



CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ARARAQUARA – UNIARA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO
REGIONAL E MEIO AMBIENTE

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

AUTOR
CARLOS ANDRÉ BONGANHA

Dissertação apresentada ao Centro
Universitário de Araraquara, como parte
das exigências para obtenção do título de
Mestre em Desenvolvimento Regional e
Meio Ambiente.

Araraquara-SP
2005

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ARARAQUARA – UNIARA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO
REGIONAL E MEIO AMBIENTE

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

Autor: Carlos André Bonganha

Orientador: Prof^a Dr^a Maria Lucia Ribeiro

Co-Orientador: Dr Nilson Guiguer Jr.

**Dissertação apresentada ao Centro
Universitário de Araraquara, como parte
das exigências para obtenção do título de
Mestre em Desenvolvimento Regional e
Meio Ambiente.**

FICHA CATALOGRÁFICA

Bonganha, Carlos André

A utilização da modelagem matemática como ferramenta para a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos: uma proposta para o município de Araraquara-S.P. Carlos André Bonganha. Araraquara. 2005.

Dissertação de Mestrado - Centro Universitário de Araraquara.

Dinâmica Regional e Alternativas de Sustentabilidade.

Orientadora: Ribeiro, Maria Lucia

1. Recursos hídricos subterrâneos. 2. Modelagem matemática. 3. Aquífero Guarani.



Centro Universitário de Araraquara

Rua Voluntários da Pátria, 1009 - Centro - Araraquara - SP
CEP: 13411-900 - Caixa Postal: 200 - Fone: (13) 3391-1000

www.uniara.com.br

BANCA DE DEFESA

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Sueli Yoshinaga Pereira'.

Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira
UNICAMP – Campinas

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Maria Lúcia Ribeiro'.

Profa. Dra Maria Lúcia Ribeiro
UNIARA – Araraquara

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Denilson Teixeira'.

Prof. Dr. Denilson Teixeira
UNIARA - Araraquara

Dedico a Marly, Gabrielle, Michelle, Neide e Edison Bonganha que formam uma grande família e que sempre me apoiaram e acreditaram no meu trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, pela vida em todas as suas formas.

Gostaria também de agradecer todas as pessoas que tiveram participação decisiva em meu trabalho, e que nos momentos mais difíceis me apoiaram, dentre elas:

- Mara Akie Iritane (I.G.), que me forneceu sua Tese de Doutorado, que serviu de base para a minha Dissertação.

- Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) nas pessoas de Jose Luiz Mendonça, Ogawa, Fernando e Brás que me deram as primeiras lições de Geologia.

- Departamento Autônomo de Água e Esgoto de Araraquara (DAAE) nas pessoas do Sr. Wellington Cyro e Braz, que me forneceram as informações necessárias para a confecção deste trabalho.

- A UNIARA, representada pela Dr^a Maria Lucia Ribeiro, pelo apoio e compreensão durante a nossa luta para terminar esta dissertação.

- Ao Geólogo Julio César Arantes Perroni, que me ajudou muito no Levantamento de Dados dos Poços do Município de Araraquara.

- Ao Dr Nilson Guiguer (Waterloo Hydrogeologic) que sempre me incentivou a fazer um trabalho de grande utilidade.

- A Geóloga Monalisa Horvath, pela sua disposição em me ajudar nas etapas práticas mais difíceis.

- A Waterloo Brasil pelo apoio a este trabalho, no período de abril de 2001 a janeiro de 2003 representados pelo Paulo e Ana Paula Queiroz.

- A Cooperativa dos Cafeicultores e Citricultores de São Paulo pelo apoio dado de fevereiro de 2003 a junho de 2005.

SUMÁRIO

1. AGUAS SUBTERRÂNEAS	1
1.1 Introdução	1
1.2 A importância da Água Subterrânea	2
1.3 Ciclo Hidrológico e disponibilidade do recurso hídrico subterrâneo.....	4
1.4 Evolução do uso das Águas Subterrâneas	6
1.5 A Urbanização e o Crescimento da Utilização dos Recursos Hídricos Subterrâneos no Estado de São Paulo	17
1.6 Sobreexploração das Águas Subterrâneas	24
2. MODELAGEM MATEMATICA EM AGUAS SUBTERRANEAS	34
2.1 Histórico	34
2.2 Princípios básicos da Modelagem Matemática	37
2.2.1 Equação de Fluxo da água subterrânea	37
2.3 Métodos Numéricos	38
2.3.1 Elementos finitos	38
2.3.2 Diferenças finitas	38
2.4 Condições Iniciais	40
2.5 Condições de Contorno	41
2.6 Procedimentos da Modelagem Matemática	42
2.7 Modelo Conceitual	42
2.8 Escolha do Aplicativo Matemático	43
2.9 Elementos do Modelo Matemático	44
2.10 Grade do Modelo	44
2.11 Poços de Injeção/Extração e de Observação	45
2.12 Calibração do Modelo	47

3. ÁREA DE ESTUDO	49
3.1 Introdução	49
3.2 Características Sócio Econômicas	50
3.3 Localização da Área de Estudo	52
3.4 O Crescimento da Utilização das Águas Subterrâneas no Município de Araraquara-S.P.- breve histórico	55
3.5 Hidrografia	60
3.6 Climatologia	60
3.7 Vegetação	62
3.8 Geologia da Região	62
3.8.1 Formação Adamantina	62
3.8.2 Formação Serra Geral	63
3.8.3 Formação Piramboia	63
3.8.4 Formação Botucatu	64
3.9 Geologia estrutural da região	64
3.10 Hidrogeologia da Área de Estudo	67
4. METODOLOGIA	69
4.1 Introdução	69
4.2 Etapas básicas para a Construção do Modelo	71
4.2.1 Definição de Objetivos	71
4.2.2 Levantamento de dados	71
4.2.3 Identificação das condições de contorno naturais	77
4.2.4 Definição do topo do embasamento	79
4.2.5 Construção do modelo conceitual	80
4.3 Desenvolvimento das Seções Geológicas	81
4.3.1 Criação do banco de dados	81
4.3.2 Desenvolvimento do sistema de informações geográficas	84
4.4 Modelo Matemático	87
4.4.1 Escolha do aplicativo matemático	87
4.4.2 Discretização da área modelada	88

4.4.3	Poços de Bombeamento	90
4.4.4	Atribuição das propriedades	92
4.4.5	Calibração do modelo	93
5.	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO MATEMÁTICO	97
5.1	Avaliação do Fluxo da Água Subterrânea calculado pelo modelo	97
5.2	Zonas de Captura	100
5.3	O Modelo Matemático como ferramenta do gerenciamento	104
5.4	Limitações	104
5.5	Limitações do Programa Visual MODFLOW Pro 3.1	107
5.6	Limitações da Modelagem Matemática	108
5.7	Viabilidade de aplicação da modelagem matemática tridimensional em função dos dados levantados	108
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	112
6.1	Resultados	112
6.2	Aspectos da Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos	112
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

RESUMO

“A UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS: UMA PROPOSTA PARA O MUNICÍPIO DE ARARAQUARA”

Esse estudo demonstra a viabilidade da aplicação da modelagem matemática tridimensional como uma ferramenta importante para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Araraquara através da simulação de cenários (atuais e futuros) e da determinação das zonas de captura da água subterrânea. 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 hídricos subterrâneos. As etapas para a construção do modelo obedeceram a seguinte seqüência: levantamento de dados (caracterização do sistema natural), identificação das condições de contorno, construção do modelo conceitual, construção do banco de dados, modelo matemático, calibração e interpretação dos resultados. A delimitação das zonas de captura (perímetro de proteção dos poços), permite determinar áreas onde potenciais contaminantes atingiriam os poços. Baseado nas simulações feitas e assumindo o bombeamento atual, constata-se que em nível regional, aparentemente não há ainda preocupação de rebaixamento excessivo dos níveis de água e exaustão do aquífero devido ao bombeamento da água subterrânea; ressalta-se, entretanto, que ao redor dos poços de grande vazão, possam ocorrer rebaixamentos excessivos. Quando a simulação é analisada considerando-se o dobro da vazão atual, o rebaixamento pode chegar a 22 metros regionalmente; embora estes níveis não sejam indicações de um eminente risco de exaustão do aquífero, podem causar conflitos entre os proprietários dos poços existentes, principalmente quando ocorrerem novas perfurações, que podem impactar os poços vizinhos. Estes resultados alertam para a preocupação, com os recursos hídricos subterrâneos, sob o ponto de vista quantitativo.

Palavras-chave: recursos hídricos subterrâneos, modelagem matemática, aquífero guarani

ABSTRACT

“USING MATHEMATICAL MODELING AS A GROUNDWATER MANAGEMENT TOOL: A PROPOSAL FOR THE MUNICIPALITY OF ARARAQUARA”

This study shows the viability of using three-dimensional mathematical models as an effective tool for groundwater management in the Municipality of Araraquara through multiple scenario simulations (present and future) as well as capture zone delineation. This Municipality was chosen because it belongs to the region in which the Guarani Aquifer is located, and because groundwater is a significant part of the water supply. The following steps were used to construct the model: collecting data (characterization of the natural system), identification of boundary conditions, construction of the conceptual model, mathematical modeling, calibration, and reporting of the results. The definition of the capture zones (well protection perimeter) allows to determine areas where potential contaminants could reach the wells. Based on the simulations scenarios, and considering the present volume of water extraction, it was found that, at the regional level, there is no excessive drawdown groundwater resources depletion although localized significant drawdowns can be found around wells with large extraction rates. On the other hand, when extraction rates were doubled the regional groundwater level is depleted by 22 meters. The reduction does not mean that the aquifer is near exhaustion, but conflicts may arise among existing well owners. From a quantitative point of view, the groundwater deserves careful attention.

Key Words: groundwater, mathematical modeling, Guarani Aquifer

1. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

1.1 Introdução

Segundo definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas, água subterrânea é a água que ocupa a zona saturada do subsolo (**Figura 1**) ou num sentido mais amplo, toda a água situada abaixo da superfície do solo, na litosfera (ABNT, 1993 NBR 9896 - Glossário de Poluição das Águas 94 p Rio de Janeiro).

Pode ser definida ainda como um suprimento de água doce sob a superfície da terra, em um aquífero ou no solo, procedente da parcela de água que se infiltra, variando conforme sua porosidade (**Quadro 1**), cobertura vegetal e a declividade do terreno formando um reservatório natural para a utilização humana.

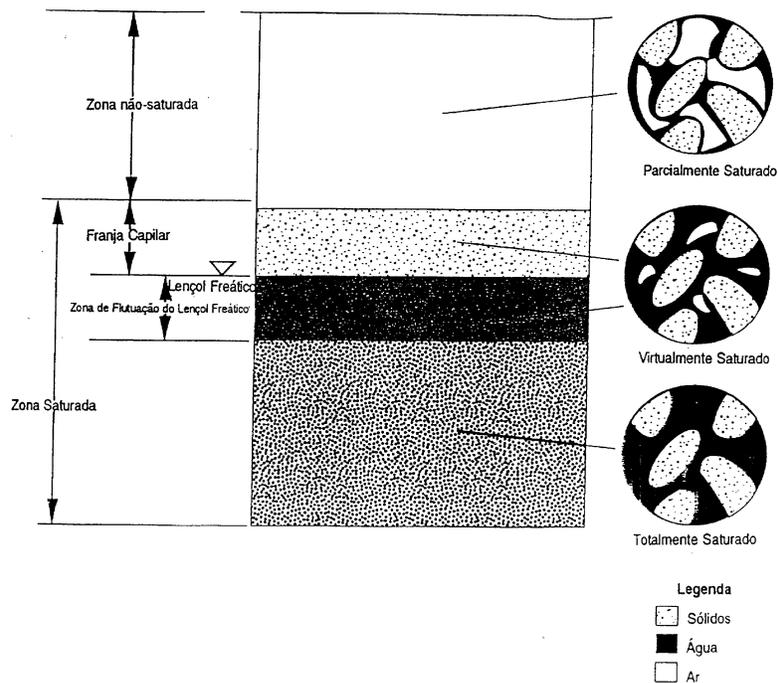


Figura 1 - Distribuição de água e ar na sub-superfície
Fonte: Publicação da API (1993)

Quadro 1 - Porosidade conforme o tipo de solo

Tipos de Solo	Variação de Porosidade
areia ou cascalho	25 a 40 por cento
areia e cascalho, misturados	25 a 35 por cento
sedimentos glaciais	10 a 20 por cento
argila	33 a 60 por cento

Fonte: GUIGUER (2000)-Poluição das Águas Subterrâneas

1.2 A Importância da Água Subterrânea

Do volume total de água no planeta (1.360 bilhões de km³), apenas 2,75% correspondem à água doce, estando 2,15% nas calotas polares e geleiras, restando em torno de 0,6% passíveis de exploração para o consumo humano no subsolo, lagos, rios, pântanos e atmosfera (**Quadro 2**). Dentro deste volume, podemos destacar a importância das águas subterrâneas (98,5%) como fonte disponível para o abastecimento de água doce (**Figura 2**).

Quadro 2 - Distribuição da água no planeta

Tipo	Ocorrência	Volumes (km³)
Água doce superficial	Rios	1.250
	Lagos	125.000
Água doce subterrânea	Umidade do solo	67.000
	Até 800 metros	4.164.000
	Abaixo de 800 metros	4.164.000
Água doce sólida (gelo)	Geleiras e Glaciais	29.200.000
Água salgada	Oceanos	1.320.000.000
	Lagos e mares salinos	105.000
Vapor de água	Atmosfera	12.900
Total		1.360.000.000

Fonte: www.meio ambiente.pro.br, consultado em 30.06.2004

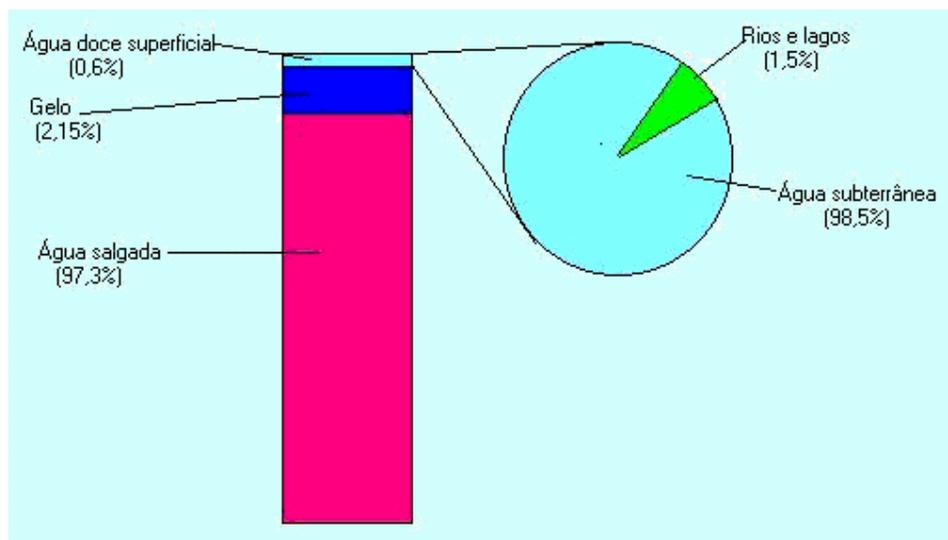


Figura 2 - Distribuição da água na terra

Fonte: www.meio ambiente.pro.br, consultado em 30.06.2004

O Brasil é um país privilegiado pois possui 12% das reservas mundiais de água doce com uma disponibilidade hídrica de 40.732 m³/hab/ano (ANA, 2002) porém aproximadamente 80% das águas brasileiras estão na Bacia Amazônica, e 1,6% no Estado de São Paulo (SABESP, 2004).

Apesar da disponibilidade hídrica do Estado de São Paulo, a sua distribuição não coincide com as áreas onde existe maior demanda pelo recurso hídrico (CETESB, 2004).

Esta crescente demanda e a diminuição da disponibilidade devido à contaminação da água por efluentes domésticos, industriais e provenientes da drenagem urbana, tem gerado uma grande pressão sobre os recursos hídricos, sendo verificada principalmente pelo crescimento de grandes núcleos urbanos nas regiões de cabeceiras de cursos de água, como as cidades de São Paulo e Campinas (ANA, 2004).

Tendo em vista a escassez do recurso hídrico superficial nestes núcleos, o recurso subterrâneo, tem se tornado uma reserva vital, onde as águas subterrâneas passam a ser uma reserva estratégica para o desenvolvimento de atividades econômicas (CETESB, 2004).

1.3 Ciclo Hidrológico e Disponibilidade do Recurso Hídrico Subterrâneo

O constante movimento da água na natureza, tem sua origem na chegada contínua da energia solar, permitindo que a água evapore e seja transportada para a atmosfera, precipite através da chuva, neblina e neve, sendo que uma parcela escoar pela superfície do solo até os rios, lagos e oceanos e outra infiltra e circula invisível pelo subsolo, alimentando o fluxo dos rios durante o tempo em que as chuvas, sobretudo, são praticamente nulas. Assim, os rios representam o sistema de drenagem da água doce para o mar, enquanto os aquíferos representam os sistemas de armazenamento de água doce no continente, que se acumularam ao longo de milhares de anos e que se encontram em condições naturais, equilibradas por um mecanismo de recarga e descarga.

Quase toda a água subterrânea existente na Terra tem origem no ciclo hidrológico (**Figura 3**), sistema pelo qual a natureza faz a água circular do Oceano para a atmosfera e daí para os continentes, de onde retorna, superficialmente ou subterraneamente ao oceano (CPRM, 2000 apud CETESB 2004). Existe assim um único volume de água no Planeta que se movimenta continuamente, não havendo divisão entre água superficial e subterrânea, onde a atuação sobre uma, provoca conseqüências no ciclo.

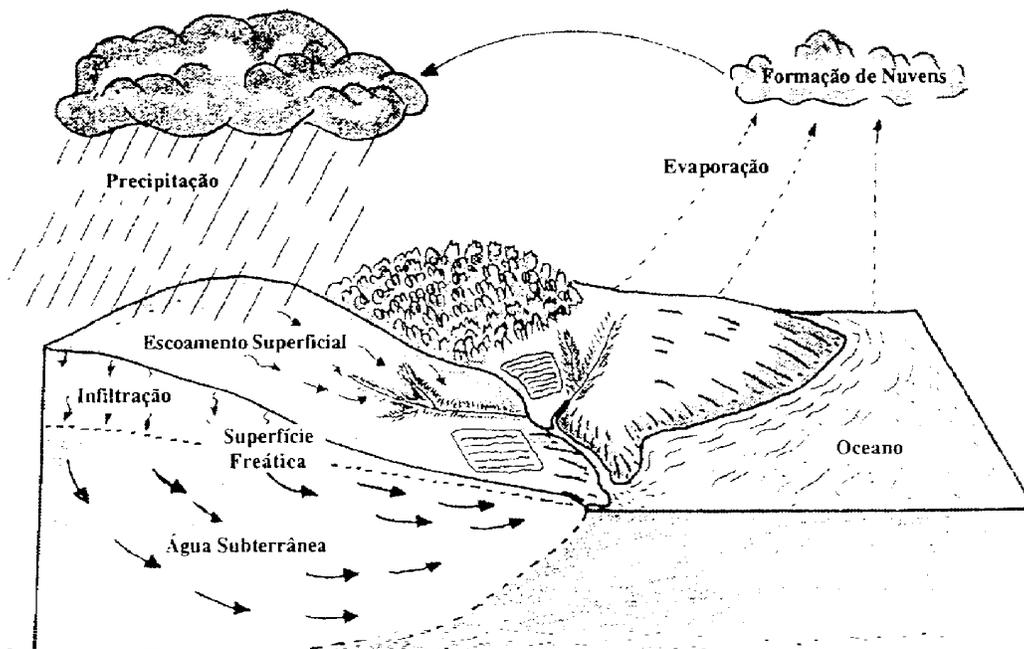


Figura 3 - Esquema simplificado mostrando as principais fases do ciclo hidrológico
 Fonte: (REVISTA UNIARA - nº 7, 2000, p.138)

O movimento descendente da água que infiltra, continua devido à ação da gravidade, preenchendo os vazios do subsolo (poros ou fraturas) acumulando-se ao encontrar barreiras menos impermeáveis, o que se denomina zona saturada.

A água subterrânea acumulada na zona saturada não fica estagnada. O movimento pode continuar descendente contribuindo para a recarga de aquíferos subjacentes. Nas áreas em que o aquífero está confinado por outra camada geológica, a recarga é dita indireta já que a água deve vencer a barreira imposta pela camada confinante até atingir o aquífero. Como na maioria das vezes o aquífero confinado encontra-se sob pressão, a água tem tendência de fluxo ascendente dificultando mais ainda o movimento descendente. Isto demonstra que as águas armazenadas em aquíferos confinados, quando utilizadas terão sua reposição lenta ou quase nula.

O movimento horizontal das águas subterrâneas também ocorre, até que estas alcancem o leito dos rios, reservatórios e mares. Esse movimento pode levar meses ou milhares de anos. Segundo SABESP/CEPAS (1994), apud CETESB 2004, a contribuição de origem subterrânea representa 62% da vazão total do rio Tietê, em Itaquaquecetuba.

1.4 Evolução do uso das Águas Subterrâneas

A utilização das águas subterrâneas remonta os primórdios das civilizações, sendo exploradas através de poços rasos escavados, cujos vestígios mais antigos datam de 12.000 anos antes de Cristo. A Bíblia relata muitos incidentes ilustrando a importância das águas subterrâneas para abastecimento das tribos de Israel. O Capítulo XXVI do Gênesis parece uma cartilha de água subterrânea, sendo Abraão e Isaac, famosos pelos seus sucessos na escavação de poços (VASQUES, 2002).

Civilizações antigas já usavam sistemas de irrigação com grande êxito, inclusive envolvendo as águas subterrâneas. Há 2.500 anos atrás, os egípcios irrigavam 400.000ha com águas vindas de aquíferos, por gravidade, através de túneis subhorizontais, sendo que o início da arte de perfurar poços é atribuída aos Chineses 5.000 anos antes de Cristo.

Durante a maior parte da história da humanidade, a água subterrânea foi captada principalmente em regiões áridas, carentes de água superficial. Ao longo de séculos, à medida que as populações e as terras agricultáveis se expandiam, a água subterrânea se tornou um recurso estratégico, com várias culturas desenvolvendo mitologias sofisticadas atribuindo a seus exploradores poderes especiais.

Até a década de 50, as águas subterrâneas eram, em geral, consideradas como um bem natural de uso doméstico e industrial, precário. O surto de desenvolvimento sócio-econômico verificado após o término da II Guerra Mundial e a crescente poluição das águas dos rios e lagos, provocaram a rápida

evolução de sua importância, a ponto de serem consideradas, atualmente, como um recurso de grande valor econômico, vital ou estratégico (VASQUES, 2002).

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).

Hoje, os principais aquíferos são explorados em todos os continentes e a água subterrânea é a fonte principal de água potável para 1,5-2 bilhões de pessoas em todo o mundo, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Água subterrânea como parcela de consumo de água potável, por região, final da década de 90¹

Região	Parcela de Água Potável na Água Subterrânea	População Atendida (milhões)
Ásia - Pacífico	32	1.000 a 1.200
Europa	75	200 a 500
América Latina	29	150
Estados Unidos	51	135
Austrália	15	3
Mundo		1.500 a 2.000

Fonte: Ásia-Pacífico e América do Latina de Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente *Groundwater: A Threatened Resource* (Nairobi: 1996), 10-11; Europa de Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico, *Water Resources Management: Integrated Policies* (Paris: 1989); Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, Departamento da Água, *The Quality of Our Nation's Water* (Washington, DC: 1998); Environment Australia, *State of the Environment Report 1996* (Canberra: 1996)

¹ Dados sobre a África indisponíveis.

Segundo estimativas da UNESCO (1992), entre 1970-1985, foram perfurados no mundo, cerca de 300 milhões de poços profundos, que fornecem água subterrânea para o abastecimento de mais de 50% da população do planeta e para a irrigação de 90 milhões de hectares.

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, conforme a **Tabela 2**, aproximadamente um quarto da população depende diretamente da água subterrânea para suas necessidades domésticas. Em Províncias como Prince Edward Island, e em cidades localizadas nas Províncias de Prince George e British Columbia, a dependência chega perto de 100%. Residências em povoados e áreas rurais dependem quase que totalmente da exploração da água subterrânea para seu abastecimento doméstico e uso agrícola.

Tabela 2 - Statistics on groundwater use in Canada, 1981¹

Province/ Territory	Population Reliant on Groundwater (%)	Groundwater Portion of Total Water (%)	Municipalities Dependent on Groundwater (%)	Percentage of Groundwater Use by Sector			
				Municipal	Rural	Agricultural	Industrial ²
British Columbia	22	9	32	18	7	20	55
Alberta	27	6	58	11	22	5	15
Saskatchewan	54	22	81	25	20	41	14
Manitoba	24	24	39	7	19	59	15
Ontario	23	6	47	51	18	23	8
Québec	17	6	31	38	22	29	11
New Brunswick	64	17	66	42	29	4	25
Nova Scotia	45	6	21	22	54	9	15
Prince Edward Island	100	91	100	46	34	15	5
Newfoundland	29	6	14	17	73	2	8
Yukon	63	22	100	98	2	0	0
Northwest Territories	1	48	6	<1	<1	0	99
Canada	26	8	38	31	19	28	22

¹ Data from Hess, P.J. *Groundwater Use in Canada, 1981*. National Hydrology Research Institute Paper N° 28, IWD Technical Bulletin N° 140, Environment Canada, 1986. Because the more recent (1993) data available in the MUD file at the federal Department of the Environment are incomplete, 1981 data were used in the interests of consistency and comparability.

² self-supplied water only

Algumas das maiores cidades do mundo em desenvolvimento como Jacarta, Daca, Lima e Cidade do México, dependem de aquíferos para quase todo seu abastecimento de água. Em áreas rurais, onde os sistemas centralizados de distribuição não estão desenvolvidos, a água subterrânea é caracteristicamente a única fonte de suprimento, onde quase 99% da população rural dos Estados Unidos e 80% dos indianos rurais, dependem da água subterrânea para beber.

Enquanto os rios e lagos são pressionados ao limite de suas capacidades - muitos deles represados, secos ou poluídos - depende-se mais e mais da água subterrânea para todas as nossas necessidades.

No Brasil, com um potencial hídrico subterrâneo estimado da ordem de 112 trilhões de m³, a utilização das águas subterrâneas pode ser considerada ainda modesta. Segundo Relatório da ANA (2004), existem cerca de 300.000 poços tubulares em operação, sendo perfurados mais de 10.000 poços anualmente.

O país apresenta condições altamente favoráveis ao desenvolvimento da vida e ao ciclo de renovabilidade dos seus potenciais de água doce- superficial e subterrânea - com alto índice pluviométrico (variando entre 1.000 e 3.000 mm/ano) sobre 90% do território. Segundo Rebouças (2004), o valor médio das recargas das águas subterrâneas, no Brasil, é estimado em 3.144 km³/ano. A extração de apenas 25% desta taxa média de recarga já representa uma oferta de água doce à população da ordem de 4.000 m³/ano per capita, que equivale quatro vezes à taxa que caracteriza o estresse hídrico, ou seja, de 1.000 m³/per capita.

Cidades como Maceió, Natal e Mossoró, são abastecidas exclusivamente por águas subterrâneas, sendo que 76,6% das cidades do Maranhão e 84,3% das cidades do Piauí, são supridas por esse tipo de fonte hídrica. Quanto ao uso da água subterrânea para fins de irrigação, destaca-se a região de Mossoró (RN), Vale do Guruguéia (PI) e, em menor escala, São Mamede (PB) (FEITOSA E MANOEL FILHO, 1997).

Já no município de Curitiba (PR), as águas captadas no aquífero embasamento cristalino, cuja vazão média é da ordem de 13.000 l/h/poço, são utilizadas para abastecer em torno de 76.000 pessoas; o volume anual produzido por este aquífero, incluindo os vários condomínios da cidade, é de aproximadamente 5.733.234 m³. A vazão média dos poços perfurados no aquífero carstico é de aproximadamente 160.000 l/h; a população atualmente abastecida com águas deste aquífero gira em torno de 185.515 habitantes, o que corresponde a uma produção da ordem de 9.000.000m³/ano (GIUSTI et al., 2000).

No Estado de São Paulo, de modo geral em períodos de seca, a vazão dos rios perenes é mantida pela água subterrânea que se acumulou nos aquíferos. A isso se dá o nome de fluxo de base (rios efluentes). Em algumas situações excepcionais, podem ocorrer situações naturais ou artificiais onde o nível da água do aquífero está abaixo do leito e assim o rio cede água ao aquífero (rio influente).

A porcentagem de uso das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo, segundo a CETESB (1997) reflete a distribuição geográfica dos melhores aquíferos para a produção de água, atendendo uma população de 5.525.340 habitantes, onde dos 645 municípios do Estado, 200 são abastecidos por água superficial, enquanto que 310 usam exclusivamente água subterrânea e os 135 municípios restantes realizam um misto de captação superficial e subterrânea. A **Tabela 3** apresenta um levantamento sobre os tipos de captação de água para abastecimento público e as populações atendidas por Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos(URGHI).

Tabela 3 - Número de municípios por tipos de captação de água para abastecimento público e as populações atendidas, por UGRHI(Unidade de Gerenciamento de Rec.Hídricos)

UGRHI	População Urbana*	Número de municípios por tipo de captação		
		Superficial	Subterrânea	Mista
1-Mantiqueira	51.447	3	0	0
2-Paraíba do Sul	1.631.005	21	3	10
3-Litoral Norte	217.747	4	0	0
4-Pardo	901.038	10	7	6
5-P.C.J.	4.072.625	31	8	18
6-Alto Tietê	16.963.693	25	0	9
7-B.Santista	1.468.617	9	0	0
8-Sapucaí/Grande	571.604	3	13	6
9-Mogi Guaçu	1.178.493	22	12	4
10-Médio Tietê	1.356.000	15	6	12
11-Litoral Sul	234.124	12	1	10
12-Baixo Pardo	286.528	3	3	6
13-Tietê/Jacaré	1.254.100	4	20	11
14-A Paranapanema	510.233	22	6	6
15-Turvo Grande	1.014.780	1	57	6
16-Tietê/Batalha	409.833	0	27	6
17-M.Paranapanema	543.712	6	25	10
18-S.J.Dourados	182.465	2	20	3
19-Baixo Tietê	618.628	2	33	7
20-Aguapeí	295.155	1	29	2
21-Peixe	376.132	3	22	1
22-P.Paranapanema	388.785	1	18	2
Total	34.526.744	200	310	135

* IBGE 2000

Fonte: SMA, 2002

Além do abastecimento público, deve ser ressaltado o aproveitamento de água subterrânea de pequena profundidade, através de poços rasos. Em todo o Estado de São Paulo, especialmente nas áreas não servidas por rede de distribuição de água e nas zonas rurais de todos os municípios, a utilização de cisternas ou cacimbas para a captação de água subterrânea de pequena profundidade, constitui-se uma fonte importante de abastecimento de água, mesmo na região da grande São Paulo.

Um outro usuário importante do recurso hídrico subterrâneo é o abastecimento industrial. Dessa forma, foi realizado um levantamento junto ao cadastro de empreendimentos da CETESB, na tentativa de comparar a demanda de água subterrânea nos empreendimentos licenciados que utilizam a água subterrânea para seu abastecimento em comparação com aqueles que se utilizam outros tipos de captação.

A informatização dos Memoriais de Caracterização de Empreendimentos - MCE é relativamente recente na CETESB e por isto, apenas 10% dos empreendimentos cadastrados apresentam informações eletrônicas sobre origem da captação de água, correspondendo à aproximadamente 22.000 dados que foram tratados estatisticamente.

Nas **Tabelas 4, 5 e 6**, pode-se verificar a representatividade das Águas Subterrâneas na UGRHI-13 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos), destacando-se o registro de 210 Empreendimentos, um consumo diário de 16324,5 m³, sendo de fundamental importância para as indústrias de Bebidas, Alimentícia, Têxtil e Metalúrgica.

A Rede Pública por sua vez, representa um total de 1191 Empreendimentos com um consumo médio diário de 4790,8 m³.

Tabela 4 - Empreendimentos licenciados pela CETESB por UGRHI, por diferentes tipos de captação de água

Nº UGRHI	UGRHI	Empreendimentos por tipo de captação de água (Número)						Outros (*)	
		Subterrânea		Superficial		Rede Pública		Nº emp.	%
		Nº emp.	%	Nº emp.	%	Nº emp.	%		
1	Mantiqueira	1	11,11	6	66,67	2	22,22	0	0
2	Paraíba do Sul	278	26,96	91	8,83	652	63,24	10	0,97
3	Litoral Norte	4	10	5	12,5	26	63,24	5	12,5
4	Pardo	160	17,66	57	6,29	680	75,06	9	0,99
5	Piracicaba/Capivari/Jundiaí	398	18,77	108	5,09	1583	74,67	31	1,46
6	Alto Tietê	591	7,12	85	1,02	7506	90,41	120	1,45
7	Baixada Santista	7	6,25	20	17,86	79	70,54	6	5,36
8	Sapucaí/Grande	58	3,92	13	0,88	1398	94,52	10	0,68
9	Mogi Guaçu	259	17,02	98	6,44	1144	75,16	21	1,38
10	Sorocaba/Médio Tietê	396	24,78	110	6,88	1082	67,71	10	0,63
11	Ribeira de Iguape/Litoral Sul	18	42,86	11	26,19	12	28,57	1	2,38
12	Baixo Pardo/Grande	38	29,92	14	11,02	73	57,48	2	1,57
13	Tietê/Jacaré	210	14,26	58	3,94	1191	80,86	14	0,95
14	Alto Paranapanema	169	41,52	44	10,81	192	47,17	2	0,49
15	Turvo/Grande	174	23,29	32	4,28	538	72,02	3	0,40
16	Tietê/Batalha	124	24,75	13	2,59	358	71,46	6	1,2
17	Médio Paranapanema	87	24,65	18	5,10	245	69,41	3	0,85
18	São José dos Dourados	27	20,45	5	3,79	99	75,00	1	0,76
19	Baixo Tietê	70	15,59	9	2,00	370	82,41	0	0
20	Aguapei	61	16,22	6	1,60	309	82,18	0	0
21	Peixe	37	16,09	14	6,09	179	77,83	0	0
22	Pontal do Paranapanema	17	32,69	2	3,85	33	63,46	0	0
Média			20,29		9,73		68,41		1,57

(*) captação por rede particular
Fonte: CETESB, 2004.

Tabela 5 - Consumo médio de água em empreendimentos licenciados pela CETESB por UGRHI, por diferentes tipos de captação de água

Nº UGRHI	UGRHI	Consumo médio de água em m³/dia por tipo de captação											
		Captação Própria					Rede Pública					Outros (*)	
		Subterrânea (poços)		Superficial (rios)		%	m³/dia		%		m³/dia		%
1	Mantiqueira	0,6	4,2	7,7	58,0		5,0	37,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	Paraíba do Sul	30870,1	3,6	108358,6	12,5	726323,7	83,6	3016,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
3	Litoral Norte	28,4	0,1	32940,6	97,7	734,9	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	Pardo	6791,5	13,6	34463,7	69,1	8569,3	17,2	43,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
5	Piracicaba/Capivari/Jundiá	23890,5	3,9	467739,3	76,5	113594,0	18,6	6405,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	Alto Tietê	42153,1	4,7	777322,5	85,8	73467,0	8,1	13133,6	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
7	Baixada Santista	34,2	0,1	59595,3	93,8	3920,3	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	Sapucaí/Grande	12004,9	39,4	9468,0	31,1	9007,4	29,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	Mogi Guaçu	12005,7	4,1	101394,7	34,3	46113,3	15,6	135748,4	46,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	Sorocaba/Médio Tietê	18648,2	26,9	29806,3	43,0	19931,1	28,7	948,3	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0
11	Ribeira de Iguape/Litoral Sul	125,8	0,5	26079,2	94,9	1262,4	4,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	Baixo Pardo/Grande	1659,1	18,3	6398,2	70,7	457,8	5,1	533,0	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0
13	Tietê/Jacarê	16324,5	39,8	9694,2	23,7	4790,8	11,7	10173,8	24,8	0,0	0,0	0,0	0,0
14	Alto Paranapanema	15602,6	26,4	15812,0	26,7	8324,1	14,1	1943,1	32,8	0,0	0,0	0,0	0,0
15	Turvo/Grande	11498,7	5,6	136904,0	66,4	57776,6	28,0	3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	Tietê/Batalha	10341,4	60,2	3926,6	22,9	600,7	3,5	2306,7	13,4	0,0	0,0	0,0	0,0
17	Médio Paranapanema	109609,5	18,4	382573,6	64,2	103963,0	17,4	14,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	São José dos Dourados	108,9	1,8	14,6	0,2	5803,4	97,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	Baixo Tietê	10453,2	49,0	9906,6	46,5	957,7	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	Aguapeí	6350,9	29,5	12688,7	59,0	2453,0	11,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21	Peixe	4499,7	64,7	2086,5	30,0	371,6	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	Pontal do Paranapanema	2385,8	92,3	0,0	0,0	117,4	4,5	83,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0
Média		23,05		50,32		20,71		5,92					

(*) captação por rede particular
Fonte: CETESB, 2004.

Tabela 6 - Captação de água subterrânea por atividade por UGRHI em m³/dia

UGRHI	Madeiras Extrativas e Mobiliário	Papel e Pa-pelão	Borracha	Bebida	Alimentícios	Couro e Peles	Calçados	Têxtil	Material Plástico e Elétrico	Mecânica e Metalurgia	Minerais Não Metálicos	Comércio	Material Transportado	Química	Perfumes Sabão/Farmácia	Serviços Pessoais	Unidade Pública	Diversos	
1	0,55																		
2	180	5		176	667		3	106	225	1141	874	14	2037	24306	603	53	2	483	
3					1						1						10	16	
4	760	330	2	2346	784	210		441	43	56	206	134	6	392	257	54	758	5	
5	895	924	241	792	2780	2	214	6333	1066	1079	6837	21	344	1187	286	212	91	587	
6	700	149	2571	1442	4535		574	1601	1701	9940	799	554	3099	5742	1584	5638	898	625	
7								2			2	28	1					1	
8	13	6		171	2118	252	8	11		28	11	3		11	2		9371		
9	341	1500	29	4697	1225	834		41	195	305	672	3	1239	615	211		8	57	
10	280	23	23	6161	3277		1059	2294	938	860	1672	4	365	483	85	145	201	475	
11	99	6		3							13			4				0	
12	62		60	0	1279	2	135	5	55	2	2	0		11	0	41	3	1	
13	20	1	3	6470	4675	66		1938	108	967	291	38	417	75	1	50	72	1131	
14	9304		3	255	5326		15	395	1	6	137	2	5	61	12		39	3	
15	759		339	1369	6947		1	36	45	107	43	5	21	500	26	1300	2		
16	1168	1	365	10	4208	3983	1	58	5	43	311	0	3	155	2		21	6	
17	38			100545	8895			18	13	17	20	12		33	4		6	9	
18	9		3	54					20	16	4			3					
19	10		5	51	1832	872	4		2	153	49	58	10	7407					
20	164	0		1399			48	2300	3	44	70			2319	4		4		
21	2	2	1	4125	310				5	6	30			7			4	10	
22	42			2148	133				0	2	1	60							
Total	14844	2947	3644	124486	56278	6664	2062	15577	4424	14771	12047	936	7545	43311	3077	7493	11486	3713	

Fonte: CETESB, 2004.

Em relação ao abastecimento urbano, verifica-se que o incentivo à adoção da água subterrânea como fonte, é a redução do custo de produção que pode ser até dez vezes inferior ao de fontes superficiais. A cidade de Ribeirão Preto é um exemplo claro desta situação: a utilização da água subterrânea para o seu abastecimento, além de garantir a qualidade da água, é um dos municípios que oferece tarifas mais baixas do Estado (Saneamento Ambiental, 1998).

Em outros municípios, como a cidade de Bauru, pólo de desenvolvimento urbano da região, os 28 poços tubulares em funcionamento são responsáveis pelo suprimento de metade da demanda doméstica. O sistema baseado na captação de água superficial de uma única fonte, mesmo operando com capacidade máxima, não suporta a crescente demanda apresentada.

A **Tabela 7** apresenta um prognóstico da contribuição das águas subterrâneas e superficiais no suprimento das demandas da cidade de Bauru.

Tabela 7 - População atendida por água superficial e subterrânea na cidade de Bauru-SP pelo sistema público de abastecimento (CAVAGUTI E SILVA et al., 1992)

Ano	População atendida (%)	Água superficial (%)	Água subterrânea (%)
1980	92,0	74,0	26,0
1991	95,0	51,3	48,7
2000	95,0	43,2	56,8

Porém, esta importante representatividade das águas subterrâneas, permite refletir sobre a indústria de perfuração de poços que tem se desenvolvido nestes últimos anos; REBOUÇAS (1999) já alertava sobre a existência de milhares de poços clandestinos e irregulares, principalmente em regiões metropolitanas, sendo que o município de Araraquara não é exceção, haja vista que estima-se que o número total de poços seja três vezes superior ao número de poços cadastrados regularmente. Aliado a este fato, vários estudos apontam para um possível rebaixamento dos níveis de água dos lençóis freáticos,

induzindo uma sobreexploração dos recursos hídricos subterrâneos, que será discutido neste capítulo.

1.5 A Urbanização e o Crescimento da Utilização dos Recursos Hídricos Subterrâneos no Estado de São Paulo

No Brasil, o processo de urbanização é bastante complexo, possuindo duas características principais, onde por um lado, concentra grande contingente populacional em um número reduzido de áreas metropolitanas e grandes cidades, alimentando o crescimento da população urbana de um número grande e crescente de cidades de diferentes tamanhos que se integram num complexo padrão de divisão territorial do trabalho social tanto entre o campo e a cidade como entre as cidades (FARIA, 1991).

No Estado de São Paulo é necessário fazer uma retrospectiva mais abrangente no processo de urbanização, porém neste trabalho será enfatizado apenas o deslocamento de investimentos da capital para o interior do Estado, levando-se em conta fatores sociais, ambientais e econômicos, possibilitando tomada de decisões preventivas em áreas de expansão populacional como o próspero interior do Estado de São Paulo.

Estes fatos ficam evidentes quando se observa que em 1970 o Estado de São Paulo respondia por 58,1% do VTI (Valor de Transformação Industrial) da indústria brasileira, onde dentro do Estado esse valor estava distribuído entre a RMSP (Região Metropolitana do Estado de São Paulo) com 43,4% e o interior com 14,7%.

Em 1995 verificou-se uma diminuição da participação do Estado de São Paulo em relação ao total do VTI (Valor de Transformação Industrial), passando a ser responsável por 49,9%, porém com uma mudança significativa na composição deste indicador dentro do próprio Estado, onde a RMSP passou a responder por 26,6% do total e o interior por 23,3% (PACHECO, 1996)

Com o deslocamento das atividades econômicas da RMSP (Região Metropolitana de São Paulo) para o interior do Estado, torna-se fundamental considerar a questão da disponibilidade hídrica na localização das futuras atividades econômicas, principalmente daquelas de uso intensivo e com potencial de atração populacional, onde através de uma análise crítica dos usos e demanda de água (**Tabela 8**) e da Disponibilidade Hídrica (**Tabela 9**) por Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) no Estado de São Paulo, pode-se desenvolver ferramentas de gestão através da modelagem matemática que permitam um equilíbrio sócio-econômico e ambiental.

Analisando as Tabelas 8 e 9, verifica-se que no Estado de São Paulo para uma demanda total de água na ordem de 362,6 m³/s tem-se uma disponibilidade hídrica estimada em 1380,1 m³/s (considerando uma vazão mínima de 892 m³/s das águas superficiais e a disponibilidade total das águas subterrâneas), o que corresponde a um comprometimento de 26,27% do volume total.

Em relação ao percentual de utilização por Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (URGRHs), a Área de Metropolização da Região de Campinas, a qual pertence à Bacia Hidrográfica do Piracicaba-Capiravari-Jundiá (PCJ), este percentual já atinge 49,85% quando somados os recursos superficiais e subterrâneos; porém estudos realizados nesta região pela UNICAMP, apontam para uma Taxa de Exploração de 100% da reserva ativa dos aquíferos no ano de 2005, devido à alta densidade demográfica, a alta taxa de industrialização e uma baixa produtividade dos sistemas aquíferos da região, aliada a limitada disponibilidade do recurso hídrico devido a inúmeras intervenções antrópicas como o Sistema Cantareira (PEREIRA, 2000).

Tabela 8 - Usos e demanda total de água das UGRHIs do Estado de São Paulo, 1990

Regiões Administrativas	Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (UGRHIs)	Urbano		Industrial		Irrigação		Demanda total (m³/s)
		(m³/s)	%	(m³/s)	%	(m³/s)	%	
São José dos Campos	(1) Mantiqueira	0,1	33,3	0,1	33,3	0,1	33,3	0,3
	(2) Paraíba do Sul	3,5	17,5	8,3	41,5	8,2	41,0	20,0
	(3) Litoral Norte	0,5	62,5	-	0,0	0,3	37,5	0,8
Ribeirão Preto	(4) Pardo	3,6	13,0	8,3	30,1	15,7	56,9	27,6
	(9) Mogi-Guaçu	3,5	9,5	16,6	45,1	16,7	45,4	36,8
Campinas	(5) Piracicaba/Capivari/Jundiaí	13,3*	39,8	12,5*	37,4	7,6*	22,8	33,4
Região Metropolitana de São Paulo	(6) Alto Tietê	62,3	87,6	4,6	6,5	4,2	5,9	71,1
Santos	(7) Baixada	7,6*	40,4	11,2*	59,6	-	0,0	18,8*
Franca	(8) Sapucaí/Grande	1,8	16,5	0,3	2,8	8,8	80,7	10,9
Barretos	(12) Baixo Pardo/Grande	1,0	8,0	1,4	11,2	10,1	80,8	12,5
Sorocaba	(10) Tietê/Sorocaba	3,7	17,3	6,8	31,8	10,9	50,9	21,4
	(14) Alto Paranapanema	1,3	6,1	1,7	8,0	18,3	85,9	21,3
Registro	(11) Ribeira de Iguape	0,6	14,3	1,3	31,0	2,3	54,8	4,2
Bauru	(13) Tietê/Jacaré	3,1	21,5	8,0	55,6	3,3	22,9	14,4
São José Rio Preto	(15) Turvo/Grande	4,2	23,9	2,0	11,4	11,4	64,8	17,6
Marília	(16) Tietê/Batalha	0,9	10,2	1,4	15,9	6,5	73,9	8,8
	(17) Médio Paranapanema	1,4	15,7	3,0	33,7	4,5	50,6	8,9
	(20) Aguapeí (parte)	0,8	14,5	0,8	14,5	3,9	70,9	5,5
Araçatuba	(18) São José dos Dourados	0,6	17,6	0,2	5,9	2,6	76,5	3,4
	(19) Baixo Tietê	1,6	12,1	1,8	13,6	9,8	74,2	13,2
Presidente Prudente	(21) Peixe	1,0	30,3	0,3	9,1	2,0	60,6	3,3
	(22) Pontal do Paranapanema	0,9	10,7	1,2	14,3	6,3	75,0	8,4
	Total do estado	117,3	32,3	91,8	25,3	153,5	42,3	362,6

Fonte: São Paulo (1997)

(*) dados referentes ao ano de 1995

Tabela 9 - Disponibilidade hídrica no Estado de São Paulo por unidade de gerenciamento

Unidade de Gerenciamento (UGRHI)	Águas Superficiais			Águas Subterrâneas
	Área de drenagem (Km ²)	Vazão Média (m ³ /s)	Vazão Mínima (m ³ /s)	Disponibilidade Total (m ³ /s)
01 - Mantiqueira	679	22	7	2,0
02 - Paraíba do Sul	14.547	217	72	20,1
03 - Litoral Norte	1.987	109	28	8,2
04 - Pardo	9.038	140	30	10,0
05 - Piracicaba/Capivari/Jundiaí	14.314	174	43	24,0
06 - Alto Tietê	5.985	86	20	19,1
07 - Baixada Santista	2.886	158	39	15,0
08 - Sapucaí/Grande	9.170	147	28	10,8
09 - Mogi-Graçu	15.218	202	49	16,8
10 - Tietê/Sorocaba	11.708	106	22	7,8
11 - Ribeiro de Iguape/Litoral Sul	16.607	511	157	57,9
12 - Baixo Pardo/Grande	7.249	86	21	11,0
Unidade de Gerenciamento (UGRHI)	Águas Superficiais			Águas Subterrâneas
	Área de drenagem (Km ²)	Vazão Média (m ³ /s)	Vazão Mínima (m ³ /s)	Disponibilidade Total (m ³ /s)
13 - Tietê/Jacaré	11.749	97	40	12,9
14 - Alto Paranapanema	22.795	255	84	25,0
15 - Turvo/Grande	16.037	122	26	10,5
16 - Tietê/Batalha	13.151	98	31	10,0
17 - Médio Paranapanema	16.829	155	65	20,7
18 - São José dos Dourados	6.732	51	12	4,4
19 - Baixo Tietê	15.787	114	27	12,2
20 - Aguapeí	13.068	96	28	10,9
21 - Peixe	10.780	82	29	11,6
22 - Pontal do Paranapanema	12.493	92	34	15,2
Estado de São Paulo	248.809	3.120	892	488,1

Fonte: Revista Citricultura Atual, outubro/2003. p.10-11

Este fenômeno parece atingir as regiões mais desenvolvidas do Estado, onde vários municípios vem sofrendo os mesmos problemas, segundo MONTEIRO (2003); os processos de explosão demográfica, que podem estar associados inclusive a migrações, e a industrialização, faz com que a demanda por água seja crescente e cidades, como Ribeirão Preto, que dependem deste recurso hídrico subterrâneo para abastecimento, apresentem uma constante e acelerada depleção do aquífero. Este município pertence a duas

Bacias Hidrográficas, a do Pardo (com percentual de comprometimento da ordem de 69%) e do Mogi Guaçu (com percentual de comprometimento da ordem de 56%).

No caso do município de Araraquara, que pertence à bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré, o comprometimento da demanda está na ordem de 27%, sendo um valor compatível com a média do Estado, porém há de se levar em conta que existe uma previsão de crescimento na região devido à instalação de um Pólo Aeronáutico, que possibilitará um desenvolvimento acelerado. Contudo estudos preliminares na região podem fornecer subsídios para tomadas de decisão preventivas que não foram possíveis nas Regiões Metropolitanas de São Paulo(RMSP) e Campinas.

Quando estas duas regiões metropolitanas (São Paulo e Campinas) são analisadas algumas evidências devem ser explicitadas: primeiramente a respeito da disponibilidade dos recursos superficiais, onde pelos dados da **Tabela 10**, pode-se verificar que a RMSP encontra-se em uma situação crítica, pois em determinadas épocas do ano, a sua demanda pode chegar a ser três vezes maior do que a disponibilidade hídrica; este déficit pode ser suprido com a importação de água (31 m³/s) oriunda principalmente da URGHI Piracicaba/Capivari/Jundiaí; entretanto este volume começa a fazer falta para a região exportadora, tendo em vista as projeções de demanda, que apontam para um comprometimento de 92% da vazão de referencia para o ano de 2010. Há de se considerar também que pelos estudos da UNICAMP, já relatados, 100% da reserva ativa dos aquíferos estará comprometida até o ano de 2005.

Estes fatores, juntamente com a renovação da outorga que autoriza o bombeamento de água do Rio Atibaia (Bacia Hidrográfica do Piracicaba/Capivari/Jaguari) para o Sistema Cantareira, devem promover algumas modificações no atual regime de bombeamento, pois existe a possibilidade da bacia Hidrográfica do PCJ importar água da URGHI Mogi Guaçu, que por sua vez começa a dar sinais de inviabilidade, devido à elevada demanda por água nessa região para atividades industriais e de irrigação, que

projetam para 2010 um comprometimento de mais de 82% da vazão de referência. Esta por sua vez pode ter a necessidade de captar água superficial de outras URGHIs da Região Central do Estado (Tietê Jacaré e Tietê Batalha) num futuro bem próximo, podendo afetar a região inserida neste estudo.

Tabela 10 - Demanda e disponibilidade hídrica superficial

		Q 7,10	Qref	1990	2010**
(1) Mantiqueira	0,3	7,0	8,0	3,7	5,0
(2) Paraíba do Sul	20,0	71,0	140,0	14,3	36,4
(3) Litoral Norte	0,8	27,0	36,0	2,2	7,5
(4) Pardo	27,6	37,0	67,0	41,2	84,2
(5) Piracicaba/Capivari/Jundiaí	33,4*	38,0	49,0	68,2*	92,2
(9) Mogi-Guaçu	36,8	47,0	59,0	62,4	82,5
(6) Alto Tietê	71,1	18,0	113,0	62,9	68,3
(7) Baixada Santista	16,8*	38,0	61,0	27,5*	32,6
(8) Sapucaí/Grande	10,9	28,0	35,0	31,0	55,7
(10) Tietê/Sorocaba	21,4	24,0	222,0	9,6	20,4
(14) Alto Paranapanema	21,3	80,0	244,0	8,7	17,5
(17) Médio Paranapanema	8,9	68,0	360,0	2,5	5,2
(11) Ribeira de Iguape	4,2	153,0	180,0	2,3	4,0
(15) Turvo/Grande	17,6	26,0	32,0	55,0	93,4
(12) Baixo Pardo/Grande	12,5	20,0	151,0	8,3	13,2
(13) Tietê/Jacaré	14,4	39,0	286,0	5,0	8,7
(16) Tietê/Batalha	8,8	24,0	382,0	2,3	5,4
(20) Aguapeí (parte)	5,5	28,0	35,0	15,7	37,7
(18) São José dos Dourados	3,4	12,0	15,0	22,7	42,0
(19) Baixo Tietê	13,2	26,0	426,0	3,1	5,9
(21) Peixe	3,3	34,0	40,0	8,2	16,5
(22) Pontal do Paranapanema	8,4	35,0	507,0	1,6	1,7

Fonte: São Paulo (1997)

(*) dados referentes ao ano de 1995

(**) projeções

Segundo SOUZA (2004), a ABAS (Associação Brasileira de Águas Subterrâneas) solicitou ao LEBAC/IGC/UNESP um estudo de viabilidade técnico-econômica de abastecimento de água da RMSP pelo Aquífero Guarani para definir locais favoráveis, interferências, padronização dos tipos de poços, formato das células de produção e outros dados técnicos com a finalidade de conferir rigor científico e credibilidade a este tipo de solução. O tempo previsto para definir todos os parâmetros deve ter uma duração de um ano. Ainda segundo SOUZA (2004), recebida à proposta ficou evidente que as regiões de Itatinga e Itirapina, no interior do Estado de São Paulo, que recebem recarga direta das chuvas, estimando-se 75 m³/s a recarga anual em uma área de afloramento de 18.400 km², eram as mais promissoras. Esta retirada poderia ser realizada através de 100 poços com vazões de 50l/s, aproveitando-se 7% da recarga anual, e sendo suficiente para o abastecimento de 1.800.000 habitantes, adotando-se um consumo médio de 200l/hab/dia. Segundo a AESABESP (Associação dos Engenheiros da SABESP), o custo somente das adutoras até o Rodoanel da RMSP seria de R\$1.178.057.418,66, valor considerado elevado para a adoção desta solução.

As limitações de uso da água superficial aliado ao crescimento da participação do interior do Estado de São Paulo no VTI (Valor de Transformação Industrial), permite avaliar os efeitos do crescimento das atividades econômicas e do crescimento populacional, apontando para uma crescente demanda dos recursos hídricos subterrâneos, sendo que o mesmo tende a aumentar nos próximos anos, tanto pelas necessidades decorrentes do aumento da concentração demográfica e da expansão econômica, como também pelas relativas vantagens sobre as águas superficiais. Todavia, a situação atual de exploração é marcada por uma visão imediatista de uso do recurso, prevalecendo o descontrole e a falta de mecanismos legais e normativos. Nestas condições, os aquíferos, em diferentes áreas do território nacional, estão sujeitos aos impactos da extração descontrolada e da ocupação indisciplinada do solo, que põe em risco a qualidade das águas (HIRATA, 1997).

Cabe então aos Órgãos Municipais de abastecimento de água, um estudo aprofundado das fontes potenciais de água, a classificação de sua qualidade e quantificação de seu volume passível de exploração, visando uma Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos, que supra as atuais necessidades e das futuras gerações.

1.6 Sobreexploração das Aguas Subterrâneas

O estudo das águas subterrâneas como recurso, envolve três fases distintas: exploração, avaliação e exploração. A primeira relaciona-se a fase em que técnicas geofísicas e geológicas de superfície e de subsuperfície são utilizadas para definir se uma unidade litoestratigráfica poderá ser aproveitada como um recurso. A segunda fase se define como aquela em que o aquífero é quantificado, os parâmetros hidrogeológicos são medidos e testes de bombeamento de poços são realizados. A terceira, conhecida também como fase de manejo, é aquela onde devem ser consideradas as estratégias de desenvolvimento e de extração otimizada do aquífero bem como a análise das interações entre o uso do recurso hídrico subterrâneo e do sistema hidrológico regional, visando um manejo sustentável (HIRATA, 1998).

Este manejo sustentável envolvendo as interações da água subterrânea e o sistema hidrológico regional, evidencia a importância de uma extração otimizada, para que a mesma não se transforme numa sobreexploração, o que de certa forma descaracterizaria a sustentabilidade do sistema. Vale ressaltar também que, segundo MARGAT (1992b), toda exploração de água subterrânea começa com uma fase de não equilíbrio, onde uma parte do volume da água produzida pelo poço é removida da reserva, sendo que a duração desta fase vai depender da vazão, condições de contorno e da velocidade de resposta do aquífero.

Porém quando se busca o conceito de sobreexploração de um aquífero, verifica-se que o mesmo é ambivalente, até mesmo ambíguo, uma vez que em

alguns casos é aplicado para o conceito hidráulico de exploração não-balanceada e exaustão de reservas e outras vezes para uma noção multi-critério de exploração excessiva com conseqüências indesejáveis (MARGAT, 1992b). A sobreexploração pode ser entendida também como uma exploração excessiva em relação a uma exploração julgada ser o máximo possível sobre a base de critérios definidos e, trazendo desta forma, conseqüências negativas que, cedo ou tarde, serão prejudiciais aos próprios operadores ou a terceiros. Estes critérios descritos por MARGAT (1992b) são:

1. físico/químicos: interrupção do equilíbrio hidrodinâmica, que precisa ser preservado; estabelecimento de um recurso depletado;
2. qualitativo: degradação da qualidade da água devido a efeitos da exploração;
3. econômico: custos da exploração excedendo o valor das vantagens que esse desenvolvimento oferece ou que se torna não competitivo em relação a outras fontes de suprimento de água ou, de forma mais geral, todos os custos diretos (para os operadores) e “custos externos” (advindos de outros) maior que as vantagens coletivas;
4. social: conflitos do uso entre diferentes categorias de usuários desse recurso com efeitos prejudiciais sofrido por terceiros, como usuários de água superficial e subterrânea;
5. ambiental: dano do ambiente natural, especialmente de ecossistemas aquáticos mais sensíveis.

Na prática, porém estas definições de sobreexploração podem variar, onde segundo Custódio (2002) as mesmas se constituem de um resultado da percepção de grupos específicos, de acordo com seus interesses e pontos de vista.

A preservação das condições de um aquífero explorado, num dado estágio, significa a manutenção de um regime de equilíbrio dinâmico médio, maximizando e perpetuando a media anual de produção de água

(MARGAT, 1992b) no entanto, é necessário levar em conta a demografia, qualidade de vida e uso e ocupação do espaço sobre o aquífero, além dos aspectos sócio- econômicos da região. Assim, a caracterização de uma sobreexploração corresponde a uma condição de abstração superior a recarga média, isto é, o índice de exploração (abstração/recarga media) é maior que 1 (ou 100%) e, conseqüentemente, a exploração encontra-se num regime não balanceado (não-equilibrado) e excessivo, conforme esquema abaixo, porém muitas incertezas estão associadas a essas medidas, onde podemos questionar se uma sobreexploração é representada por : $C + D$, ou $B + D$, ou somente D ?

Exploração	Não excessivo	Excessivo
Equilíbrio	A	B
Não Equilíbrio	C	D

MARGAT (1992b).

De acordo com MARGAT (1992b) a sobreexploração é diagnosticada baseada na observação de manifestações de manutenção prolongada de um regime de não-equilíbrio: continua queda do nível de água (rebaixamento da superfície potenciométrica) e possíveis conseqüências no fluxo das bordas do sistema aquífero e da qualidade da água.

MARGAT (1992b) analisa o fato de que um regime não-balanceado, revelado pelo rebaixamento da superfície potenciométrica e, então, de diminuição das reservas, não necessariamente implica que a abstração de água seja maior que a recarga media natural do aquífero, podendo refletir somente um aumento local da abstração de água subterrânea, que é maior que a recarga natural ou efeitos de que a abstração de fluxos nas bordas do sistema aquífero não foi ainda completamente sentida.

Segundo CUSTÓDIO (2002), não há certeza de um sinal de alarme sobre o que esta acontecendo com um aquífero; porém, de acordo com o mesmo autor, existem sinais de fácil identificação, como: rebaixamento contínuo do nível de água, diminuição da vazão de fontes e progressiva deterioração da qualidade da água, ainda que outras causas possam resultar nesses mesmos resultados. Outras mudanças como diminuição da vazão de um rio, redução da área alagada, migração de água subterrânea de baixa qualidade e subsidência de terreno geralmente ocorrem num ritmo muito lento, necessitando de um monitoramento contínuo e uma série histórica para sua correta avaliação e redução do efeito da variabilidade que falsearia essa tendência.

Algumas características tornam os alguns aquíferos mais vulneráveis a sobreexploração, conforme descrito por MARGAT (1992b):

1. aquíferos pouco espessos, onde rebaixamentos substanciais reduzem a produtividade ou aquíferos estratificados com uma camada permeável que pode ser drenada;
2. aquíferos com alta produtividade, onde a água subterrânea pode ser facilmente obtida por muitos operadores e usuários, resultando em uma abstração acumulada que com facilidade excede a recarga média do aquífero;
3. aquíferos recarregados por cursos de água, cuja conectividade pode deixar de existir por um substancial rebaixamento;
4. aquíferos com importantes restrições na conservação da vazão de áreas de descarga;
5. aquíferos com interface de água doce/salgada ou com grande amplitude de qualidade de água;
6. aquíferos sedimentares inconsolidados em solo compactável, onde o rebaixamento pode causar significativa subsidência.

Algumas alternativas para mitigar ou eliminar o rebaixamento progressivo do nível dos aquíferos já existem, tais como a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, através de instrumentos como outorga de concessões de exploração e a recarga artificial dos aquíferos (MURILLO-DIAZ et al., 1999), ou mesmo a realocação de poços, o que pode ser bastante caro (LARA; ORTIZ, 1999), e a cobrança pelo uso da água (RAMNARONG, 1999).

MARGAT (1992b) identifica 3 métodos de gestão das reservas de um aquífero de acordo com as estratégias de exploração:

1 Estratégia de máxima e duradoura exploração dos recursos renováveis, sob um regime de equilíbrio dinâmico, com abstração média \leq recarga média, sem levar em conta flutuações sazonais e mesmo possíveis variações anuais (mais exploração no período de estiagem). Então, após um período de descenso do nível de água numa fase inicial de não-equilíbrio, a reserva estabilizada é utilizada, usualmente como fator regulador, sob restrição de preservar uma taxa de fluxo mínima nas áreas de descarga do aquífero (fontes, rios) ou para preservar o equilíbrio de água doce/salgada em aquíferos costeiros. Esta estratégia é apropriada para aquíferos livres de pequena a média capacidade e de limitada espessura, com alta taxa de recarga e aquíferos confinados próximos à zona de recarga, isto é, casos onde as restrições limitam o possível rebaixamento.

2. Estratégia de repetida exploração do armazenamento num regime prolongadamente não-balanceado, que pode ser dirigido ou não intencional numa fase inicial, e na qual a abstração (aumentando ou estável) é maior que a recarga. A segunda fase envolve uma redução da exploração para restaurar o equilíbrio. Pode ser limitado por restrições externas ou redução na produtividade dos poços (rebaixamento excessivo ou limitado pela base do aquífero). É mais apropriada para aquíferos livres ou semiconfinados com alta capacidade e pequena a média taxa de recarga, sem apreciáveis restrições pela conservação dos níveis de água, e.g., aquíferos desconectados de cursos de água.

3. Estratégia de mineração ou exploração até a exaustão do aquífero, com abstração alta e muito superior à recarga. Nesse caso a depelação da reserva provê a maioria da água produzida e a exploração é, em longo prazo, mais ou menos limitada quando o rebaixamento torna-se excessivo sem retomar o equilíbrio. A recuperação da reserva nesse caso por ser muito lenta ou mesmo impedida por uma degradação excessiva da capacidade de armazenamento do reservatório devido à subsidência. É a única estratégia possível para aquíferos com alta capacidade e com recarga muito baixa.

Vários problemas relacionados a sobreexploração estão descritos na literatura internacional, causando principalmente a subsidência, como na Cidade do México, Berlim, Milão, Veneza, Londres e várias cidades estadunidenses (MARGAT, 1992b).

Na Espanha 70% das águas subterrâneas são utilizadas para a irrigação e o país tem uma das taxas mais baixas do mundo comparado a outros países semi-áridos de condições semelhantes, reflexo este de uma mentalidade “hidroesquizofrênica” afinada totalmente com a separação da gestão de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (LLAMAS, 1992).

Ainda, segundo dados de LLAMAS (1992) fornecidos pela administração espanhola, existem 75 unidades hidrogeológicas no país com problemas, e as mesmas estão divididas em 3 grupos: um primeiro grupo com 45 unidades nas quais o bombeamento ultrapassa a recarga; um segundo grupo de 17 aquíferos com bombeamento entre 80 a 100% da recarga; e um terceiro grupo com problemas locais não especificados. Na Espanha, porém, existe somente um aquífero legalmente superexplorado; é o aquífero de “Campos de Montiel” na porção central da Espanha, que foi declarado provisoriamente superexplorado em 1988 e definitivamente superexplorado em 1989, devido ao impacto causado sobre determinados ecossistemas.

Na Itália, foram estudadas duas áreas ao Norte localizadas no Vale do Pó para mostrar os efeitos da sobreexploração do aquífero. A primeira área

compreende o Distrito Industrial de Milão e a segunda compreende o Distrito de Modena, que é composto por extensas áreas agrícolas. Neste estudo foram consideradas as medições da superfície piezométrica em dois momentos (1951 e 1989) onde constatou-se que na primeira houve uma variação do nível piezométrico nos últimos 40 anos que decresceu 15 metros. No Distrito de Modena, esta variação do nível piezométrico decresceu 7 metros nos últimos 40 anos.

Em trabalho recente, BRAADBAART e BRAADBAART (1997) analisaram a sobreexploração das águas subterrâneas em regiões urbano-industriais da Ásia. Em Pequim e Hanói, o nível do lençol foi rebaixado em dezenas de metros nas últimas décadas o que causou a elevação dos custos de bombeamento. Este rebaixamento em Jakarta e Bangkok, que são regiões costeiras, tem gerado a intrusão salina.

Segundo o Worldwatch Institute (www.wwiuma.org.br de 12/04/2003), os níveis dos lençóis freáticos tem rebaixado na região norte da China a medida que a demanda hídrica ultrapassa a oferta. Poços estão secando, cursos de água estão se exaurindo e rios e lagos desaparecendo. Numa região que se estende do norte de Xangai até o norte de Beijing e que produz 40% dos grãos, o rebaixamento do nível do lençol freático tem alcançado 1,5 metros anualmente. Os produtores do norte enfrentam perdas de água de irrigação tanto pela exaustão dos aquíferos como pelo desvio da água para as cidades e indústrias. Em 2010, quando a população da China deverá ter crescido em 126 milhões, o Banco Mundial prevê que a demanda urbana de água aumentará de 50 bilhões de metros cúbicos para 80 bilhões, apontando para um crescimento de 60%. A demanda industrial por sua vez, está projetada para aumentar de 127 milhões de metros cúbicos para 206 milhões, representando uma expansão de 62%. Na maior parte da região norte, essa demanda crescente por água só poderá ser atendida através do desvio da água utilizada na irrigação.

Nos Estados Unidos, os Estados do Texas, Oklahoma e Novo México com 135.000 km², utilizam o Aquífero de Ogallala como principal fonte de água para a irrigação, abastecimento urbano e industrial. Devido a esta importância,

foram realizados estudos, simulando-se a mudanças dos níveis de água entre os anos de 1980-2020, fato que apontou para um declínio que variou de 3 a 30 metros dependendo da região, servindo de base estratégica para ações preventivas a serem implementadas.

Na América do Sul, especificamente na Argentina, podemos verificar que sobreexploração das águas subterrâneas devido ao abastecimento Público, tem sido observada no entorno urbano da cidade de Buenos Aires, em área com maior densidade populacional na Argentina, com aproximadamente 12 milhões de habitantes, se estendendo pelas cidades de Zárate e La Plata. A cidade de La Plata, historicamente foi a primeira importante cidade da Argentina a utilizar as águas subterrâneas como fonte de abastecimento em 1885, porém antes de 1950, 15 poços foram abandonados devido a problemas de intrusão salina devido a sobreexploração na Planície Costeira do Rio da Prata (GIWA, 2002).

No Sistema Aquífero Guarani (que abrange a Argentina, Paraguai, Uruguai e Brasil), em nível regional, não existem evidencias de sobreexploração, onde no Paraguai as taxas de extração são similares a taxa de recarga estimada, na Argentina e Uruguai a utilização é mínima, atendendo uma capacidade de bombeamento em torno de 3,00 m³/h. No Brasil, a capacidade de bombeamento instalada, está em torno de 111,00 m³/h, o que representa 1/30 da taxa de recarga, o que é considerado uma exploração Sustentável. Entretanto a nível local, na maior parte das áreas de recarga ou em áreas com nascentes naturais com desenvolvimento urbano, temos a evidencia de sobreexploração e riscos de poluição devido a atividades humanas (GIWA,2002).

No Brasil verifica-se uma deficiência séria no conhecimento do potencial hídrico de seus aquíferos e do seu atual estágio de exploração das águas subterrâneas. Os estudos regionais são escassos e encontram-se defasados, observando-se a falta de uma base homogênea de informações, que cubra todo o território brasileiro (ANA, 2004).

No Estado do Paraná, o aumento da utilização da água subterrânea na região de Curitiba já apresenta algumas áreas dentro do município onde a

superexploração vem se agravando. Vários fatores contribuem para esta situação, a quantidade considerável de obras civis, a maioria delas necessitando de rebaixamento do nível d'água, localizadas principalmente no centro da cidade e eixos de urbanização por edifícios; aumento da densidade populacional com o aparecimento de condomínios, tanto em edifícios como conjuntos de casas e sobrados; concentração de indústrias; hospitais e postos de gasolina; que por diversas razões optaram pela utilização de aquíferos subterrâneos para o abastecimento. Outra característica é a própria evolução urbana de Curitiba, cujos loteamentos não foram acompanhados de execução de redes de abastecimento de água, o que propiciou uma concentração de poços rasos. A cidade possui ainda um agravante, já que todos os anos ocorrem um ou dois períodos de estiagens que leva a uma exploração intensa da água subterrânea (GIUSTI, 1990).

No Estado de São Paulo, inserido nas Bacias do Rio Pardo e Rio Mogi-Guaçu, e gerido pelo Comitê de Bacia do Rio Pardo, o município de Ribeirão Preto é apontado pela ANA (2002) como região prioritária, devido a conflitos entre demanda industrial e humana, onde aparecem os primeiros sinais de sobreexploração de água subterrânea indicado pelo rebaixamento do nível do lençol freático na cidade de Ribeirão Preto (www.ambiente.sp.gov.br). De acordo com trabalho de MONTEIRO (2003), que obteve informações junto ao DAERP (Departamento de Água e Esgoto de Ribeirão Preto), o município tem uma produção de 3,14 m³/s de água para abastecimento público, sendo totalmente de origem subterrânea, de qualidade excepcional para consumo. O município teve seu primeiro poço perfurado no Mosteiro de São Bento em 1920, e atualmente o DAERP opera 164 poços tubulares, dos quais 86 estão em funcionamento simultâneo, produzindo mais de 264 milhões de litros diários (11 mil m³/h), sendo que no total o município possui 400 poços.

Ao contrário do que evidenciam as informações acima referentes ao município de Ribeirão Preto, segundo MONTEIRO (2003), não se pode afirmar com certeza que existe uma sobreexploração naquele município.

A sobreexploração é geralmente sinônimo de uma exploração inadequada do aquífero (VILLAROYA; VILLAROYA e REBOLLO apud VILLAROYA; ALDWELL, 1998), atrelando-se assim o conceito às questões de gestão. De acordo com Custódio apud Villaroya e Aldwell (1998) a causa mais séria da exploração inadequada de um aquífero é a ignorância sobre o que acontece e a negligência em produzir os dados necessários para avaliar corretamente a situação hidrogeológica e econômica.

Com isto, estudos de sobreexploração e rebaixamento podem fornecer importantes subsídios à gestão de um aquífero. Para seu desenvolvimento é necessário um estudo espacial e temporal dos níveis potenciométricos, sendo sugerido o uso de dados de piezômetros, podendo ser ainda realizado com medidas nos poços instalados e com o auxílio de dados geofísicos (MONTEIRO, 2003).

Ainda segundo MONTEIRO (2003), os benefícios gerados pela exploração das águas subterrâneas são geralmente superiores aos possíveis prejuízos, havendo mesmo ações preventivas, mitigadoras e corretivas para estes prejuízos, porém para uma adequada gestão desses recursos, é necessário conhecimento suficiente do funcionamento do sistema aquífero, algo raramente disponível.

A única proposta adequada para definir um aquífero como sobreexplorado é o conhecimento profundo de seu funcionamento nos mais diversos aspectos, com um modelo conceitual realístico, embasado em banco de dados de monitoramento espaço-temporal suficientemente grande, suportado por cálculos de fluxo e transporte de massa e modelagem matemática (CUSTÓDIO, 2002).

2. MODELAGEM MATEMÁTICA EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

2.1 Histórico

O planejamento e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos, assim como a proteção e a descontaminação dos aquíferos, dependem da competência em quantificar o fluxo e o transporte de contaminantes nas águas subterrâneas, podendo ser realizada através de medidas de campo e da modelagem matemática. A abordagem usando as medidas de campo é a mais direta e a mais precisa, entretanto, raramente é utilizada com exclusividade, devido aos seus altos custos e aos longos prazos que necessita para caracterizar o seu comportamento (CLEARY, 1991).

Com isto a abordagem quantitativa utilizada com maior frequência pelos órgãos governamentais e empresas de consultoria americanas e européias é a modelagem matemática, onde os modelos a serem utilizados podem ser físicos, elétricos ou matemáticos. Os modelos matemáticos empregam uma equação ou uma série de equações que simulam e prevêm respostas físico-químicas de um aquífero sujeito a perturbações, tais como poços de injeção ou extração ou a migração de um resíduo tóxico (CLEARY, 1991).

A modelagem matemática consiste na representação matemática do que acontece na natureza a partir de um modelo conceitual, idealizado com base no levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real, tendo como objetivo uma melhor compreensão do sistema atual, possibilitando prever situações futuras, algumas vezes passadas, porém sempre buscando direcionar ações de decisão (IRITANI, 1998).

Segundo OLEA (1991), “os modelos tem como função a representação de algumas ou todas as propriedades de um sistema ou de um objeto com o propósito de deduzir efeitos, ou entender melhor os processos subjacentes responsáveis por certas observações”.

De um ponto de vista histórico, é importante entender que os modelos desenvolvidos nos últimos 25 anos foram influenciados por modelos físicos e elétricos analógicos, que os precederam nos anos 50 e 60. Os primeiros esforços com modelos físicos de real interesse apareceram nos anos 50 e tratavam principalmente de fluxo de água subterrânea. Estes modelos físicos foram rapidamente sucedidos por modelos elétricos baseados na analogia entre a Lei de Ohm, para o fluxo da eletricidade, e a lei de Darcy, para o fluxo de água subterrânea em meios porosos. Através do uso de grandes placas com resistores e capacitores, o fluxo de água subterrânea em grandes sistemas aquíferos poderia ser simulado (WALTON, 1970). Esses modelos analógicos eram muito populares nos anos 60, porém em meados dos anos 70 foram inteiramente substituídos por modelos digitalizados para computadores. Modelos físicos e elétricos analógicos eram essencialmente modelos de fluxo, e os movimentos de contaminantes em água subterrânea raramente eram estudados.

No final dos anos 60, computadores digitais de grande porte (mainframe) encontravam-se bastante disponíveis, e os primeiros modelos de computador sofisticados para fluxo de água subterrânea e transporte de contaminantes começaram a surgir. Os modeladores profissionais escreveram seus próprios programas em FORTRAN, sendo difíceis de serem usados, permanecendo centralizado fisicamente em enormes computadores de grande porte.

Em 1981 com o aparecimento dos computadores pessoais, houve uma verdadeira revolução na modelagem do fluxo de água subterrânea e transporte de contaminantes, onde centenas de modelos foram desenvolvidos para o manejo da enorme variedade de tipos de aquífero, rochas e combinações físico-químicas específicas que eram encontradas no campo.

Assim, a modelagem matemática tornou-se uma ferramenta rotineira no auxílio a solução de problemas de águas subterrâneas, sendo usada com frequência em grandes projetos.

Para a tomada de decisões visando a utilização sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, apenas o entendimento do sistema hidrogeológico não é suficiente, tornando-se necessário o entendimento da dinâmica de sistemas complexos e a previsão de cenários distintos, onde atualmente, a melhor ferramenta é a modelagem matemática.

O modelo matemático representa o comportamento do sistema físico real da água subterrânea através da solução das equações matemáticas que regem os processos atuantes. Os procedimentos ou passos efetuados no computador para a resolução das equações utilizadas para construir o modelo matemático formam o programa de computador ou aplicativo ou simulador matemático. KONIKOW & BREDEHOEFT (1992) chamam este programa, construído para resolver as equações parciais através de algoritmos numéricos, de “modelo genérico”. Para a otimização do Sistema de Abastecimento de água, o programa utilizado é de fluxo de água subterrânea, que, dentre suas diversas aplicações, permite:

- entender tridimensionalmente, a dinâmica de sistemas complexos de fluxo de água subterrânea;
- avaliar o regime de exploração das águas subterrâneas.
- determinar Zona de Captura dos poços, fundamental para o zoneamento de proteção de captações;
- planejar e otimizar sistemas de abastecimento de água através da determinação das melhores localizações dos poços;
- otimizar sistemas de rebaixamento de lençol freático

Os Modelos Matemáticos constituem a melhor ferramenta existente, quando a compreensão do sistema real se torna necessária para a previsão e

comparação de alternativas ou cenários futuros; seus resultados são altamente dependentes da qualidade dos dados de entrada e a compreensão do modelo conceitual do sistema.

Um modelo matemático é descrito pelas equações que governam o sistema, onde no caso específico deste estudo, foi utilizada a equação fundamental de fluxo de água subterrânea e as condições iniciais e de contorno.

2.2 Princípios Básicos da Modelagem Matemática

2.2.1 Equação de fluxo da água subterrânea

A equação diferencial parcial tridimensional, aplicada a um modelo matemático, que governa o fluxo de água subterrânea, considerando-se um meio heterogêneo, anisotrópico e em estado transiente, é derivada através da combinação matemática da equação de balanço de água e da lei de Darcy (ANDERSON e WOESSNER, 1992 e CLEARY, 1989).

Considerando-se um volume elementar representativo de um aquífero, com os eixos do sistema de coordenadas coincidentes com as principais direções do tensor de condutividade hidráulica, isto é, x , y e z co-lineares a K_x , k_y , e k_z , respectivamente, e considerando a água com uma densidade constante, a equação fundamental de fluxo de água subterrânea é representada pela **equação 1** mostrada a seguir (CLEARY, 1991).

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

onde:

h = carga hidráulica [L]

k_{xx} , k_{yy} e k_{zz} são os valores de condutividade hidráulica ao longo dos eixos x , y e z , respectivamente [L/T].

S_s = coeficiente de armazenamento específico [1/L]

t = tempo

$W(x,y,z,t)$ = representa fontes ou sumidouros de água [L³/TL³]

2.3 Métodos numéricos

2.3.1 Elementos finitos

O método de elementos finitos é caracterizado por uma representação discretizada sobre uma área, onde a variação da carga hidráulica dentro do elemento é definida pela interpolação da carga nos nós, sendo em geral, definida por triângulos que podem ser refinados nas áreas de maior interesse (áreas com alto gradiente hidráulico), permitindo assim um melhor ajuste ao formato e possibilitando uma melhor representação da área estudada.

Nos casos em que as direções principais de condutividade hidráulica variam em todo aquífero, não podendo ser ajustadas aos eixos das coordenadas, deve-se utilizar este método, porém devido a uma maior dificuldade em seu manuseio, o mesmo ainda é pouco utilizado para a modelagem matemática de fluxo de água subterrânea.

2.3.2 Diferenças finitas

O método de diferenças finitas é uma representação discretizada em um ponto (CLEARY, 1989), onde a carga hidráulica é definida no nó da malha e é extrapolada para toda a área que o envolve. Este método, empregado nos programas de fluxo mais utilizados atualmente, tem a grade ou a malha do modelo definida por linhas e colunas, apresentando um ajuste mais grosseiro ao formato da área modelada, compensada pela facilidade de utilização para entrada de dados e análise dos resultados do modelo matemático, fazendo com que seja o método mais empregado no momento para a simulação de fluxo da água subterrânea.

A escolha de qualquer um dos métodos influencia a estrutura da grade do modelo, que pode, então, ser discretizada em elementos finitos ou em uma grade de diferenças finitas, como mostra a **Figura 4**.

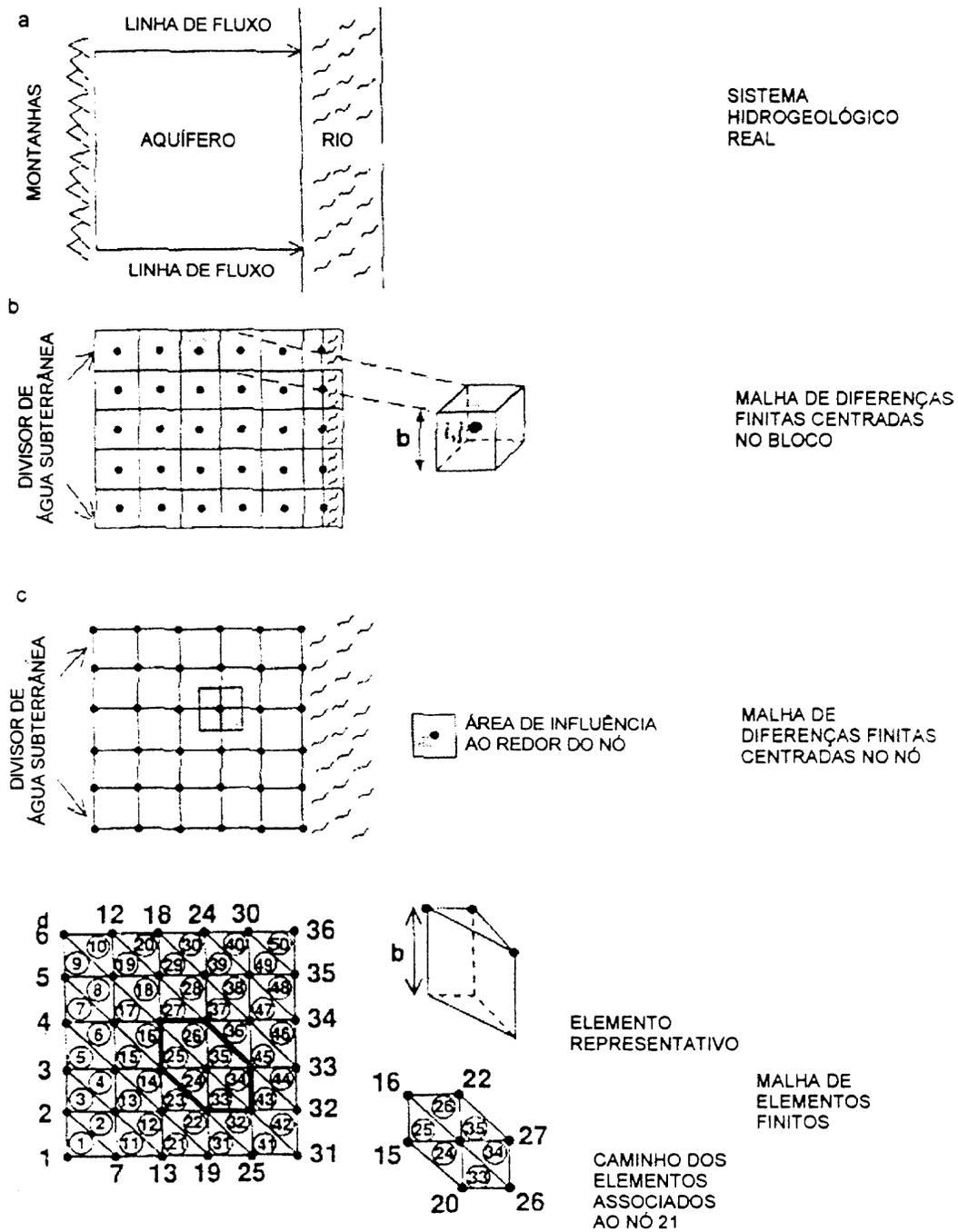


Figura 4 - Representação da malha de diferenças finitas e elementos finitos (ANDERSON e WOESSNER, 1992) apud Iritani (1998)

O programa MODFLOW (McDONALD e HARBAUGH 1988) utiliza uma grade de diferenças finitas, onde o nó da célula, isto é, o ponto onde o valor de um dado ou informação é posicionado, está localizado no centro da célula ou bloco, sendo por isso, chamado de diferenças finitas centrado no bloco. Quando o dado é colocado na intersecção das linhas e colunas da malha que define a grade do modelo, tem-se uma abordagem de diferenças finitas com nós concentrados nas malhas. Para definir as fronteiras do domínio de um modelo matemático, por exemplo, através de rios e cargas constantes, as diferenças finitas centradas no bloco são, matematicamente mais fáceis de serem manipuladas e resolvidas (ANDERSON e WOESSNER, 1992), o que leva a maioria dos programas existentes a usarem este método, como no programa MODFLOW.

2.4 Condições Iniciais

As condições iniciais referem-se à distribuição tridimensional de carga hidráulica no domínio do modelo matemático tomando-se por base o início da simulação (tempo atual igual a zero).

Quando as medidas reais de carga hidráulica são conhecidas, estas podem ser utilizadas como condição inicial, otimizando a resposta do modelo nos primeiros passos de tempo de simulação, diminuindo tempo para convergências dos cálculos. Isto implica em fluxo inicial, com h (carga hidráulica) diferentes para cada posição x , y , z . Entretanto, segundo CLEARLY (1989), a transformação é, na maioria das vezes, desconhecida na prática, o que leva grande parte dos modeladores a assumir uma carga hidráulica média e constante para todo o domínio do modelo, isto é, uma carga hidráulica h igual para qualquer posição x , y , z .

Nas simulações em estados transientes, costuma-se utilizar as cargas hidráulicas simuladas em estado estacionário como condição inicial (ANDERSON e WOESSNER, 1992).

2.5 Condições do Contorno

São baseadas no sistema hidrogeológico real e utilizadas para definir as fronteiras hidráulicas ou físicas que delimitam o domínio do modelo, onde as barreiras físicas podem ser exemplificadas como corpos superficiais de água ou rochas impermeáveis e as barreiras hidráulicas apesar de não serem visíveis controlam o fluxo de água subterrânea no sistema e podem ser exemplificadas como divisores de água ou linhas de fluxo.

As condições de contorno são matematicamente classificadas em três tipos.

Tipo 1 ou Dirichlet (Carga Hidráulica Especificada)

Esta condição de contorno representa uma fronteira com uma carga hidráulica especificada, podendo ser constante, como por exemplo, um lago, ou função do tempo e do espaço, como nos rios (CLEARY, 1989).

Tipo 2 ou Neuman (Fluxo Especificado)

Esta condição de contorno refere-se a um fluxo de água subterrânea assimilada na fronteira de um modelo. A forma mais freqüentemente usada é uma fronteira denominada como “não fluxo”, isto é, fluxo igual a zero simulando zonas impermeáveis e divisores de água subterrânea. No programa MODFLOW (McDONALD e HARBAUNGH, 1988), é possível colocar a recarga, considerando um fluxo diretamente especificado na primeira camada do modelo.

Tipo 3 ou Cauchy (Fluxo Dependente de Carga Hidráulica)

Neste tipo de condição de contorno, o fluxo de água através de uma fronteira é calculado com base na diferença entre uma carga hidráulica especificada e a carga hidráulica calculada pelo modelo (ANDERSON e WOESSNER, 1992), comumente utilizado para definir a drenanca de um corpo de água superficial.

Todos estes tipos de fronteiras descritos acima podem também ser utilizados como condições internas de contorno, de forma a simular qualquer feição que afete o sistema hidrogeológico local, como lagos, barragens e rios internos ao domínio do modelo.

2.6 Procedimentos da Modelagem Matemática

Para a construção de um modelo matemático que represente um sistema real, de fluxo de água subterrânea, são adotados os procedimentos abaixo:

- desenvolvimento do modelo conceitual, que envolve todo o levantamento e interpretação de dados e observações do sistema real;
- seleção do programa a ser utilizado segundo as necessidades e os dados existentes;
- tradução do modelo conceitual para a linguagem matemática, construindo-se os diversos bancos de dados para a entrada das informações no programa selecionado;
- calibração do modelo matemático construído de forma a diminuir as incertezas inerentes a uma representação simplificada (modelo matemático) de um sistema real, em geral, complexo.

2.7 Modelo Conceitual

O modelo conceitual consiste em compreender o sistema hidrogeológico em questão com base na interpretação e análise semiquantitativa dos dados (WALTON, 1992) de forma a identificar as unidades hidroestratigráficas e suas características hidráulicas e o sistema de fluxo da água

subterrânea. Este modelo conceitual norteará a definição do domínio do modelo, do tipo de aquífero a ser modelado, das condições iniciais e de contorno, e das fontes e sumidouros de água no sistema.

A interpretação de mapas e perfis litológicos e perfilagens geofísicas de poços para a confecção de seções geológicas, combinada com a análise das propriedades hidráulicas, direcionam a definição das unidades hidroestratigráficas a serem utilizadas na modelagem matemática, caracterizando-as em extensão, continuidade lateral e espessura.

Os modelos numéricos requerem a definição de condições de contorno, onde são especificadas as cargas hidráulicas ou taxas de fluxo, para a delimitação da área modelada.

ANDERSON e WOESSNER (1992) sugerem que, sempre que possível, sejam adotadas como condições de contorno, fronteiras hidráulicas naturais, representadas por alguma feição física como contatos geológicos, rios e divisores de água.

A compreensão do sistema de fluxo da água subterrânea é obtida através da avaliação dos mapas potenciométricos, podendo-se identificar as áreas de recarga e descarga da região de interesse e as feições que afetam hidraulicamente o sistema avaliado, inclusive, a influência antrópica como poços, drenos e tanques que podem funcionar como consumidores (sumidouros) ou fornecedores (fontes) de água.

2.8 Escolha do Aplicativo Matemático

A seleção do aplicativo matemático a ser empregado depende de vários fatores, tais como: o objetivo do trabalho, o problema a ser resolvido com o modelo matemático, a complexidade do modelo conceitual, tempo e recursos disponíveis. Estes fatores irão influenciar na decisão das opções entre um modelo analítico ou numérico, bi ou tridimensional, diferenças finitas ou elementos finitos, de fluxo de água subterrânea ou transporte de massa (IRITANI, 1998).

Diversos programas são encontrados no mercado, entretanto, é aconselhável optar por um aplicativo que seja amplamente utilizado em diversos cenários compatíveis e que tenha um manual bem detalhado, com documentação completa e suporte técnico ao usuário. Além disso, o programa deve calcular o balanço de água, pois, como as equações resolvidas se baseiam em conservação de massa, valores semelhantes entre os volumes de água que entram ou saem do sistema indicam que o programa calculou corretamente as equações que compõem o modelo matemático (ANDERSON e WOESSNER, 1992).

2.9 Elementos do Modelo Matemático

Para a construção do modelo matemático é necessário traduzir o modelo conceitual da área, definido com base nos dados hidrogeológicos e hidrológicos, para a linguagem do programa escolhido. Assim, a discretização da malha, a delimitação das condições de contorno e das condições iniciais devem ser introduzidas adequadamente de forma que o aplicativo matemático escolhido para a construção do modelo matemático represente as condições reais do sistema hidrogeológico.

Os elementos para a definição do modelo matemático são:

- discretização da grade do modelo;
- delimitação das condições de contorno externas e internas;
- definição dos poços de injeção/ extração e de observação;
- definição das condições.

2.10 Grade do Modelo

No método das diferenças finitas, a área modelada é discretizada por uma grade ou malha, desenhada por linhas, colunas e camadas, que definem o

conjunto de células onde serão colocadas as condições de contorno e também serão calculadas as cargas hidráulicas e velocidades da água subterrânea. Antes da discretização da malha é necessário definir o domínio do modelo, isto é, a área dentro de sua região de interesse que será modelada.

A grade discretizada no modelo pode ser refinada nas áreas de maior interesse ou onde existem altos gradientes hidráulicos, como ao redor de poços, para aumentar a definição e precisão no cálculo das cargas hidráulicas e velocidades.

No MODFLOW é possível definir uma grade com espaçamento irregular, em todos os eixos (x , y e z), com a grade discretizada na horizontal e na vertical, sendo necessário definir as propriedades hidráulicas de cada unidade hidrogeológica, para sua representação no modelo matemático.

O MODFLOW aceita condições heterogêneas e anisotrópicas, sendo então necessário introduzir as condutividades hidráulicas das unidades para três eixos de coordenadas (K_x , K_y , K_z e os parâmetros de armazenamento S_s , S_y , n_{ef} e n).

2.11 Poços de Injeção/Extração e de Observação

A água pode entrar ou sair do sistema modelado através da fronteira e também através dos poços de injeção ou extração. As fontes ou sumidouros, que simulam estes poços de injeção/extração, são representados pelo termo $W(x, y, z, t)$ na equação de fluxo da água subterrânea.

Os poços de bombeamento inseridos no MODFLOW (McDONALD e HARBAUNGH, 1988), devem especificar a vazão bombeada em cada camada atravessada pelos filtros (Q_n), proporcionalmente à transmissividade da camada (T_n). Isto se deve ao fato do MODFLOW assinalar o poço no centro da célula, considerando que o filtro se estende por toda a camada, não aceitando o poço aberto em mais de uma camada do modelo. Para contornar este problema, pode-se simular um grupo de poços simples, cada um com filtro em uma camada,

simulando um poço com filtro em multicamadas bombeando uma vazão total Q_w (Figura 5). Para calcular a vazão de cada um dos poços simples (Q_n), usa-se a relação com a transmissividade de cada camada (T_n) (McDONALD e HARBAUGH, 1988), onde n é o número da camada do modelo.

Facilitando a entrada de dados, o programa Visual MODFLOW (GUIGUER e FRANZ, 1996) permite inserir o perfil real do poço de bombeamento, sendo que posteriormente o programa faz os cálculos para simular um grupo de poços simples e inserir os dados no MODFLOW.

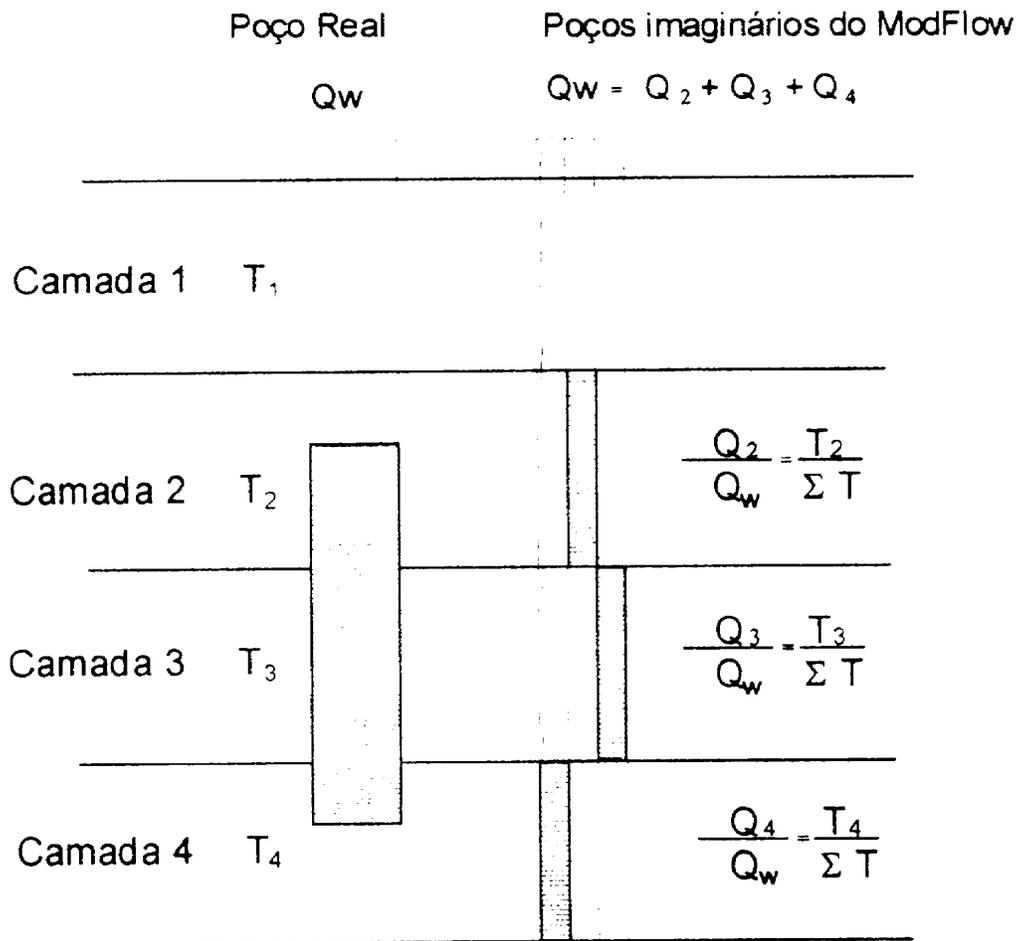


Figura 5 - Determinação da taxa de bombeamento em cada camada do modelo considerando um poço atravessando diversas camadas. (IRITANI, 1998-Tese de Doutorado)

2.12 Calibração do Modelo

O processo de calibração consiste no ajuste do modelo matemático simulado ao sistema hidrogeológico observado.

Neste processo, os parâmetros hidrogeológicos e as condições de contorno são ajustados para que as cargas hidráulicas simuladas pelo modelo matemático sejam semelhantes às aquelas observadas no sistema real. O processo de calibração mais comumente utilizado é o de “tentativa e erro”, onde os parâmetros são ajustados manualmente através de simulações sucessivas e comparação entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas (ANDERSON e WOESSNER, 1992). Quando a diferença entre a carga hidráulica calculada e observada atingir um valor aceitável, previamente definido, o modelo será considerado calibrado. Este valor é também chamado de “critério de calibração” e a diferença entre as cargas hidráulicas é tratada como “resíduo”. Há três maneiras mais comuns para calcular a média das diferenças entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas no domínio do modelo. A média dos resíduos (denominado nos programas como ME - “mean error”) é simplesmente a média da diferença entre as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo (h_{calc}) e observadas (h_{obs}). Esta média do resíduo é calculado pela **equação 2**:

$$ME = 1/n \sum_{nl}^n (h_{obs} - h_{calc})_l \quad (2)$$

onde n é o número de valores de calibração.

Este cálculo da média do resíduo considera os valores positivos e negativos, enquanto que a média do resíduo absoluto (referenciado como ME -, “mean absolute error” nos programas existentes) considera o valor absoluto da diferença entre a carga hidráulica observada e a calculada. Esta média absoluta é obtida pela **equação 3**.

$$\text{MAE} = 1/n \sum_{l=1}^n | (h_{\text{obs}} - h_{\text{calc}})_l | \quad (3)$$

O desvio padrão, isto é, a raiz quadrada da média dos quadrados do resíduo, é um dos critérios de calibração mais utilizados, sendo denominado nos programas pela sigla RMS (“root mean squared”), e é calculado pela **equação 4**:

$$\text{RMS} = \left[1/n \sum_{l=1}^n (h_{\text{obs}} - h_{\text{calc}})_l^2 \right]^{0,5} \quad (4)$$

Dessa forma, adota-se também um outro critério relativo à diferença de carga hidráulica total (H) no domínio do modelo, denominado neste trabalho de “porcentagem de resíduo” e representado por:

$$\% \text{ resíduo} = \text{RMS} / H,$$

onde se pode assumir um valor inferior a 10% como aceitável.

Com o software utilizado neste trabalho Visual MODFLOW Pro 3.1 (GUIGUER e FRANZ, 1996), a calibração pode ser feita automaticamente através do aplicativo Win PEST, o que possibilitou uma redução no tempo despendido normalmente nas calibrações manuais do modelo, estando o mesmo completamente integrado ao Visual MODFLOW Pro 3.1 (GUIGUER e FRANZ, 1996).

Concluídas estas etapas, obtêm-se uma representação simplificada (modelo matemático) de um sistema real, onde a mesma seqüência foi utilizada para o trabalho nesta dissertação.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1 Introdução

A importância da água subterrânea, especialmente de um grande sistema aquífero se deve ao fato do mesmo constituir uma reserva estratégica para o suprimento de água para as atuais e futuras gerações, tornando-se a mais viável alternativa, principalmente devido a vulnerabilidade e saturação que se encontram atualmente os mananciais superficiais.

Assim é necessária uma avaliação do potencial hídrico subterrâneo passível de exploração por parte dos municípios, para que os mesmos possam tomar ações preventivas de preservação da quantidade e da qualidade destes recursos. Com a expansão econômica e populacional que tem ocorrido no interior do Estado de São Paulo, já relatadas anteriormente, cabe aos Comitês de Bacia Hidrográfica, e aos Órgãos Públicos Estaduais e Municipais o papel de gerenciar estes recursos, primeiramente quantificando estes volumes e tomando medidas que visem sua utilização racional por parte dos principais usuários, ou seja: a população, a indústria e a agricultura.

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, 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 (DAEE) que congrega um número grande de técnicos especialistas na área de águas subterrâneas.

Estes fatos aliados aos índices de desenvolvimento econômico da região e da qualidade de vida da população local, conforme dados da Secretaria Municipal de Desenvolvimento Econômico (ARARAQUARA, 1999 apud Meaulo, 2004), tem permitido à região de Araraquara, ser eleita por inúmeras empresas, como excelente área para a consolidação de novos investimentos, merecendo destaque os seguintes dados:

- Índice de área verde: com 36m²/hab, quando a Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda 12 m²/hab;

- Legislação Municipal: intensificando a preservação de diversas áreas verdes nos fundos dos vales que foram incorporados ao patrimônio ambiental da cidade;

- Saúde Pública: oferece 6 hospitais com laboratórios, instalações especiais que abrangem áreas de higiene, saúde maternal, saúde infantil, controle de doenças transmissíveis e agrícolas;

- Educação: Município conta com varias escolas de ensino fundamental, médio e nível superior como a Universidade Estadual Paulista - Unesp, Centro Universitário de Araraquara - Uniara, Universidade Paulista - Unip e Faculdade Isolada de Araraquara - Fiar, recebendo estudantes da cidade, localidades circunvizinhas e de outros Estados.

3.2. Características Sócio Econômicas

Araraquara é desde 1969 sede da sexta sub região (região administrativa sediada em Ribeirão Preto), tendo grande identidade com o seu perfil Sócio Econômico Demográfico possuindo traços peculiares, o que confere um alto grau de homogeneidade à macro região de Ribeirão Preto, delineando um certo padrão resultante da Divisão Territorial assumida, sobretudo, à partir dos anos 30 no Estado de São Paulo.

O desenvolvimento do município, está intimamente ligado à agricultura, pois com a falência da cafeicultura nos anos 30, a economia agrícola regional respondeu rapidamente à crise, desenvolvendo o cultivo da cana-de-açúcar e da cultura do algodão.

Esta reorganização fez com que as atividades sofressem profundas modificações, através da montagem de um parque agro-industrial, ligado quer aos subprodutos do amendoim e algodão (óleos vegetais, sabão, etc.), quer pelo incremento do setor açucareiro e produção leiteira.

Este processo de diversificação da base agrícola, somado a instalação da agroindústria, teve reflexos sobre o comércio e os serviços locais, fazendo com que o município se tornasse um subcentro de comércio regional.

Na década de 60/70, o perfil do município sofre mudanças, graças à montagem de um parque agroindustrial (associado à produção de suco de laranja e à produção de açúcar), possibilitando ao município uma taxa de crescimento industrial maior que o crescimento do Estado.

Araraquara passa a receber então uma migração, bem como um aumento de sua população, criando um excedente populacional e provocando uma generalização de problemas urbanos, **dentre eles o abastecimento de água** (grifo nosso).

Até 1970, a malha urbana vinha crescendo de forma agregada ao núcleo central, porém começou a romper-se com conjuntos habitacionais distantes da área urbanizada, criando enormes vazios urbanos, sendo que neste período (1970-1984) 50% dos loteamentos foram registrados junto a Prefeitura Municipal (UNIARA, 2000), o que tornou necessário porém, a perfuração de 6 poços tubulares (Santana, Paiva, Ouro, Santa Lúcia, São Paulo e Paiol) visando o abastecimento público nestes bairros mais distantes.

Atualmente a região de Araraquara está recebendo a instalação de um moderno Parque Aeroespacial, com a vinda da EMBRAER, e quando esta Empresa estiver em pleno funcionamento, estima-se que virão outras 14 Empresas para fornecer matérias primas para a construção de aeronaves.

Este fato já é uma realidade, o que deve transformar em muito a economia regional, em níveis superiores as ocorridas nas décadas de 60/70 com a vinda das agroindústrias .

Está em votação na Câmara dos Vereadores o novo Plano Diretor do Município, que não foi sancionado até a presente data (março/2005).

3.3. Localização da Área de Estudo

O município de Araraquara, está localizado na região central (**Figura 6**) do Estado de São Paulo estando inserida na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 13 (UGRHI-13-Tietê-Jacaré) compreendendo uma área de 11.537 km², 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, segundo dados do IBGE (1996), apresentados na **Tabela 11**. Neste estudo, utilizamos como base as folhas Araraquara (SF-22-X-D-VI-4; IBGE, 1998) e Rincão (SF-22-X-D-VI-2; IBGE, 1988).

Os rios mais importantes da bacia são: o Rio Tietê, que vai da barragem da Usina Hidrelétrica da Barra Bonita até a barragem da Usina Hidrelétrica de Ibitinga, compreendendo uma extensão de 150 km e os Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira que são os principais afluentes da margem direita do rio Tietê e que em seu trecho final, encontram-se represados devido à formação do reservatório de Ibitinga. Os principais reservatórios da UGRHI-13 são: UHE de Bariri e Ibitinga e a Represa do Lobo.

O uso do solo se destina a atividades urbanas, industriais (sucro-alcooleira, curtumes e indústrias alimentícias) e agropecuárias que compreendem grandes áreas de pastagem e de culturas anuais (milho), semiperenes (cana-de-açúcar) e perenes (café e citrus) (IPT, 2000).

O uso da água se destina principalmente ao abastecimento público e industrial, ao afastamento de efluentes domésticos e industriais e a irrigação.

Tabela 11 - Municípios pertencentes a UGRHI-13 com sua população total e urbana

Município	População Total	População Urbana
Agudos	31.311	29.347
Araraquara	168.468	158.389
Arealva	6.668	4.408
Areiópolis	10.151	8.433
Bariri	25.797	23.396
Barra Bonita	32.845	31.592
Bauru	292.566	287.530
Boa Esperança do Sul	11.489	9.348
Bocaina	8.561	7.649
Boracéia	3.548	2.751
Boreoi	1.768	1.271
Brotas	17.059	14.024
Dois Córregos	21.638	19.195
Dourado	8.296	7.444
Gavião Peixoto	4.453	1.859
Iacanga	8.110	6.714
Ibaté	23.498	21.724
Ibitinga	42.359	39.196
Igaraçu do Tietê	23.077	21.901
Itaju	2.268	1.280
Itapuí	9.897	8.633
Itirapina	11.024	9.521
Jaú	103.601	97.088
Lençóis Paulista	50.865	47.653
Macatuba	16.024	13.830
Mineiros do Tietê	11.020	10.390
Nova Europa	6.781	5.582
Pederneiras	33.921	30.371
Ribeirão Bonito	10.802	9.066
São Carlos	175.517	164.103
São Manuel	34.688	31.543
Tabatinga	12.266	8.975
Torrinha	8.183	6.486
Trabijú	1.356	1.183
Total	1.229.875	1.141.875

Fonte: IBGE, 1996

3.4 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 2 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 3 reservatórios submersos e 1 suspenso, com capacidade total de 6.400 m³.

Para atender a demanda na periferia, havia também na Vila Xavier, um reservatório com capacidade de 1.750 m³, 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 m³.

Nesta época, visando suprir a crescente demanda por água (crescimento da agroindústria, conjuntos habitacionais distantes do núcleo central do município), foram feitos estudos de viabilidade, no intuito de captar recursos financeiros para a execução de um projeto existente para a captação superficial no Rio Jacaré-Guaçu a 10 km da cidade, porém naquela oportunidade os órgãos responsáveis pela aprovação exigiram novos estudos que permitissem uma análise técnico-financeira mais apurada, inviabilizando momentaneamente esta opção.

Após este fato, em meados de 1970, deu-se início a perfuração de um poço profundo no Jardim Eliana para complementação do abastecimento de água no município, que cumpriu sua finalidade em relação ao fornecimento de

água (30 m³/h), porém, como a perfuração apenas atravessou a camada de basalto e não se aprofundou no arenito Botucatu, não forneceu subsídios que permitissem a continuidade das perfurações e a conseqüente ampliação do sistema através de poços para a exploração do aquífero.

Em julho de 1971, o DAAE contratou a Empresa Serete para elaborar um estudo de alternativas para o sistema de abastecimento no município, porém com a carência de informações registradas no pequeno número de fichas de poços perfurados em Araraquara, concluiu-se na época que a alternativa de ampliação do sistema de abastecimento através de perfuração de poços profundos estava descartada.

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 m³, 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 m³ /dia.

Na Represa das Cruzes a água bruta captada é enviada por meio de uma Estação Elevatória até a Estação de Tratamento de Água da Fonte (ETA FONTE), situada a 1.600 m de distância, onde duas adutoras em paralelo, uma de 450 mm e outra de 300 mm, são utilizadas para fazer a adução da água

captada. Já no Ribeirão das Anhumas a água captada é enviada através de duas Estações Elevatórias (Anhumas I e II) até a ETA FONTE situada a cerca de 13 Km de distância, possuindo uma adutora de 3.300 m e outra com 9.900 m de extensão. No Córrego do Paiol, a água aduzida é encaminhada a Estação de Tratamento de Água Paiol (ETA PAIOL) através de uma adutora de 300 mm, possuindo uma tubulação de ferro fundido com aproximadamente 1.800 m de extensão.

A complementação dos volumes necessários de água para o abastecimento é realizada através de 12 poços, extraíndo água dos Aquíferos Serra Geral e Guarani, conforme os dados de vazão que foram obtidos do DAAE e organizados apresentados no **Quadro 3**.

Quadro 3 - Captação de Água Subterrânea no Município de Araraquara-SP

Poços	Vazão /m ³ /dia	Aquífero
Santana	870	Botucatu
Santa Lucia	3098	Botucatu
Ouro	1440	Botucatu
Paiol	2713	Botucatu
Standard	3675	Botucatu
Selmi Dei	3280	Botucatu
P.Gramado	1944	Botucatu
Pinheirinho	1827	Botucatu
Fonte	6422	Botucatu
Iguatemi	4785	Botucatu
Rodovia	3234	S. Geral/Guarani
Aldo Lupo	2310	S Geral/Botucatu
Total	35.598 m³/dia	

Fonte: Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE-Araraquara) 2001

Estes poços e suas características construtivas (dados físicos, geológicos e hidrogeológicos) podem ser observados na **Tabela 12**, sendo que os mesmos serviram de base para este trabalho.

No total são aduzidos diariamente dos pontos de captação 70.248 m³ de água, equivalendo a uma captação mensal aproximada de 2.100.000 m³.

Tabela 12 - Características construtivas dos poços do Município de Araraquara-SP

Dados Físicos

Poço	Prof. Final	Data Inic.	Data Termino	Duração dias	Metros Por dia	Firma Perfuradora
Santana	300.00	30-out-73	15-jul-74	258.00	1.16	Air Lift
Paiva	356.00	31-jan-80	24-out-80	267.00	1.33	Air Lift
Ouro	256.00	01-jul-82	26-jul-82	25.00	10.24	Hidroaço
S. Lúcia	340.00	02-set-83	25-nov-83	84.00	4.05	Hidroaço
São Paulo	378.00	08-mar-85	09-jun-85	93.00	4.06	CPRM
Paiol	385.50	29-ago-85	07-dez-85	100.00	3.86	Politi
Standard II *	331.50	15-jun-90	04-ago-90	50.00	6.63	Contep
Selmi Dei	405.00	02-dez-91	11-jan-92	40.00	10.13	Contep
Gramado	413.00	18-mar-92	29-mai-92	72.00	5.74	Constroli
Pinheirinho	380.00	07-jun-92	31-jul-92	54.00	7.04	Contep
Iguatemi	337.34	21-jan-94	18-fev-94	28.00	12.05	CPRM
Fonte	448.00	11-jan-95	24-mar-95	72.00	6.22	Contep

Dados Geológicos

Profundidade Solo/Arenito		Basalto	Arenito	Cota	Cota	NS
Final	Superior	Serra Geral	Produtor	do NE	Arenito	
300.00	5.00	137.00	158.00	534.00	447.00	7,588.35
356.00	13.50	140.50	202.00	527.47	471.00	7,584.70
256.00	6.00	0.00	250.00	586.00	615.00	7,586.25
340.00	16.00	64.00	260.00	529.50	520.00	7,585.25
378.00	29.00	113.00	236.00	533.79	498.00	7,588.90
385.50	23.00	175.00	187.50	533.61	410.00	7,587.75
331.50	21.76	75.74	234.00	503.84	502.50	7,586.65
405.00	35.60	120.40	249.00	519.26	504.00	7,593.95
413.00	26.00	124.00	263.00	525.32	515.00	7,580.20
380.00	10.00	175.00	195.00	528.23	475.00	7,590.30
337.34	10.00	0.00	327.34	637.10	699.00	7,582.00
448.00	54.00	173.00	221.00	523.12	474.42	7,589.90

Dados Hidrogeológicos

Prof. Final	Cota Topo Topografica	Q m3/h	NE m	ND m	Q/s m3/h/m	Demanda Necessária
300.00	600.00	113.00	56.00	128.00	1.5694	96.43
356.00	625.85	130.00	98.38	177.60	1.6410	153.92
256.00	618.00	168.00	32.00	64.10	5.2336	71.79
340.00	600.00	200.00	70.50	112.00	4.8193	149.33
378.00	643.00	174.35	109.21	146.23	4.7096	169.97
385.50	600.00	282.77	66.39	106.25	7.0941	200.30
331.50	600.00	210.76	96.16	145.14	4.3030	203.93
405.00	660.00	182.60	140.74	174.22	5.4540	212.08
413.00	665.00	216.56	139.68	190.74	4.2413	275.38
380.00	660.00	175.60	168.77	215.64	3.7465	252.44
337.34	709.00	202.15	71.90	135.55	3.1760	182.68
448.00	701.42	211.18	178.30	221.24	4.9180	311.48

Fonte: Departamento Autônomo de Água e Esgoto(DAAE)

Segundo dados do DAAE (2001), estes pontos de captação existentes atualmente no município, apresentam um potencial de extração suficiente para atender a previsão de demanda de água na cidade para os próximos 15 anos.

Em nível regional, pode-se verificar a importância da utilização das Águas Subterrâneas para as principais cidades da Região de Araraquara através do **Quadro 4**, onde são mostrados os respectivos percentuais de utilização deste recurso para o Abastecimento Público.

Quadro 4 - Levantamento da porcentagem de uso das águas subterrâneas, para abastecimento público do Estado de São Paulo, 1977.

Município	UGRHI	Empresa de fornecimento de água	Número de poços	Porcentagem abastecimento de água subterrânea	População abastecida com água subterrânea	Volume explorado (m ³ /d)
Américo Brasiliense	09	Prefeitura Municipal	08	100	22.601	4.520,2
Motuca	09	Prefeitura Municipal	02	100	2.188	437,6
Rincão	09	Prefeitura Municipal	03	80	6.474	1.294,8
Santa Lúcia	09	Prefeitura Municipal	04	100	6.317	1.263,4
Araraquara	13	DAAE	10	50	81.915	16.383,0
Boa Esperança do Sul	13	Prefeitura Municipal	07	100	9.352	1.870,4
Brotas	13	Prefeitura Municipal	02	5	854	170,8
Dourado	13	SABESP	02	100	8.374	1.674,8
Ibaté	13	Prefeitura Municipal	04	100	23.422	4.684,4
Ibitinga	13	SAAE	07	60	25.460	5.092,0
Itirapina	13	Prefeitura Municipal	02	100	11.013	2.202,6
Gavião Peixoto	13	Prefeitura Municipal	02	100	4.284	856,8
Nova Europa	13	Prefeitura Municipal	02	100	5.576	1.115,2
Ribeirão Bonito	13	Prefeitura Municipal	04	60	6.465	1.293,0
São Carlos	13	SAAE	16	50	87.647	17.529,4
Tabatinga	13	Prefeitura Municipal	06	100	12.352	2.470,4
Torrinha	13	Prefeitura Municipal	0	0	-	-
Trabiju	13	Prefeitura Municipal	01	100	1.362	272,4
Adolfo	16	SABESP	01	100	3.360	672,0
Borborema	16	Prefeitura Municipal	04	80	9.982	1.996,4
Dobrada	16	Prefeitura Municipal	06	100	7.132	1.426,4
Elisiário	16	Prefeitura Municipal	03	100	820	164,0
Ibirá	16	SABESP	0	0	-	-
Irapuã	16	SABESP	02	100	6.390	1.278,0
Itajobi	16	Prefeitura Municipal	08	100	13.847	2.769,4
Itápolis	16	SAAE	07	100	36.220	7.244,0
Marapoama	16	Prefeitura Municipal	02	100	1.950	390,0
Matão	16	DAEMA	13	100	65.721	13.144,2
Mendonça	16	Prefeitura Municipal	02	100	3.341	668,2
Novo Horizonte	16	SABESP	01	80	25.075	5.015,0
Sales	16	Prefeitura Municipal	01	100	3.832	766,4
Santa Ernestina	16	SABESP	05	100	5.587	1.117,4
Taquaritinga	16	SAAET	08	50	25.120	5.024,0
Urupês	16	Prefeitura Municipal	03	100	11.212	2.241,4
Total			148		535.245	107.049,0

Fonte: CIBA - Agência de Araraquara

3.5 Hidrografia

A localização do município de Araraquara, na parte elevada dos Planaltos e Chapadas da Bacia do Paraná, em altitudes que chegam a superar os 750 metros, e resultando em formas de relevo mais aplainadas (rochas sedimentares) ou mais onduladas e formando espigões alongados (rocha basálticas e o solo de terra roxa) é favorável ao desenvolvimento de uma numerosa rede hidrográfica.

Segundo IPT (1981) os rios apresentam características comuns, como corredeiras e pequenos encachoeiramentos que são formados a partir de soleiras de rochas pertencentes à Formação Serra Geral. Hidrograficamente a área é drenada por ribeirões e córregos que cortam o município preferencialmente nas direções NW para SE e NE para SW.

Os cursos de água existentes no Município fazem parte de duas bacias hidrográficas, onde a oeste temos a do Rio Jacaré-Guaçu (afluente do Rio Tietê-UGRHI-13) e a leste a do Rio Mogi-Guaçu (afluente do Rio Pardo - UGRHI-9).

A Bacia do Jacaré-Guaçu se sobressai pela extensão banhada por seus afluentes, salientando-se: o Rio Itaquere e o Rio Chibarro, o Ribeirão das Cruzes e do Ouro, os Córregos Capão do Paiva, Vieira, Água Branca, da Servidão e do Pinheirinho. Cabe ressaltar que o Córrego Águas do Paiol, do Laranjal e o Ribeirão do Lajeado são importantes afluentes do Ribeirão das Cruzes.

Na Bacia do Mogi-Guaçu encontram-se importantes cursos de água como: o Ribeirão das Cabaceiras, das Anhumas, do Rancho Queimado, do Cruzeiro, do Monte Alegre e os Córregos da Pindaíba, da Trela, do Boi, da Ponte e de outros de menor importância.

3.6 Climatologia

Na região predomina a massa continental tropical com período chuvoso no verão, com os picos em janeiro e fevereiro e período seco no inverno, sendo os meses menos chuvosos julho e agosto.

As precipitações medias anuais são da ordem de 1.300 mm, apresentando temperaturas medias anuais oscilando entre 22°C e 23°C, com a mínima se situando no inverno com 18°C e a máxima no verão com 30°C, conforme **Tabela 13**.

Tabela 13 - Precipitações médias anuais do Município de Araraquara-SP*

Mês	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)	Evapotranspição (mm)	Armazenamento (mm)	Evapotranspição Real (mm)	Deficiência Hídrica (mm)	Excedente Hídrico (mm)
Jan	24,1	257	120	100	120	0	137
Fev	24,2	219	110	100	110	0	109
Mar	23,8	154	112	100	112	0	42
Abr	21,8	56	83	77	79	3	0
Mai	19,5	46	62	66	57	5	0
Jun	18,3	36	49	58	44	5	0
Jul	18,2	23	49	44	36	13	0
Ago	20,1	20	65	28	36	29	0
Set	21,7	47	80	20	55	25	0
Out	22,7	128	98	51	98	0	0
Nov	23,1	147	104	94	104	0	0
Dez	23,6	199	117	100	117	0	76
Totais	261,1	1.332	1.048	837	968	80	364
Médias	21,8	111	87	70	81	7	30

* Latitude: 21,85 S - Longitude: 48,51 W; Altitude: 469 m; Período: 1941-1970

Fonte: DAEE

A Umidade Relativa Média do ar fica em torno de 50% ao longo do ano, porém ultrapassando os 60% no período chuvoso, com uma evaporação potencial de 900 mm anuais.

De acordo com a classificação de Koeppen, o clima da região e do tipo Aw com muita pluviosidade, sendo diretamente influenciado pela massa de ar equatorial continental, tropical continental, tropical atlântica e polar do atlântico Sul. A região é considerada climaticamente como zona de transição, por apresentar variações entre o clima tropical e o sub-tropical, entre úmido e seco.

3.7 Vegetação

A cobertura vegetal original que recobria a região de Araraquara, denominada por Azevedo (1959, apud Meaulo, 2004) de Floresta Latifoliada Tropical foi praticamente devastada, transformando-se em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, café, laranja e pastagens.

3.8 Geologia da Região

Os dados geológicos, estão representados nos Anexos 2 (Seções Geológicas); 3 (Interpretação Geológica), sendo que os mesmos se referem as informações obtidas durante os levantamentos feitos junto ao DAAE, DAEE e Córner.

A seguir são descritas resumidamente as características geológicas (IPT, 1981) das unidades mapeadas; as informações mais específicas, estão apresentadas nos Anexo 2 e 3.

3.8.1 Formação Adamantina (Grupo Bauru)

Esta Formação de idade Cretácea, assenta-se sobre os derrames de basalto da Formação Serra Geral, através de contato erosivo e abrange um conjunto de fácies cuja principal característica é a presença de bancos de arenitos de granulação fina a muito fina, cor róseo a castanho, portando estratificação cruzada, com bancos de arenitos de espessuras variando entre 2 a 20 metros, alternados com bancos de lamitos, siltitos, arenito lamíticos de cor castanho avermelhado a cinza castanho, maciços ou com estratificação plano-paralela. Localmente a formação Adamantina tem uma espessura inferior a 50 metros ocupando as partes altas da cidade a partir da cota de 600 metros.

3.8.2 Formação Serra Geral (Grupo São Bento)

A Formação Serra Geral, de idade Jurássico-Cretáceo, tem seu contato basal com os arenitos da Formação Botucatu através de forma de interdigitação, tornando complexa a delimitação de ambas as formações em âmbito regional. A Formação Serra Geral é representada na região por derrames de basalto e pelos sill de diabásio com espessura unitária variável, desde poucos metros até algumas dezenas de metros. Na região a espessura global pode atingir em torno de 200 metros .

No topo de cada derrame, encontram-se vesículas ou amídalas, preenchidas por minerais do grupo das zeolitas, sendo que nesta região ocorre a maior percentagem de substância vítrea. A parte central, normalmente é maciça e microcristalina. A zona basal apresenta aspectos semelhantes a do topo, porém com espessuras sensivelmente inferiores.

Entre derrames ou mesmo grupo de derrames podem ocorrer arenitos da Formação Botucatu, podendo se mostrar silicificados, podendo sua espessura variar de alguns centímetros a 50 metros. Os sills de diabásio podem ocorrer em qualquer posicionamento da coluna geológica das rochas preexistentes, ocorrendo normalmente na base do Piramboia ou na base e no interior da Formação Botucatu.

3.8.3 Formação Pirambóia (Grupo São Bento)

A Formação se caracteriza por uma sucessão de camadas arenosas, comumente avermelhadas, onde os arenitos de idade Triássico-Jurássico são de granulação média a fina, possuindo fração argilosa maior na parte inferior que na superior, onde localmente ocorrem arenitos conglomeráticos, sendo comum a presença de lamitos em camadas horizontais de pequena espessura. Predominam as estratificações plano-paralelas, ocorrendo uma alternância de laminais mais ou

menos ricas em argila e silte, ou ainda mostra estratificação cruzada de médio a grande porte do topo tangencial.

Esta Formação representa, por suas características litológicas e estruturais, depósitos de ambiente continental úmido, oxidante de origem fluvial, depósitos em canais meandranes e planícies com pequenas lagoas esparsas, apresentando uma espessura global na área atingindo 185 metros.

3.8.4 Formação Botucatu (Grupo São Bento)

O contato basal da Formação Botucatu com a Formação Pirambóia, se dá por mudança litológica gradual, manifestando-se por discordância erosiva, quando a Formação se inicia por arenito conglomerático ou conglomerado basal.

Esta Formação é de idade Jurássico-Cretáceo de origem eólica e constitui-se quase que inteiramente de arenitos de granulação fina a média, uniforme com boa seleção de grãos foscos de alta esfericidade. A cor predominante é de tonalidade avermelhada, tendo uma estratificação comum cruzada do tipo tangencial de médio a grande porte características de dunas caminantes. A granulometria varia de 0,125 a 0,250 mm, com teor de argila não ultrapassando 6%, atingindo 120 metros de espessura .

3.9 Geologia estrutural da região

Segundo o IPT(1981)a análise das isobatas do topo da Formação Botucatu e das isopacas do basalto da Formação Serra Geral demonstra que a área sofreu intensos falhamentos pré-Cretáceo, tanto nas direções NE como NW. São falhas em degrau ou em sistema de horst e graben, com mergulho vertical ou sub-vertical, cujos rejeitos são da ordem de 100 metros. Esses falhamentos de caráter regional encontram-se mascarados na área, pelas coberturas cenozóicas e pela Formação Adamantina.

A primeira falha situada na porção sudeste da área, provocou o levantamento relativo do bloco sul. A erosão atuando sobre este bloco erguido,

fez com que o basalto se tornasse extremamente fino, tornando o Botucatu aflorante em cotas superiores a 650 metros. Como estes eventos foram pré-Bauru, parte do Botucatu encontra-se recoberto pela Formação Adamantina. A segunda falha, paralela a primeira situada, tem um rejeito menor, e com isto temos cerca de 50 metros de espessura de basalto. A terceira falha é de direção NW, e tem um rejeito da ordem de 100 metros. Neste falhamento, o bloco oeste foi rebaixado relativamente. Com o rebaixamento, o topo do Botucatu foi colocado, quase a mesma altura do topo do Piramboia do bloco leste. A quarta falha, nesta descrição, é paralela a anterior, com um rejeito um pouco menor, tornando o bloco sul um graben.

Esse tectonismo provocou grandes modificações na configuração do topo do Botucatu e na espessura do pacote basáltico, onde a leste da cidade no horst, o Botucatu aflora na cota 680 metros, sob forma domica, caindo para NE e SW nas cotas 560 metros. Constata-se que na metade sul deste bloco, o basalto desapareceu por completo, sendo encontrado ao norte com uma espessura de 70 metros. Dentro da zona de falhamento que atinge mais de 500 metros de largura, o Botucatu se encontra entre as cotas 610 e 540 metros e a espessura do basalto entre 40 e 90 metros. No graben central, onde se localiza a maior parte da cidade, o topo do Botucatu varia de 510 a 460 metros, formando duas depressões alongadas no sentido NE. É também nestas depressões que ocorrem as maiores espessuras de basalto (em torno de 200 metros). Ao sul da cidade dentro da zona falhada de quase 1 km de largura, o topo do Botucatu esta na cota media de 450 metros e a espessura do basalto varia de 200 a 145 metros. No Bloco sul, o Botucatu esta entre as cotas 540 e 520 metros, correspondendo à cota dos afloramentos nos vales do Ribeirão das Cruzes e Rio Chibarro, onde a cunha de basalto varia de 0 a 80 metros na proximidade da falha.

O Mapa Geológico do Estado de São Paulo (**Figura 7**), e as características geológicas das unidades mapeadas, estão apresentadas no Mapa Geológico da região, de acordo com trabalho desenvolvido no município de Araraquara por Meaulo (2004).

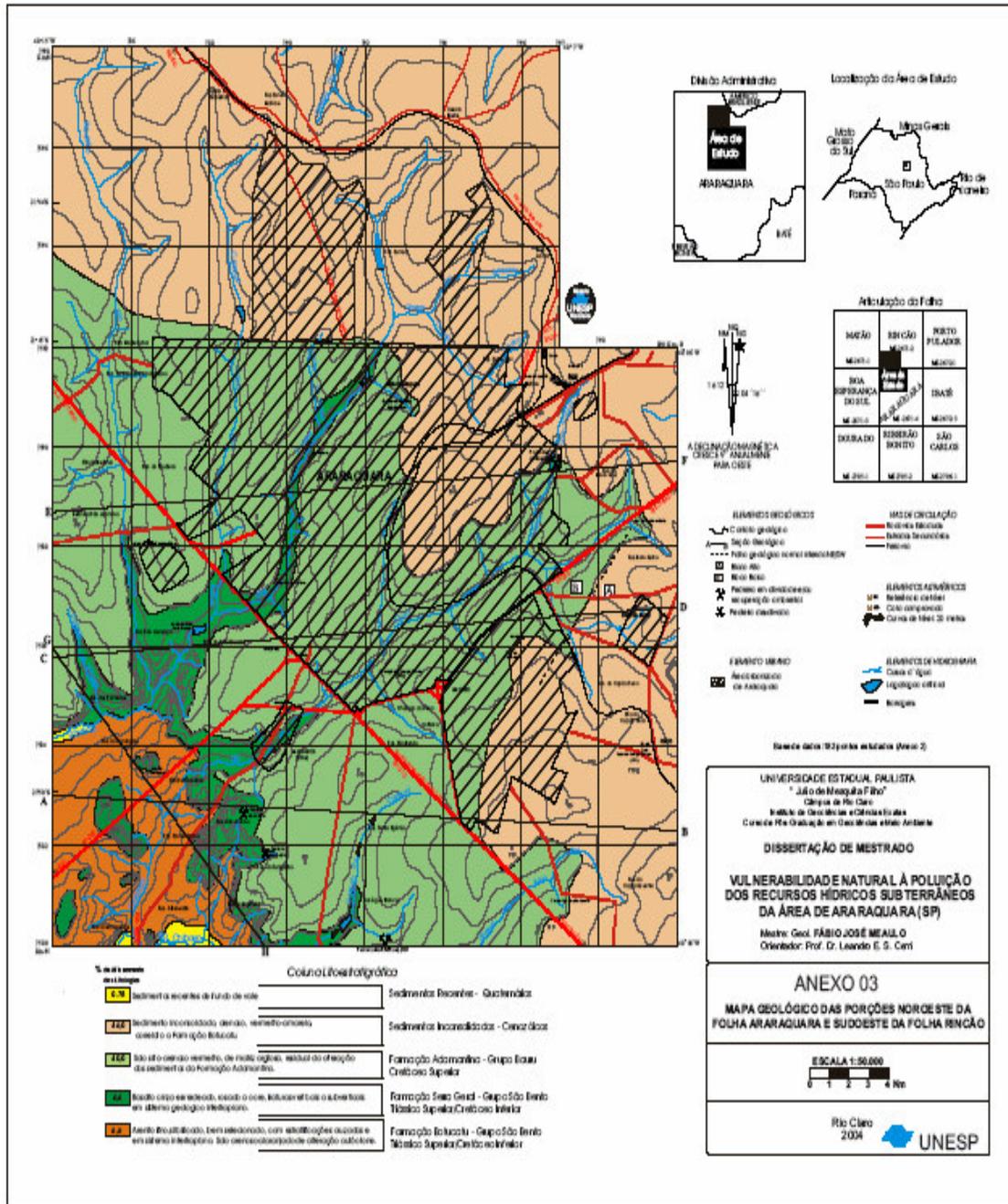


Figura 7 - Mapa geológico do Estado de São Paulo
Fonte: MEAULO, 2004

3.10 Hidrogeologia da Área de Estudo

Do ponto de vista hidrogeológico global, a área de estudo se encontra inserida na Bacia do Paraná, que por sua vez possui dimensões continentais, localizada no centro-leste da América do Sul, Argentina e Paraguai.

Segundo Rebouças (1976, apud Meaulo, 2004) as condições hidrogeológicas da Bacia, são norteadas, principalmente por fatores de ordem climática (realimentação do recurso hídrico) e geológica (característica do meio e geoestruturas). O clima responde pela abundância e a variabilidade pluviométrica de uma determinada região, enquanto que a geologia, geralmente, demonstra a importância e distribuição das estruturas armazenadoras da água subterrânea.

A hidrogeologia da Bacia Sedimentar do Paraná é formada pelos Aquíferos: Guarani, Serra Geral, Bauru, Furnas, Palermo, Rio Bonito e Estrada Nova, porém neste trabalho estaremos focando apenas a área de estudo que compreende apenas os Aquíferos Guarani, Bauru e Serra Geral.

O Sistema aquífero Guarani apresenta regionalmente uma área estimada de 840.000 km² (Brasil) dos quais são recobertos pelos basaltos da Formação Serra Geral, o que cria condições de confinamento e artesianismo. A sua espessura média é de 250 m, sendo que os poços tem profundidade e produtividade variáveis, onde em condições livres possuem profundidade média de 113 m e vazão média de 13 m³/h.

Em locais confinados (Quadro 5), o aquífero tem alta produtividade com vazão média de 54 m³/h e profundidade média de 263 m, sendo utilizado para abastecimento humano como no caso de Ribeirão Preto e Araraquara.

O sistema aquífero fraturado Serra Geral possui espessura média de 150 m e ocupa a porção sul da região hidrográfica, sendo que os poços apresentam produtividade média de 23 m³/h há uma profundidade de 123 m.

O Sistema Bauru-Caiuá possui espessura média de 200 m apresentando uma vazão média de 24 m³/h há uma profundidade média de 131 m.

Quadro 5 - Características do Aquíferos pertencentes a Área de Estudo

	AQUÍFEROS			
	Guarani-Livre	Guarani-Confinado	Serra Geral	Bauru
Espessura Média	250 m	600 m	150 m	200 m
Profundidade Média-Poços	113 m	263 m	123 m	131 m
Vazão Média	13 m ³ /h	54 m ³ /h	23 m ³ /h	24 m ³ /h

Fonte: ANA, 2003

O **Quadro 6** sintetiza as principais propriedades relevantes para o entendimento dos sistemas aquíferos da região de estudo.

Quadro 6 - Síntese das unidades aquíferas da área de estudo

Classe	Hidroestratigrafia	Características do Aquífero	Unidade Geológica	Litologias	Capacidade Específica (m ³ /h/m)	Condutividade Hidráulica Média (cm/s)	Número de Poços Tubulares
Sistema Aquífero Sedimentar, permeável por porosidade granular	Bauru	Granular Livre	Formação Adamantina solo silto-arenoso avermelhado	Arenitos mal selecionados muito finos a conglomeráticos.	0,1 a 5,0	8 x 10 ⁻⁵	27
Sistema Aquífero fraturado, permeável por fraturamento nas rochas.	Serra Geral	Fissurado, confinado a eventual livre	Formação Serra Geral, basalto fraturado, cinza esverdeado, intercalações de arenito	Derrames sucessivos de lavas superpostas	0,01 a 10		30
Sistema Aquífero sedimentar, permeável por porosidade granular	Guarani	Livre a confinado	Formação Botucatu, arenito muito fino a fino, alaranjado com estratificações cruzadas.	Arenitos finos a médios, arenitos lamíticos e lamitos arenosos.	0,5 a 16	6 x 10 ⁻⁴	91

4. METODOLOGIA

4.1 Introdução

Um modelo é uma representação simplificada de uma realidade física, a qual consiste de um meio subterrâneo natural cuja avaliação e propriedades deseja-se conhecer. O problema físico do fluxo de água é descrito através de um modelo matemático que inclui: as equações diferenciais que governam os fenômenos (equações de fluxo, lei de Darcy, etc.), as condições iniciais do sistema, a geometria e propriedades do meio e as condições existentes nos limites do sistema (condições de contorno, definição do topo do embasamento).

A metodologia clássica empregada na modelagem matemática de fluxo das águas subterrâneas procura, em primeiro lugar, identificar os processos físicos que devem ser incluídos na análise de acordo com sua importância no fluxo, etapa que se finaliza com a descrição de um Modelo Conceitual.

Segundo KOHNKE (2001), 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.

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 8**.

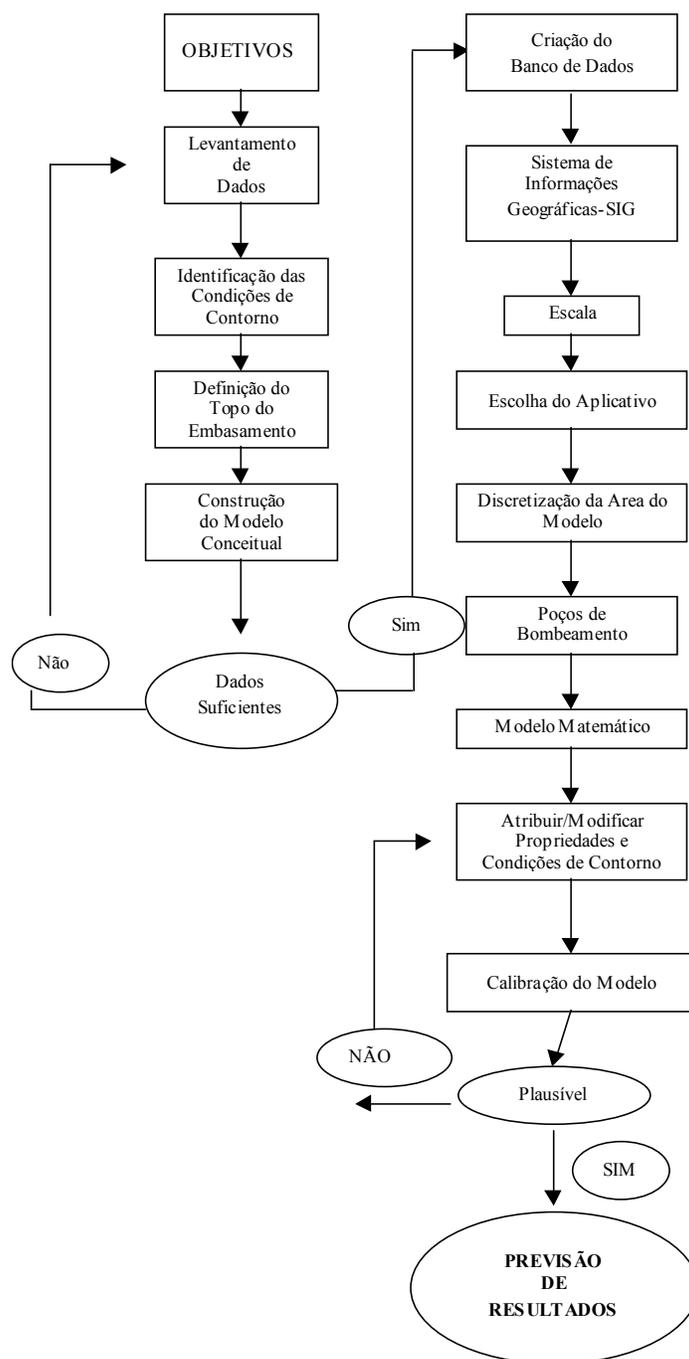


Figura 8 - Etapas básicas para a construção de um modelo

Durante o desenvolvimento destas etapas, foi feita a revisão bibliográfica sobre modelagem matemática buscando a sua aplicabilidade e limitações, destacando-se os trabalhos e os artigos publicados por IRITANI (1998); CAMPOS (2000); KOHNKE et al. (2002); MEDEIROS (2003); e PROMMER (2003), que compreendem a base da dissertação aqui apresentada.

4.2 Etapas Básicas para a Construção do Modelo

4.2.1 Definição de Objetivos

O objetivo proposto para este trabalho é avaliar o atual regime de exploração das águas subterrâneas no município de Araraquara a partir do levantamento, organização e interpretação das informações existentes.

Com a compilação destas informações será determinada a zona de captura dos poços e a avaliação das condições atuais, através da simulação de cenários (atuais e futuros).

Com estes resultados, este trabalho se propõe a disponibilizar uma ferramenta de gestão a ser utilizada no desenvolvimento de estratégias de extração otimizada dos aquíferos, analisando as interações entre o uso do recurso hídrico subterrâneo e do sistema hidrológico regional, numa perspectiva de manejo integrado e sustentável.

4.2.2 Levantamento de dados

Nesta etapa do projeto foi efetuado um levantamento bibliográfico buscando informações referentes à hidrogeologia, geologia e hidrologia do município de Araraquara e região, visando o conhecimento do subsolo e o desenvolvimento do modelo conceitual.

A coleta de dados englobou a caracterização do sistema natural de superfície (topografia e águas superficiais) e de sub superfície (propriedades do solo-condutividade, armazenamento, porosidade e densidade).

Estes 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; foram levantados:

- Relatórios de perfurações e instalação de poços de monitoramento,
- Relatórios de monitoramento dos níveis de água dos poços,
- Relatórios contendo informações de monitoramento dos rios que recortam a área de interesse,
- Relatórios contendo dados de precipitação,
- Relatórios contendo informações geológicas locais,
- Relatórios contendo informações hidrogeológicas regionais, levando-se em conta a circulação de água subterrânea de áreas de recarga regionais para áreas de descarga regionais (**Figura 9**).

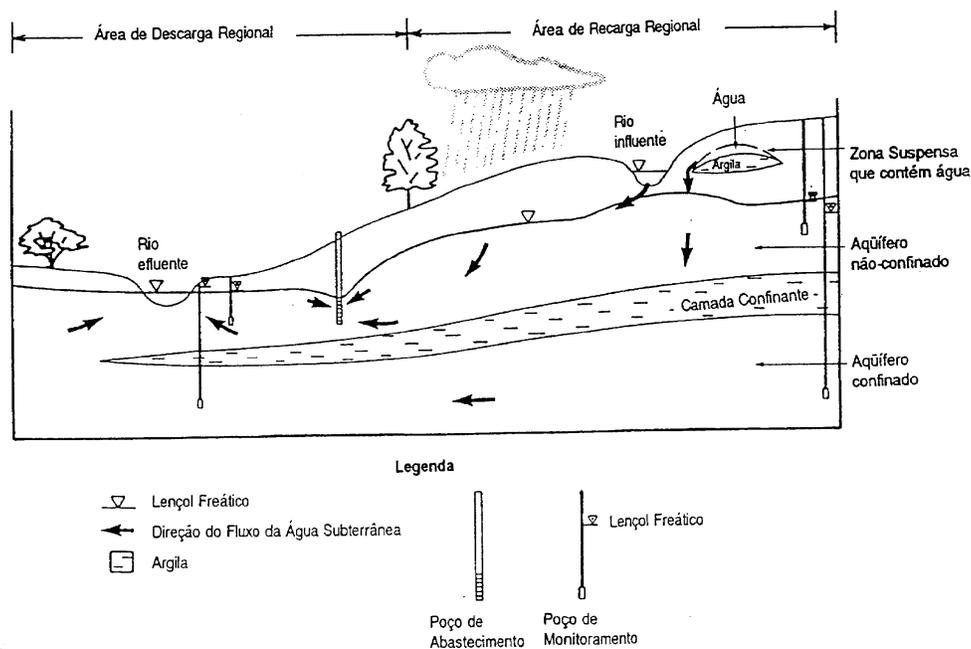


Figura 9 - Circulação de água subterrânea de áreas de recarga regionais para áreas de descarga regionais. (Publicação da API –1989)

A caracterização do Sistema natural foi dividida em:

1. Caracterização da Superfície

- Topografia
- Águas Superficiais
- Dados Atmosféricos

2. Caracterização da Subsuperfície

- Geologia/Litologia/Hidrogeologia
- Nível de água
- Propriedades do solo
- Elevações Potenciométricas

As informações geológicas foram obtidas através de levantamento bibliográfico (mapeamentos e estudos correlatos realizados na região do

Município de Araraquara), adotando- se o mapa do IBGE como base para o trabalho aqui desenvolvido (Tabela 14).

Informação	Fonte/Método
Dados Gerais de Subsuperfície	
♦ Geologia/hidrogeologia	DAAE/DAEE/Corner
♦ N.A.'s	DAAE/DAEE/Corner
Dados Específicos de Subsuperfície	
Geologia/Litologia	Descrições de Sondagens/Corner
Propriedade dos Solos (K, Ss, Sy, n)	DAAE/DAEE/Corner
Solo Propriedades (Densidade, f.o.c., Dispersividade)	DAAE/DAEE/Corner Bibliografia
Elevação Potenciométrica	DAAE/DAEE/Corner Bibliografia

Informação	Fonte/Método
Dados Gerais - Superfície	
♦ Topografia	Mapas/DAAE/IBGE/Mapa Hidrogeológico Aq Guarani
♦ Localização Corpos D'Água Superficiais	Mapas IBGE/DAEE/Comitê de Bacia Tietê-Jacaré
♦ Dados Atmosféricos (Precipitação, Evapotransp.)	ESALQ-EMBRAPA
Dados Específicos de Superfície	
♦ Elevações Topográficas	Mapa IBGE/DAEE/Corner
♦ Elevações da Superfície dos Corpos d'Água	DAAE/IBGE

Tabela 14 - Fontes de Informação

As informações referentes aos Poços, foram levantadas junto ao Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE-Araraquara) e no Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE-Araraquara), sendo complementados por um Estudo realizado no município em 1995 pela CORNER Perfuração de Poços Ltda., onde foram levantados: perfil construtivo, dados do nível d'água e vazão, perfil litológico, perfilagem geofísica e o teste de bombeamento.

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. Nos poços pertencentes ao DAAE (12) e a grandes usuários, além da numeração foram colocadas siglas de identificação do proprietário.

Na **Figura 10**, está apresentado o Projeto Esquemático dos Poços Tubulares Profundos no Município de Araraquara.

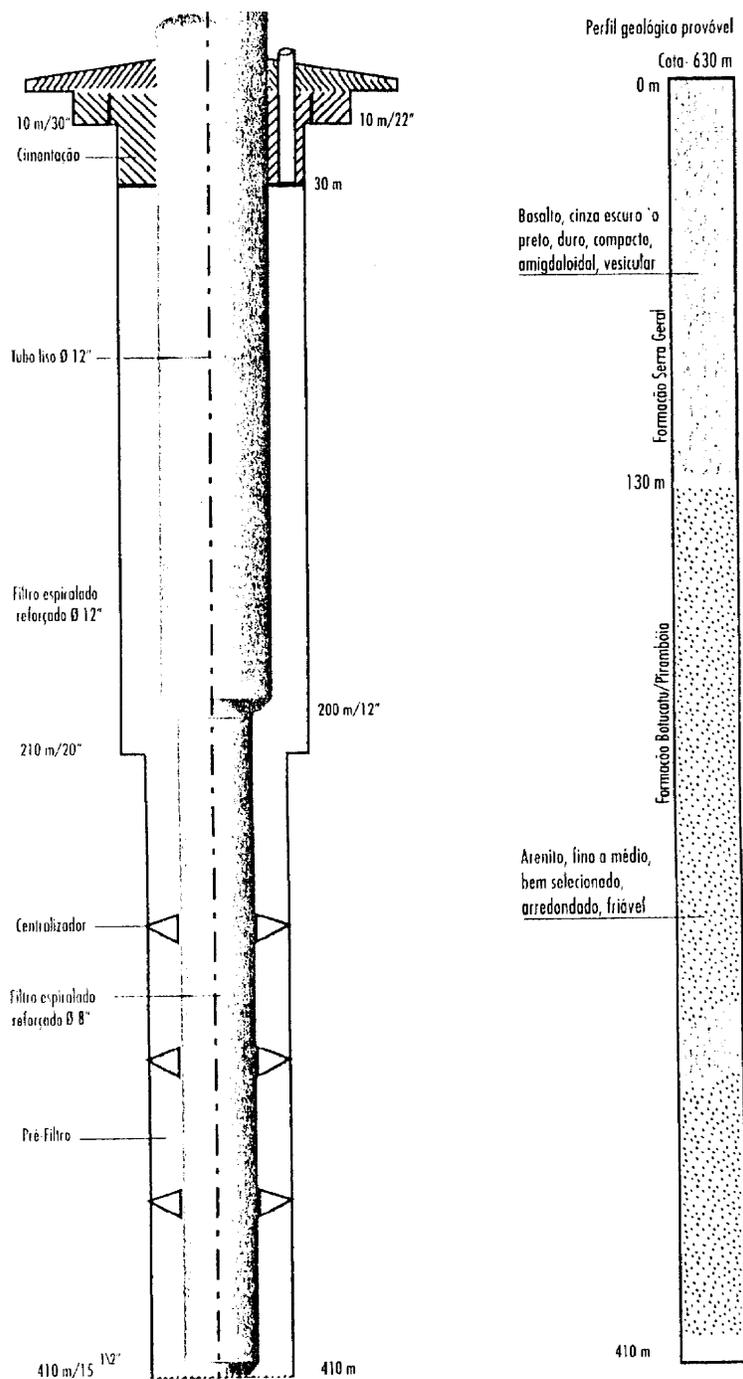


Figura 10 - Projeto esquemático de poço tubular profundo no município de Araraquara-SP
 Fonte: Revista Águas e Energia Elétrica, abril/99, p.75.

4.2.3 Identificação das condições de contorno naturais

A escolha das condições de contorno mais adequadas para simular matematicamente sistemas hidrogeológicos, é uma etapa essencial do processo de modelagem. Longe de ser uma tarefa trivial, ela depende do conhecimento pormenorizado do sistema a ser simulado e das especificidades matemáticas do modelo escolhido (FILHO e COTA, 2003).

No presente trabalho, a identificação das condições de contorno teve como base, uma delimitação mínima da região de interesse, visando selecionar uma área de domínio do modelo suficientemente grande para que as Condições de Contorno (baseadas em limites naturais) não influenciassem os resultados finais.

Como parte da revisão hidroestratigráfica regional e local, os limites apropriados do modelo, foram identificados e seus valores estabelecidos utilizando-se limites físicos naturais, tais como: divisores naturais de fluxo, locais de descarga, divisores de águas superficiais, divisores das áreas de recarga e linhas de fluxo.

Na área de Araraquara, algumas características fisiográficas favorecem a definição das condições naturais de contorno, como por exemplo à presença de rios e córregos que cortam o município, bem como a existência de divisores de água superficiais. Assim sendo, neste trabalho foram utilizados 3 tipos de condições de contorno: na camada superior do modelo em todos os córregos e rios identificados no mapa topográfico, foi empregada uma condição de contorno tipo 3 ou de Rio (Figura 11). Nas camadas inferiores do modelo optou-se pela definição da área de contorno com base no Mapa Hidrogeológico do Aquífero Guarani (CAMPOS, 2000). Nas bordas Norte e Sul (Figura 12) 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 (Figura 13), foram utilizadas condições de contorno de carga constante, com valores de 450m e 650m, respectivamente, valores estes baseados no mapa hidrogeológico.

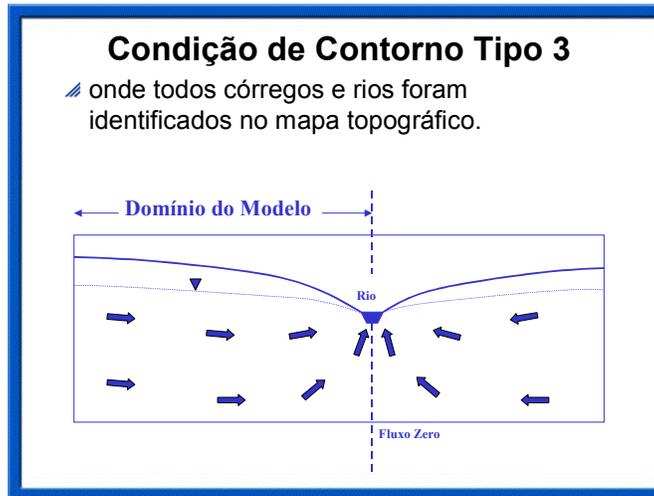


Figura 11 - Condição de contorno tipo 3

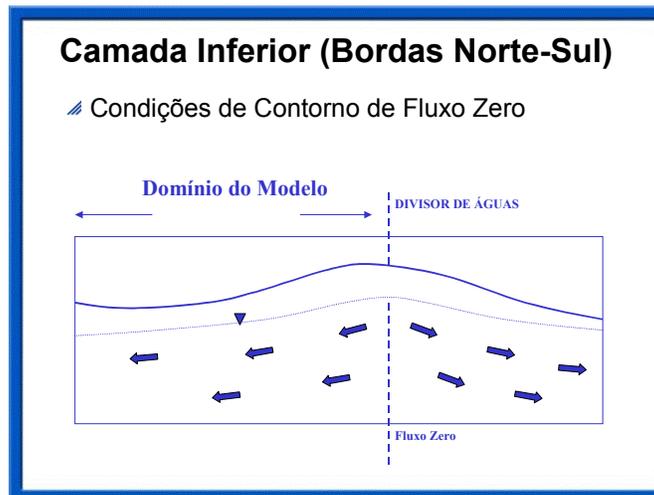


Figura 12 - Camada inferior (bordas norte-sul)

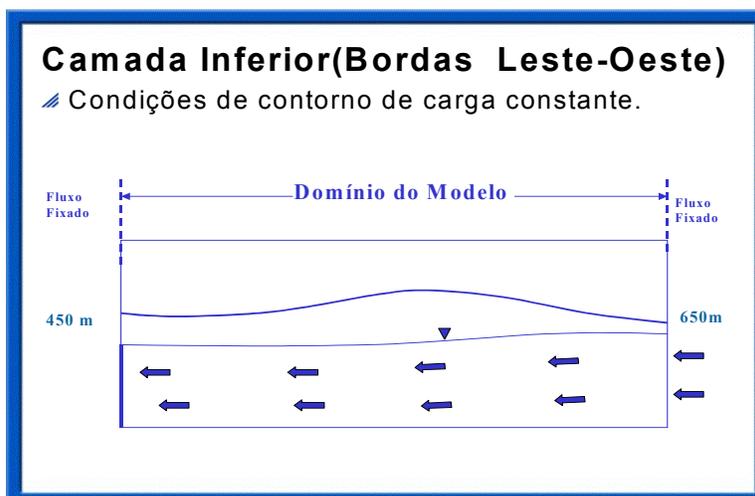


Figura 13 - Camada inferior (bordas leste-oeste)

Esta condição assume que o fluxo de águas subterrâneas se dá primordialmente de leste para oeste e que, pelas bordas se encontram longe o suficiente da área de interesse, não permitindo que as cargas nas bordas sejam afetadas pela instalação de novos poços na área estudada.

4.2.4 Definição do topo do embasamento

Através da análise dos mapas geológicos e hidrogeológicos existentes, definiu-se 4 grandes unidades hidroestratigráficas principais para a área estudada, que correspondem ao Grupo Bauru (Formação Adamantina) e as Formações Serra Geral, Piramboia e Botucatu, porém como as Formações geológicas Piramboia e Botucatu são atualmente denominadas Aquífero Guarani, ambas foram agrupadas em uma só camada. A disposição destas unidades hidroestratigráficas em subsuperfície serviu de base para a determinação das camadas do modelo matemático.

A definição do topo do embasamento foi realizada através da utilização dos dados de perfuração dos poços tubulares profundos, onde foi considerado como embasamento o Grupo Bauru, representado pela Formação Adamantina, que é um sistema aquífero sedimentar, permeável por porosidade granular, composto por arenitos muito finos e conglomeráticos, bancos lamíticos, célticos e finas camadas calcárias.

A Formação Serra Geral (Grupo São Bento) localiza-se estratigraficamente abaixo do Grupo Bauru, representando um sistema aquífero fraturado, permeável por fraturamento nas rochas, formado por derrames sucessivos de lavas superpostas.

As Formações Piramboia e Botucatu que formam o Aquífero Guarani, está abaixo das demais camadas e constituem um Sistema Aquífero sedimentar, permeável por porosidade granular formado por arenitos finos a médios, arenitos lamíticos e lamitos arenosos, ficando definida como base de toda a seqüência estratigráfica.

4.2.5 Construção do modelo conceitual

Para o entendimento e construção do modelo conceitual, foram primeiramente definidas as unidades hidroestratigráficas a partir da interpretação dos perfis construtivo e litológico dos poços e das perfilagens geofísicas existentes, associadas ao mapa geológico da área. O parâmetro condutividade hidráulica foi obtido a partir da interpretação dos dados de testes de bombeamento levantados no cadastramento dos poços.

Para a avaliação do comportamento do fluxo da água subterrânea foram confeccionados mapas potenciométricos utilizando-se dados da época da perfuração dos poços, e para a definição do volume de água escoado para as drenagens, foram avaliados dados hidrológicos para a estimativa do escoamento básico, permitindo o entendimento da forma de ocorrência e comportamento do fluxo das águas subterrâneas.

O Modelo Conceitual possibilitou uma idealização e simplificação dos dados da área de estudo, identificando todos os elementos, que de alguma forma condicionam o fluxo subterrâneo e que por sua importância requerem um maior grau de detalhamento. O conceito básico é sempre o de reproduzir o comportamento do fluxo, as propriedades do solo, as taxas de recarga e evapotranspiração bem como a sua hidroestratigrafia.

Com base nas informações e dados levantados, foram definidas as seguintes premissas para a criação do Modelo Conceitual (Figura 14):

1. Devem ser consideradas as seguintes unidades litológicas no Modelo Conceitual: Grupo Bauru (Formação Adamantina), Formação Serra Geral e Formação Piramboia/Botucatu.

2. Os Sistemas Aquíferos correspondentes são: Aquífero Livre Bauru e o Aquífero confinado a semiconfinado Piramboia/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.

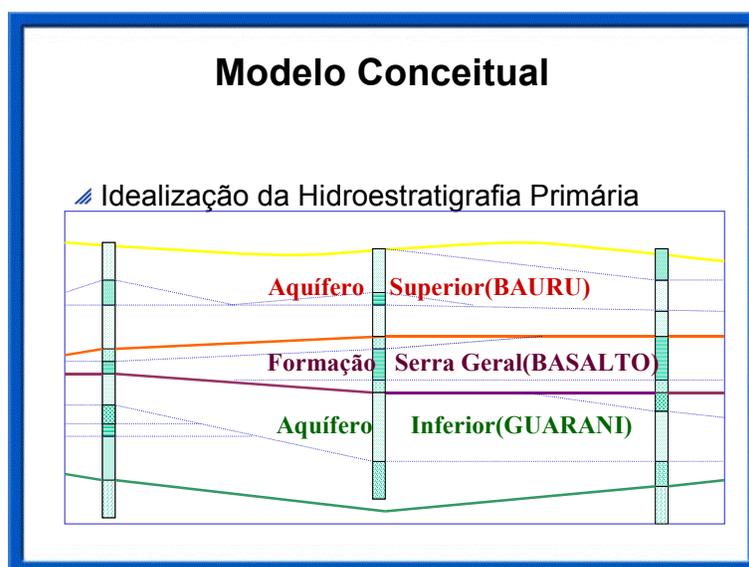


Figura 14 - Modelo Conceitual

4.3 Desenvolvimento das Seções Geológicas (Escala)

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

4.3.1 Criação do banco de dados

A avaliação e o tratamento de dados é uma das partes mais importantes da modelagem matemática, sendo que todos os dados relevantes

existentes para a área a ser estudada, foram primeiramente tabelados no aplicativo EXCEL de forma organizada, onde foram criadas as seguintes colunas:

- Nome do Poço (Well_Identification)
- UTMN (Northing)
- UTME (Easting)
- Cota do Terreno (Ground Elevation)
- Cota da Base do Poço (Borehole Bottom Elevation)
- Profundidade do topo do filtro do poço (Top)
- Profundidade da base do filtro (Bottom)
- Cota do topo do filtro (Top Elevation)
- Cota da base do filtro (Bottom Elevation)
- Cota do topo da litologia (Top_Lith)
- Cota da base da litologia (Bottom_Lith)
- Identificação Preliminar da Geologia (Geology)
- Descrição litológica do material (Lithologic_Comments)
- Cota do nível de água (AvgWElev)
- Profundidade do nível de água (AvgWLevel)
- Cota do terreno (Ground_Elevation)
- Diâmetro do poço (Diameter/Rate/Kind)

Após a inclusão dos dados nas tabelas em EXCEL (Figura 15), os mesmos foram transferidos para um Banco de Dados em formato MICROSOFT ACCESS (Figura 16) compatíveis com o Sistema de Informações Geográficas (SIG). Após a entrada de todos os dados necessários, obedecendo ao formato do banco de dados, a qualidade das informações foi verificada. Nesta etapa, os dados foram plotados na forma de mapas, possibilitando assim uma checagem das coordenadas de interesse, onde em paralelo os valores das cotas topográficas foram interpolados visando à minimização de erros grosseiros.

Planilha Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
5	P-65	7590500	792500	A	685	365	685				
6	P-12	7591350	791700	A	613.2	365	638				
7	P-63	7589300	796650	A	690	365	690				
8	P-45	7588600	786900	A	640	365	640				
9	P-15	7592900	791300	A	608	365	650				
10	P-61	7589750	792300	A	690	365	690				
11	P-156	7591550	797950	A	695	365	695				
12	P-154	7583800	789600	A	560	365	560				
13	P-155	7587050	796000	A	656	365	656				
14	P-165	7588970	790650	A	628	365	628				
15	P-83	7588150	793150	A	690	365	690				
16	P-86	7588850	794150	A	692.5	365	708				
17	P-107	7585000	794250	A	670	365	670				
18	P-147	7593700	787900	A	670	365	670				
19	P-71	7588700	792100	A	670	365	670				
20	P-163	7588350	793650	A	695	365	695				
21	P-68	7587650	793600	A	690	365	690				
22	P-74	7586200	793250	A	690	365	690				
23	P-34	7589000	791700	A	680	365	680				
24	P-80	7588050	792050	A	649	365	649				
25	P-66	7590050	792600	A	685	365	685				
26	P-146	7591050	795420	A	665	365	665				
27	P-26	7591200	795750	A	665.9	365	682				
28	P-151	7591140	795750	A	682	365	682				
29	P-2	7589200	793200	A	697	365	697				
30	P-137	7588270	787250	A	630	365	630				
31	P-18	7589400	786500	A	599.5	365	620				
32	P-166	7593950	791000	A	700	365	700				
33	P-54	7591600	797300	A	685.5	365	730				
34	P-157	7593150	796950	A	700	365	700				
35	P-49	7589100	794050	A	683	365	708				
36	P-159	7589100	794150	A	700	365	700				
37	P-153	7584000	794000	A	695	365	695				
38	P-94	7587700	793050	A	680	365	680				
39	P-64	7585050	791700	A	610	365	610				

Figura 15 - Planilha Excel

Tabela Access

ID	Well_Identifier	Northing	Easting	Ground_El	Borehole	BedData	Comment
1	P-138	7,594,400	799,620	725	663	F	Corner
2	P-29	7,590,750	794,650	680	662	F	Corner
3	P-20	7,589,300	791,950	683	658	F	Corner
4	P-65	7,590,500	792,500	685	637	F	Corner
5	P-12	7,591,350	791,700	638	605.2	F	Corner
6	P-63	7,589,300	796,650	690	655	F	Corner
7	P-45	7,588,600	786,900	640	592	F	Corner
8	P-15	7,592,900	791,300	650	600	F	Corner
9	P-61	7,589,750	792,300	690	635	F	Corner
10	P-156	7,591,550	797,950	695	632	F	Corner
11	P-154	7,583,800	789,600	560	540	F	Corner
12	P-155	7,587,050	796,000	656	630.65	F	Corner
13	P-165	7,588,970	790,650	628	607.5	F	Corner
14	P-83	7,588,150	793,150	690	648	F	Corner
15	P-86	7,588,850	794,150	708	664	F	Corner
16	P-107	7,585,000	794,250	670	627.5	F	Corner
17	P-147	7,593,700	787,900	670	602	F	Corner
18	P-71	7,588,700	792,100	670	635	F	Corner
19	P-163	7,588,350	793,650	695	648.5	F	Corner
20	P-68	7,587,650	793,600	690	650	F	Corner
21	P-74	7,586,200	793,250	690	640.2	F	Corner
22	P-34	7,589,000	791,700	680	633	F	Corner
23	P-80	7,588,050	792,050	649	621	F	Corner
24	P-66	7,590,050	792,600	685	635	F	Corner
25	P-146	7,591,050	795,420	665	596	F	Corner
26	P-26	7,591,200	795,750	682	592	F	Corner
27	P-151	7,591,140	795,750	682	632	F	Corner
28	P-2	7,589,200	793,200	697	570	F	Corner
29	P-137	7,588,270	787,250	630	479	F	Corner
30	P-18	7,589,400	786,500	620	579.5	F	Corner
31	P-166	7,593,950	791,000	700	610	F	Corner

Figura 16 - Tabela Access

4.3.2 Desenvolvimento do sistema de informações geográficas (SIG)

O Banco de dados de um Sistema de Informações Geográficas (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 software MICROSOFT ACCESS, foi utilizado como ferramenta para o desenvolvimento do banco de dados, uma vez conectados diretamente ao o SIG, foram criadas as seguintes Tabelas (Anexo 1):

- AvgWaterLevel
- GeoDesc
- Geology
- Interpretation
- Screens
- Well_Location

A partir da criação do Banco de Dados no Access, o programa MapInfo foi utilizado juntamente com a ferramenta CS-Mapper para a construção de seções geológicas e elaboração de diversos mapas, possibilitando a compreensão hidrogeológica da área de estudo (Figura 17).

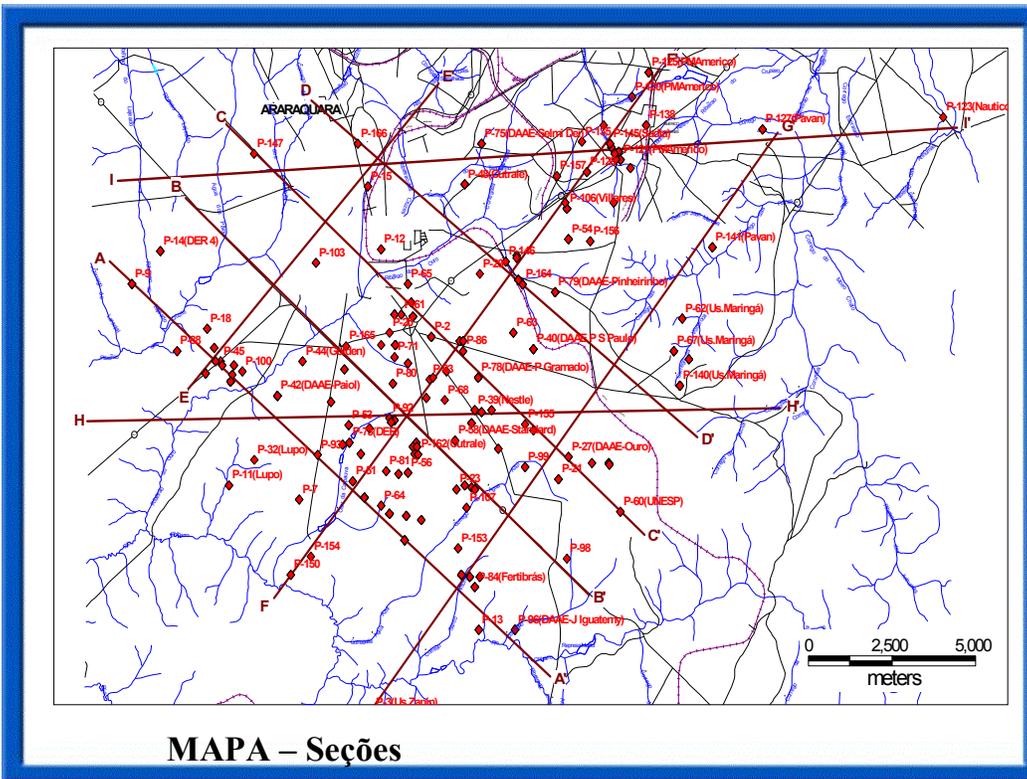
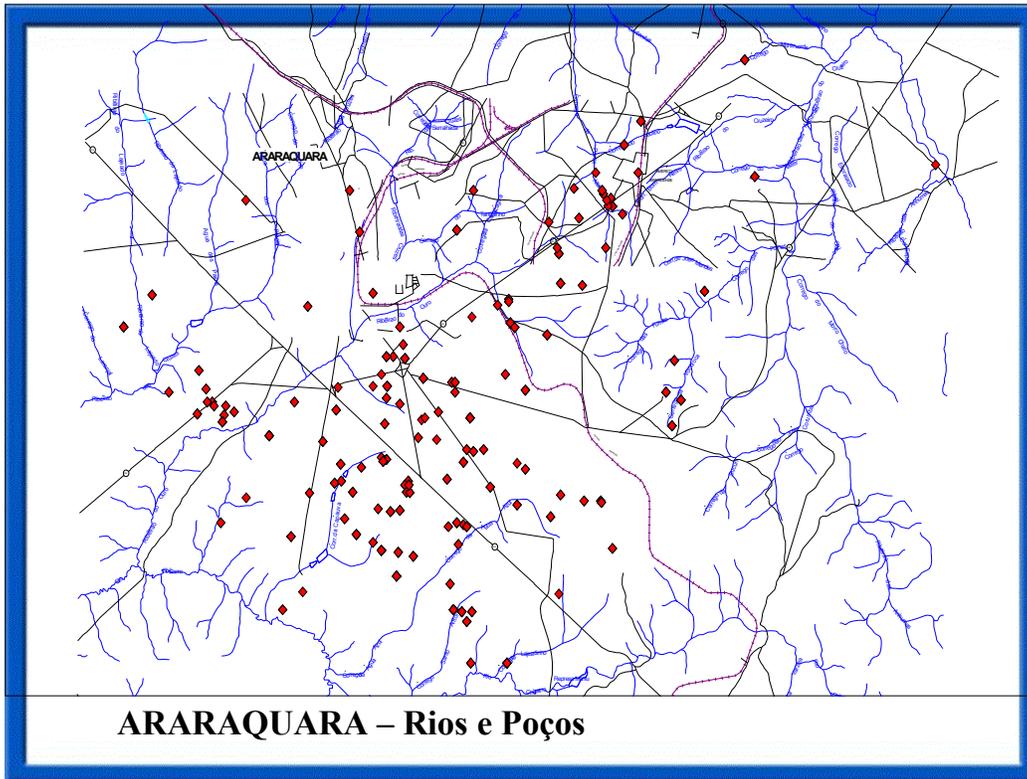


Figura 17 - Compreensão hidrogeológica da área de estudo

O MapInfo é um programa da MapInfo Corporation, que apresenta uma capacidade de visualização que é essencial em qualquer programa de mapeamento, possibilitando a interação entre mapas, gráficos e Tabelas.

A compilação de todas as informações coletadas, possibilitou a visualização da localização dos Poços (Anexo 2) e a construção das 9 Seções Geológicas que foram nominadas com letras maiúsculas desde AA até II, e que estão visualizadas no Anexo 3.

No caso da visualização das Cotas Topográficas bem como da interpolação da elevação de cada camada geológica em toda área de estudo, (Figura 18 e Anexo 4) foi utilizado o programa SURFER 7.0, que é um aplicativo desenvolvido pela Golden Software, sendo utilizado mundialmente como padrão na elaboração de Mapas de contorno, tridimensionais, vetores e mapas de imagens.

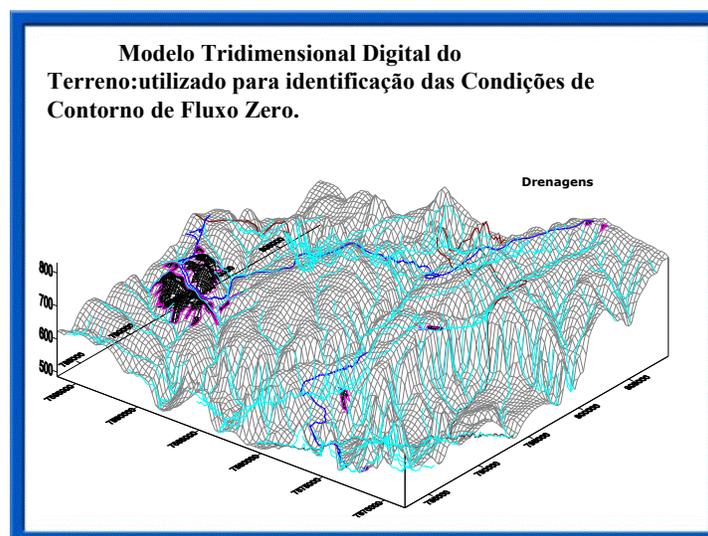


Figura 18 - Modelo tridimensional digital do terreno: utilizado para identificação das condições de contorno de fluxo zero

A compilação destes dados, permitiu a visualização da topografia da área estudada, do Perfil geológico dos Poços e das Seções Geológicas. A conclusão da 2ª Etapa (Escala), possibilitou um melhor entendimento de

todo o sistema, servindo de base para o início da 3ª Etapa, a Modelagem Matemática.

4.4 Modelo Matemático (Numérico)

4.4.1 Escolha do aplicativo matemático

A escolha do aplicativo matemático fundamentou-se no objetivo de simular o fluxo subterrâneo natural, determinar o impacto futuro das condições atuais e no delineamento das zonas de captura dos poços.

O programa selecionado para o fluxo de água subterrânea foi o Visual MODFLOW Pro 3.1 (Guiguer & Franz, 1996), desenvolvido por Nilson Guiguer e Thomaz Franz em 1994 e atualmente comercializado pela WHI Tec Solutions Ltda, que gentilmente cedeu seu software para utilização neste trabalho.

O Visual MODFLOWPro foi desenvolvido para a modelagem tridimensional por diferenças finitas centradas no bloco para fluxo de água subterrânea, permitindo simulações tanto no estado estacionário como no transiente, condições heterogêneas e anisotrópicas para as múltiplas camadas discretizadas em uma grade irregular ou uniforme. As condições de contorno que o programa permite colocar contemplam os três tipos, podendo simular fronteiras como, “não fluxo”, carga constante, drenos, rios, lagos, paredes, recarga, evapotranspiração, variáveis ou não no tempo. Permite, ainda, a simulação de poços de injeção ou extração, com taxas variáveis ou não, no tempo. Devido ao mesmo ser construído na forma modular, sua aplicação é otimizada, pois utiliza-se apenas os módulos necessários para atender as complexidades do sistema hidrogeológico.

O Visual MODFLOW Pro é um pré e pós-processador para o MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) e MODPATH (Pollock, 1989), permitindo a entrada de dados e a visualização dos resultados na forma gráfica, facilitando a construção e definição do modelo matemático. O software faz a

leitura dos dados de entrada colocados graficamente traduzindo os mesmos para o formato ASCII exigido pelo MODFLOW e pelo MODPATH. Para a apresentação dos resultados o Visual MODFLOWPro segue o caminho inverso, lendo os arquivos em ASCII gerados pelo MODFLOW e MODPATH, transformando para os formatos de gráficos e mapas de isolinhas, facilitando a visualização.

4.4.2 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.

Para este trabalho foi utilizado como base o Mapa do IBGE (1998) através das folhas Araraquara (SF-22-X-D-VI-4) e Rincão (SF-22-X-D-VI-2), porém, a modelagem matemática concentrou-se principalmente na zona urbana do município, pois é nele que estão localizados a maior parte dos poços de abastecimento, totalizando uma área de 467,55 quilômetros quadrados.

O número de camadas do modelo foi definido com base nas unidades hidroestratigráficas determinadas pelo modelo conceitual, como mostrado nas Figuras 19, 20 e nos Anexos 2 e 3. Dessa forma foram definidas 3 camadas: a primeira sendo representada pelo Grupo Bauru, a segunda representada pelo 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.

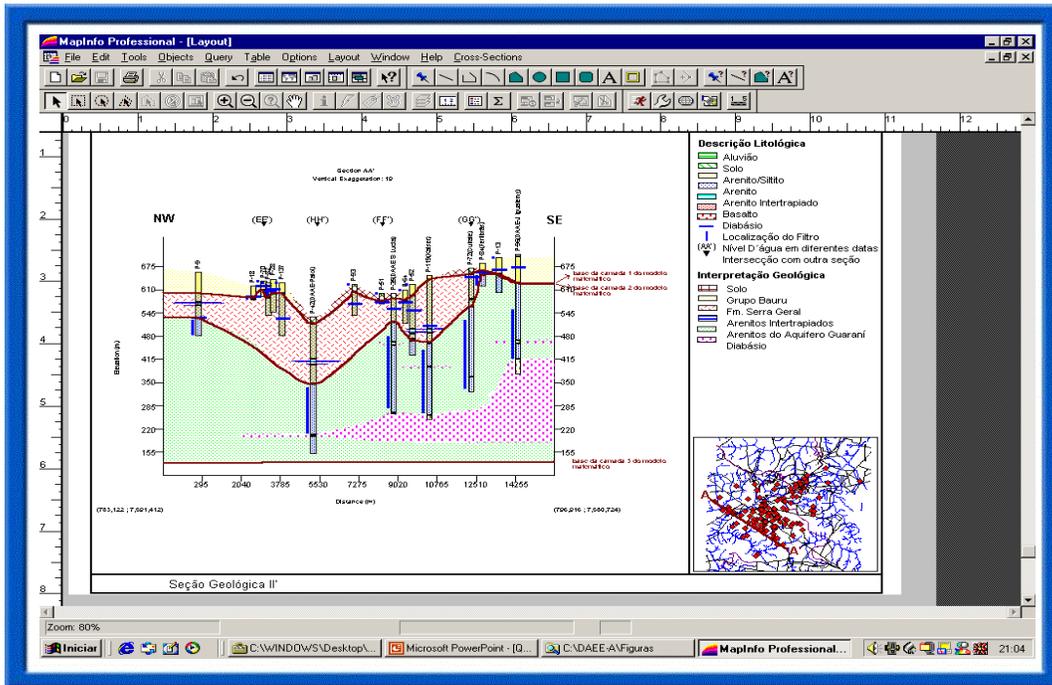


Figura 19 - Modelo conceitual

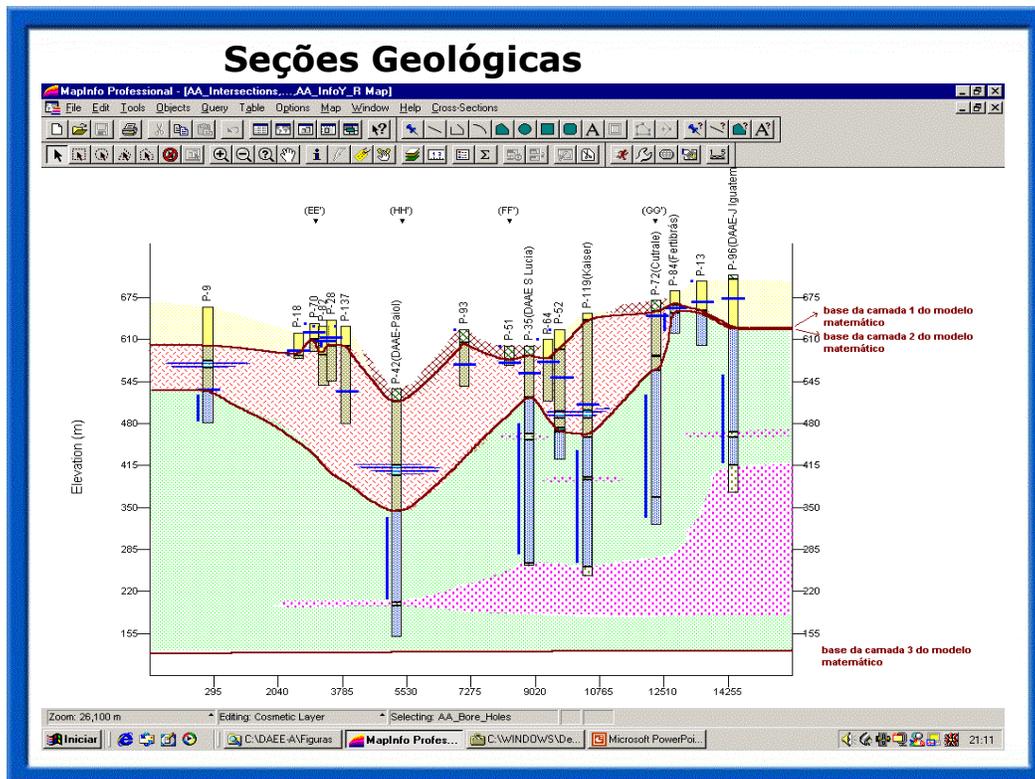


Figura 20 - Seções geológicas

A modelagem matemática foi estabelecida em três situações para possibilitar a validação do modelo calibrado. A primeira situação considerou o sistema hidrogeológico sem nenhuma interferência antrópica, ou seja assumindo que nenhum poço estava ativo, ou “sem bombeamento”. Num segundo cenário foram considerados apenas os poços que são utilizados para o abastecimento público de água no município, cenário este denominado de “com bombeamento”. Numa terceira situação, foram considerados para a simulação os poços que são utilizados para o abastecimento público no município, considerando o dobro do consumo atual de cada poço.

As superfícies que limitam as camadas foram determinadas de acordo com as unidades hidroestratigráficas definidas anteriormente no modelo conceitual, sendo que as mesmas foram digitalizadas e importadas no modelo matemático, permitindo uma representação mais próxima da espessura real do aquífero.

O topo da primeira camada representa a superfície do terreno, que foi digitalizado a partir de mapas gerados pelo aplicativo Surfer 7.0. A base da primeira camada (Anexo 4) assenta-se sobre os derrames de basalto da Formação Serra Geral através de contato erosivo.

A base da segunda camada tem contato com os arenitos da Formação Botucatu através de forma de interdigitalização, o que torna complexa a delimitação de ambas (Anexo 4).

A base da terceira camada foi colocada como cota 150, pois acredita-se que a partir desta profundidade não ocorram interferências nas simulações do modelo.

4.4.3 Poços de bombeamento

Foram inseridas no modelo matemático as características hidráulicas dos poços tais como: diâmetro do poço, intervalo dos filtros, vazão e período de bombeamento. O Visual MODFLOWPro, assume que os poços possuem filtro

em toda a camada explorada, o que permitiu representar apenas um intervalo, considerando o topo da primeira seção filtrante e a base da última seção.

Os poços considerados ativos para o modelo estão ilustrados no **Quadro 7**, onde estão colocados apenas aqueles que são utilizados para o abastecimento público pelo DAAE, pois são os que possuem os dados mais atualizados e confiáveis.

Well_Identification	Northing	Easting	Data	Top	Bottom	Vazao - m ³ /dia
P-10(Santana)	9817.692	19848.61	36500	450	329	-870
P-105(Kaiser)	11943.83	16920.37	36500	429	220	-3054
P-119(Kaiser)	11865.55	16355.2	36500	437	266	-2691
P-19(Paiva)	12558.21	16686.47	36500	425	278	-1950
P-27(Ouro)	16593.71	18704.22	36500	509	407	-1440
P-30(Centrale)	11785.78	18486.23	36500	513	300	-2520
P-32(Lupo)	6986.824	18433.18	36500	420	358	-144
P-35(S. Lucia)	10570.58	17469.48	36500	478	280	-3098
P-39(Nestlé)	13371.34	19620.35	36500	476	321	-540
P-40(P.S.Paulo)	15901.05	21354.4	36500	458	289	-2615
P-42(Paiol)	8251.68	19969.08	36500	333	210	-2713
P-58(Standard)	12924.4	18684.58	36500	502	301	-3675
P-62(Us.Maringá)	18340.41	22287.98	36500	560	393	-1728
P-67(Us.Maringá)	18430.76	21535.09	36500	549	461	-1934
P-72(Centrale)	13371.34	15993.82	36500	522	336	-2582
P-75(S.Dei)	14033.88	26172.9	36500	470	277	-3280
P-78(P.Gramado)	13008.2	20598.01	36500	493	262	-1944
P-79(Pinheirinho)	16731.8	22651.2	36500	499	327	-1827
P-84(Fertibrás)	14575.96	15361.39	36500	648	624	-264

Quadro 7 - Poços utilizados para a calibração com bombeamento atual

Na fase de calibração do modelo para as três situações (sem bombeamento, com bombeamento atual e bombeamento dobrado) e para a definição da zona de captura, as vazões dos poços foram estimadas para um período de 24 horas.

4.4.4 Atribuição das Propriedades

Nesta etapa foram atribuídas e distribuídas as propriedades: condutividade, porosidade, armazenamento e recarga líquida, conforme apresentado nas Figuras 21 e 22.

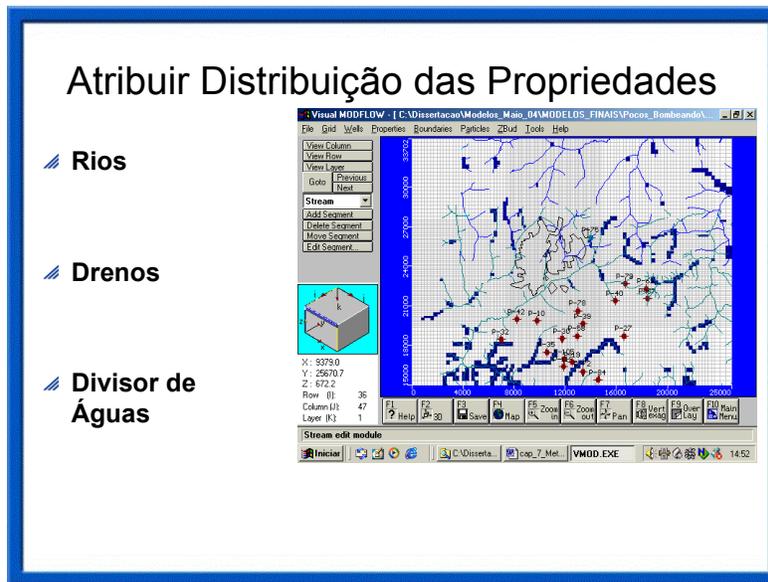


Figura 21 - Distribuição das propriedades

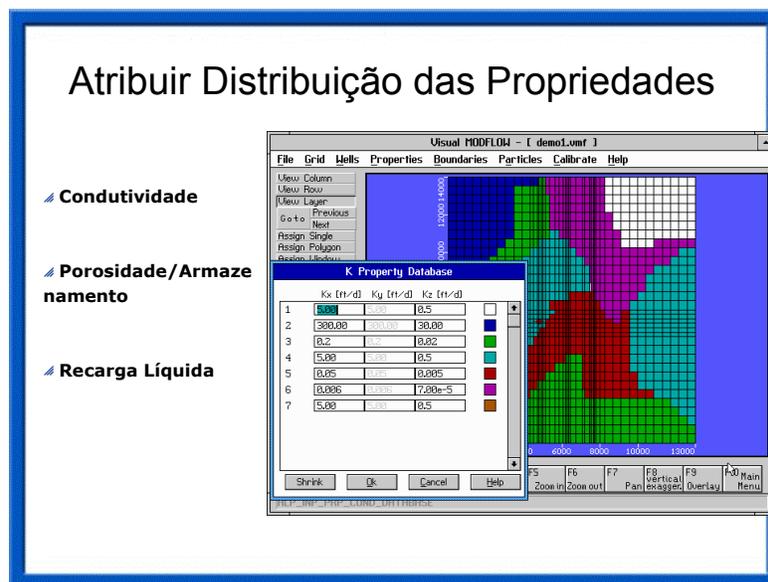


Figura 22 - Distribuição das propriedades

4.4.5 Calibração do modelo

A calibração do sistema tem como objetivo sintetizar o sistema real observado com o modelo, visando uma melhor representação dos processos, detectando e eliminando valores errôneos. As observações específicas de uma área, estão sujeitas a incertezas e subjetividade nas interpretações.

Critérios qualitativos e quantitativos para uma calibração adequada. Os seguintes parâmetros foram utilizados neste trabalho: condutividade hidráulica, armazenamento, percolação no aquífero, taxa de recarga, recarga ou descarga de águas superficiais, direção de fluxo, elevações ou depressões, padrão das curvas de contorno, condições de contorno

Para uma maior confiabilidade do sistema, a calibração do modelo foi efetuada considerando-se duas situações distintas do sistema hidrogeológico.

Na primeira situação (sem bombeamento), 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 (com bombeamento atual), simulou o sistema hidrogeológico, considerando os 19 poços que possuem os dados mais confiáveis (Quadro 7, p.91).

Para a calibração, adotou-se o percentual do resíduo ($\% \text{ resíduo} = \text{RMS}/\Delta H$) como parâmetro de avaliação, sendo utilizado o resíduo proporcional entre as diferenças das cargas hidráulicas calculadas e observadas em relação à variação total da carga hidráulica do sistema, onde procurou-se chegar a valores próximos de 10,00%. O valor obtido na primeira calibração, feita manualmente, foi de 38,00%, porém com a utilização do aplicativo WinPest, conseguiu-se uma melhor aproximação, de 22,95% nas duas situações consideradas (“sem bombeamento” e “com bombeamento”), conforme mostram as **Figuras 23a, 23b, 23c e 23d**.

Embora não seja um percentual ideal, este resultado é válido devido à inconsistência e a falta de confiabilidade dos dados referentes aos poços de bombeamento: níveis medidos a partir de 1974, época em que os poços foram perfurados, não tendo sido atualizados até hoje.

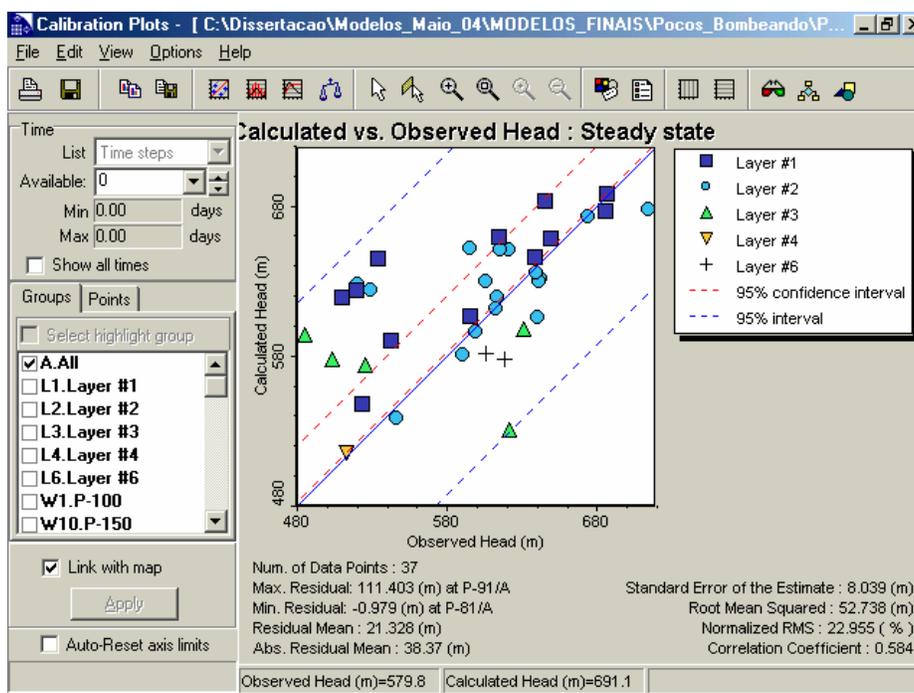


Figura 23a - Calibração do modelo matemático- Situação “com bombeamento”

Carga Hidráulica observada x Carga Hidráulica calculada pelo modelo

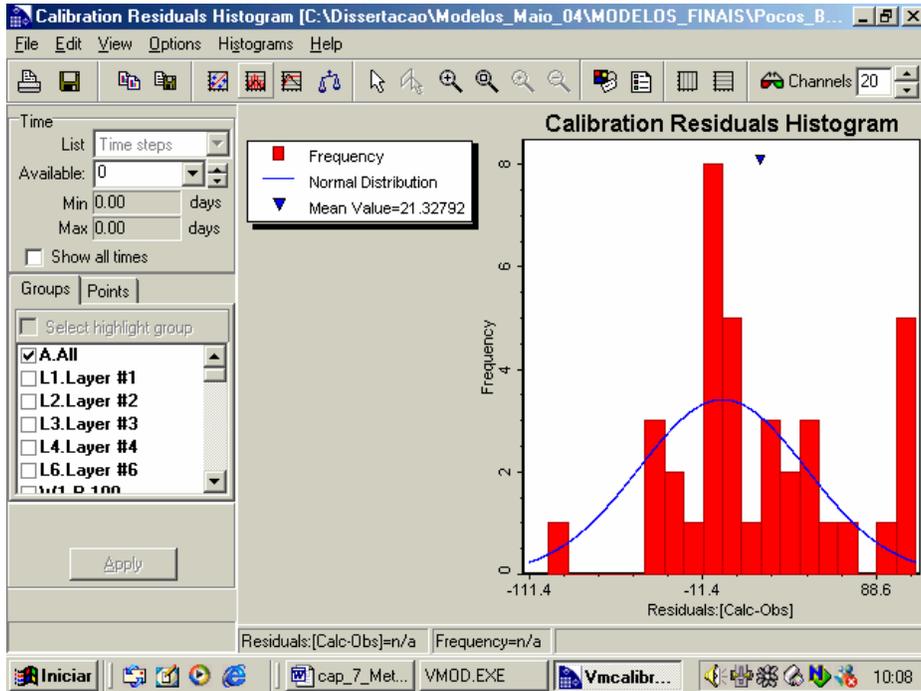


Figura 23b - Calibração do modelo matemático- Situação “com bombeamento”.

Carga Hidráulica observada x Carga Hidráulica calculada pelo modelo

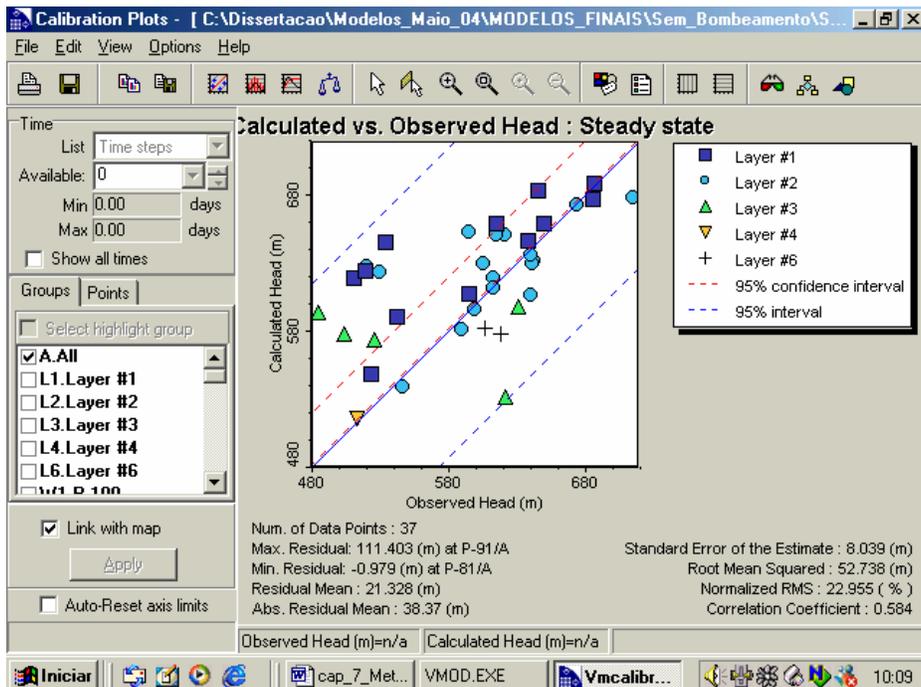


Figura 23c - Calibração do modelo matemático- Situação “sem bombeamento”

Carga Hidráulica observada x Carga Hidráulica calculada pelo modelo

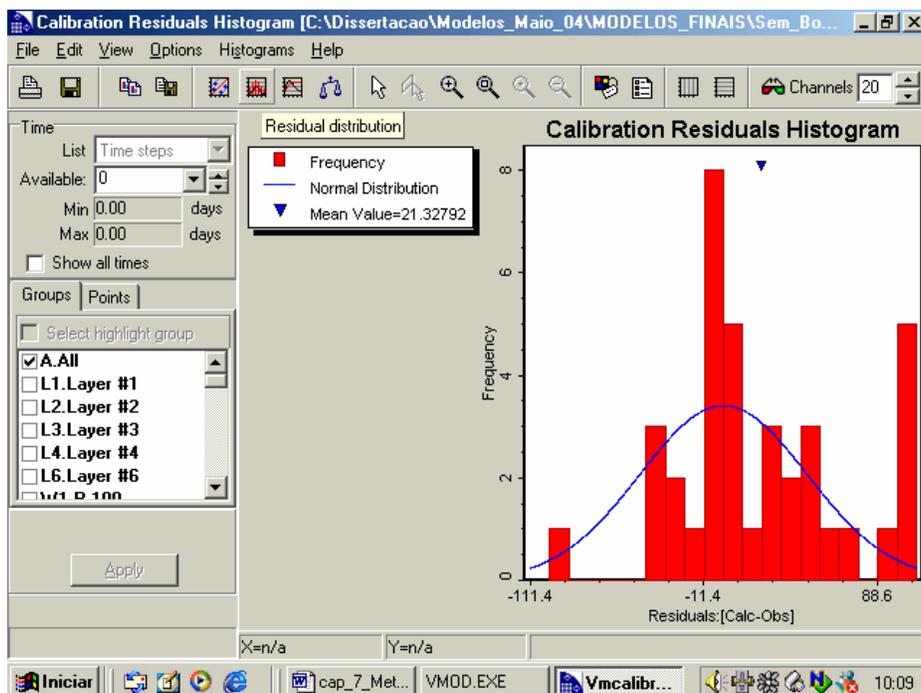


Figura 23d - Calibração do modelo matemático- Situação “sem bombeamento”

Carga Hidráulica observada x Carga Hidráulica calculada pelo modelo

Finalizada a etapa de calibração, partiu-se para a Previsão de Resultados, que será abordada no próximo capítulo, conforme descrito na Figura 8, pagina 70.

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. Foi também realizada uma avaliação das condições naturais de fluxo da água subterrânea e um pré-bombeamento para se calcular o rebaixamento induzido pelo bombeamento dos poços atuais.

O modelo calibrado (Figuras 24, 25 e Anexo 5) mostrou que a superfície potenciométrica, com os poços em bombeamento, não é significativamente alterada, acompanhando a superfície do terreno, e portanto, em nível regional o bombeamento atual não representaria preocupação em relação à exaustão do aquífero. Porém, quando esta análise é feita em nível local, principalmente ao redor de poços de grande vazão, o rebaixamento pode ser expressivo resultando na eventual diminuição do potencial de produção ou até mesmo perda dos mesmos (Figura 26 e Anexo 6).

Foram feitas simulações visando estimar os efeitos causados por futuros aumentos na demanda de água. Em uma dessas simulações 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.

Como apenas uma fração dos poços existentes, foi utilizada para fazer esta simulação, pode-se concluir que embora estes níveis não sejam indicações de um eminente risco de exaustão do aquífero, tais rebaixamentos podem causar conflitos futuros entre os proprietários dos poços existentes, principalmente quando da perfuração de novos poços, que podem interferir e impactar poços vizinhos.

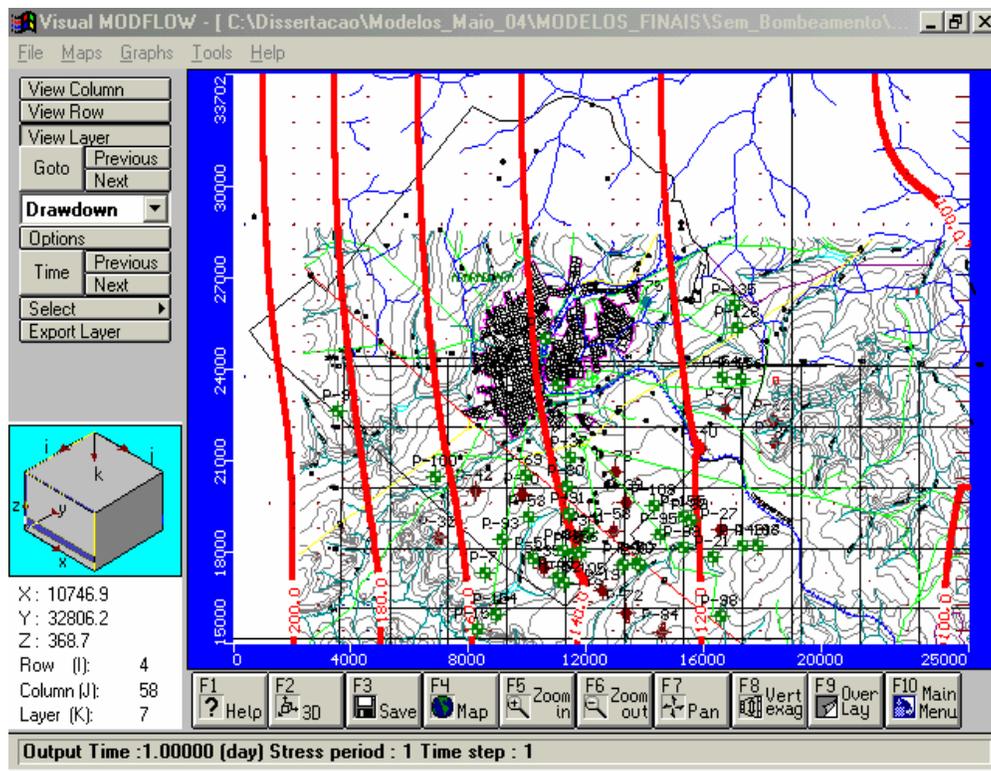


Figura 24 –Superfície Potenciometrica com Poços sem bombeamento.

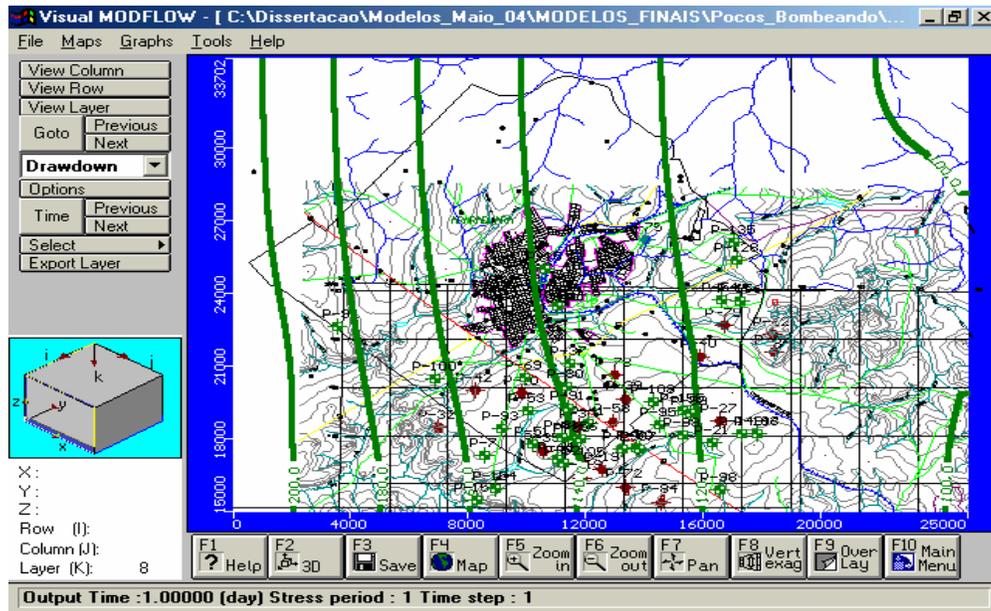


Figura 25 – Superfície Potenciometrica com Poços em bombeamento (vazão atual)

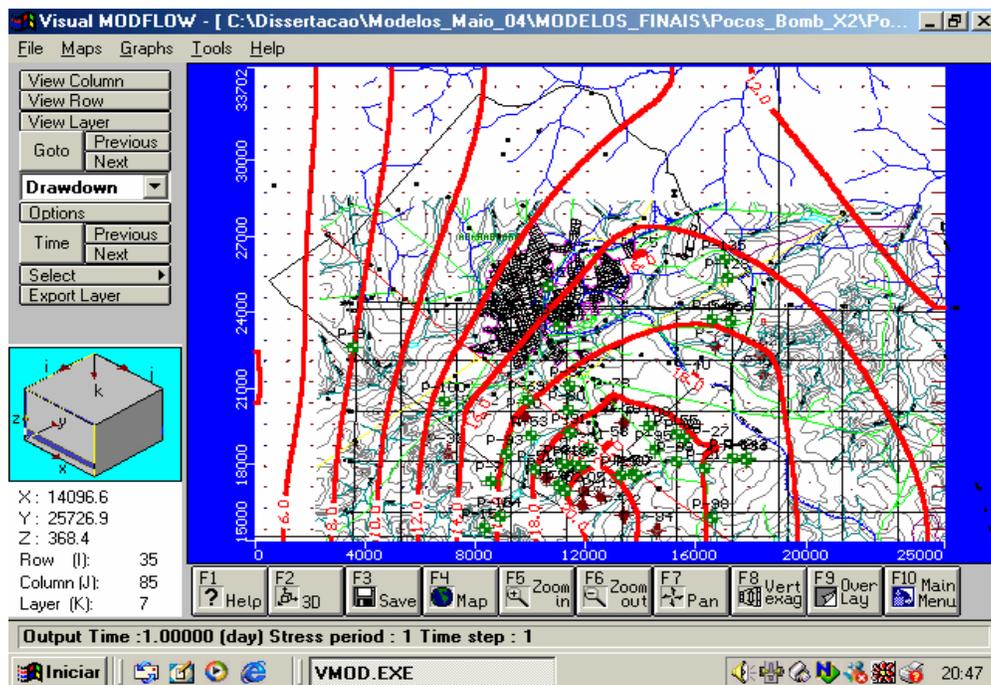


Figura 26 – Rebaixamentos causados pelos poços de bombeamento considerando o dobro da vazão atual.

Outro fator importante a ser considerado é o balanço hídrico realizado, que avalia o sistema hidrogeológico pela aplicação do modelo (Anexo 7); o resultado obtido demonstra a adequação do sistema hidrogeológico real (recarga,

infiltração, evapotranspiração, etc.), além de realçar a importância da interligação entre os recursos hídricos superficiais e os subterrâneos.

A partir destes resultados, fica demonstrado claramente, as conseqüências advindas do aumento da taxa de bombeamento nos poços simulados, com redução na vazão de contribuição do aquífero para o rio: de 7.142 m³/dia no bombeamento atual para 4.439 m³/dia com o bombeamento dobrado, fato que pode trazer sérias conseqüências para a vazão na bacia hidrográfica, na área de estudo.

Este dado de relevante importância, pode ser confirmado pelos trabalhos realizados pela SABESP/CEPAS (1994), que comprovam que, o rio Tietê no município de Itaquaquecetuba, recebe uma contribuição de origem subterrânea que equivale a 62% de sua vazão total (CETESB, 2004), conforme já mencionado anteriormente.

5.2 Zonas de Captura

A simulação do caminhamento de partículas através do aplicativo MODPATH do software Visual MODFLOW Pro 3.1(WHI), calculou a trajetória da partícula reversa: 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.

As **Figuras 27, 28, 29, 30 e 31 e o Anexo 8**, representam 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 a proteção destes mananciais subterrâneos, estabelecendo quais são as zonas mais sensíveis, de acordo com o tempo de trânsito destas partículas (5, 10, 15 ou 20 anos).

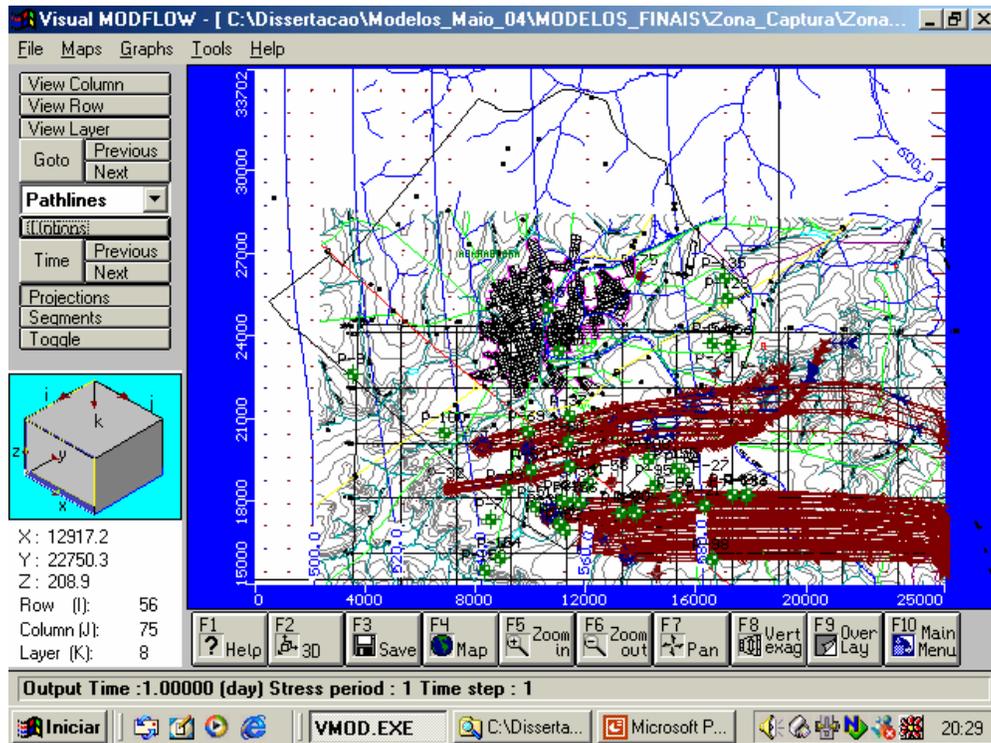


Figura 27 - Zonas de Captura em Estado Estacionário.

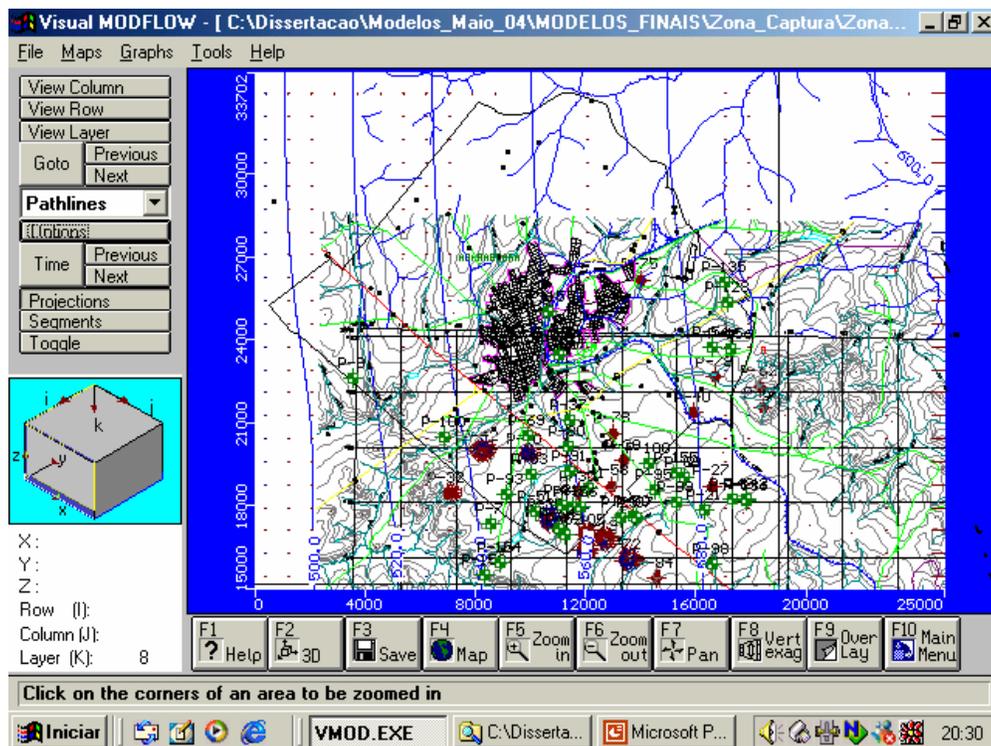


Figura 28 - Zonas Captura 5 anos

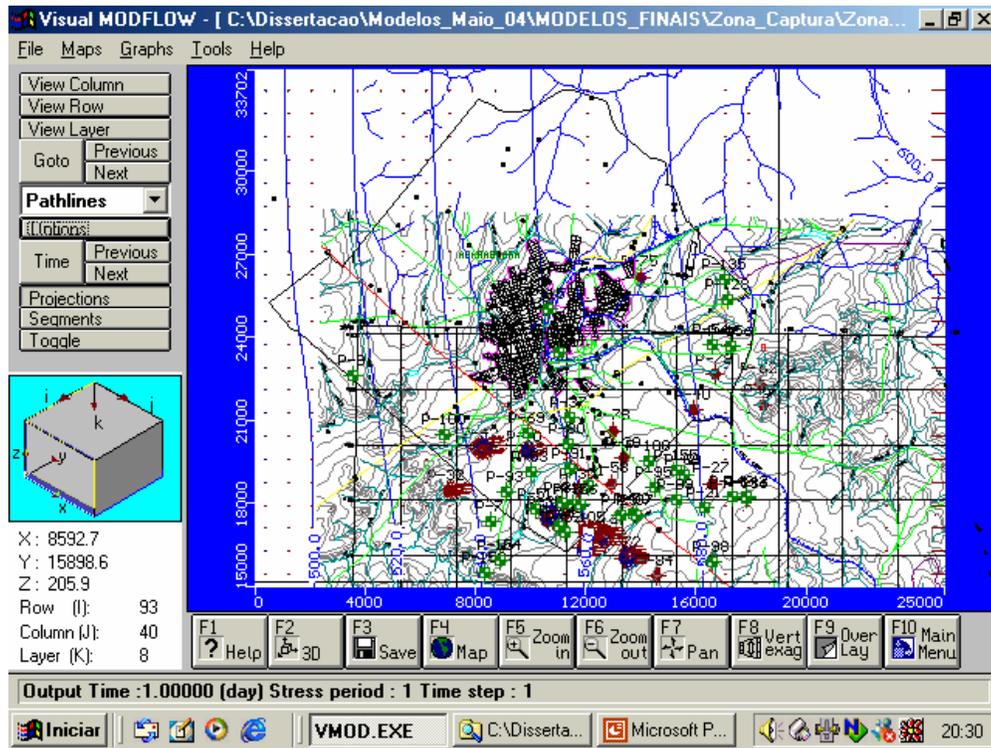


Figura 29 - Zonas Captura 10 anos

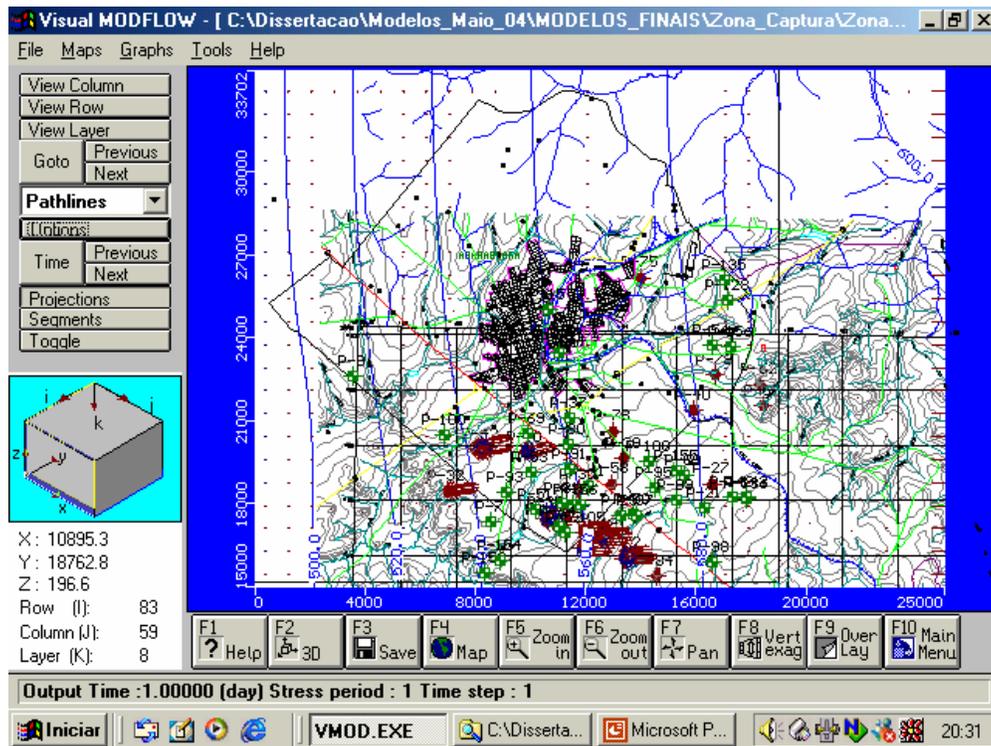


Figura 30 - Zonas de Captura 15 anos

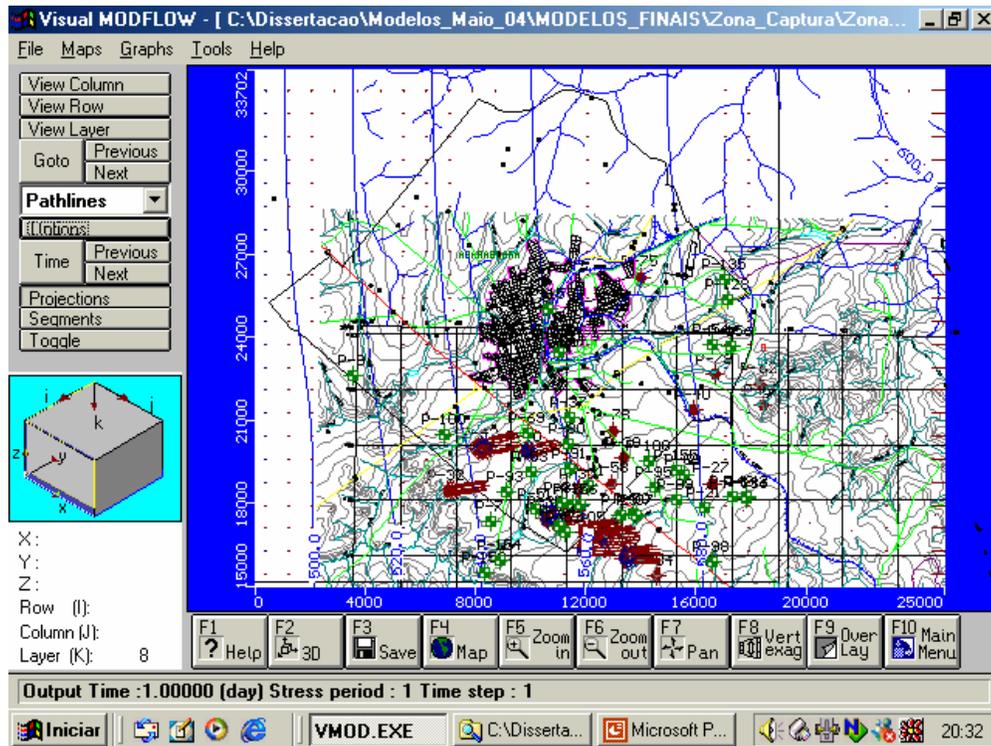


Figura 31 - Zonas de Captura –20 anos

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. Vale ressaltar que o Ministério da Saúde, através da Portaria nº 518, de 25 de março de 2004, está implementando o perímetro de proteção dos poços, em áreas contaminadas; porém, até a conclusão deste trabalho, tal definição ainda não havia sido aprovada.

A divulgação dos dados e resultados deste trabalho, pode ser utilizada para a delimitação de perímetros de proteção dos poços, permitindo a definição de estratégias de proteção, factíveis de serem implementadas em Araraquara, ou em qualquer outro município.

5.3 O Modelo Matemático como Ferramenta do Gerenciamento

Neste trabalho, todo o processo de modelagem matemática, teve como objetivo, mostrar sua eficiência como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos; com a simulação de cenários (sem bombeamento, com bombeamento: atual e projeção futura) e a delimitação das zonas de captura dos poços. Estes resultados permitem disponibilizar aos Órgãos Estaduais e Municipais responsáveis pela outorga e pelo abastecimento de água uma ferramenta capaz de facilitar o trabalho do dia a dia; permitindo inclusive, a simulação de cenários e suas conseqüências, quando forem perfurados novos poços no município, não inseridos neste estudo.

A grande vantagem da modelagem matemática frente às demais metodologias de avaliação, consiste no fato da mesma permitir simulações de cenários futuros, possibilitando uma atualização constante de novos dados. Constitui-se uma ferramenta útil na avaliação do comportamento da água subterrânea, frente a novas alterações antrópicas, direcionando o levantamento de novos dados.

Desta forma, a modelagem matemática fornece subsídios para fins de gerenciamento dos poços, assim como, para a proteção da qualidade da água subterrânea.

5.4 Limitações

Como principal limitação encontrada neste trabalho, ressalta-se a falta de atualização dos dados dos poços investigados: referem-se a épocas distintas e não foram atualizados; tais informações constituem requisito básico para a confiabilidade dos resultados de qualquer trabalho de modelagem matemática.

NEVES (2004) em trabalho realizado na Bacia do Rio Jundiáí, constatou que a maior parte dos poços cadastrados utilizados em seu estudo, não puderam ser considerados devido a problemas no banco de dados, onde variáveis

essenciais estavam ausentes ou continham erros. A falta de alguns dados, como vazão, nível estático, nível dinâmico e coordenadas, impossibilita qualquer avaliação em termos de disponibilidade hídrica ou para fins de pesquisas acadêmicas.

O gráfico da **Figura 32** mostra a porcentagem de erros e a falta de dados dos bancos de dados utilizados nesta compilação. Foram consideradas algumas categorias de dados que são fundamentais para o estudo hidrogeológico, tanto no setor técnico-científico, quanto no setor de gerenciamento dos recursos hídricos. Cabe destacar que estes erros são facilmente identificáveis: - digitação e erros de medida.

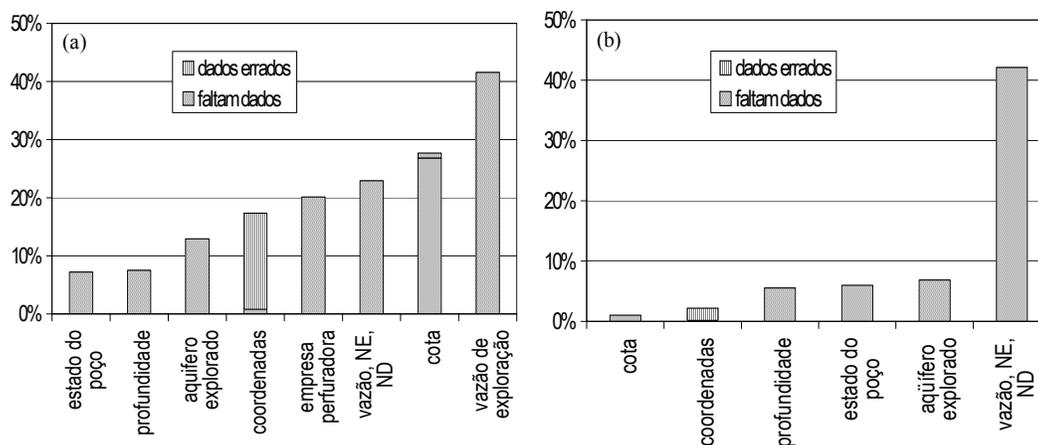


Figura 32 - (a) Gráfico de erros do banco de dados SIDAS (DAEE) e (b) gráfico de erros do banco de dados SIAGAS (CPRM).

Fonte: NEVES, 2004

Em trabalho realizado no município de Ribeirão Preto, MONTEIRO (2003) relatou a necessidade de filtragens prévias e seleção dos dados, pois constatou que: alguns poços não apresentavam medidas de profundidade do nível estático, outros não possuíam georreferenciamento ou estes dados eram incorretos e, ainda outros correspondiam a poços muito próximos e apresentavam grande interferência do cone de rebaixamento ou valores bem diferentes entre si.

Também foi observado que as medidas de profundidade de nível estático disponíveis eram escassas, pois devido aos poços serem utilizados para o abastecimento Público do município de Ribeirão Preto, estes operam 24 horas por dia, parando a abstração de água somente para a troca de bombas ou manutenção, quando então pode ser efetuada uma medição; deve-se ressaltar ainda, que a falta de um programa de monitoramento do nível estático, regular e adequado, traz algumas dificuldades quando se deseja realizar uma modelagem espaço-temporal da variação da superfície potenciométrica, sendo que foram obtidos dados com georreferenciamento: dos 108 poços operados pelo DAERP, somente parte deles pode ser usada, devido às informações disponíveis.

MONTEIRO (2003) analisou a dificuldade de uma boa correlação entre as superfícies topográfica e potenciométrica, verificando que estas incertezas não podem ser medidas ou inferidas, sendo responsáveis por um erro intrínseco aos dados, apontando para os 3 fatos descritos abaixo:

1. No município de Ribeirão Preto o Aquífero Guarani apresenta características hidrogeológicas diversas com comportamento de aquífero livre a confinado, considerando-se ainda uma complexidade geológica dada por fraturas (SINELLI, 1970);

2. Estimava-se a existência de mais de 400 poços, muitos deles clandestinos, que acarretam efeitos diretos sobre as medidas no nível estático, devido a interferência dos cones de rebaixamento;

3. As medidas do nível estático foram tomadas em diferentes épocas e são escassas para um estudo mais preciso, sendo somente medidas quando da troca das bombas dos poços, devido aos mesmos serem utilizados para abastecimento público. Para estabilização do nível estático, seria necessário aguardar pelo menos 6 horas, para a obtenção de uma medida mais confiável, porém, a troca de bombas dura de alguns minutos a poucas horas.

Além dos fatos relatados por MONTEIRO (2003) e NEVES (2004), existem limitações advindas da qualidade e distribuição espacial dos dados utilizados no estudo, que devem ser considerados, quando se analisam os resultados fornecidos pelo modelo matemático desenvolvido no trabalho realizado no município de Araraquara, porém os dados levantados neste trabalho, são suficientes para esta primeira modelação, permitindo o entendimento do comportamento do sistema hidrogeológico, servindo como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na área que abrange o município.

5.5 Limitações do Programa Visual MODFLOW Pro 3.1

A utilização do programa é relativamente fácil devido ao mesmo trabalhar na forma de módulos, permitindo utilizar apenas aqueles de interesse do sistema modelado; porém, é necessário um intensivo treinamento para os técnicos que desenvolvem estes tipos de projeto.

Como se trata de um programa de diferenças finitas, o refinamento das grades, nos pontos de interesse, promove o refinamento em porções desnecessárias, aumentando muitas vezes o tempo de processamento.

Assim, ou o número de camadas teria de ser reduzido ou o refinamento, em volta de cada poço, não pode ser feito na prática para representar com precisão o rebaixamento medido nos poços. Portanto, é intrínseco que o rebaixamento calculado pelo modelo vai representar o rebaixamento médio na escala de um bloco numérico, e portanto vai ser sempre menor do que o valor medido no poço em si, comprometendo o nível de calibração obtida.

Apesar das dificuldades aqui relatadas, o programa Visual MODFLOW Pro é um aplicativo que permite grande flexibilidade e recursos para a representação das heterogeneidades do sistema físico real, ressaltando que a qualidade do modelo matemático construído, não depende apenas de um eficiente programa, mas de uma gama de fatores, onde se destacam a

confiabilidade dos dados levantados e a sua interpretação, visando um melhor entendimento do sistema hidrogeológico real.

5.6 Limitações da Modelagem Matemática

A modelagem matemática implica, por si só, em limitações inerentes à impossibilidade de uma representação fiel do sistema real, sendo inviável um detalhamento extremo da área. As unidades geológicas, que são formadas por intercalações bastante pequenas, às vezes decimétricas, de areia e argila, não permitem uma representação perfeita em um modelo regional, aplicando-se assim generalizações e simplificações do sistema físico real, visando tornar possível a simulação de cenários através do modelo matemático.

Outra limitação se refere à estimativa, sendo que alguns parâmetros podem ser obtidos através de levantamentos no campo e análise laboratorial, podendo implicar em alto custo e demanda de tempo. Nestes casos, utiliza-se a estimativa com base em dados bibliográficos ou por comparação com experiências, em estudos semelhantes.

5.7 Viabilidade de Aplicação da Modelagem Matemática Tridimensional em Função dos Dados Levantados

A modelagem matemática tridimensional necessita tanto de informações do meio físico superficial como de subsuperfície, sendo que os dados levantados para este estudo, foram obtidos de poços perfurados desde o ano de 1974, sendo que os mesmos possuíam outra finalidade que não incluíam a modelagem matemática.

Visando uma melhor qualidade dos dados dos poços, o DAAE e o DAEE, como sugestão, deveriam conjuntamente realizar novas medições em todos os poços cadastrados, o que possibilitaria uma atualização deste importante

Banco de Dados, que pode ser utilizado para diversas outras aplicações além da modelagem matemática.

Segundo IRITANI (1998), as informações mínimas necessárias para uma modelagem matemática, deveria contemplar:

- * Mapas geológicos da área em escala 1:50.000 a 1: 10.000;
- * Dados dos Poços, tais como: construtivos, litológicos, testes de bombeamento, vazão, nível da água durante e após a construção do poço, perfisagens geofísicas e análise da água.
- * Dados de monitoramento do nível de água;
- * Dados hidrológicos para o balanço hídrico;
- * Volume de água subterrânea que está sendo retirado do sistema;
- * Mapas topográficos

Para tanto, observa-se a necessidade da criação de fóruns dentro dos Comitês de Bacias Hidrográficas, como já acontece com o CBH-PCJ (Comitê de Bacia Hidrográfica do Piracicaba-Capivari- Jundiaí), que possui o GTAS (Grupo Técnico de Águas Subterrânea), sendo responsável pelos estudos referentes as águas subterrâneas na bacia, porém sem força política e financeira para a implementação das necessidades levantadas.

A gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos se faz necessária em nível estadual, através da obtenção de dados do potencial hídrico dos aquíferos e do conhecimento de sua vulnerabilidade natural em escala regional, através do DAEE e da CETESB respectivamente, adequando-se ao Fluxograma apresentado a seguir proposto pela CETESB (2004).

Trabalhos realizados no município de Ribeirão Preto-SP, estudaram o Aquífero Guarani através de modelos matemáticos determinísticos (MONTENEGRO; RIGHETTO; SINELLI, 1988; MONTENEGRO; RIGHETTO, 1990); uma análise destes estudos mostra a falta

de um programa de monitoramento dos parâmetros do aquífero e problemas que dificilmente serão evitados, tais como: existência de poços clandestinos (não previstos nos modelos), e a interferência do cone de rebaixamento de poços (MONTEIRO, 2003).

6. Considerações Finais e Recomendações

6.1 Resultados

O presente estudo, demonstrou a potencialidade da aplicação da modelagem 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 a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Araraquara.

A modelagem matemática permite também, entender o sistema hidrogeológico real, direcionando as necessidades de levantamentos de novos dados, visando sempre enriquecer as informações que são a base deste tipo de investigação, tornando-o o mais próximo possível da realidade ambiental.

A delimitação das zonas de captura pode ser incorporada ao Plano Diretor Municipal e, é 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, em 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-se que, com 5 anos, a medida deve ser mais restritiva do que com 20 anos.

Além das zonas de captura, este modelo matemático pode ser utilizado para a gestão dos recursos hídricos, através da simulação de cenários, identificando, inclusive, áreas estratégicas para futuras explorações da água subterrânea.

Baseado 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 acontecer com maior frequência em nossa região.

6.2 Aspectos da Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos

Os resultados deste trabalho alertam para a preocupação, ainda incipiente, com os recursos hídricos subterrâneos sob o ponto de vista quantitativo, particularmente quando se trata do Sistema Aquífero Guarani. Embora este sistema represente a maior reserva de água doce subterrânea do mundo (REBOUÇAS, 2004), já começa a apresentar sinais de extração de água incompatíveis no município de Ribeirão Preto (MONTEIRO, 2003). Devido ao adensamento populacional crescente e a busca de novos espaços para a indústria,

comércio e agronegócios, tem-se uma expectativa de maior demanda por água, dificultando a implementação de uma adequada estratégia de preservação dos recursos hídricos subterrâneos; neste sentido, a exploração intensiva local do aquífero pode apresentar a longo prazo um processo de sobreexploração.

O município de Araraquara parece seguir algumas vocações semelhantes à cidade vizinha de Ribeirão Preto. Sua pujança aliada à implantação de um Pólo Industrial Aeronáutico no município de Gavião Peixoto, deve exigir estudos mais aprofundados nesta área, pois as medidas preventivas são sempre as mais adequadas. Caberia ao Comitê de Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré (CBH-TJ) com apoio do DAAE e suporte técnico do DAEE, o papel de traçar uma política local para a utilização racional dos recursos hídricos subterrâneos municipais, sem no entanto, deixar de considerar as inter-relações com as águas superficiais e as influências das demais atividades regionais.

Durante a execução da pesquisa a falta de dados atualizados e confiáveis em relação ao regime de vazão de poços, localização, níveis estático e dinâmico e parâmetros hidrogeológicos se constituíram os principais fatores limitantes deste trabalho. Recomenda-se então um recenseamento dos poços com sua localização, estado de operação, níveis estáticos e dinâmicos, e testes de bombeamento. Este recenseamento deve ser feito tanto nos poços cadastrados e conhecidos como também nos não cadastrados.

Como sugestão, o levantamento dos dados dos poços não cadastrados poderia ser realizado por meio de campanhas educativas e não punitivas, incentivando os proprietários dos poços ilegais a realizarem o cadastramento, sem pagamento de multas retroativas: neste trabalho, de um total de 143 poços, foram utilizadas apenas os dados de 19 poços para as simulações, pois os demais apresentavam dados incompletos, além daqueles não contemplados no cadastro. Este cadastramento, como ferramenta fundamental para qualquer programa de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, deve ser implementado a curto prazo e coordenado pelo Comitê de Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré, haja vista que atualmente o DAEE (comunicação pessoal) possui 432 poços em seu sistema.

A importância da criação deste banco de dados para o município de Araraquara também foi levantada por MONTEIRO (2003) para o município de Ribeirão Preto, onde o autor também chama a atenção para a importância de se ter um “banco de dados” completo e organizado, mesmo que menor, ao invés de um grande “banco de dados” com informações não confiáveis, imprecisas e pouco acuradas, as quais não permitem a aplicação de uma modelagem adequada.

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, tanto quanto 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.
- ACTA GEOLÓGICA XXIII-2000. UNISINOS.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *A Evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília; ANA (2002).
- ANDERSON, M.P e WOESSNER, W.W. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic Press. San Diego, EUA. 1992.
- API. *A Guide to the Assessment and Remediation of Undergorund Petroleum Releases*. American Petroleum Institute. Washington DC. EUA. 1989.
- API. *Guide for Assessing Remediating petroleum Hydrocarbons in soils*. American Petroleum Institute. Washington DC. EUA. 1993.
- BARCELÓ, D.; HENNION, M.C. *Techniques and instrumentation in analytical chemistry: trace determination of pesticides and their degradation products in water* in *Elsevier Science*, B. Holanda. V., 1997. V.19, 542p.
- BARRIUSO, E. *Pesticides pollution of soils: analytical aspects* in *Analisis Magazine*, v.22, p.M13-15, 1994.

- BORGMAN, L.E.; QUIMBY, W.F. *Sampling for tests of hypothesis when data are correlates in space and time*. In: KEITH, L.H. (ed) ***Principle of enviromental sampling***. Washington, DC : ACS Professional Reference, American Chemical Society, p.25-43, 1988.
- BRAADBAART, O., BRAADBAART, F. (1997). *Policing the urban pumping race: industrial growndwater overexplotation in Indonesia*. World Development, v.25, n.2, p. 199-210.
- BRANCO, S.M et al. *Hidrologia Ambiental*. São Paulo : USP e ABRH, 1991.
- BROWN, L.R. *Estado do Mundo 2001*. Salvador-Ba. UMA Editora 2000, 277p.
- CARMO, R.L. *Concentração e desconcentração populacional no Estado de São Paulo e uso dos Recursos Hídricos*. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, 1999.
- CAVAGUTI, N., SILVA, F.P. *Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos na cidade de Bauru-SP, face as características hidrogeológicas especiais da região*. 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. p. 74-79. Belo Horizonte-MG, 1992.
- CLEARY, R.W. *Qualidade das Águas Subterrâneas*. In: PORTO et al. *Hidrologia Ambiental*. ABRH e EDUSP. São Paulo. p. 211-293. 1991.
- CLEARY, R.W. *Hidrologia de Águas Subterrâneas*. In :RAMOS et al. 1989. *Engenharia Hidrológica*. ABRH e Ed. UFRJ. Rio de Janeiro-RJ. p. 293-404.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Estudo de águas subterrâneas no Estado de São Paulo* - Geopesquisadora Tahal, 1974. 2V
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. *Água subterrânea: uma riqueza de São Paulo*. Revista Águas e Energia. p.75-80, abril 1999.

- DAJOZ, R. *Ecologia geral*. Petrópolis : Vozes, 1978.
- DONAIRE, D. *Gestão Ambiental na Empresa*. São Paulo : Atlas, 1999.
- FARIA, V. *Cinqüenta Anos de Urbanização no Brasil*. In : Novos Estudos. CEBRAP. Nº 29. março de 1991. p. 98-119.
- FEITOSA, F.A., CARNEIRO, MANOEL Fº, J. (coordenador) *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 1997, 389p.
- FETTER, C.W. *Applied Hydrology*. Columbus, Ohio, Charles E. Merrill Publishing Co., 1980.
- FETTER, C.W. *Applied Hydrogeology*. Merril Publishing Company. EUA. 2ª ED. 592 p. 1988.
- FILHO, C.A. e COTA, S.D.S. *Análise da sensibilidade para o parâmetro condutância na condição de contorno de tipo 3 do Modelo MODFLOW*. Revista Águas Subterrâneas nº 17. Maio/2003. Curitiba-PR.
- FOSTER, S.S.D. e HIRATA, R. *Determinacion Del riesgo de Contaminacion de águas subterrâneas*. Uma metodologia basada em datos existentes. CEPIS/OPAS. Lima-Peru. 1991.
- FREEZE, R. e CHERRY, J. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. EUA. 1979.
- GIUSTI, D.A. (1990). *Propostas para a utilização racional da água subterrânea na região de Curitiba*. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 6, Porto Alegre-RS. Anais. ABAS, V, p.253-257.
- GIUSTI, D.A., HINDI, E. e ROSA, E. (2000). *Contribuição das águas subterrâneas no abastecimento de Curitiba*. Anais do I Congresso Mundial Integrado de Água Subterrânea, Fortaleza, agosto.

- Global International Water Assessment - GIWA. IARH - Instituto Argentino de Recursos Hídricos. Buenos Ayres, Argentina. *Relatório Preliminar*, outubro/2002.
- GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Estudo de Águas Subterrâneas*. São Paulo, 1974.
- GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo*. São Paulo. 1999.
- GRALLA, P. *Como funciona o meio ambiente*. São Paulo : Quark Books, 1998.
- GRANZIEIRA, M.L.M. *Direito de Águas: disciplina jurídica das águas doces*. São Paulo : Atlas, 2001.
- GUIGUER, N. e FRANZ, T. *Visual MODFLOW*. User's Manual. Waterloo Hydrogeologic Inc.. Waterloo, Canada. 1996. 231 p.
- GUIGUER, N. *Poluição das Águas Subterrâneas e do solo Causada por Vazamentos em Postos de Abastecimento*. São Paulo : Waterloo Brasil Ltda., 2000.
- GUIGUER, N. e HORVATH, M. *Desenvolvimento e implementação de sistemas de informações de águas subterrâneas*. XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Florianópolis-SC, 2002.
- HIRATA, R. e HAGGER, F.P. *O uso de softwares nas águas subterrâneas*. In: Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 10, Anais. Campo Grande-MS, 1997.
- HIRATA, R. *Avaliação de Aquíferos em meios porosos*. Seminário Latino Americano sobre Operação e manutenção de Poços Profundos. ABAS. Belo Horizonte-M.G., 1998.

- 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, 1998. 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.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Resultados do Censo Demográfico 2000*, Rio de Janeiro, 2002.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. *Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tiete-Jacaré*. São Paulo, 2000.
- IRITANI, M.A. *Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea*. Tese (Doutorado). USP, 1998. 200 p.
- KARVINEN, W.O. *Rising to the Surface: Emerging Groundwater Policy Trends in Canada / Centre for Resource Studies*. Kingston. Canada. 1994.
- KONIKOW, L.F e BREDEHOEFT, J.D. *Groundwater models cannot be valited*. Advances in Water Resources. p. 75-83. 1992.
- LANÇAS, F.M. *Cromatografia em fase gasosa*. São Carlos : Acta, 1993. 254p.
- LOPES, I.V. (org). *Gestão Ambiental no Brasil: experiência e sucesso*. Rio de Janeiro : Editora Fundação Getúlio Vargas, 1998.
- LOPES, M.F.C. *Água Subterrânea no Estado de São Paulo: Síntese das condições de ocorrência*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Fortaleza-CE. p. 305-17. 1984.

- MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. São Paulo, 1981.
- MARTINS, C. *Biogeografia e ecologia*. São Paulo : Nobel, 1978.
- Mc DONALD, M.G. e HARBAUGH, A.W. *A Modular Three dimensional finite-difference ground water flow model. Techniques of Water Resources Investigation of U.S. Geological Survey*. USGS. Washington-D.C. EUA. 576p. 1988.
- MEAULO, F.J. *Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara(SP)*. Trabalho de Dissertação de Mestrado. UNESP- Rio Claro-SP, 2004.
- MENDES THAME, A.C. et alii. *A Cobrança pelo Uso da Água*. São Paulo : Instituto de Qualificação e Editoração Ltda., 2000.
- MONTEIRO, R.C. *Estimativa espaço-temporal da superfície potenciométrica do sistema aquífero Guarani na cidade de Ribeirão Preto [SP], Brasil*. Dissertação (Mestrado). UNESP - Rio Claro, 2003.
- MORAES, A.J. *Manual para Avaliação da Qualidade da Água*. São Carlos : Rima Editora, 2001.
- NEGRI, B. *Concentração e desconcentração industrial em São Paulo (1980-1990)*. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP. 1994.
- NEVES, M.A., MORALES, N., PEREIRA, S.Y., ALBUQUERQUE FILHO, J.L. 2004. *Análise das informações disponíveis sobre poços tubulares profundos e seu uso no diagnóstico da variação temporal do nível d'água e da produtividade dos aquíferos da bacia do rio Jundiá (SP)*. In: Anais do XIII

- Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá (MS), ABAS, 2004, 1 CD-Room.
- PACHECO, C.A. *Evolução Recente da urbanização e da Questão Regional no Brasil: Implicações Econômicas para a Dinâmica Demográfica*. In IV Conferencia Latino Americana. México, março de 1993.
- PAGE, G.W. *Planning for Groundwater Protection*. Academic Press Inc. San Diego. EUA.1987.
- PEREIRA, S.Y. *Disponibilidade e consumo das águas subterrâneas na região de Campinas, SP, Brasil*, UNICAMP, 2000.
- POLLOCK, D.W. *Documentacion of computer programs to complete and display pathlines using results from the Geological Survey modular three dimensional finite-difference groundwater model*. USGS, Open File Report 89-381, 81 p. 1989.
- POLTRONIÉRI, L.C. *Percepção Ambiental : a experiência brasileira*. São Paulo: Studio Nobel, 1999.
- PROMMER, H.; BARRY, D.A.; ZHENG, C. Modflow-based reactive multi component transport modeling. *Ground Water* 41 (2): p. 247-257, março/abril de 2003.
- REBOUÇAS, A. *Groundwater resources in South America*. Episodes, Vienna, v.22, n.3, p.232-237, 1999.
- REBOUÇAS, A. *A inserção da água subterrânea no Sistema Nacional de Gerenciamento*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.7, n.4, p.39-50, outubro/dezembro 2002.
- REBOUÇAS, A. *Uso inteligente da água*. São Paulo : Escrituras Editora, 2004.

- REBOUÇAS, A.C. (1996). *Diagnóstico do setor de hidrogeologia-PADCT-MCT*. Caderno Técnico da ABAS, n.3, 46 p.
- REVISTA ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. *Água Subterrânea: uma riqueza de São Paulo*. Serviço Técnico de Pesquisas, Estudos e Treinamentos de Araraquara, do DAEE, abril 1999, p.75-80.
- REVISTA CITRICULTURA ATUAL: *Uso Racional da Água: o que e outorga e para que serve*. GRUPO DE CONSULTORES CITROS. p. 10-11. Ano VI, nº 36. Outubro/2003.
- REVISTA ESTUDOS AVANÇADOS. ROCHA, G.A. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. v.II, nº 30, p.191-212. 1997.
- REVISTA ROMARCHEOLOGICA. Elio de Rosa Editore. Abril de 2002. p.38. Roma-Itália.
- REVISTA SANEAMENTO AMBIENTAL (1998). *Recursos Hídricos em alta*. Rio de Janeiro, v.49, jan/fev.
- REVISTA UNIARA. *Água Subterrânea: entenda a importância e sua forma de ocorrência*. Centro Universitário de Araraquara. nº 7 p.137-143. Araraquara. 2000.
- RIBEIRO, M.L.; POLESE, L.; DRAETTA, M.S.; MINELLI, E.V.; DEL'ACQUA, A. *Mixed column application in pesticides residues analysis in J. Braz. Chem. Soc.*, v.2, p102-104, 1991.
- ROSA, A.V. *Agricultura e Meio Ambiente*. São Paulo : Atual Editora, 1997.
- ROSEGRANT, M.W. *Water Resources in the Twenty-first Century: Challenges and Implications for Action*. Interntional Food Policy Research Institute. Washington, 1997.

- SAMPSON, A. *O homem da companhia: uma história dos executivos*. São Paulo: Companhia das Letras, 1996.
- SANDERS, L.L. *A manual of field hydrogeology*. Upper Saddle River/N.J : Simon & Schuster/A Viacom Company, 1998.
- 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, Gerôncio Albuquerque Rocha. São Paulo: Instituto Geológico: CETESB, 1997.
- SÃO PAULO. Secretaria do Meio Ambiente. *Gestão das Águas: 6 anos de percurso*. São Paulo-SP 1997.
- SETZER, J. *Atlas de Evapotranspiração Efetiva no Estado de São Paulo*. CTH, 1976.
- SILVA, D.D e PRUSKI, F.F. *Gestão de Recursos Hídricos: aspectos legais, econômicos e sociais*. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG. 2000
- SIMMERS, I. (ed). *Selected papers on aquifer overexploitation*: Puerto de La Cruz, tenerife (Spain). April-15-19, 1991/International Association of Hydrogeologists. Hannover: Hese, 1992.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; SCHROEDER, E.D. *Water Quality: Characteristics, Modeling and Modification*. Addison-Wesley Pub. Co., 1987.
- TRIBUNA IMPRESSA. *Aqüífero Guarani já está contaminado*. Araraquara, 20/05/01. p.8.
- VASQUES, A.C. *Gestão de recursos hídricos subterrâneos: Estruturação de um Programa de dessalinização de Poços para abastecimento de pequenas*

comunidades rurais no Estado do Ceará. (Tese apresentada ao Instituto de Geociências UNICAMP-2002)

WALTON, W.C. *Groundwater Modeling utilities*. Lewis Publishies, Inc, EUA. 640p, 1992.

Sites Consultados:

www.cetesb.sp.gov.br

www.cprm.gov.br/siagas

www.capes.gov.br

www.cvs.saude.sp.gov.br

www.ambiente.sp.gov.br

www.dace.sp.gov.br

www.ambiente.pro.br