fica evidente a importância deste recurso, verifica-se, porém um expressivo incremento da exploração das águas subterrâneas nos últimos anos, sendo confirmado no Estado de São Paulo pelo aumento do número de poços atualmente outorgados pelo DAEE, conforme podemos constatar através da Figura 1.

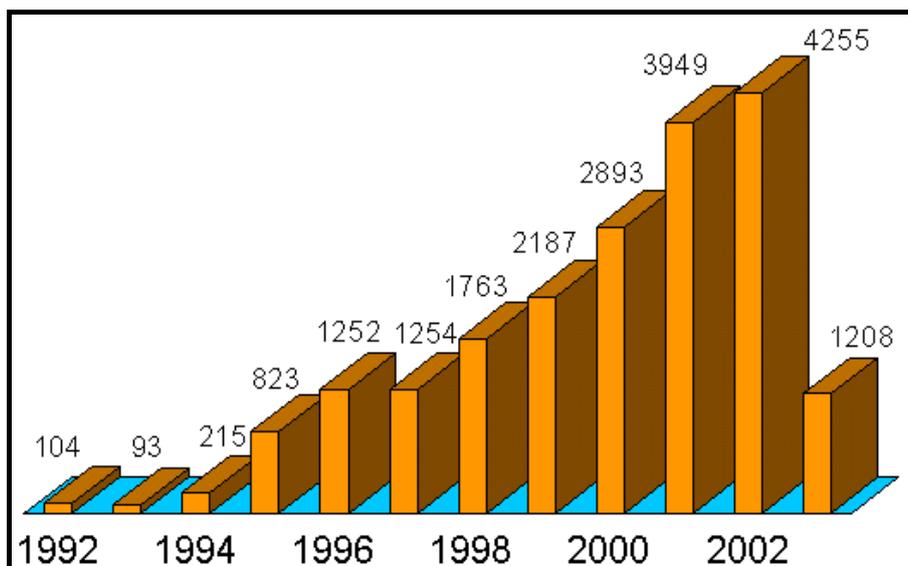


Figura 1. Outorgas expedidas por ano pelo DAAE (em 2003, até 30/abril). Fonte: DRH/DTP, 2003.

Dessa forma, através da modelagem matemática, este trabalho se propôs a disponibilizar estratégias de desenvolvimento e de extração otimizada dos Recursos Hídricos Subterrâneos no Município de Araraquara, analisando suas interações com o sistema hidrológico regional, numa perspectiva de Manejo Integrado e Sustentável.

## 2 - ÁREA DE ESTUDO

O município de Araraquara está localizado na região central do Estado de São Paulo estando inserido na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 (UGRHI-13-Tietê-Jacaré) compreendendo uma área de 11.537 km<sup>2</sup>, sendo composta por 34 municípios com uma população total de 1.229.875 habitantes, sendo 1.141.875 na zona urbana e 88.000 na zona rural. Neste estudo, utilizamos como base as folhas Araraquara (SF-22-X-D-VI-4; IBGE, 1988) e Rincão (SF-22-X-D-VI-2; IBGE, 1988).

O município foi escolhido para este trabalho, por estar localizado na área de abrangência do Aquífero Guarani e por possuir uma tradição na utilização dos recursos subterrâneos, devido a uma atuação responsável por parte de seu Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE) e também pela presença do Departamento de Água e Energia Elétrica (DAAE) que congrega um número grande de técnicos especialistas na área de águas subterrâneas.

## **2.1- O Crescimento da Utilização das Águas Subterrâneas no Município de Araraquara-SP: breve histórico**

Até o ano de 1969 os serviços de abastecimento de água e coleta de esgoto no município de Araraquara, estavam subordinados ao Departamento de Obras da Prefeitura Municipal.

Com uma população de aproximadamente 60.000 habitantes, o município começava a enfrentar sérios problemas de abastecimento, fato que tornou necessária a criação do DAAE (Departamento Autônomo de Água e Esgoto) em junho de 1969.

No início de funcionamento do DAAE, a cidade contava com apenas dois pontos de captação superficial (Ribeirão das Cruzes e Anhumas), sendo que após a captação, a água era bombeada para a Estação de Tratamento na Fonte Luminosa, que possuía três reservatórios submersos e 1 suspenso, com capacidade total de 6.400 m<sup>3</sup>.

Para atender a demanda na periferia, havia também na Vila Xavier, um reservatório com capacidade de 1.750 m<sup>3</sup>, porém no início da Década de 70, com o crescimento da cidade, houve a necessidade de se construir um novo reservatório (R-7) neste bairro, com capacidade de 1.200 m<sup>3</sup>.

Porém, foi a partir de 1974, com a criação do Serviço de Água Subterrânea, órgão que estava ligado ao DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica), e com sua participação ativa na perfuração do poço do Bairro Santana, que os estudos comparativos de viabilidade, entre a utilização da água superficial e da água subterrânea, visando a ampliação do sistema de abastecimento no município puderam ser concluídos.

Nas condições estudadas concluiu-se que a ampliação do sistema através da água subterrânea teria um custo duas vezes menor do que se fosse feito através da captação superficial, partindo-se então para a continuidade das perfurações.

Atualmente 49,33% da água utilizada no abastecimento do município, é coletada através de três pontos de captação superficial (Cruzes, Anhumas e Paiol) num total de 34.650 m<sup>3</sup>, e 50,67% através de doze pontos de captação subterrânea (Santa Lúcia, Santana, Ouro, Paiol, Standard, Selmi Dei, Parque Gramado, Pinheirinho, Fonte, Iguatemi. Rodovia e Aldo Lupo) num total de 35.598 m<sup>3</sup>/dia (Quadro 1).

Quadro 1. Captação de Água Subterrânea no Município de Araraquara-SP

Poços	Vazão /m <sup>3</sup> /dia
Santana	870
Santa Lucia	3098
Ouro	1440
Paiol	2713
Standard	3675
Selmi Dei	3280
P.Gramado	1944
Pinheirinho	1827
Fonte	6422
Iguatemi	4785
Rodovia	3234
Aldo Lupo	2310
<b>Total</b>	<b>35.598 m<sup>3</sup>/dia</b>

Fonte: Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE-Araraquara) 2005.

### 3 - METODOLOGIA

O processo que leva a exploração das litologias que compõe os aquíferos no campo até sua avaliação, possui 4 etapas, e em cada uma delas é elaborado um Modelo. A primeira etapa é o Modelo Conceitual, que nada mais é do que uma idéia concebida sobre um processo ou fenômeno. O segundo Modelo a ser elaborado pode ser chamado de escala, e, pode ser visto como uma visualização diminuída e generalizada da realidade. O terceiro é o Modelo Matemático, que permite a abstração dos processos e fenômenos de tal maneira, que estes possam ser descritos por equações matemáticas. O quarto, o Modelo Digital, é a realização digitalizada do processo ou fenômeno (ABAS, 2001).

Neste trabalho foram obedecidas as etapas descritas acima, porém como forma de simplificar mais o processo adotou-se os Procedimentos do cronograma descrito na Figura 2.

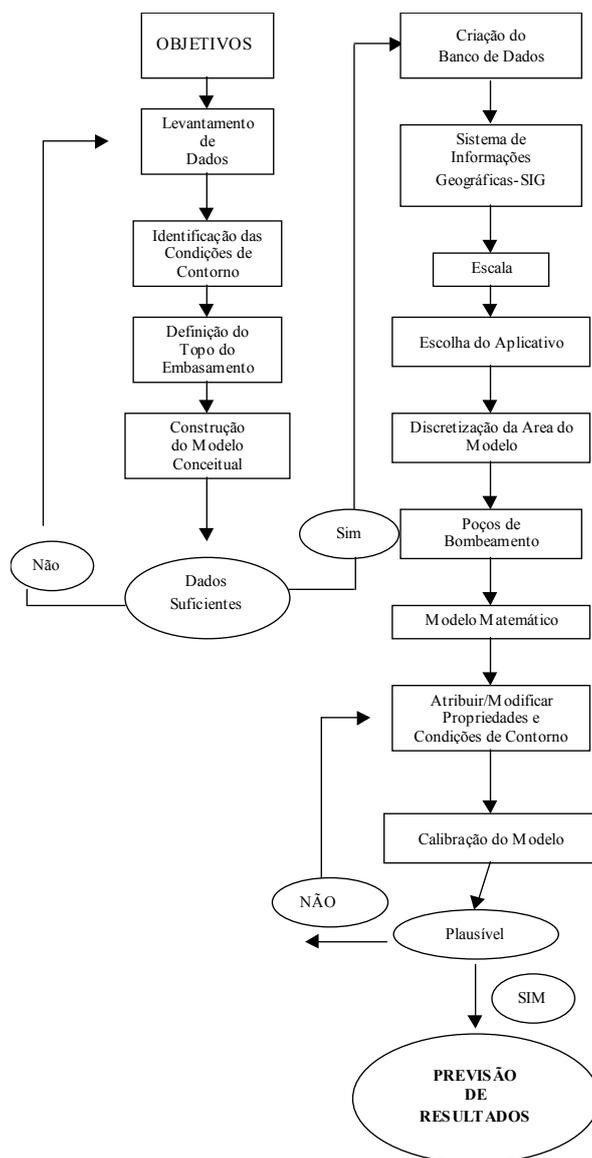


Figura 2. Etapas básicas para a construção de um modelo

## 4 - DESENVOLVIMENTO DO MODELO CONCEITUAL DE FLUXO

### 4.1- Definição de Objetivos

O objetivo final proposto por este trabalho é simular numericamente os Aquíferos que compõe a área de entorno do município de Araraquara, e desta maneira disponibilizar uma ferramenta de gestão para a utilização sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

## **4.2- Levantamento das Informações Existentes**

Os levantamentos foram feitos junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE - Araraquara) e do Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE - Araraquara) e proporcionaram uma compreensão adequada das condições hidrogeológicas existentes na região de estudo, com o enfoque na incorporação destas informações ao Modelo Numérico.

No município de Araraquara foram cadastrados um total de 143 poços, até 1995, concentrados principalmente, nas proximidades da zona urbana, onde se adotou uma numeração seqüencial precedida da letra P, sem nenhuma correlação temporal ou geográfica.

## **4.3- Identificação das Condições de Contorno Naturais**

Neste trabalho utilizamos 3 tipos de condições de contorno: na camada superior do modelo em todos os córregos e rios identificados no mapa topográfico, foi utilizada uma condição de contorno tipo 3 ou de Rio. Nas camadas inferiores do modelo optou-se pela definição da área de contorno com base no Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guarani. Nas bordas Norte e Sul adotou-se condições de contorno de fluxo zero, assumindo-se que nestas áreas os fluxos são primordialmente paralelos às bordas. Já nas bordas oeste e leste, utilizamos condições de contorno de carga constante, com valores de 450m e 650m, respectivamente, valores estes baseados no mapa hidrogeológico.

## **4.4- Construção do Modelo Conceitual**

Com base nas informações e dados levantados, foram definidas as seguintes premissas para a criação do Modelo Conceitual:

1. Devem ser consideradas as seguintes unidades litológicas no Modelo Conceitual: Grupo Bauru (Formação Adamantina), Formação Serra Geral e Formação Pirambóia/Botucatu.
2. Os Sistemas Aquíferos correspondentes são: Aquífero Livre Bauru e o Aquífero confinado a semiconfinado Pirambóia/Botucatu (Aquífero Guarani).
3. O basalto da Formação Serra Geral, serve como camada confinante do Aquífero Guarani, apresentando baixa condutividade hidráulica.
4. As águas subterrâneas dos Aquíferos Bauru e Guarani deságuam na bacia do rio Tietê.

#### **4.5- Desenvolvimento das Seções Geológicas (Escala)**

Nesta etapa, foram utilizados todos os dados coletados, visando à criação de um banco de dados, permitindo uma visualização diminuída e generalizada da realidade.

#### **4.6- Desenvolvimento do Sistema de Informações Geográficas (SIG)**

O Banco de dados SIG é uma forma adequada de armazenar dados de topografia, águas superficiais, águas subterrâneas e hidroestratigrafia, sendo utilizado para gerar seções litológicas e para expandir superfícies topográficas e potenciométricas em locais onde há ausência de dados.

O banco de dados foi conectado diretamente ao SIG, onde foram criadas as seguintes Tabelas: AvgWaterLevel, GeoDesc, Geology, Interpretation, Screen e Well\_Location.

#### **4.7- Discretização da área modelada**

A partir da criação destes perfis, foi feita a importação dos dados para o programa Visual MODFLOW (GUIGUER & FRANZ, 1996), sendo um dos modelos mais utilizados e testados mundialmente.

O número de camadas do modelo foi definido com base nas unidades hidroestratigráficas determinadas pelo modelo conceitual, onde foram definidas 3 camadas: a primeira sendo representada pelo Grupo Bauru, a segunda representada pela Formação Serra Geral e a terceira camada representando o Aquífero Guarani. Estas camadas foram subdivididas em 2, 3 e 3 camadas numéricas respectivamente para que o modelo ficasse mais refinado, totalizando assim 8 camadas numéricas.

#### **4.8- Calibração do Modelo**

A calibração do modelo foi efetuada considerando-se duas situações distintas do sistema hidrogeológico.

Na primeira situação (sem bombeamento- Figura 3a), simulou-se o sistema hidrogeológico sem qualquer interferência antrópica, ou seja, considerando a inexistência de poços de extração. Foram utilizados também os dados de balanço hídrico da bacia.

A segunda situação simulada (com bombeamento atual - Figura 3b), simulou o sistema hidrogeológico, considerando os 19 poços que possuem os dados mais confiáveis (Quadro 2).

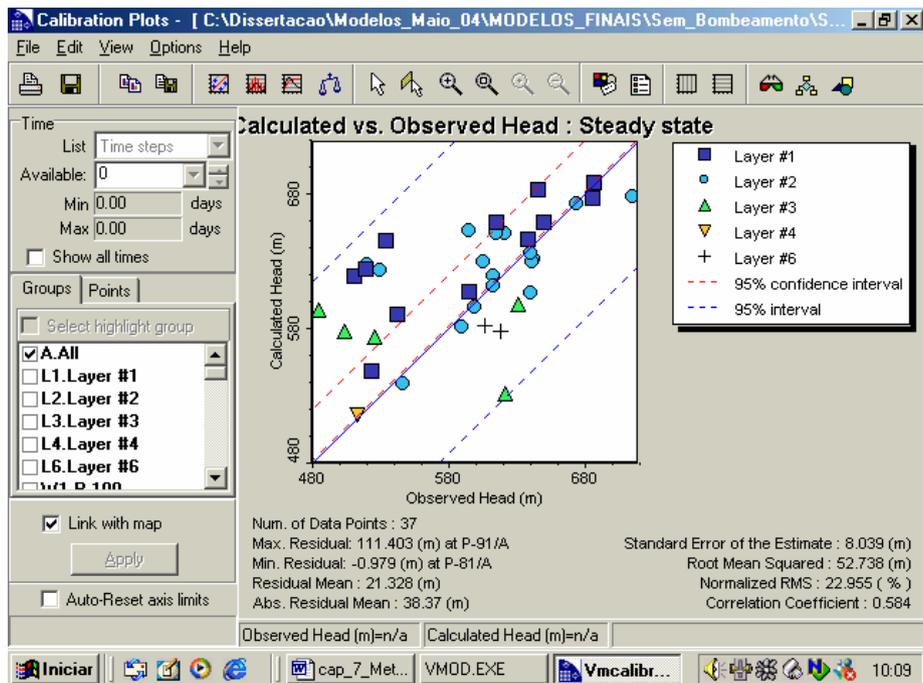


Figura 3a. Calibração do modelo matemático - Situação “sem bombeamento”

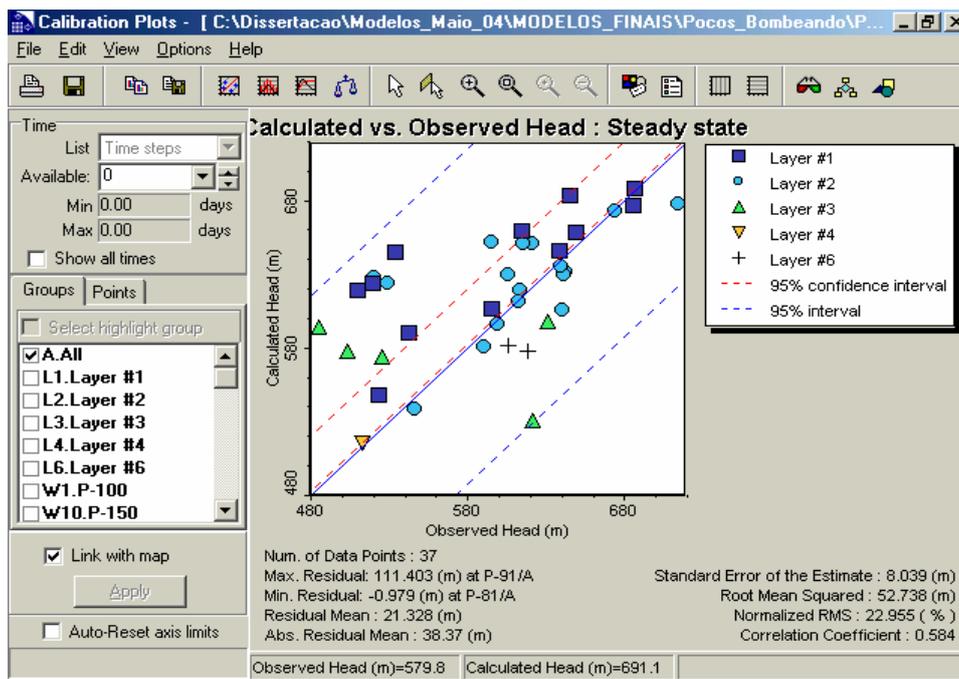


Figura 3b. Calibração do modelo matemático - Situação “com bombeamento”

## 5 - AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO

### 5.1- Avaliação do Fluxo da Água Subterrânea Calculado pelo Modelo Matemático

Com o modelo matemático calibrado, simulou-se a situação do sistema hidrogeológico considerando a vazão atual de 19 poços de bombeamento mais significativos (Quadro 2). Além

disto foi feita uma avaliação das condições naturais de fluxo da água subterrânea e um pré-bombeamento para se poder calcular o rebaixamento induzido pelo bombeamento dos poços atuais.

Foram feitas simulações visando estimar os efeitos causados por futuros aumentos na demanda de água. Em uma dessas simulações (Figura 4) assumiu-se o dobro do bombeamento da extração atual de água nos 19 poços. Constatou-se em nível regional que o rebaixamento pode chegar a 22 metros, resultado que deve ser levado em conta para elaboração de Políticas de Gerenciamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos no município de Araraquara.

Quadro 2. Poços utilizados para a calibração com bombeamento atual

<b>Well_ Identification</b>	<b>Northing</b>	<b>Easting</b>	<b>Data</b>	<b>Top</b>	<b>Bottom</b>	<b>Vazão - m<sup>3</sup>/dia</b>
P-10	9817.692	19848.61	36500	450	329	870
P-105	11943.83	16920.37	36500	429	220	3054
P-119	11865.55	16355.2	36500	437	266	2691
P-19	12558.21	16686.47	36500	425	278	1950
P-27	16593.71	18704.22	36500	509	407	1440
P-30	11785.78	18486.23	36500	513	300	2520
P-32	6986.824	18433.18	36500	420	358	144
P-35	10570.58	17469.48	36500	478	280	3098
P-39	13371.34	19620.35	36500	476	321	540
P-40	15901.05	21354.4	36500	458	289	2615
P-42	8251.68	19969.08	36500	333	210	2713
P-58	12924.4	18684.58	36500	502	301	3675
P-62	18340.41	22287.98	36500	560	393	1728
P-67	18430.76	21535.09	36500	549	461	1934
P-72	13371.34	15993.82	36500	522	336	2582
P-75	14033.88	26172.9	36500	470	277	3280
P-78	13008.2	20598.01	36500	493	262	1944
P-79	16731.8	22651.2	36500	499	327	1827
P-84	14575.96	15361.39	36500	648	624	264
<b>Vazão Total</b>						<b>38.869</b>

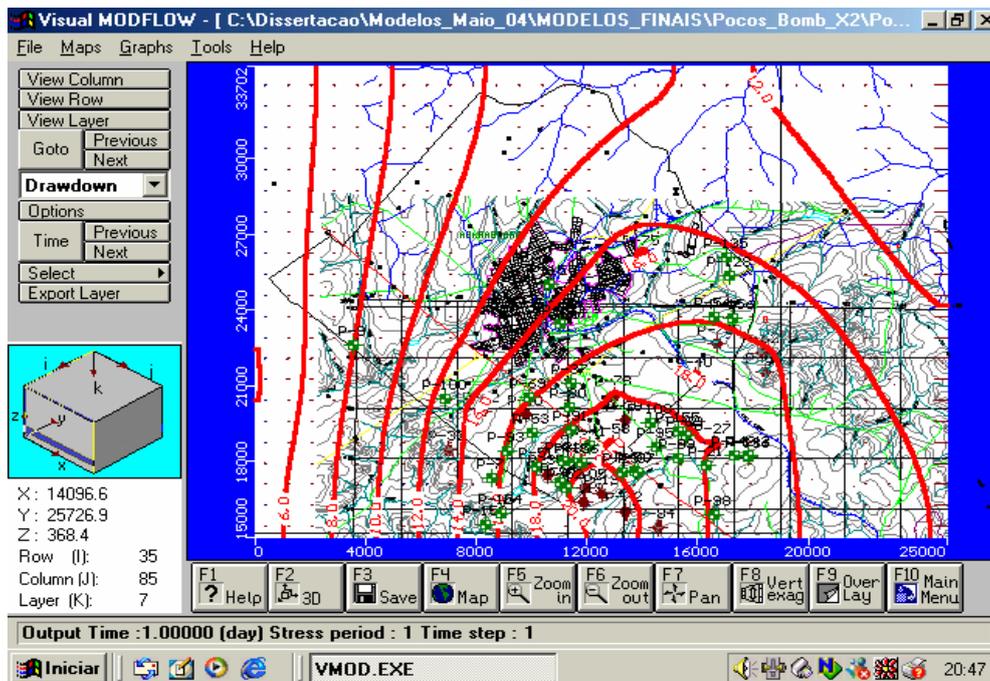


Figura 4. Rebaixamentos causados pelos poços de bombeamento considerando o dobro da vazão atual.

## 5.2- Zonas de Captura

A simulação do caminhamento de partículas através do aplicativo MODPATH do software Visual MODFLOWPro3.1(GUIGUER & FRANZ,1996), calculou a trajetória da partícula reversa, onde partículas imaginárias de água foram colocadas ao redor dos 19 poços em todas as camadas do modelo. Esta simulação permitiu a visualização da zona de captura dos poços em regime estacionário e contemplando períodos de 5, 10, 15 e 20 anos e os tempos de trânsito entre o momento de entrada de uma partícula no aquífero e sua captura pelos poços, alertando para o potencial risco de poluição da água subterrânea em cada um dos períodos.

A Figura 5 representa as zonas de captura do modelo nos 19 poços de extração presentes no município. Um mapeamento neste sentido estabelece uma base para trabalhos futuros que visem à proteção destes mananciais subterrâneos, onde se pode verificar quais são as zonas mais sensíveis de acordo com o tempo de trânsito destas partículas .

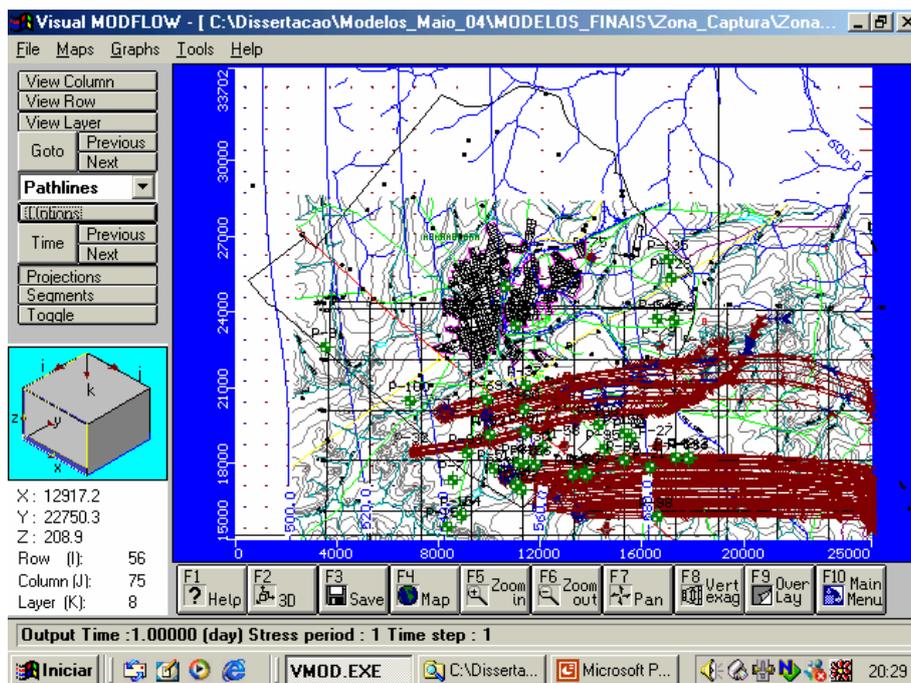


Figura 5. Zonas de Captura em estado estacionário

Neste trabalho a delimitação das áreas de proteção para todos os poços foi realizada em uma única vez. A mesma poderá ser utilizada em trabalhos futuros para a delimitação de cada poço adicional que for considerado para outorga, por exemplo.

## 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O presente estudo comprovou a viabilidade da aplicação da modelação matemática tridimensional para a simulação de cenários (atuais e futuros) para a determinação das zonas de captura das captações de água subterrânea, constituindo-se em uma ferramenta importante para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos no município de Araraquara.

A delimitação das zonas de captura pode servir como base para a elaboração de um Plano Diretor Municipal e se torna imprescindível na definição de políticas de zoneamento urbano, pois permite determinar a localização de áreas com baixo, médio e alto risco de contaminação das águas subterrâneas, e como consequência possibilitando a proteção das mesmas. Adotando-se tempos de trânsito variando de 5, 10, 15 e 20 anos, o Poder Público Municipal pode implementar políticas com maior ou menor rigor, levando-se em conta o risco de contaminação de cada ponto de extração levantado. Este fato reforça a necessidade de recomendação da inserção dos Estudos de Vulnerabilidade nos Planos Diretores Municipais, pois a população dependerá da água subterrânea para abastecimento nos próximos anos; neste sentido, as leis de Zoneamento, devem levar em conta os pontos de captação com diferentes níveis de restrições, dependendo do tempo de trânsito,

ressaltando que com 5 anos a medida deve ser mais restritiva do que com 20 anos.

Nas simulações feitas com os dados disponíveis e assumindo o bombeamento atual, constata-se que em nível regional, aparentemente não há ainda preocupação em termos de rebaixamento excessivo dos níveis de água e exaustão do aquífero devido ao bombeamento da água subterrânea, entretanto é importante ressaltar que em nível local, ou seja, ao redor dos poços de grande vazão, possa ocorrer o rebaixamento; por isto recomenda-se a elaboração de modelos em escala pontual para assegurar que não ocorram problemas futuros.

Quando a simulação é analisada considerando o dobro da vazão atual, nota-se que os rebaixamentos podem chegar a 22 metros regionalmente; embora estes níveis não sejam indicações de um eminente risco de exaustão do aquífero, tais rebaixamentos podem causar conflitos entre os proprietários dos poços existentes, principalmente quando ocorrerem novas perfurações que podem impactar os poços vizinhos: este é um tipo de conflito que poderá ocorrer com maior frequência em nossa região.

Os resultados deste estudo não estão restritos aos 19 poços aqui apresentados, mas poderão servir de base para estudos mais aprofundados, tais como a modelagem de fluxo de contaminantes.

À medida que os dados dos poços forem atualizados e novos dados forem coletados, o modelo matemático deve ser revisado e aprimorado, de forma a representar o mais próximo possível, o sistema hidrogeológico real; sugere-se um monitoramento sistemático anual do nível estático dos poços que permita a atualização do modelo matemático para sua aplicação como ferramenta na gestão de recursos hídricos municipais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAS Informa. *Modelamento 3D da Geometria de aquíferos*. KOHNKE, M.W. 2001- maio/junho 2001.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *A Evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília; ANA (2002).
- BROWN, L.R. *Estado do Mundo 2001*. Salvador-Ba. UMA Editora 2000, 277p.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Água subterrânea: uma riqueza de São Paulo*. Revista Águas e Energia. p.75-80, abril 1999.
- GUIGUER, N. e FRANZ, T. *Visual MODFLOW*. User's Manual. Waterloo Hydrogeologic Inc.. Waterloo, Canada. 1996. 231 p.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Base topográfica do mapa geológico da porção noroeste da folha Araraquara (SF-22-X-D-VI-4): região sudeste do Brasil*. Rio de Janeiro, 1988. 1 mapa escala : 1: 50.000.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Base topográfica do mapa geológico da porção sudoeste da folha Rincão (SF-22-X-D-VI-2): região sudeste do Brasil*. Rio de Janeiro, 1988. 1 mapa escala : 1: 50.000.

SÃO PAULO. *Instituto Geológico*. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo / Instituto Geológico, CETESB, DAEE, Secretaria de Estado do Meio Ambiente; Coordenado por Ricardo César Aoki Hirata, Carai Ribeiro de Assis Bastos, Gerônimo Albuquerque Rocha. São Paulo: Instituto Geológico: CETESB, 1997.

### **SITES CONSULTADOS**

[www.dae.sp.gov.br](http://www.dae.sp.gov.br)

[www.daaearaquara.com.br](http://www.daaearaquara.com.br)