UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELAGEM NUMÉRICA COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO
DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM SÃO JOSÉ DO RIO PRETO, SP**

Ana Maciel de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Hirata

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO
2013

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação
do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Carvalho, Ana Maciel de

Modelagem numérica como ferramenta para a gestão
das águas subterrâneas em São José do Rio Preto
(SP) / Ana Maciel de Carvalho. - São Paulo, 2013

171 p.: il

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Hirata, Ricardo

1. Gestão das águas subterrâneas 2. Modelagem
numérica 3. Sistema Aquífero Bauru I. Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**MODELAGEM NUMÉRICA COMO FERRAMENTA PARA A GESTÃO DAS
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM SÃO JOSÉ DO RIO PRETO, SP**

Ana Maciel de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Hirata

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

Nome

Assinatura

Presidente: _____

Examinadores: _____

SÃO PAULO
2013

A Mandula, uma menina guineense que, assim como muitas outras crianças de países pobres e em desenvolvimento, sofre inocentemente com a falta de água.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, este trabalho não teria sido concretizado se não houvesse o grande incentivo, apoio, compreensão, amor e carinho dos meus pais, Renato e Mara, que mesmo estando longe estão sempre presentes.

Agradeço ao Ricardo Hirata, pela oportunidade, orientação e conselhos que recebi durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus irmãos, Hugo e Raul, pelo companheirismo e aprendizado e, também, pela revisão do texto realizada pelo Hugo.

Agradeço à Vânia, ao Beto e à Bia, que foram uma família muito querida durante todo o tempo, e ao Bruno Pirilo Conicelli, por toda a vivência, paciência, apoio e conhecimento trocado sobre águas subterrâneas e geoprocessamento.

Agradeço ao Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e à Servmar Serviços Técnicos Ambientais, pela disponibilização dos dados utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e a todos os colegas e amigos “ipeteanos” pela oportunidade e pelo apoio, em especial ao José Luiz Albuquerque Filho, à Priscila Ikematsu, à Tatiana Tavares, ao André Luiz Ferreira, ao Zeno Hellmeister e ao Aroldo Ribeiro da Silva — agradeço imensamente pelas contribuições em gestão das águas, modelagem numérica, ArcGis, Surfer, estudos do solo, e por muito do conhecimento em hidrogeologia, essenciais à realização desta pesquisa.

Agradeço ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo e ao Department of Earth and Environmental Sciences at the University of Waterloo pela infraestrutura fornecida.

Agradeço aos colegas e amigos Mateus Simonato, Luiz Ferrari, Marcelo Sousa, David Rudolph e Ana Sartorato, pelas diversas contribuições em gestão das águas, uso do programa Visual MODFLOW, organização dos dados, modelo conceitual e numérico e, também, pela oportunidade de realizar parte do estudo fora do país.

E, finalmente, agradeço aos meus amigos e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram com esta conquista.

RESUMO

CARVALHO, A. M. 2013. 171 p. **Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas em São José do Rio Preto (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

O município de São José do Rio Preto (SJRP), localizado na porção noroeste do estado de São Paulo, é extremamente dependente da água subterrânea, tanto para abastecimento público quanto privado, justificando-se o grande número de poços existentes, que excede a mais de dois mil, sobretudo no Sistema Aquífero Bauru (SAB). Embora este recurso seja fundamental para o abastecimento da cidade, 79% dos poços não possuem outorga. O aumento do número de poços, sem o devido controle, explorando o aquífero, pode justificar e intensificar os problemas de forte abatimento da superfície potenciométrica na região central da área urbana do município. Nesse sentido, esta pesquisa objetivou desenvolver um aplicativo computacional, na forma de modelagem numérica de simulação de fluxos subterrâneos, para subsidiar a exploração sustentável do SAB. Para o sucesso do modelo numérico, foi realizada toda a caracterização hidrogeológica e definido o modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas. O modelo numérico foi calibrado em regime estacionário para duas situações: pré-exploração e bombeamento atual; e, posteriormente, foram gerados três diferentes cenários futuros de bombeamento: a) exploração duas vezes maior do que a atual ($Q = 133.206 \text{ m}^3/\text{dia}$); b) exploração três vezes maior do que a atual ($Q = 199.809 \text{ m}^3/\text{dia}$); c) exploração apenas dos poços públicos ($Q = 39.662 \text{ m}^3/\text{dia}$). Houve médias de rebaixamento na área urbana de 15 m, 42 m e 8 m, respectivamente. Rebaixamentos mais proeminentes do nível freático ocorrem na área central do município, onde se concentra 80% dos poços. Dessa forma, recomendam-se algumas ações direcionadas ao poço, à proteção do aquífero e ao usuário.

Palavras-chave: Gestão das águas subterrâneas. Modelagem numérica. Sistema Aquífero Bauru

ABSTRACT

CARVALHO, A. M. 2013. 171 p. **Numerical Modeling as a Tool for Management of Groundwater in São José do Rio Preto (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

The city of São José do Rio Preto (SJRP), located in the northwestern portion of the state of São Paulo, is highly dependent of groundwater for both public and private supply, that justifies the large number of existing wells, which exceeds more than 2000, especially in the Bauru Aquifer System (BAS). Although this resource is essential for the city supply, 79% of the wells do not have grants. The increase of wells, without the correct control, exploring the aquifer can justify and intensify the problems of strong relief in the central region of the urban area by city. Then, this research aimed to develop a computational application how numerical simulation modeling of groundwater flow, to support the rational exploitation of the BAS. For the success of the numerical model, the entire hydrogeological characterization was performed and defined the conceptual model of groundwater flow. The numerical model was calibrated in steady state for two situations: pre-exploitation and current pumping, and then were generated three different future scenarios of pumping: a) exploitation twice larger than the current ($Q = 133,206 \text{ m}^3/\text{day}$); b) exploitation three times larger than the current ($Q = 199\,809 \text{ m}^3/\text{day}$); and c) exploitation of only public wells ($Q = 39,662 \text{ m}^3/\text{day}$). There were averages of debasement in the urban area of 15 m, 42 m and 8 m, respectively. Most prominent debasements of groundwater level occurred in the central area of the city, which the concentrates is 80 % of the wells. Therefore, some actions are recommended directed to the well, to protect the aquifer and the user.

Keywords: Management of groundwater. Numerical modeling. Bauru Aquifer System

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais atividades e etapas de desenvolvimento da pesquisa	19
Figura 2 - Localização do município de São José do Rio Preto	20
Figura 3 - Condições de contorno	43
Figura 4 - Localização dos poços outorgados (em verde) e não outorgados (em vermelho) em São José do Rio Preto	51
Figura 5 - Geomorfologia da região de estudo	53
Figura 6 - Pedologia da região de estudo	54
Figura 7 - Coluna litoestratigráfica do Grupo Bauru	55
Figura 8 - Divisão do Grupo Bauru com base em perfilagem gama e descrições de amostras de calha	58
Figura 9 - Mapa de localização das seções geológicas traçadas	62
Figura 10 - Seções geológicas traçadas na área de estudos	63
Figura 11 - Mapa topográfico	65
Figura 12 - Modelo Digital de terreno (MDT)	66
Figura 13 - Modelo Digital do contato solo e Adamantina 1	67
Figura 14 - Modelo Digital do contato Adamantina 1 e Adamantina 2	68
Figura 15 - Modelo Digital do contato Adamantina 2 e Santo Anastácio	69
Figura 16 - Modelo Digital do contato Santo Anastácio e Serra Geral	70
Figura 17 - Modelo Digital da base da área	71
Figura 18 - Mapa de declividade	72
Figura 19 - Bacia do Rio Turvo/Grande e as sub-bacias	73
Figura 20 - Mapa de hidrografia do município de São José do Rio Preto	74
Figura 21 - Mapa de transmissividade dos poços	79
Figura 22 - Mapa de condutividade hidráulica dos poços	80
Figura 23 - Mapa de data de construção dos poços	82
Figura 24 - Mapa de profundidade dos poços	84
Figura 25 - Mapa potenciométrico anterior à década 1980	88
Figura 26 - Mapa potenciométrico das décadas de 1980 e 1990 com poços rasos (acima de 90 m)	89
Figura 27 - Mapa potenciométrico das décadas de 1980 e 1990 com poços profundos (abaixo de 90 m)	90
Figura 28 - Mapas potenciométrico da década de 2000 com poços rasos (acima de 90 m)	91
Figura 29 - Mapa potenciométrico da década de 2000 com poços profundos (abaixo de 90 m)	92
Figura 30 - Ortofotos do município de São José do Rio Preto	96
Figura 31 - Mapa de Uso e Ocupação do município de São José do Rio Preto	97

Figura 32 - Mapa da Rede de abastecimento público e rede de esgoto do município de São José do Rio Preto	99
Figura 33 - Mapa da Rede de abastecimento público e rede de esgoto do município de São José do Rio Preto	100
Figura 34 - Mapa de recarga.....	109
Figura 35 - Mapa de sistemas aquíferos explotados por poços	115
Figura 36 - Mapa de estado dos poços.....	116
Figura 37 - Mapa de uso declarado da água dos poços.....	118
Figura 38 - Mapa de vazão de exploração dos poços tubulares.....	121
Figura 39 - Mapa de vazão específica dos poços tubulares.....	122
Figura 40 - Modelo Conceitual de fluxo para o Sistema Aquífero Bauru na região de São José do Rio Preto	125
Figura 41 - Área modelada mostrando a condição de contorno atribuída	128
Figura 42 - Topografia e elevações das camadas do modelo	130
Figura 43 - Condições de contorno da área do modelo.....	131
Figura 44 - Recargas atribuídas ao modelo pré-exploração (anterior à década de 1980) ..	133
Figura 45 - Recargas atribuídas ao modelo exploração atual.....	134
Figura 46 - Camadas hidrogeológicas	136
Figura 47 - Localização dos poços de observação na área do modelo pré-exploração.....	137
Figura 48 - Localização dos poços de observação e bombeamento na área do modelo atual	138
Figura 49 - Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Bauru resultante do modelo numérico de fluxo tipo “pré-exploração”	143
Figura 50 - Mapa potenciométrico e seção gerados pelo modelo numérico de fluxo tipo “pré-exploração”	144
Figura 51 - Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Bauru resultante do modelo numérico de fluxo tipo “bombeamento atual”	148
Figura 52 - Mapa potenciométrico e seção gerados pelo modelo numérico de fluxo tipo “bombeamento atual”	149
Figura 53 - Mapa potenciométrico e seção hidrogeológica gerados pelo modelo para o cenário 1 (exploração duas vezes maior do que a atual)	156
Figura 54 - Mapa potenciométrico e seção hidrogeológica gerados pelo modelo para o cenário 2 (exploração três vezes maior do que a atual)	157
Figura 55 - Mapa potenciométrico gerado pelo modelo para o cenário de exploração apenas dos poços públicos	158

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Evolução da construção de poços tubulares em SJRP ao longo do tempo	83
Gráfico 2 - Correlação entre a profundidade dos poços construídos anteriormente à década de 1980 e seus respectivos níveis estáticos	85
Gráfico 3 - Correlação entre a profundidade dos poços construídos nas décadas de 1980 e 1990 e seus respectivos níveis estáticos	85
Gráfico 4 - Correlação entre a profundidade dos poços construídos na década de 2000 e seus respectivos níveis estáticos	86
Gráfico 5 - Correlação entre a profundidade dos poços e seus respectivos níveis estáticos	86
Gráfico 6 - Crescimento da população de SJRP	93
Gráfico 7 - Hidrograma do rio Preto com medidas de 1989 a 2001 (posto 6B-011 – Ipiгуá)	111
Gráfico 8 - Tipo de uso das águas subterrâneas por poço cadastrado	119
Gráfico 9 - Vazão por tipo de uso das águas subterrâneas por poço cadastrado.....	119
Gráfico 10 - Balanço de massas	140
Gráfico 11 - Correlação entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas.....	141
Gráfico 12 - Balanço de massas	146
Gráfico 13 - Correlação entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas.....	147

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Mapas pré-existentes georreferenciados e utilizados nesta pesquisa	34
Quadro 2 - Derivação da equação fundamental do fluxo da água subterrânea	41
Quadro 3 - Tipos de condições de contorno	43
Quadro 4 - Diferenças entre os métodos de diferenças finitas e elementos finitos.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contabilização do número de poços em relação às informações mais importantes para a construção do modelo conceitual de fluxo	50
Tabela 2 - Resumo das interpretações dos perfis geofísicos	61
Tabela 3 - Parâmetros hidrogeológicos para o Sistema Aquífero Bauru	77
Tabela 4 - Número de empresas em SJRP	95
Tabela 5 - Situação agropecuária de SJRP	98
Tabela 6 - Informação sobre o abastecimento de água	102
Tabela 7 - Classificação do escoamento superficial	105
Tabela 8 - Dados climáticos utilizados para o balanço hídrico	106
Tabela 9 - Balanço hídrico para os blocos da BAT (mm/ano)	108
Tabela 10 - Vazões Mínimas Mensais (m^3/s)	110
Tabela 11 - Valores de recarga para zona rural e urbana	113
Tabela 12 - Valores de recarga, Q7-10 e disponibilidade hídrica da área	113
Tabela 13 - Vazão corrigida ($\text{m}^3/\text{mês}$) para cada tipo de uso da água	120
Tabela 14 - Vazão específica dos poços tubulares	123
Tabela 15 - Parâmetros de cada camada modelada adotados como primeira tentativa de calibração do modelo numérico	125
Tabela 16 - Condições iniciais de condutância atribuídas às condições dos tipos rio e dreno	132
Tabela 17 - Parâmetros de cada camada modelada adotados como primeira tentativa de calibração do modelo numérico	136
Tabela 18 - Valores calibrados de condutividades hidráulicas e porosidades	139
Tabela 19 - Valores calibrados de condutância e recarga	140
Tabela 20 - Valores calibrados de condutância e recarga	142
Tabela 21 - Valores calibrados de condutância e recarga	146
Tabela 22 - Análise de sensibilidade realizada para os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga	150
Tabela 23 - Análise de sensibilidade realizada para os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga	151
Tabela 24 - Resumo dos resultados de rebaixamento da simulação de cenários de exploração	155

LISTA DE SIGLAS

Azr	Área da zona rural
Azu	Área da zona urbana
CATI	Casa da Agricultura Regional
CRH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CTAS	Câmara Técnica de Água Subterrânea
CF	Constituição Federal
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
ETP	evapotranspiração potencial
FEHIDRO	Fundo Estadual dos Recursos Hídricos
GHB	General Head Boundary
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
K	condutividade hidráulica
MAE	<i>mean absolute error</i>
MDF	método de diferenças finitas
MDT	modelo digital de terreno
ME	<i>mean error</i>
MEF	método de elementos finitos
PERH	Plano Estadual de recursos Hídricos
PIB	Produto Interno Bruto
Q/s	capacidade específica
QD	Descarga de água
Rn	Recarga natural
Ri	Recarga induzida
S	coeficiente de armazenamento médio
SAB	Sistema Aquífero Bauru
SAG	Sistema Aquífero Guarani
Semae	Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SJRP	São José do Rio Preto
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
T	transmissividade
TIN	<i>triangulated irregular network</i>
UGRHI	Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos
USGS	United States Geological Survey
ZOC	zona de captura dos poços

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativas da pesquisa	16
1.2 Organização da dissertação	18
1.3 Área de estudo.....	20
2 OBJETIVOS	21
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Gestão de águas subterrâneas	22
3.2 Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1 Coleta de dados e pesquisa bibliográfica.....	33
4.2 Geoprocessamento dos dados	34
4.3 Modelo conceitual e numérico de fluxo das águas subterrâneas.....	38
4.3.1 Equação geral do movimento da água subterrânea	39
4.3.2 Condições auxiliares.....	42
4.3.2.1 Condições iniciais	42
4.3.2.2 Condições de contorno.....	42
4.3.3 Discretização espacial	45
4.3.4 Calibração do modelo	46
4.3.5 Análise de sensibilidade	48
4.3.6 Software Visual MODFLOW	48
5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	50
5.1 Meio físico	52
5.1.1 Geomorfologia, pedologia e geologia	52
5.1.1.1 Descrição das amostras de calha.....	56
5.1.1.2 Análise dos perfis geofísicos	59
5.1.1.3 Seções Geológicas.....	61
5.1.1.4 Modelo Digital do Terreno e elevações das camadas	64
5.1.1.5 Mapa de declividade do terreno	64
5.1.2 Hidrografia, hidrogeologia e clima	73

5.1.2.1 Parâmetros hidrogeológicos do SAB	76
5.1.2.2 Mapas potenciométricos	81
5.2 Dados socioeconômicos	93
5.2.1 Indicadores demográficos e de desenvolvimento social e econômico	93
5.2.2 Uso e ocupação do solo	94
5.2.3 Infraestrutura sanitária	98
5.3 Quantidade da água subterrânea	102
5.3.1 Balanço hídrico	102
5.3.2 Demanda da água subterrânea	114
6 MODELO CONCEITUAL DE FLUXO	124
7 MODELO NUMÉRICO DE FLUXO	127
7.1 Definição da área a ser modelada e da malha de diferenças finitas	127
7.2 Entrada de dados	129
7.2.1 Topografia e demais elevações	129
7.2.2 Condições de contorno	130
7.2.3 Recarga e evapotranspiração	132
7.2.4 Parâmetros hidrogeológicos	135
7.2.5 Poços de bombeamento e observação	137
7.3 Calibração do modelo numérico	138
7.3.1 Modelo pré-exploração em estado estacionário	139
7.3.2 Modelo bombeamento atual em estado estacionário	144
7.4 Análise de sensibilidade	149
7.4.1 Modelo pré-exploração em estado estacionário	150
7.4.2 Modelo bombeamento atual em estado estacionário	151
8 CENÁRIOS DE EXPLOTAÇÃO FUTUROS E CENÁRIOS ALTERNATIVOS	153
9 RECOMENDAÇÕES PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM SJRP	159
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	161
REFERÊNCIAS	164

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é cada vez mais importante para o abastecimento, sendo uma importante fonte para o consumo humano, industrial e agrícola. A consciência dessa importância vem ganhando maior força ao longo das últimas quatro décadas.

O abastecimento por água superficial, em vários grandes centros urbanos brasileiros, tem-se tornado limitado devido a fatores como concentração populacional e contaminação dos cursos d'água. Esses fatores, associados à maior acessibilidade às tecnologias de perfuração de poços, tornaram as águas subterrâneas responsáveis por parcelas significativas do abastecimento.

Segundo Rebouças (2004), mais da metade da água de abastecimento público no Brasil provém das reservas subterrâneas, sendo o estado de São Paulo, atualmente, o maior usuário de reservas subterrâneas do país. Cerca de 80% dos municípios paulistas são abastecidos, de forma parcial ou total, por água subterrânea (CETESB, 2010).

Além de ser bastante utilizada, a água subterrânea apresenta inúmeras vantagens em relação à água superficial, pois se encontra mais protegida contra possíveis contaminantes, está menos sujeita às variações sazonais (incluindo aquelas advindas de mudanças climáticas), além de ter um custo de captação menor para pequenas e médias produções, entre outras.

No entanto, o uso intensivo e descontrolado da água subterrânea pode provocar a superexploração, ocasionando subsidência de solo e até mesmo a contaminação da água.

Segundo Hirata *et al.* (2012), o termo superexploração é entendido como o conjunto de extrações a que um aquífero está submetido e que se encontra além da sua capacidade de demanda, ocasionando:

- A exaustão do aquífero (por meio da redução de níveis, impossibilitando a extração por métodos convencionais);
- A elevação temerária dos custos de extração da água;
- A degradação da qualidade de suas águas, pela indução de águas contaminadas ou salinas;
- A redução intolerável dos níveis de base de rios e outros corpos de água;

- Problemas geotécnicos, como subsidência de terreno; e/ou
- Problemas de equidade social e competição injusta entre os grandes e pequenos usuários.

Nesse contexto de importância, e com a finalidade de se evitarem tais riscos, o uso da modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas se destaca no auxílio da gestão dos recursos hídricos, por permitir o entendimento da dinâmica de sistemas complexos de hidrogeologia, simular cenários futuros de exploração e, com isso, permitir que decisões importantes no planejamento sejam tomadas embasadas em uma técnica bem definida.

1.1 Justificativas da pesquisa

O município de São José do Rio Preto (SJRP), localizado no noroeste do estado de São Paulo, é extremamente dependente da água subterrânea, tanto para abastecimento público quanto privado, justificando o elevado número de poços existentes, que excede a mais de dois mil, sobretudo no Sistema Aquífero Bauru (SAB).

Porém, observa-se que 79% desses poços não possuem outorga, o que pode trazer uma série de problemas, pois não há garantia de que estes foram construídos segundo os critérios técnicos adequados, já que não houve aprovação técnica de seus projetos construtivos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), além de não haver o conhecimento real da quantidade de água subterrânea explorada.

Como resultado do crescimento acelerado e desordenado da perfuração de poços em SJRP, estudos recentes identificaram abatimento do nível potenciométrico do SAB, em sua região central, havendo assim suspeita de superexploração (CRH, 2000; OLIVEIRA, 2002; LIMA, 2004; DAEE, 2011).

Além disso, a interferência entre poços pode ocasionar rebaixamento dos níveis potenciométricos no aquífero e, conseqüentemente, causar outros problemas, tais como:

- Aumento nos custos de exploração da água subterrânea;
- Carreamento de contaminação para níveis mais profundos do aquífero; e
- Exaustão do aquífero.

Diante desse cenário, a Câmara Técnica de Água Subterrânea (CTAS), de acordo com a Deliberação n. 52, de 15 de abril de 2005, do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CRH), definiu a região de SJRP como área prioritária para execução de estudos hidrogeológicos específicos e para avaliação quanto à ocorrência de superexploração.

O estudo da Servmar (2008) permitiu estabelecer de forma expedita as vazões máximas explotáveis em cada área da cidade a fim de reduzir o desequilíbrio que existe entre oferta e procura por água. Com isso, foi delimitada uma área confirmada de restrição e controle, que futuramente será promulgada pelos órgãos competentes. O estudo também aponta a necessidade de trabalhos mais detalhados, incluindo uma modelação numérica de maior detalhe, em regimes transientes, reproduzindo possíveis cenários de uso do recurso e avaliação de impactos.

A modelação numérica do fluxo de água subterrânea vem continuamente ganhando importância como ferramenta imprescindível de suporte a decisões inerentes ao gerenciamento dos recursos hídricos, pois permite subsidiar a elaboração de programas de gerenciamento de poços, simulações de vários cenários futuros e, em consequência, a proteção da qualidade da água subterrânea.

A presente pesquisa se insere neste contexto, pois, por meio do estudo dos aspectos hidrogeológicos, criou alguns cenários preditivos de exploração de água no município permitindo, assim, sugerir critérios para um uso mais racional do recurso, subsidiando sua gestão. Esses cenários foram criados a partir da confecção e calibração de um modelo numérico de fluxo de água subterrânea em estado estacionário, levando-se em consideração, dentre outros aspectos, a existência de interferências entre os poços e o rebaixamento dos níveis estáticos e dinâmicos.

Adicionalmente, deve-se mencionar a escassez de estudos enfocando a gestão de águas subterrâneas no Brasil, sobretudo que avaliem as disponibilidades hídricas através de modelos numéricos de fluxo, bem como de estudos enfocando a criação de cenários alternativos no país.

1.2 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em dez capítulos, desenvolvidos em oito etapas de trabalho (Figura 1), como segue:

- Etapa 1, referente aos capítulos 1 e 2. Introduz o tema da pesquisa, apresentando a importância do estudo e os motivos que levaram à seleção da área.
- Etapa 2, referente ao capítulo 3. Apresenta a revisão bibliográfica, ou seja, uma revisão dos estudos, pesquisas e trabalhos dos principais autores relacionados aos temas de modelagem numérica de aquíferos aplicada para gestão de recursos hídricos, bem como uma síntese da legislação sobre o tema da gestão de águas subterrâneas.
- Etapa 3, referente ao capítulo 4. Apresenta as atividades para a realização da pesquisa, como a coleta de dados e informações da área.
- Etapa 4, referente ao capítulo 5. Apresenta a caracterização da área por meio da interpretação de dados coletados, de informações obtidas e do georreferenciamento dos dados.
- Etapa 5, referente ao capítulo 6. Apresenta o modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas, determinado a partir de análise dos dados, de mapeamentos e de bibliografia coletados e, também, de avaliação em geoprocessamento.
- Etapa 6, referente ao capítulo 7. Apresenta o modelo numérico de fluxo das águas subterrâneas, cujo resultado é extremamente dependente do modelo conceitual previamente definido.
- Etapa 7, referente ao capítulo 8. Apresenta os cenários de exploração possíveis de serem criados em um modelo numérico definido.
- Etapa 8, referente ao capítulo 9. Apresenta as recomendações de gestão dos recursos hídricos subterrâneos, concluindo o estudo.

Finalmente, no último capítulo são tecidas as considerações finais.

Figura 1 - Principais atividades e etapas de desenvolvimento da pesquisa

1.3 Área de estudo

O município de SJRP localiza-se no noroeste do estado de São Paulo (Figura 2), abrangendo uma área total de 431,30 km², com área urbana de 119,48 km² (LEME; FREITAS, 2012). É limitado a norte pelos municípios de Ipiguá e Onda Verde; a leste pelo município de Guapiaçu; a sul pelos municípios de Bady Bassitt e Cedral, e a oeste pelo município de Mirassol. O município de SJRP dista 450 km da capital, pela Rodovia Washington Luis (SP-310), e 700 km de Brasília, pela Rodovia Transbrasiliana (BR-153).

Figura 2 - Localização do município de São José do Rio Preto

A população de SJRP, segundo o censo de 2010, era de 408.258 habitantes, sendo que 94% desses habitantes estão concentrados na zona urbana (IBGE, 2012).

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa objetiva o desenvolvimento de modelagem numérica de simulação de fluxos subterrâneos, para subsidiar a exploração racional do SAB, na área urbana de São José do Rio Preto, visando compatibilizar as extrações de água subterrânea pela concessionária pública e pelos usuários privados, dentro de um ambiente sustentável.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho tem como enfoque a elaboração de modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas, com auxílio de geoprocessamento, como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru na zona urbana, local mais adensado por poços tubulares, do município de São José do Rio Preto.

Assim, a seguir se faz uma exposição sobre a gestão de águas subterrâneas e seus fundamentos jurídicos, bem como sobre os trabalhos de diversos autores que trataram do geoprocessamento e da modelagem numérica de fluxo de águas subterrânea como subsídio para a gestão de águas subterrâneas.

3.1 Gestão de águas subterrâneas

Considerando que mais da metade da água de abastecimento público no Brasil provém das reservas subterrâneas, é imprescindível a prática da gestão dos recursos visando proteger os aquíferos e garantir a disponibilidade hídrica às populações, além de evitar a necessidade de processos de remediação, em virtude de complexidades técnicas, custos financeiros elevados e pesado encargo operacional.

Conforme Bear *et al.* (1992), a gestão de um aquífero significa a tomada de decisão, sem a violação de restrições técnicas específicas e não técnicas que lhe são impostas. As decisões de gestão visam minimizar o custo da extração e aumentar os benefícios das águas subterrâneas, podendo essas decisões serem relacionadas com a definição de vazão de poços, à sua localização, à definição de recarga artificial, a programas de incentivo ao uso ou restrição, a programas de benefícios ou compensações financeiras, controle de uso do solo, entre outras.

Para Owen *et al.* (2010), a gestão dos recursos hídricos subterrâneos tem como prioridade o desenvolvimento sustentável. Assim, a solução para um desenvolvimento sustentável relacionado aos problemas da água é o balanço e o equilíbrio entre a disponibilidade do recurso com o aumento da demanda do uso da água.

Segundo Porto e Porto (2008), uma gestão sustentável dos recursos hídricos necessita de um conjunto mínimo de instrumentos principais, tais como uma base de

dados e informações socialmente acessíveis, a definição clara dos direitos de uso, o controle dos impactos sobre os sistemas hídricos e o processo de tomada de decisão.

Além disso, uma gestão efetiva do recurso hídrico exige: o conhecimento atual tanto da qualidade quanto da quantidade dos recursos hídricos (disponibilidade e demanda); bem como uma avaliação dos custos econômicos, sociais e ecológicos envolvidos em sua exploração, inclusive aqueles associados à superexploração e à contaminação de aquíferos (HIRATA *et al.*, 2010).

Visando a adequada gestão dos recursos hídricos, faz-se necessário que ocorra a efetiva articulação das políticas públicas estabelecidas nas diferentes esferas de governo.

Devido à importância do recurso hídrico subterrâneo e às ameaças oriundas da urbanização e outros tipos de usos, existe um extenso aparato normativo que trata da necessidade de preservar esse recurso, para garantir a produção de água em quantidade e qualidade adequadas para abastecer os habitantes.

Portanto, o poder público cria um conjunto de ações para a gestão dos recursos hídricos. Trata-se de um conjunto de decisões tomadas pelos atores públicos, com a participação da sociedade civil, para a proposição de ações para modificar as condições atuais.

No âmbito federal destacam-se a Constituição Federal (CF) de 1988; a Lei n. 9.433/1997; as resoluções do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, sobretudo as Resoluções CNRH n. 15/2001 e CNRH n. 22/2002; e a Portaria do Ministério da Saúde n. 2.914/2011.

A partir da promulgação da CF, os corpos d'água superficiais e subterrâneos passaram a ser de domínio público e pertencentes à União ou aos Estados, extinguindo-se o domínio privado desse recurso no Brasil. Além disso, a CF incluiu no seu artigo 21, inciso XIX, um dispositivo atribuindo à União a competência de instituir um Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Uma das principais leis de águas subterrâneas que segue na direção da gestão sustentável dos recursos hídricos é a Lei n. 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Além disso, por meio dessa Lei foram estabelecidos os instrumentos de gestão, quais sejam:

- Planos de recursos hídricos;
- Enquadramento dos corpos de água em classes de uso;
- Outorga de direito de uso;
- Cobrança pelo uso da água;
- Compensação a municípios;
- Sistema de informações sobre recursos hídricos.

A Resolução CNRH n. 15, de 11 de janeiro de 2001, estabeleceu diretrizes gerais para a gestão das águas subterrâneas no território brasileiro; e a Resolução CNRH n. 22, de 24 de maio de 2002, estabeleceu diretrizes para a inserção das águas subterrâneas nos planos de recursos hídricos.

Quando se refere à qualidade da água para consumo humano, a Portaria n. 2.914, do Ministério da Saúde, de 12 de dezembro de 2011, estabelece procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água e os padrões de potabilidade que devem ser atendidos no Brasil.

No âmbito do estado de São Paulo destacam-se a Lei n. 6.134/1988, a Constituição Estadual de 1989, o Decreto n. 32.955/1991 e a Lei n. 7.663/1991.

Em relação às águas subterrâneas, em 2 de junho de 1988 foi promulgada a Lei estadual n. 6.134, que trata da preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas estaduais, posteriormente regulamentada pelo Decreto estadual n. 32.955, editado em 7 de fevereiro de 1991.

Visando orientar a ocupação das bacias hidrográficas dos mananciais de abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo, foram promulgadas as Leis estaduais n. 898/1975 e n. 1.172/1976. A Lei estadual n. 9.866/1997 que estabelece a política em vigor para a proteção dos mananciais do Estado, propôs uma nova política de mananciais, incorporando aspectos importantes da Lei federal n. 9.433/1997 e da Lei estadual n. 7.663/1991.

No estado de São Paulo, a Constituição Estadual de 1989, nos artigos 205 a 213, dispõe sobre os princípios do gerenciamento integrado e da proteção dos recursos hídricos.

Em 30 de dezembro de 1991, foi promulgada a Lei estadual n. 7.663, que dispõe sobre as normas de orientação à Política Estadual dos Recursos Hídricos e sobre o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Esta lei

também frisa a importância de proteger áreas em torno de poços tubulares, visando à manutenção da qualidade da água e restringindo a ocupação antrópica.

A Lei estadual n. 7.663/1991 tem como objetivo assegurar que a água possa ser controlada e utilizada, em padrões de qualidade satisfatórios, por seus usuários atuais e pelas gerações futuras, em todo o território do estado de São Paulo. Para isso, cria os instrumentos da Política Estadual de Recursos Hídricos, tais como: a) outorga de direitos de uso dos recursos hídricos; b) cobrança pelo uso dos recursos hídricos; c) rateio de custos das obras; d) Plano Estadual de recursos Hídricos (PERH), além de prever infrações e penalidades. Tem como princípio básico a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gerenciamento, que se dará de forma descentralizada, integrada e participativa. Discorre também sobre a gestão do Fundo Estadual dos Recursos Hídricos – FEHIDRO, criado como suporte financeiro da Política Estadual de Recursos Hídricos e das ações correspondentes.

O Decreto estadual n. 32.955/1991 dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do estado de São Paulo, estabelecendo as áreas de proteção das águas subterrâneas.

De acordo com o referido decreto, sempre que, no interesse da conservação, proteção e manutenção do equilíbrio natural das águas subterrâneas, dos serviços de abastecimento de água, ou por motivos geotécnicos ou geológicos, se fizer necessário restringir a captação e o uso dessas águas, o DAEE e a Cetesb deverão propor ao Conselho Estadual de Recursos Hídricos a delimitação de áreas destinadas ao seu controle.

As áreas de proteção, que devem ser estabelecidas com base em estudos hidrogeológicos, classificam-se em:

- Área de Proteção Máxima: compreendendo, no todo ou em parte, zonas de recarga de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituam em depósitos de águas essenciais para abastecimento público;
- Área de Restrição e Controle: caracterizada pela necessidade de disciplina das extrações, pelo controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e por restrições a novas atividades potencialmente poluidoras; e
- Área de Proteção de Poços e outras Captações: incluindo a distância mínima entre poços e outras captações e o respectivo perímetro de proteção.

No âmbito das Áreas de Restrição e Controle, a Resolução CRH n. 52, de 15 de abril de 2005, institui as diretrizes e procedimentos para a definição de áreas de restrição e controle da captação e uso das águas subterrâneas.

Na Área de Proteção de Poços, inclui-se o Perímetro Imediato de Proteção Sanitária, que abrange um raio de dez metros a partir da captação, e o Perímetro de Alerta contra poluição por substâncias não conservativas, que toma por base um tempo de trânsito de 50 dias no sentido montante de fluxo, a partir da captação (artigo 24 do Decreto estadual n. 32.955/1991).

Além dessas questões, as águas subterrâneas se destacam principalmente pelos conflitos já existentes, devido à escassez atual, com previsões piores no futuro. As soluções para esses problemas requerem uma gestão descentralizada, participativa e integrada (BARBOSA, 2006). Além disso, conforme Albuquerque Filho *et al.* (2011), deve haver a promoção da gestão participativa envolvendo os vários segmentos da sociedade, e a adoção da bacia hidrográfica como unidade fisiográfica de gestão.

Conciliar todas essas questões e compatibilizar a utilização dos recursos hídricos ao crescimento econômico é um desafio grande, mas necessário, e, dentre os desafios para a gestão dos recursos em questão, nota-se que, apesar da importância das águas subterrâneas para o desenvolvimento econômico, a população se depara com a deficiência no conhecimento do potencial e do estágio de exploração dos aquíferos (HIRATA *et al.*, 2010).

O desafio que se impõe aos gestores públicos, à sociedade e aos usuários de água, é o de construir e articular ações que traduzam uma nova forma de relação entre homem, solo e água (HIRATA *et al.*, 2010).

Sendo assim, percebe-se que é essencial realizar a gestão das águas subterrâneas para a sustentabilidade dos recursos hídricos. O processo para isso tem se desenvolvido muito nos últimos anos; no entanto, muitos desafios ainda devem ser superados.

3.2 Modelagem numérica como ferramenta para a gestão das águas subterrâneas

A modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas começou a ser mais amplamente utilizada na década de 1970 e, desde então, vem sendo muito aplicada para responder às questões relacionadas ao movimento das águas subterrâneas.

As principais aplicações se referem à qualidade do recurso hídrico em razão das inúmeras áreas declaradas contaminadas. Nesses estudos, questões como forma, tamanho e distância da pluma contaminante na situação atual e futura são respondidas de maneira a representar a situação mais próxima da realidade e auxiliar nos estudos de remediação. Embora seja menos comum, está em expansão o uso da modelagem para auxiliar estudos de gestão de água subterrânea. Neste caso, questões como a melhor forma de exploração podem ser avaliadas.

Em ambos os casos, segundo Cleary (1989), o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, bem como a proteção e a remediação de aquíferos, dependem da possibilidade de quantificação dos fenômenos de fluxo e de transporte em sistemas aquíferos.

Existem algumas maneiras de quantificar o fluxo das águas subterrâneas, com base em dados coletados em campo: os métodos analítico e numérico. Embora métodos numéricos forneçam melhores resultados, demandam altos custos e tempo. Segundo Bear *et al.* (1992), apesar de os métodos analíticos serem mais simples e solicitarem menor quantidade de dados, podendo ser usados em uma maior variedade de casos, são menos realistas que o numérico, que considera as diversas complexidades hidrogeológicas.

O método de soluções numéricas faz uso de equações de fluxo e/ou transporte de massa e consiste em modelos matemáticos de simulação, geralmente do tipo determinístico, processados em computadores. Esses são os únicos modelos que podem descrever adequadamente os aquíferos heterogêneos e anisotrópicos com contornos de fluxo (rio, zonas de descarga, recarga, evapotranspiração), em regime transiente. Assim, o modelo matemático tenta representar o comportamento do sistema físico real da água subterrânea.

A modelação numérica consiste na representação matemática do que acontece na natureza, a partir de um modelo conceitual, idealizado com base no levantamento e na interpretação de dados e em observações do sistema real. Tem

como objetivo uma melhor compreensão do sistema real, possibilitando prever situações futuras com uma constante atualização de dados e, algumas vezes, situações passadas, mas sempre buscando direcionar ações de decisão (IRITANI, 1998).

Os modelos numéricos no âmbito da Gestão de Águas Subterrâneas podem ser aplicados, segundo Cleary (1989), para:

- Localizar poços de abastecimento de água;
- Compreender e prever fenômenos de fluxo de água subterrânea e transporte em sistemas de aquíferos heterogêneos, anisotrópicos e estratificados;
- Prever o transporte de contaminantes;
- Avaliar alternativas de remediação de água subterrânea;
- Delinear zonas de captura dos poços, o que é fundamental para a definição de perímetros de proteção de poços;
- Otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos.

Segundo Bonganha *et al.* (2007), dentre suas diversas aplicações, a modelagem matemática em águas subterrâneas também permite avaliar o regime de exploração das águas subterrâneas e otimizar sistemas de rebaixamento de lençol freático em obras civis.

De acordo com Anderson e Woessner (1992), a utilização de modelos matemáticos nos estudos de águas subterrâneas é o melhor caminho para realizar previsões adequadas acerca das consequências de uma determinada proposta.

Além disso, os modelos numéricos de água subterrânea são ferramentas de avaliação de cenários como: o impacto a longo prazo de retiradas de água, da interação água superficial-água subterrânea e da migração de contaminantes. A simulação é vista como um método para explorar problemas hidrogeológicos e como uma ferramenta para predizer impactos sobre sistemas de água subterrânea, sendo essencial para hidrogeólogos e para gestores de água (GORELICK, 1983).

Mas, para auxiliar no desenvolvimento de estudos de modelagem numérica, diversos autores têm utilizado o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Bonham-Carter (1994) define SIG como um sistema de computador para tratamento de dados espaciais; ou seja, um SIG é capaz de processar dados gráficos e não gráficos

(alfanuméricos), com ferramentas de análises espaciais.

O SIG é usado associado ao modelo numérico, uma vez que os dados coletados são trabalhados previamente no SIG e transferidos para o modelo numérico. Watkins *et al.* (1996) destacam o SIG para a geração de dados estatisticamente especializados e que dão suporte à tomada de decisão.

A informação espacial implica uma informação representada em banco de dados ou atributos com localização geográfica, como, por exemplo, por meio de coordenadas.

Com base na tecnologia do geoprocessamento, este se tornou muito útil em estudos urbanos e ambientais, pois assim é possível espacializar e avaliar a distribuição territorial, nos aspectos socioeconômicos ou nos aspectos físicos, e estabelecer relações sistemáticas, servindo, assim, como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão e ao planejamento.

Câmara e Medeiros (1998) colocam o geoprocessamento como uma disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica.

Na área de recursos hídricos, especificamente, o geoprocessamento é utilizado de diversas maneiras: para identificar bacias hidrográficas; para auxiliar na caracterização de aquíferos fraturados e sedimentares, por meio do georreferenciamento de estruturas geológicas e de informações litológicas; para fazer análises de potencialidade, por meio do georreferenciamento de zonas de vazão e de parâmetros hidrogeológicos definidos por poços; para auxiliar no zoneamento de áreas de recarga e descarga, por meio da análise da declividade do terreno e do georreferenciamento de drenagens e cargas hidráulicas; para auxiliar no zoneamento do território, auxiliando a ocupação territorial; entre outros estudos.

Sendo assim, o geoprocessamento em estudos de hidrogeologia é necessário e fundamental em uma primeira fase, a de tratamento dos dados, para auxiliar a caracterização hidrogeológica.

Essa análise permite visualizar em mapa áreas prioritárias para o estudo e avaliar a localização onde mais ocorre tal situação, tentando, assim, definir zonas diferentes em termos de características hidrogeológicas.

Oliveira (2002) desenvolveu um modelo numérico em regime de estado estacionário para as águas subterrâneas do município de São José do Rio Preto – SP para avaliação de dois cenários: diminuição da precipitação e aumento da área

urbanizada. Com isso, chegou-se à conclusão de que os reflexos das hipóteses provocariam um colapso no sistema de captação na região central e, no estudo, recomendou-se a realização de um modelo em estado transiente.

Sartorato (2011), também em São José do Rio Preto, desenvolveu modelo numérico de fluxo das águas subterrâneas, tipo pré-exploração, em estado estacionário, com avaliação de dois cenários: duplicando e triplicando a vazão dos poços, chegando a rebaixamentos de 36 m e 55 m, respectivamente, na área urbana do município.

Em seu estudo, Cavicchia (2007) desenvolveu o modelo numérico de fluxo do SAG, em estado estacionário, na região do município de Ribeirão Preto – SP, pelo método de elementos finitos e, também, com apoio do SIG, para auxiliar o gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos na região considerada crítica em termos de perigo de contaminação, por influência da alta vulnerabilidade do SAG, e com indícios de exploração intensiva.

Também estudando o SAG, Guanabara (2011) desenvolveu um modelo numérico de fluxo, mas em estado transiente, da área de afloramento do SAG na bacia do Ribeirão da Onça, para estudar a variação do nível freático e auxiliar na gestão desse importante e estratégico sistema.

Barreiras (2009) desenvolveu um modelo numérico de fluxo das águas subterrâneas do concelho do Seixal – Portugal, com simulação de cenários de bombeamento, visando contribuir para o conhecimento hidrogeológico, devido às constantes pressões urbanísticas e industriais que ocorrem na região.

Iritani (1998) mostrou a viabilidade de utilização da modelagem matemática tridimensional como uma metodologia a ser aplicada para a definição das zonas de captura de captações de águas subterrâneas, tendo como área de estudo o município de Caçapava – SP. Nesse trabalho foram avaliados dois cenários: sem bombeamento e com bombeamento de poços.

Da mesma forma, Carvalho e Hirata (2012) avaliaram diferentes métodos de delimitação da zona de captura de poços para a definição de perímetros de proteção de poços e chegaram à conclusão de que o melhor método a ser utilizado, quando se têm os dados, é o modelo numérico.

Ainda na delimitação de zonas de captura, Rock e Kupfersberger (2002) estudaram o impacto considerando condições transientes do aquífero no sudeste da Áustria, verificando que a transiência superestima o perímetro de proteção de poço

se comparado com o estado estacionário.

Cavalcanti (2002) avaliou a aplicação da modelagem numérica, associada ao SIG, na determinação previsional das elevações induzidas em aquíferos livres, em decorrência do enchimento de reservatórios. Nesse trabalho avaliou-se a simulação do enchimento do reservatório de Biritiba-Mirim – SP, definindo-se um mapa potenciométrico previsto para após o enchimento do lago.

O uso da modelagem numérica como gestão de áreas costeiras foi desenvolvido por Mancuso *et al.* (2007). O estudo teve como objetivo simular a hidrodinâmica do sistema estuarino da bacia de Santos – SP.

Bernice (2010), em estudos realizados no Aquífero Adamantina, no município de Urânia – SP, fez uso da modelagem numérica de fluxo de água subterrânea e de transporte de contaminante para avaliar os possíveis impactos no aquífero a partir da contaminação por nitrato e, com isso, propôs medidas de gerenciamento do uso do terreno urbano.

Também com foco na qualidade da água, Viviane *et al.* (2004) criaram o modelamento numérico de águas subterrâneas como subsídio para tomada de decisões com base no risco, o que propicia melhor alocação de recursos e otimização das medidas a serem empregadas em áreas impactadas. No estudo, foi verificada a viabilidade de implantação de alternativas para a remediação de contaminação por combustível.

Uma das soluções para o tratamento de aquíferos freáticos contaminados foi estudada por Santos *et al.* (2006) por meio da modelagem numérica para aplicação de sistemas de *Wetlands*. Cenários foram simulados variando a geometria da janela de entrada de água, a profundidade de captura da pluma de contaminação e a recarga.

Além desses estudos, existem diversos outros, no Brasil e no mundo, que usam de alguma forma a modelagem numérica de fluxo de águas subterrâneas como auxílio na gestão dos recursos hídricos.

Deve-se atentar, no entanto, que a modelagem numérica tenta representar a realidade em uma versão simplificada do que frequentemente é um sistema complexo; por isso, os resultados devem sempre ser considerados com os devidos critérios, mas, ainda assim, quando baseada em um modelo conceitual bem definido a partir de dados e da experiência de campo, é considerada a melhor ferramenta para a tomada de decisão atualmente disponível (ALLEY *et al.* 1999).

De acordo com Bear *et al.* (1992), o grau de incerteza é aumentado na maioria dos casos devido à insuficiência de dados. Segundo Wendland e Rabelo (2010), incertezas advindas das cargas hidráulicas, dos fluxos e dos parâmetros hidráulicos ocorrem devido aos aspectos de medição ou devido à estimativa de características hidráulicas e geológicas do aquífero, destacando-se a simplificação da estrutura estratigráfica, por falta de dados, como um dos erros mais comuns.

Além disso, para Kresic (1997), o usuário muitas vezes desconhece as limitações técnicas, tais como as suposições e a aproximação de dados em que o modelo é baseado.

Dadas as numerosas incertezas e a contínua evolução das condições das águas subterrâneas, para Foster *et al.* (2010) é aconselhável uma “abordagem adaptativa” para a gestão de recursos hídricos subterrâneos em áreas urbanas. A gestão deve ser baseada em monitoramento contínuo dos níveis freáticos e das tendências de qualidade, monitoramento este que deve ser guiado por modelagem numérica transiente, com informações em diferentes tempos, de água subterrânea. Isso permitirá uma avaliação de cenários futuros das águas subterrâneas e levará à definição de soluções mais robustas e sustentáveis para o abastecimento público de água.

Desta forma, a modelagem matemática é uma importante ferramenta para o entendimento dinâmico de sistemas complexos de hidrogeologia e pode ser utilizada como orientativo para um programa de gestão dos recursos de longo prazo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A realização desta pesquisa envolve a elaboração de um modelo numérico de fluxo em regime estacionário das águas subterrâneas de SJRP e, adicionalmente, a criação de cenários futuros para auxiliar na gestão dos recursos hídricos na região.

Para tal, além da revisão bibliográfica da área estudada e de estudos de uso de modelos numéricos para avaliar a exploração de aquíferos em áreas urbanas e gestão de recursos hídricos, foram realizadas seis fases distintas, quais sejam:

- i. Coleta de dados geográficos, geológicos e hidrogeológicos;
- ii. Construção de uma base de dados georreferenciados;
- iii. Definição de um modelo conceitual de fluxo do SAB;
- iv. Definição de um modelo numérico de fluxo pré-bombeamento em estado estacionário;
- v. Definição de um modelo numérico de fluxo atual em estado estacionário;
- vi. Criação de cenários futuros de exploração; e
- vii. Recomendações de gestão dos recursos hídricos.

4.1 Coleta de dados e pesquisa bibliográfica

Para a realização desta pesquisa, é necessário o levantamento de mapeamentos pré-existentes, como mapas topográficos, mapas geológicos, mapas hidrogeológicos, mapas de hidrografia, cartas de uso e ocupação do solo e ortofotos da região. O Quadro 1 indica os detalhes técnicos de cada mapa pré-existente utilizado.

Além disso, foram levantados e avaliados os dados de poços perfurados na região, tendo como ponto de partida o banco de dados levantado por Servmar (2008) e, posteriormente, a busca de novas informações de poços tubulares junto ao DAEE, ao Sema e a empresas perfuradoras do município.

Mapas	Geometria da feição	Formato	Extensão	Escala	CIM	Fonte
Topográfico	Linha	Vetor	shape (.shp)	Precisão de 90 m (1:250.000)	SF-22-X-B-IV-3	SRTM Embrapa
Uso e ocupação do solo	Polígono	Vetor	shape (.shp)	1:25.000		DAEE/IG (2011)
Pedológico	Polígono	Vetor	shape (.shp)	1:500.00		Embrapa (1999)
Hidrológico	Linha	Vetor	shape (.shp)	1:250.000		IBGE (2011)
Hidrogeológico	Polígono	Vetor	shape (.shp)	1:1.000.000		DAEE <i>et al.</i> (2005)
Rede de esgoto	Linha	Vetor	shape (.shp)	1:50.000		IG/DAEE (2011)
Rede de abastecimento de água	Linha	Vetor	shape (.shp)	1:50.000		IG/DAEE (2011)

Quadro 1 - Mapas pré-existentes georreferenciados e utilizados nesta pesquisa

4.2 Geoprocessamento dos dados

O pré-processamento de dados topográficos e hidrogeológicos foi realizado em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), com a utilização do software ArcGis versão 2010, georreferenciado em UTM, Fuso 22, datum SAD 69, e, também, com a utilização do software Surfer 9, que permite a análise espacial e a confecção de mapas de variáveis.

A utilização do geoprocessamento foi muito importante para caracterizar a área de estudos e para auxiliar no entendimento hidrogeológico e na construção do modelo numérico de fluxo de águas subterrâneas.

Foram elaborados os seguintes mapas para este estudo:

- Declividade (%);
- Modelo Digital de Terreno (MDT);
- Carga hidráulica de cada poço (m);
- Data de construção de poços (décadas de 1970, 1980, 1990 e 2000);
- Profundidade dos poços (m);
- Potenciométricos (m);
- Cota de contatos litológicos em cada poço (m);
- Isópacas (m);

- Isóbatas (m);
- Localização dos poços;
- Vazão de exploração dos poços (m^3/h);
- Vazão específica de poços ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$);
- Transmissividade de poços (m^2/dia);
- Condutividade hidráulica de cada poço (m/dia);
- Tipo de uso e exploração da água (abastecimento público, doméstico, industrial, irrigação, recreação e outros);
- Estado do poço (equipado, desativado ou tamponado);
- Sistema Aquífero explotado (Bauru, Guarani ou Serra Geral);
- Situação de outorga do poço.

Dentre os mapas gerados, o MDT, o mapa de declividade e os mapas potenciométricos foram elaborados a partir de métodos de geoprocessamento explicados a seguir.

Partiu-se dos dados originais do Projeto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) — disponibilizados gratuitamente pela Embrapa, na escala 1:250.000, com resolução de 90 x 90 m, correspondentes à folha SF-22-X-B-IV-3, previamente georreferenciados, em formato GeoTIFF e na projeção cartográfica WGS 84. Esses dados foram importados para bancos de dados em SIG, o que possibilitou gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT).

As estruturas de dados MDT mais utilizadas na prática são os modelos locais: grade regular e malha triangular. A grade regular é um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares. Os vértices desses poliedros podem ser os próprios pontos amostrados, caso tenham sido adquiridos nas mesmas localizações xy que definem a grade desejada (SOUSA *et al.*, 2009).

Em uma primeira etapa, geraram-se as curvas de nível da imagem com equidistâncias de 10 em 10 m. Na sequência, obtendo-se as curvas de nível, gerou-se o MDT com o método Topo To Raster, técnica baseada nos trabalhos desenvolvidos por Hutchinson (1988, 1989) em seu programa ANUDEM.

O método Topo To Raster, um dos métodos de se representar computacional e graficamente uma superfície terrestre (um MDT), é uma técnica que permite a utilização conjunta de curvas de níveis, cursos de rios e delimitações de contornos,

minimizando erros na interpolação.

A partir do MDT, foi possível gerar as elevações e modelos digitais das demais camadas de comportamento hidrogeológico diferentes que ocorrem na área de estudo e que foram definidas para o modelo conceitual e numérico. Admitiram-se para a região cinco camadas: Solo, Adamantina A, Adamantina B, Santo Anastácio e Serra Geral.

Essas elevações foram geradas no software Surfer 9, empregando grades regulares de 20 x 20 m e o método de krigagem ordinária dos dados de curva de nível da área através do programa. O MDT gerado foi então utilizado para a confecção dos modelos digitais das elevações dos contatos entre as unidades do modelo.

Com a confecção de seções geológicas de cortes da área de estudos, pôde-se definir a geometria tridimensional do SAB. Com base nessas seções, obtiveram-se informações das espessuras de cada unidade definida, bem como profundidades do topo das camadas. Tais espessuras foram então interpoladas pelo programa Surfer 9, obtendo-se, assim, mapas de isoespessuras, ou isópacas, e mapas de profundidade até topo das camadas, ou isóbatas.

Para a geração dos modelos digitais das interfaces entre as unidades definidas pelo modelo conceitual, o seguinte processo foi executado: para a camada de solo, foi efetuada a operação de subtração do mapa de isoespessuras dessa unidade do MDT. O modelo gerado foi então utilizado na confecção do Modelo Digital da interface entre a Unidade Adamantina A e a Unidade Adamantina B, subtraindo-se dele o mapa de isoespessura da camada Adamantina A. Os demais modelos foram gerados seguindo-se o mesmo processo, com exceção da base da camada 5 (base do modelo), para a qual a operação feita foi a subtração de 50 metros da interface entre o Grupo Bauru e a Formação Serra Geral.

A declividade é avaliada obtendo-se a equidistância das curvas de nível (ΔV) e a distância horizontal entre elas (ΔH). Assim, o cálculo da declividade, em porcentagem, se dá através da Equação (1).

$$D = \Delta V \div \Delta H \times 100\% \quad (1)$$

A partir do MDT gerado, procedeu-se à elaboração do mapa de declividade por triangulação de Delaunay (DELAUNAY, 1934), tendo como mapa de entrada o

MDT e como saída o tipo de mapa de declividade escolhido, grau ou porcentagem. Para esta pesquisa, escolheu-se a saída em porcentagem.

Na literatura são observadas classes de declividade, tais como as sugeridas por Ross (1997), De Biase (1992) e Embrapa (1979). Os ajustes desses intervalos a uma dada região dependerão das características de seu relevo e da escala de trabalho (ZUQUETTE, 1987).

Segundo Embrapa (1979), os intervalos correspondem a: 0 a 3% (relevo plano); 3 a 6% (relevo plano a suave ondulado); 6 a 9% (relevo suave ondulado a ondulado); 9 a 12% (relevo ondulado). No estudo em questão, foram adotados valores semelhantes aos propostos por Embrapa (1979), cujos intervalos são: < 3% (relevo plano); 3 a 7% (relevo plano a suave ondulado); > 7% (relevo suave ondulado a ondulado).

Já para o mapa potenciométrico, a definição das isolinhas deve ser relacionada com a profundidade do poço e com a data de medição do nível da água, devido às interferências de sazonalidade, bombeamento, recarga de um aquífero, entre outras.

No entanto, como a pesquisa se utiliza principalmente de dados de poços em bombeamento, enfrenta-se o problema da definição do nível freático em condição natural, sem interferências entre poços, onde os rios e córregos drenam o aquífero.

Além disso, houve uma evolução na construção de poços tubulares na região, devido ao crescimento da população e ao aumento da demanda por água. Assim, foram consideradas as diferentes datas de construção dos poços, dado o histórico de bombeamento da região e, como já indicado por estudos como os de Oliveira (2002) e de Lima (2004), por terem sido identificados notáveis rebaixamentos do nível potenciométrico do SAB na região.

Dessa forma, uma primeira abordagem foi a construção de gráficos de correlação entre a profundidade dos poços e seus respectivos níveis estáticos.

Após essa análise preliminar, foram confeccionados cinco mapas potenciométricos em ambiente SIG, que continham as informações de cargas hidráulicas dos poços divididos por diferentes datas de construção e por profundidades de poços:

- Poços anteriores à década de 1980;
- Poços construídos entre as décadas de 1980 e 1990 com profundidades

abaixo e acima de 90 m; e

- Poços da década de 2000, com profundidades abaixo e acima de 90 m.

4.3 Modelo conceitual e numérico de fluxo das águas subterrâneas

Definiu-se um modelo conceitual de fluxo de água subterrânea que represente o SAB a partir de: (i) informações bibliográficas; (ii) mapeamentos pré-existentes; (iii) dados hidrológicos; (iv) dados de poços tubulares perfurados na região, como, por exemplo, informações de ensaios de bombeamento, descrição das amostras de calha e geofísica de poços; (v) realização de seções geológicas e (vi) pré-processamento dos dados em ambiente SIG.

O modelo conceitual considera a definição do domínio do modelo, que envolve: a geometria dos aquíferos; as características do aquífero a ser modelado, como os parâmetros hidrogeológicos; as condições iniciais e de contorno, a partir do conhecimento dos cursos hídricos superficiais, níveis potenciométricos e divisores de água subterrânea e superficial; informações sobre as entradas e saídas de água do sistema, por meio do conhecimento da quantidade de água que entra e que sai no sistema; e as informações de fluxo.

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 e a delimitação das condições de contorno e das condições iniciais devem ser adequadamente introduzidas, de modo que o aplicativo matemático, escolhido para a construção do modelo matemático, represente as condições reais do sistema hidrogeológico, a partir da calibração do modelo numérico aos dados de carga hidráulica e de fluxo de água do modelo conceitual.

Os elementos principais para a definição do modelo matemático incluem:

- Escolha do código numérico de simulação adequado à situação;
- Definição da extensão da área de estudo e discretização da grade do modelo;
- Delimitação das condições de contorno externa e interna, e suas variações no tempo;
- Definição dos poços de extração e de observação;

- Definição das condições hidráulicas dos aquíferos, incluindo recargas naturais e induzidas, descargas, transmissividades, coeficientes de armazenamento, relações rio–aquífero, entre outras.
- Calibração do modelo por comparação aos dados do modelo conceitual de fluxo;
- Testes de sensibilidade para identificar imprecisões, limitações e capacidade de previsibilidade do modelo numérico obtido, incluindo correções ao modelo e recalibração; e
- Simulação de cenários futuros de exploração das águas subterrâneas.

O modelo numérico de fluxo do SAB gerado para o município de SJRP é do tipo pré-exploração. Para desenvolvê-lo, utilizou-se o código MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1988), que resolve as equações de fluxo em 3D através do método das diferenças finitas por meio da utilização do software Visual MODFLOW, versão 2010 (GUIGUER; FRANZ, 1996), rodado em estado estacionário, como requerem os modelos para avaliação da exploração de aquíferos.

4.3.1 Equação geral do movimento 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 por meio da combinação matemática da equação de balanço de água e da Lei de Darcy (ANDERSON; WOESSNER, 1992; CLEARY, 1989). O Quadro 2 demonstra essa derivação.

Conhecida como equação fundamental do fluxo da água subterrânea (Equação 2), pressupõe que a diferença entre a quantidade de água que entra e a que sai num determinado ponto (x, y, z) num aquífero em função do tempo (t), considerando produção e consumo, corresponde à mudança de armazenamento em função do tempo, sendo variáveis independentes a posição (x, y, z) e o tempo (t).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W(X, Y, Z, t) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

Onde:

h = carga hidráulica [L];

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} = componentes do tensor da condutividade hidráulica [L/T];

S_s = coeficiente de armazenamento específico [1/L]. Equivale ao volume de água liberado [L³], por unidade de volume de material poroso [L³], por unidade de decréscimo da carga hidráulica [L];

t = tempo [T]

W = fontes e sumidouros do aquífero (poço e drenos), podendo ser expressos, como pontuais, por meio de 3 funções de delta de Dirac (Equação 3).

$$W = \sum_{i=1}^N Q_i \delta(X - X_i) \delta(Y - Y_i) \delta(Z - Z_i) \quad (3)$$

Onde:

Q_i = taxa de bombeamento (–) ou de injeção (+) [L³/T];

i = índice do poço;

X_i , Y_i e Z_i = coordenadas tridimensionais do poço;

N = número de poços

Fluxos em condições de estado estacionário não consideram a derivada da carga hidráulica em relação ao tempo na equação fundamental de fluxo das águas subterrâneas (Equação 2). Isso ocorre se o coeficiente de armazenamento for igual a zero na equação, fazendo com que não tenha, portanto, armazenamento nas células ou nós com a variação do tempo (CLEARY, 1989).

Em teoria, essa equação serve tanto para aquíferos confinados como para aquíferos livres. No entanto, num aquífero livre a água vem de drenança por poros, sendo que a mudança no armazenamento do aquífero pode ser calculada pelo volume do cone de depressão, multiplicando-se pela vazão específica aparente (S_y) (MCWHORTER; SUNADA, 1977).

Devido às características de contorno móvel em aquíferos freáticos, é necessário que se utilizem as aproximações de Dupuit-Forchheimer, desenvolvidas em 1863, e as equações lineares de Boussinesq (Equação 4) (CLEARY, 1989).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right] + W(X, Y, t) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4)$$

Onde S_y = vazão específica, que leva em consideração os efeitos de armazenamento nos aquíferos freáticos.

<p>Fluido que entra (ρQ_{yi}) – fluido que sai (ρQ_{yo}) = mudança de armazenamento em função do tempo.</p> <p>Lembrando que $q = Q \Delta x \Delta z$: $\rho Q_{yi} = \rho q_{yi} \Delta x \Delta z$ e $\rho Q_{yo} = \rho q_{yo} \Delta x \Delta z$</p>	<p>ρ = densidade do líquido Q = volume y = direção adotada, dentro de coordenadas x, y, z</p>
Substituindo ρq_{yi} por $\frac{\partial \rho q y}{\partial y}$, o fluxo que sai do elemento de volume, na direção y , será:	$\rho q_{yi} + \left(\frac{\partial \rho q y}{\partial y} \right) \Delta y$
A quantidade de água ρQ_{yo} que sai pela face oposta $\Delta x \Delta z$ é:	$\rho Q_{yo} = \left[\rho q y + \frac{\partial \rho q y}{\partial y} \Delta y \right] \Delta x \Delta z$
A quantidade de água no elemento de volume por unidade de tempo $\frac{\partial Q}{\partial t}$ na direção y é a diferença entre a quantidade que entra e a que sai ($Q_{yi} - Q_{yo}$); assim:	$\frac{\partial \rho Q y}{\partial t} = - \frac{\partial \rho q y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z$
A variação total no fluxo pode ser expressa por:	$\left[\frac{\partial \rho q x}{\partial x} + \frac{\partial \rho q y}{\partial y} + \frac{\partial \rho q z}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z$ <p style="text-align: center;"><i>mudança no armazenamento</i> = <i>função do tempo</i></p>
A mudança no armazenamento pode ser expressa pelo Coeficiente de Armazenamento Específico (S_s). Sendo: ΔV = volume de água liberado [L^3]; Δh = unidade de decréscimo da carga hidráulica [L]; $\Delta x \Delta y \Delta z$ = volume do material poroso [L^3]	$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$
Convencionalmente, ΔV é intrinsecamente positivo, quando Δh é negativo. Assim, a variação do armazenamento no tempo é expressa como:	$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z$
Assim, tem-se a equação de balanço de água.	$\rho \left(\frac{\partial q x}{\partial x} + \frac{\partial q y}{\partial y} + \frac{\partial q z}{\partial z} \right) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t}$
Esta equação é de pouco uso, pois não se pode medir q_n diretamente. Portanto, utiliza-se a Lei de Darcy, que relaciona q_n e h :	$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$
Sendo assim, tem-se a equação fundamental de fluxo das águas subterrâneas:	$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$
É importante lembrar que, para um meio homogêneo e isotrópico, $K_x = K_y = K_z = K$	$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t}$
Quando o armazenamento não se altera com o tempo, os termos do lado direito se igualam a zero. Esta equação é conhecida como “equação de Laplace” e descreve uma situação de estado estacionário (<i>steady-state</i>) ou de equilíbrio.	$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$

Quadro 2 - Derivação da equação fundamental do fluxo da água subterrânea
 Fonte: Anderson e Woessner (1992)

4.3.2 Condições auxiliares

A equação fundamental do fluxo da água subterrânea é uma equação diferencial composta por incógnitas (∂h), derivadas parciais ($\partial h/\partial t$) e parâmetros hidrogeológicos (K_x , K_y , K_z , W e S_s). Para resolver essa equação é necessário, em primeiro lugar, determinar a área do aquífero onde se deseja a solução $h(x,y,z,t)$, ou seja, as condições auxiliares, quais sejam, iniciais e de contorno.

4.3.2.1 Condições iniciais

As condições iniciais descrevem a variação tridimensional da carga hidráulica através do aquífero quando o tempo for inicial, ou seja, igual a zero na simulação. Isto implica um fluxo inicial com carga hidráulica (h) diferente para cada posição x,y,z (Equação 5).

$$H = h(x,y,z,0), \text{ no instante } t = 0 \quad (5)$$

No entanto, essa informação muitas vezes é desconhecida, fazendo com que os modeladores usem uma carga constante média (h_0) (CLEARY, 1989). Em simulações em estado transiente, costumam-se utilizar as cargas hidráulicas simuladas em estado estacionário como condição inicial (ANDERSON; WOESSNER, 1992).

4.3.2.2 Condições de contorno

As condições de contorno que definem as interações do aquífero com o meio podem ser, segundo Anderson e Woessner (1992), de dois tipos: 1) limite físico, formado pela presença física de rocha impermeável ou de corpos d'água como lagos e rios; e 2) limite hidráulico, como divisores de água subterrânea e pequenos córregos.

Segundo Carvalho Filho e Cota (2003), condições de contorno são enunciados matemáticos que especificam a variável dependente (carga) ou a derivada da variável dependente (fluxo) nos limites ou fronteiras do problema

Sendo assim, essas condições de contorno são matematicamente classificadas em três tipos (Quadro 3 e Figura 3).

Tipo	Tipo 1 ou de Dirichlet	Tipo 2 ou de Neumann	Tipo 3 ou mista (Robin ou Cauchy)
Limite	Físico	Hidráulico	Combinação dos Tipos 1 e 2. O fluxo é calculado com base na diferença entre a carga hidráulica especificada e a carga hidráulica calculada pelo modelo.
Especificação	Carga hidráulica é especificada no contorno	Fluxo é especificado no contorno	
Exemplo	Lago (constante) Rio (função do tempo e/ou espaço)	Fluxo zero ou não-fluxo em divisores de água ou zonas impermeáveis e a recarga e evapotranspiração especificada na primeira camada do modelo	Drenança através de contornos semipermeáveis, drenos, nascentes e rios.
Equação	$H = H(X, Y, Z, t)$, em $t > 0$	$-K\eta \frac{\partial h}{\partial \eta} = f(X, Y, Z, t)$ f = fluxo por unidade de área normal à fronteira [$L^3/L^2/T$]	$-Kz \frac{\partial h}{\partial z} = \frac{K'}{b'} (H_0 - H)$ b = espessura da camada semiconfinante.

Quadro 3 - Tipos de condições de contorno

Figura 3 - Condições de contorno
Fonte: modificado de Iritani e Ezaki (2009).

O código MODFLOW oferece quatro pacotes que representam condições de contorno do tipo 3, que matematicamente funcionam de maneira muito similar e têm

por finalidade simular os efeitos do fluxo entre os contornos e o sistema aquífero, sendo elas: *General Head Boundary* (GHB), *River*, *Drain* e *Wall*. A condição mais geral é representada pelo módulo GHB. Os outros pacotes apenas se diferenciam através dos limites de validade da equação utilizada para o cálculo da descarga de água.

Para a condição de contorno do tipo 3, o código utiliza a seguinte equação básica para o cálculo da descarga de água (QD) entre o contorno e o aquífero, em que “h” é a carga hidráulica na célula, “d” é uma elevação relativa à condição de contorno e “cond” é um parâmetro de proporcionalidade denominado condutância (Equação 6).

$$QD = \text{cond} \times (d - h) \quad (6)$$

O pacote *River* simula o fluxo de água entre as águas superficiais e o aquífero nas células do domínio onde esta condição de contorno foi atribuída. Utiliza-se para tanto a equação 6; contudo, esta perde a validade para valores de carga inferiores ao leito do rio, passando a descarga a ser constante e igual ao seu valor máximo, dado quando “h” se iguala à cota do leito do rio. Já o pacote *Drain* possui a característica de atuar apenas como sumidouro de água do aquífero, ou seja, para valores de carga abaixo do limite inferior estabelecido, em que a equação de descarga perde a validade e o contorno torna-se inativo (CARVALHO FILHO; COTA, 2003).

A condutância, apesar de ser uma constante de proporcionalidade que descreve o grau de conectividade entre o contorno e a célula, possui significado físico, estando relacionada às propriedades físicas das drenagens. Assim, tanto para as condições de *River* quanto para às de *Drain*, este parâmetro pode ser calculado pela seguinte equação (Equação 7).

$$\text{Cond} = K \times L \times W \div E \quad (7)$$

Sendo $K[L/T]$ a condutividade hidráulica do material que compõe o leito do rio, $L[L]$ é o comprimento do rio na célula para a qual a condutância está sendo calculada, $W[L]$ é a largura do rio e $E[L]$ é a espessura do leito do rio.

4.3.3 Discretização espacial

Para possibilitar a modelagem numérica é necessário discretizar a área estudada para que a equação fundamental do fluxo das águas subterrâneas seja calculada em cada célula do modelo, resultando em uma distribuição de cargas hidráulicas conforme a subdivisão adotada.

Nesse sentido, existem dois métodos mais utilizados: método de diferenças finitas (MDF) e método de elementos finitos (MEF) (Quadro 4). Em ambos os métodos, a equação diferencial parcial original é discretizada nas variáveis de espaço X, Y e Z.

De maneira geral, os MDF são mais simples, mais usados, porém apresentam maiores limitações que os MEF (CLEARY, 1989; ANDERSON; WOESSNER, 1992). A escolha entre dois métodos depende do problema a ser resolvido e da preferência do modelador. Olsthoorn (1985) demonstra, em seu artigo, o uso de MDF, para sistemas aquíferos em três dimensões e em estado transiente, utilizado de maneira simples e sem a necessidade do uso de softwares especiais.

Programas de computador — tais como Visual MODFLOW (MCDONALD; HARBAUGH, 1988) e Groundwater Modeling System – GMS (ENGINEERING COMPUTER GRAPHICS LABORATORY – ECGL, 1996) — se apoiam no MDF, já o software Feflow (DIERSCH, 1980) faz uso do MEF.

Métodos	Método de diferenças finitas (MDF)	Método de elementos finitos (MEF)
Representação discretizada	Em um ponto	Sobre uma área
Valores de carga	Representados em nós da malha. Para conhecer o valor em área fora do nó, interpolam-se os valores.	Pode ser fornecido sobre todo o domínio.
Complexidade	Menor	Maior
Representação de um poço	Raramente coincide com um nó definido, assumindo a localização do nó mais próximo.	Representação coincide ou aproxima-se da localização real.
Condições de contorno	Introduzidas com menor acuidade	Introduzidas com maior acuidade
Softwares que operam	Maior quantidade	Menor quantidade
Complexidade anisotrópica	Atende quando as direções principais de condutividade hidráulica são paralelas aos eixos X e Y da malha	Melhor resultado quando existem muitas áreas anisotrópicas.

Continua

Continuação

Métodos	Método de diferenças finitas (MDF)	Método de elementos finitos (MEF)
Exemplo

Quadro 4 - Diferenças entre os métodos de diferenças finitas e elementos finitos
Fonte: modificado de Driscoll (1992)

4.3.4 Calibração do modelo

Como já mencionado, o modelo numérico é utilizado para representar a realidade de um sistema de fluxo de águas subterrâneas por meio da equação fundamental de fluxo e, para isso, deve-se discretizar a área estudada para que a equação seja aplicada célula a célula. Esse processo implica erros durante a modelagem, que devem ser corrigidos por meio da calibração.

A calibração deve ser realizada com dados de campo, que usualmente consistem de cargas hidráulicas observadas em diferentes locais da área e em diferentes tempos. Assim, os ajustes devem ser realizados até que os dados observados sejam reproduzidos (CLEARY, 1989).

Para que um modelo seja considerado calibrado, devem ser observados dois critérios: um quantitativo e outro qualitativo. A calibração quantitativa é baseada no balanço de massa e na correlação de resíduos de carga hidráulica (BEAR; VERRUIJT, 1994). Já a calibração qualitativa consiste na comparação entre mapas potenciométricos e hidrogeológicos, definidos anteriormente à construção do modelo numérico.

O processo de calibração mais comum é o de “tentativa e erro”, no qual se ajustam os parâmetros manualmente realizando sucessivas simulações e comparações entre cargas hidráulicas observadas e calculadas até que se atinjam valores aceitáveis (ANDERSON; WOESSNER, 1992). A diferença entre as cargas hidráulicas nada mais é do que o resíduo.

O resíduo da calibração pode ser calculado pela média das diferenças entre

as cargas hidráulicas observadas e calculadas (*mean error* – ME), que considera valores positivos e negativos (Equação 8).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (hobs - hcalc)i \quad (8)$$

Onde:

n = número de valores de calibração

O resíduo também pode ser calculado pela média do resíduo absoluto (*mean absolute error* – MAE), que considera o valor absoluto da diferença das cargas hidráulicas (Equação 9).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(hobs - hcalc)i| \quad (9)$$

Além desses, o erro quadrático médio também é um dos critérios utilizados (Equação 10):

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (hobs - hcalc)^2 i \right]^{0,5} \quad (10)$$

A magnitude do resíduo aceitável depende da variação de carga hidráulica dentro do domínio do modelo (IRITANI, 1998). Usualmente, adota-se uma porcentagem do resíduo cujo valor aceitável deve ser inferior a 10% (Equação 11).

$$\%resíduo = RMS/\Delta h \quad (11)$$

Na avaliação do balanço de massas, é necessário verificar a quantidade de água que entra e a que sai no modelo; se esses valores forem iguais, o método é considerado preciso. Em geral não se admite $(V \text{ entra} - V \text{ sai}) / (V \text{ entra} + V \text{ sai})$ maior que 0,01, ou seja, um modelo calibrado deve apresentar discrepância menor do que 1%.

4.3.5 Análise de sensibilidade

Um modelo devidamente calibrado, que representa os dados observados, não está, necessariamente, correto. O teste de um modelo se faz pela análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade consiste no processo em que os parâmetros de entrada do modelo sofrem uma variação, em geral em torno de 10% do valor inicial, e esses resultados das mudanças relativas são avaliados. Esse processo tem como finalidade demonstrar qual o comportamento das simulações do modelo diante das incertezas dos valores de entrada (OLIVEIRA, 2002).

Segundo Anderson e Woessner (1992), o objetivo da análise de sensibilidade é a quantificação das incertezas de um modelo calibrado causadas pelas incertezas nas estimativas dos parâmetros nele inseridos, sendo uma etapa essencial no processo de modelação numérica.

Um modelo calibrado, que seja preciso e acurado e que tenha sido verificado, pode ser utilizado para fazer previsões e responder às questões iniciais.

4.3.6 Software Visual MODFLOW

A escolha de um software para a operação do modelo numérico de fluxo de águas subterrâneas depende de alguns fatores — como: o objetivo do trabalho, os dados, o tempo e os recursos disponíveis, além da afinidade com o software. Esses fatores influenciarão na escolha de um modelo analítico ou numérico, bi ou tridimensional, diferenças finitas ou elementos finitos, de fluxo de água subterrânea ou transporte de contaminantes (IRITANI, 1998).

Um dos códigos ou programas computacionais de simulação mais utilizados para desenvolver o modelo numérico de simulação é o MODFLOW, desenvolvido pela United States Geological Survey (USGS), cujos manuais foram publicados por McDonald e Harbaugh (1988).

O código MODFLOW desenvolve as equações de fluxo no meio saturado, aplicado em sistemas uni, bi ou tridimensionais por meio do método das diferenças finitas (WINSTON, 1999).

O software Visual MODFLOW (GUIGUER; FRANZ, 1996), escolhido para uso neste trabalho como pré e pós-processador, divulgado em 1994, é um dos softwares

mais utilizados nas questões relacionadas ao fluxo de águas subterrâneas e transporte de contaminantes. O software faz uso do método de diferenças finitas e inclui os pacotes MODFLOW, MODPATH, Zone Budget, MT3D/RT3D e PEST.

5 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Nesta pesquisa, a caracterização da área se refere aos aspectos do meio físico, considerando as características geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas e hidrográficas; além dos aspectos socioeconômicos, considerando características demográficas, desenvolvimento econômico, infraestrutura sanitária, uso e ocupação do solo e uso da água subterrânea.

Muitas das informações relacionadas ao meio físico foram embasadas no cadastro de poços, tendo sido encontradas grandes dificuldades no fornecimento dos dados. Foram cadastrados 2.068 poços, sendo alguns com informações de coordenadas, perfil construtivo e geofísico do poço, descrição litológica, vazão de exploração, resultados de ensaios de bombeamentos, data de construção dos poços, profundidade do nível da água estático e dinâmico, entre outras.

Do total cadastrado, 2.008 poços estão localizados no município de SJRP e, 60 poços, localizados nos municípios no entorno, cujas informações também são importantes para caracterização da área, principalmente dos seus limites.

No entanto, por conta de a maioria dos poços não ser outorgada (79%) (Figura 4 e Tabela 1), nem todos apresentam informações relevantes para a compreensão das características hidrogeológicas e para a definição dos modelos, dificultando, inclusive, afirmar diferentes zonas de condutividade hidráulica e transmissividade em superfície.

Tabela 1 - Contabilização do número de poços em relação às informações mais importantes para a construção do modelo conceitual de fluxo

Número de poços cadastrados com informações					
Informações geológicas		Parâmetros hidrodinâmicos			
Perfis geológicos	Perfis geofísicos	h (m)	T (m ² /dia)	Q/s (m ³ /h/m)	K (m/dia)
350	10	621	60	575	23

h: carga hidráulica, em relação à cota topográfica e o nível estático; T: transmissividade; Q/s: capacidade específica; K: condutividade hidráulica

Figura 4 - Localização dos poços outorgados (em verde) e não outorgados (em vermelho) em São José do Rio Preto

5.1 Meio físico

Os aspectos do meio físico foram abordados a partir da compilação, tratamento, análise e cartografia da geologia, geomorfologia, hidrografia, hidrogeologia e balanço hídrico da área de estudo.

5.1.1 Geomorfologia, pedologia e geologia

A descrição geomorfológica e pedológica foi efetuada considerando-se os aspectos regionais, com base em bibliografia, e os aspectos locais para a geomorfologia, com base na elaboração e análise do modelo digital do terreno, elevações das camadas hidrogeológicas e declividade do terreno. Já a descrição geológica, além de ter sido consultada a bibliografia para aspectos regionais, foram considerados, também, os aspectos locais, com base na descrição de amostras de calha, análise dos perfis geofísicos e seções geológicas.

Quanto aos aspectos regionais, a área estudada encontra-se no Planalto Ocidental do estado de São Paulo, caracterizado por uma topografia suave, relevo ondulado relativamente uniforme, com extensos e baixos espigões em longas e estreitas faixas, notavelmente nos divisores de águas.

As formas de relevo predominantes são colinas amplas, que ocupam quase a totalidade das áreas drenadas pelo rio Grande, e colinas médias, que ocorrem nas cabeceiras e nos interflúvios entre as principais drenagens da Bacia do rio Turvo/Grande, onde se encontra inserida a sub-bacia do rio Preto (IPT, 1999) (Figura 5).

Figura 5 - Geomorfologia da região de estudo
Fonte: IPT (1999)

O município apresenta relevo pouco ondulado e é cortado por um rio de pequeno porte, o rio Preto, e seus afluentes; solo do tipo arenito Podsol e Latosol (fase arenosa), de média para baixa fertilidade natural (Figura 6); vegetação do tipo cerrado, cerradinho e capoeira; clima tropical, com temperatura média anual de 23,48 °C; e pluviosidade caracterizada por seis meses úmidos (outubro a março) e seis meses mais secos (abril a setembro) (LEME; FREITAS, 2012).

A área de estudo insere-se na porção nordeste da Bacia do Paraná, importante bacia intracratônica que representa uma imensa região da América do Sul, constituída por uma sucessão sedimentar-magmática com idades neo-orovicianas a neocretácicas (MILANI, 2004).

A área estudada refere-se principalmente às rochas do Grupo Bauru, de idade cretácea, sobreposta aos derrames da Formação Serra Geral. O Grupo Bauru é constituído, predominantemente, por sedimentos siliciclásticos continentais que ocorrem nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Goiás e Mato Grosso do Sul, com área total de 370.000 km², (SILVA, 2003). Litologicamente, esta sucessão é caracterizada por arenitos, arenitos argilosos, carbonatados ou não, siltitos, lamitos e argilitos, apresentando localmente conglomerados e camadas calcárias (DAEE, 1976).

Figura 6 - Pedologia da região de estudo
Fonte: Embrapa (1999)

Soares *et al.* (1980) propuseram a divisão estratigráfica clássica do Grupo Bauru, ainda aceita e utilizada pela maioria dos geocientistas, nas formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina e Marília, sendo as formações Adamantina e Santo Anastácio as mais representativas na área de estudos (Figura 7).

Figura 7 - Coluna litoestratigráfica do Grupo Bauru
Fonte: proposta por Soares *et al.* (1980)

A Formação Adamantina é composta por arenitos róseos a castanhos, de granulação fina a muito fina, com estratificação cruzada, alternados com bancos castanho-avermelhados a cinza-acastanhados de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, maciços ou com estratificação plano-paralela, apresentando frequentemente marcas de onda e microestratificações cruzadas (IPT, 1981). Na área de estudo, essa formação apresenta espessura média de 120 metros.

Em profundidade, ocorre a Formação Santo Anastácio, com espessura média na área de 50 metros, sendo que, segundo IPT (1999), apresenta-se em contato discordante com a Formação Serra Geral (Grupo São Bento). Essa formação é constituída por arenitos finos a médios, de coloração marrom-avermelhada a arroxeada, mal-selecionados, com grãos arredondados a subarredondados, cobertos por uma película limonítica (IPT, 1981).

Vários autores propuseram revisões da clássica proposta de Soares *et al.* (1980). No entanto, essa classificação será utilizada nesta pesquisa devido à sua funcionalidade e ao fato de a grande maioria dos trabalhos relacionados à área de estudo utilizar essa proposta, além do fato de as descrições dos perfis litológicos dos poços tubulares outorgados pelo DAEE seguirem essa classificação.

A Formação Serra Geral é composta por um conjunto de derrames basálticos toleíticos, entre aos quais se encontram intercalados arenitos com as mesmas características dos pertencentes às formações Botucatu e Piramboia. Associam-se aos derrames corpos intrusivos (diques e *sills*) de mesma composição. Tal evento eruptivo ocorreu durante o Jurássico Superior e o Cretáceo Inferior em toda a Bacia do Paraná (IPT, 1981).

Essa superfície basáltica apresenta caimento para oeste, em direção à calha do rio Paraná, com cotas variando desde 600 m de altitude nas áreas próximas às Cuestas Basálticas, até 100 m acima do nível do mar, na porção oeste, como observado por DAEE *et al.* (2005).

A Formação Botucatu é caracterizada por arenitos de granulação fina a média, bem-selecionados, avermelhados, exibindo estratificações cruzadas tangenciais de grande porte, depositados em dunas eólicas de ambiente desértico (IPT, 1981).

Já os sedimentos da Formação Piramboia são de granulação fina a média, localmente grossos e conglomeráticos, com fácies sedimentares que apresentam silte e argila exibindo estratificações cruzadas planar e acanalada e plano-paralela, depositados em ambiente fluvio-lacustrino e eólico (CAETANO-CHANG; WU, 1992; MILANI *et al.*, 1994; GIANNINI *et al.*, 2004).

5.1.1.1 Descrição das amostras de calha

A definição detalhada da geometria do SAB, que inclui a caracterização das unidades hidroestratigráficas que ocorrem na área de estudos, é realizada a partir do conhecimento da geologia de subsuperfície.

Para isso, além do levantamento bibliográfico prévio já discutido anteriormente, foram utilizadas nesta pesquisa duas formas para a complementação das informações: descrições de amostras de calha coletadas durante a perfuração dos poços tubulares e análise de 10 perfilagens geofísicas de poços.

As descrições de amostras de calha coletadas durante uma sondagem ou perfuração de poços não são muito precisas, principalmente em relação à definição da profundidade de cada mudança de litologia, pois são comuns desmoronamentos das paredes do furo de sondagem, e também em relação ao tempo de chegada da amostra em superfície para a descrição.

Segundo Nery (1990), tais amostras coletadas (amostras de calha) não representam, na maioria das vezes, as profundidades referidas pelo sondador, devido ao tempo de perfuração, à pressão de bombeamento do fluido de perfuração (lama) e a outras variáveis.

Mesmo trazendo incertezas quanto à espessura real das unidades descritas, a análise dos perfis litológicos (Figura 8), realizada a partir das descrições de amostras de calha, mostrou-se muito útil devido ao grande número de poços que apresentam essas descrições e seu bom espalhamento por toda a área de estudos. Assim, preliminarmente, foram identificadas quatro unidades, como segue:

1. Camada de solo: espessuras variando de poucos metros até mais de 60 metros.
2. Formação Adamantina: espessura média de 100 m, constituída predominantemente por arenitos lamíticos, intercalados a níveis pelíticos. Sua coloração varia de castanha a levemente avermelhada (SOARES *et al.*, 1980).
3. Formação Santo Anastácio: espessura média de 50 m, constituída por arenitos mal-selecionados, de granulação fina, imaturos, por vezes apresentando uma coloração avermelhada e importante conteúdo de minerais máficos (SOARES *et al.*, 1980).
4. Formação Serra Geral: constitui o embasamento, apresentando-se como uma rocha basáltica com diferentes níveis de alteração.

Figura 8 - Divisão do Grupo Bauru com base em perfilagem gama e descrições de amostras de calha. Formação Adamantina (A), Formação Adamantina (B), Formação Santo Anastácio. Exemplo de perfilagem geofísica do poço Residencial Figueira.

5.1.1.2 Análise dos perfis geofísicos

Após a construção de um poço é essencial a realização de perfilagem geofísica. Sabe-se que existem diversos tipos, cada um com um objetivo específico, entre eles a determinação exata da profundidade e da espessura das diferentes camadas litológicas encontradas no poço, que auxilia de maneira mais precisa a definição da geometria das camadas litológicas em subsuperfície.

Entende-se como perfilagem geofísica de poço a leitura, em profundidade, das características e propriedades litológicas que ocorrem em subsolo onde o poço foi perfurado. Essa leitura é realizada por meio de equipamentos com sonda capaz de gerar como resultados imagens visuais de perfis do poço com medições de determinados parâmetros.

Segundo Nery (1990), perfis geofísicos apresentam medidas de parâmetros físicos da rocha registrados pelos sensores em função das suas propriedades elétricas (resistividade elétrica ou potencial eletroquímico natural), acústicas (velocidade de propagação ou tempo de trânsito das ondas sonoras), radioativas (radioatividade natural ou induzida), mecânicas, entre outras. Tais medições dão, de forma indireta, informações petrofísicas da rocha, como granulometria, porosidade e permeabilidade.

Sendo assim, de maneira a confirmar as espessuras das camadas litológicas, foram analisadas as dez perfilagens geofísicas fornecidas para a pesquisa. Mesmo que escassas, esta análise provou ser de suma importância para melhor caracterizar a geometria do SAB na área de estudos.

Como auxílio às interpretações, foram avaliados também perfis de referência para o Grupo Bauru, apresentados por Paula e Silva *et al.* (2003).

Para a investigação das unidades geológicas de subsuperfície do Grupo Bauru, com ênfase no conteúdo de argilominerais das rochas, utilizou-se prioritariamente os perfis de Raios Gama convencionais.

A perfilagem do tipo Raios Gama (GR) é um tipo de perfilagem nuclear ou radioativa, ou seja, utiliza-se uma fonte radioativa de baixa atividade e avalia-se a interação entre a radiação e os átomos presentes na rocha (OLIVEIRA, 2005), sendo a resposta dos raios gama diretamente proporcional à concentração de elementos radioativos como Urânio, Tório e Potássio em um material qualquer

(NERY, 1990). Sendo assim, rochas que contenham uma mineralogia rica nesses elementos apresentam maior emissão de raios gama.

Uma vez que argilominerais possuem alto teor de potássio, rochas com conteúdo maior de argila apresentam picos mais acentuados nos perfis gama, o que torna esse tipo de perfilagem muito útil na identificação da granulometria de rochas sedimentares.

A análise das perfilagens geofísicas do tipo Raios Gama confirmou a divisão descrita pelas amostras de calha. Segundo Paula e Silva *et al.* (2003), a Formação Adamantina na região de SJRP apresenta padrão de radioatividade mais intenso em razão de uma provável contribuição de fontes alcalinas no suprimento sedimentar. Tal fato é refletido na perfilagem gama e tem como consequência a fácil distinção dessa unidade em relação à camada de solo em seu topo e à Formação Adamantina em sua base (Figura 9).

Além disso, pode-se subdividir a Formação Adamantina em duas unidades, razoavelmente bem marcadas nos perfis geofísicos:

1. Unidade Superior (Adamantina A), constituída por arenitos de granulação fina, bem-selecionados, relativamente pobres em níveis argilosos, de coloração castanha clara a avermelhada.
2. Unidade Inferior (Adamantina B), constituída também por arenitos finos, bem-selecionados, mas ricos em sedimentos finos, por vezes apresentando níveis pelíticos, de coloração castanha escura.

A Tabela 2 resume a interpretação de todas as seções geofísicas, mostrando as profundidades em que ocorrem os contatos entre as unidades definidas.

Tabela 2 - Resumo das interpretações dos perfis geofísicos

Poço	Localização		Profundidade (m)	Interpretação			
	N	E		Contato entre a camada de solo e a camada superior da Formação Adamantina (m)	Contato entre a porção superior e a porção inferior da Formação Adamantina (m)	Contato entre as formações Adamantina e Santo Anastácio (m)	Contato Grupo Bauru e Formação Serra Geral (m)
Jardim das Acácias	7702688	669566	133,65	26	50	73	129
Eco Village 1	7692511	664860	240,00	29,5	59	104	166
Palestra-Poço 1	7698930	662930	174,00	20	41	111	170
Luzia Poloto	7704010	667687	153,00	29	58	106	151
Village Rio Preto-Poço 1	7701512	673036	137,00	18	53	96	----
Village Rio Preto-Poço 2	7701290	672840	120,80	6	18	85	120
Residencial Figueira	7698870	672080	148,00	40	65	122	147
Residencial Gaivota 1-Poço 1	7699000	672950	149,00	27	53	102	149
Residencial Gaivota 1-Poço 2	7698970	672690	144,10	27	54	101	139
Jardim Urano	7695650	669320	1152	12,5	18,5	48	199

5.1.1.3 Seções Geológicas

A partir da caracterização da litologia pelas amostras de calha e por perfisagens geofísicas, foi possível definir de maneira tridimensional as cinco camadas litológicas diferentes que ocorrem na região estudada.

De forma a entender a geometria do SAB em toda a região, de maneira espacializada, foram confeccionadas seis seções geológicas ao longo de toda a área de estudos (Figuras 9 e 10).

MAPA DE SEÇÕES GEOLÓGICAS

MAPA DE LOCALIZAÇÃO

Figura 9 - Mapa de localização das seções geológicas traçadas

Figura 10 - Seções geológicas traçadas na área de estudos

5.1.1.4 Modelo Digital do Terreno e elevações das camadas

Para esta pesquisa, o MDT foi gerado a partir da imagem SRTM. Em uma primeira etapa foram geradas as curvas de nível da imagem com equidistâncias de 10 em 10 metros (Figura 11). Observou-se que a área apresenta cotas que variam de 440 m a 600 m. Na sequência, obtendo-se as curvas de nível, gerou-se o MDT com o método Topo To Raster (Figura 12).

A partir do MDT, foi possível gerar as elevações e modelos digitais (Figuras 13 a 17) das demais camadas de comportamento hidrogeológico diferentes que ocorrem na área de estudo: Solo, Adamantina A, Adamantina B, Santo Anastácio e Serra Geral.

A partir da análise das seções geológicas e elevação das camadas, pode-se notar que, na área de estudo, o basalto, assim como os sedimentos sobrepostos, tem caimento para oeste, observado, principalmente, pelas seções C – D e E – F. A espessura média dos sedimentos é de aproximadamente 180 m.

5.1.1.5 Mapa de declividade do terreno

O mapa de declividade é importante para um estudo hidrogeológico, pois auxilia na localização de áreas que possuem maior probabilidade de recarga. Isso porque, quanto maior a declividade do terreno, mais fácil a água escoar na superfície. Ao contrário, quando a declividade é baixa, ou seja, o terreno é mais plano, a probabilidade de a água infiltrar e recarregar um aquífero é muito maior.

Como observado no mapa topográfico (Figura 11), no MDT (Figura 12) e no mapa de declividade (Figura 18), a área apresenta cotas que variam de 440 m a 600 m e declividade predominante de até 7%, ou seja, a área apresenta uma topografia suave e um relevo ondulado.

Figura 11 - Mapa topográfico

Figura 12 - Modelo Digital de terreno (MDT)

Figura 13 - Modelo Digital do contato solo e Adamantina 1

Figura 14 - Modelo Digital do contato Adamantina 1 e Adamantina 2

Figura 15 - Modelo Digital do contato Adamantina 2 e Santo Anastácio

Figura 16 - Modelo Digital do contato Santo Anastácio e Serra Geral

Figura 17 - Modelo Digital da base da área

Figura 18 - Mapa de declividade

5.1.2 Hidrografia, hidrogeologia e clima

O município de SJRP está inserido na Sub-bacia do rio Preto (Sub-bacia 7), pertencente à Bacia dos rios Turvo e Grande (Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI 15), definida pela Bacia do rio Turvo e seus tributários e pelas porções drenadas diretamente para o rio Grande, situadas entre a Usina de Marimbondo e o divisor de águas de sua margem esquerda, onde as águas encontram-se com as águas do rio Paranaíba.

A UGRHI 15 faz limite a norte com o estado de Minas Gerais pelo rio Grande, a leste com a Bacia do Baixo Pardo/Grande, a sudeste com a Bacia do rio Mogi Guaçu, e a sul com as Bacias Tietê/Batalha e São José dos Dourados (IPT, 1999), como pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 19 - Bacia do Rio Turvo/Grande e as sub-bacias
Fonte: IPT (1999)

A sub-bacia do rio Preto tem como afluentes: córrego do Macaco, da Lagoa ou da Onça, do Canela, do Borá, da Piedade, da Felicidade, São Pedro, da Anta e do Talhado e dois lagos artificiais formados pelo rio Preto (LEME; FREITAS, 2012). Contudo, devem ser destacados os córregos do Borá, do Canela e da Piedade, pois estes atravessam a zona urbana e foram, no passado, os receptores de quase toda a carga de esgoto gerada pela cidade (Figura 20).

Figura 20 - Mapa de hidrografia do município de São José do Rio Preto

O córrego da Piedade ainda recebe também os esgotos da cidade de Mirassol e, segundo Servmar (2008), há a possibilidade de que estes córregos

forneçam água em alguns momentos para poços em bombeamento na área.

A área de interesse deste estudo conta com importantes sistemas aquíferos que são amplamente utilizados na captação de águas subterrâneas, sendo eles: Bauru, Guarani e, secundariamente, Serra Geral. Contudo, o SAB apresenta o maior volume de água extraída e a maior quantidade de poços tubulares.

Segundo IPT (1999), o SAB pode ser considerado um aquífero poroso, moderadamente permeável, devido ao teor relativamente alto de material argiloso e siltoso e, localmente, apresenta condições de semiconfinamento a confinamento.

Segundo DAEE *et al.* (2005), a capacidade de produção do SAG é de 250 a 300 m³/h por poço, enquanto a do SAB é de 40 m³/h. Contudo, devido ao fato de o primeiro ocorrer abaixo de 800 metros de profundidade, o uso deste sistema pela população é reduzido, já que se exige a construção de poços mais complexos e, consequentemente, mais caros.

O sentido do escoamento regional das águas do SAB se dá em direção às drenagens principais, como os rios Turvo, Preto, São José dos Dourados, Tietê, Aguapeí, Peixe, Santo Anastácio, Paraná e Paranapanema.

O Aquífero Serra Geral corresponde aos basaltos dessa formação, sendo considerado um aquífero fraturado. Esse aquífero sobrepõe-se ao SAG e é recoberto pelo SAB. (DAEE *et al.*, 2005). Por se tratar de um aquífero fraturado, suas propriedades hidráulicas são bastante variáveis.

O relatório da Servmar (2009) apresenta também um estudo de vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação, realizado pelo método GOD (FOSTER; HIRATA, 1988), caracterizando o SAB com média-alta a alta-baixa vulnerabilidade à contaminação. Esses resultados mostram que a contaminação por substâncias de média mobilidade pode atingir o aquífero, como se observam em laudos químicos realizados.

Além disso, em relação aos aspectos climáticos, temperatura e precipitação, o clima predominante no município é o tropical úmido com inverno seco, e o subtropical, na sua parte sul (IPT, 1999). A temperatura média anual observada entre 1994 e 2007 foi de 25 °C. As temperaturas média-máxima e média- mínima foram de 31 °C e 19 °C, respectivamente. A temperatura mínima, de 0,5 °C, foi observada em julho de 2000, e a máxima, de 42 °C, em outubro de 2002.

Em relação à precipitação, foram selecionados dados da estação pluviométrica do DAEE (B6-020), localizada em SJRP, obtidos entre 1941 e 2004.

Os índices pluviométricos médios mensais variaram entre o mínimo de 17 mm e 239 mm no período mais chuvoso. As médias mínimas variaram entre 0 mm e 31 mm e as médias máximas entre 111 mm e 537 mm. Desconsiderando os períodos com poucos dados, calculou-se a precipitação anual (média) de 1.220 mm. Os índices mais elevados foram medidos nas décadas de 1970 e 1980, quando houve variação entre 1.069 mm e 1.974 mm, e entre 997 mm e 2.239 mm, respectivamente. Entre as décadas de 1940 e 1960, a precipitação anual variou de 531 mm e 731 mm até 1.406 mm e 1.429 mm, respectivamente. Na década de 1990, a variação ocorreu entre 912 mm e 1.697 mm, e, entre os anos de 2000 e 2004, entre 1.104 mm e 1.358 mm.

5.1.2.1 Parâmetros hidrogeológicos do SAB

O SAB apresenta zonas com diferentes características hidrogeológicas, subdividindo-se em quatro aquíferos: Marília, Adamantina, Santo Anastácio e Caiuá, conforme a divisão das formações geológicas proposta por Soares *et al.* (1980) e adotada nesta pesquisa. Na área de estudo, ocorrem os aquíferos Adamantina e Santo Anastácio, foco do estudo.

Em estudos regionais, as informações sobre os parâmetros hidrogeológicos se baseiam, principalmente, no sistema aquífero como um todo, pois a maioria dos poços são perfurados em toda sua profundidade, atravessando os diferentes aquíferos.

Além disso, podem ocorrer diferenças laterais, devido à grande extensão do aquífero e diferenças na geometria, podendo-se verificar, no mesmo aquífero, zonas diferentes de determinados parâmetros hidrogeológicos. Na porção oeste do aquífero, predominam parâmetros hidrogeológicos de maiores valores, como se pode observar na Tabela 3.

Segundo Arid *et al.* (1970), em SJRP estima-se que a reserva do SAB seja de 40 bilhões de m³, com volume disponível de 25 a 30 bilhões de m³ de água. Apesar de as vazões do SAB serem consideradas pequenas, são de grande importância devido à sua grande extensão e à facilidade de captação por poços relativamente rasos (75 a 125 m de profundidade).

Tabela 3 - Parâmetros hidrogeológicos para o Sistema Aquífero Bauru

Aquífero	Parâmetros hidrogeológicos																	Fonte
	Q (m³/h)			Q/s (m³/h/m)			K (m/d)			T (m²/d)			S		n _{ef} (%)			
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	a	b	c	
Adamantina	-	-	19	-	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-					1
	-	-	-	-	-	-	0,2	0,8	0,5	-	-	-	-					2
Santo Anastácio	-	-	35	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-					1
	-	-		-	-	-	0,3	3,66	1,98	-	-	-	-					2
Bauru	10	120	40	0,022	4,9	0,57	0,002	3,66	-	0,14	328	50	1,0E ⁻⁰¹	1,0E ⁻⁰³	5	15	5	3
	-	-	-	-	-	-	1	2	0,5	10	100	-	-					4
Bauru (região oeste)			40			1,6						200						3
Bauru (região de SJRP)			40	0,5	1,5													3
Adamantina e Santo Anastácio	0,15	288	15,25	0,085	7,57	0,65	0,06	1,07	0,36	0,4	60	18,22	2,05E-5					5

a: valor mínimo, b: valor máximo, c: valor médio e predominantes.

1: Carvalho e Hirata (2011), 2: Servmar (2010), 3: DAEE/IG/IPT/CPRM (2005), 4: DAEE (1976), 5: Banco de dados da pesquisa.

O cadastro de poços compilado para este estudo conta com nove resultados de testes de bombeamento para a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos (K , T , S) para o SAB na área estudada. No entanto, esses poços são utilizados para a extração de água e, muitas vezes, atravessam todo o SAB, não sendo possível discretizar os parâmetros para cada camada.

Em comparação com os valores encontrados na literatura, observa-se que os obtidos pelos ensaios de campo são relativamente próximos (Tabela 3 e Figuras 21 e 22).

Figura 21 - Mapa de transmissividade dos poços

Figura 22 - Mapa de condutividade hidráulica dos poços

5.1.2.2 Mapas potenciométricos

Na definição clássica, “potencial” é a capacidade de realizar trabalho, sendo o potencial, segundo Hubbert (1940), uma quantidade física capaz de ser medida em um ponto qualquer de um sistema de fluxo, cujas propriedades sejam tais que o fluxo sempre ocorra de regiões de maior para menor potencial, independentemente de sua direção no espaço.

Sendo assim, mapas potenciométricos são mapas de isolinhas de contorno das cargas hidráulicas de um aquífero possibilitando caracterizar aspectos da circulação das águas subterrâneas, podendo, por exemplo, definir as direções de fluxo. Além disso, em um mapa potenciométrico é possível determinar o gradiente hidráulico, a localização das áreas de recarga e descarga e, inclusive, se um rio é perene ou intermitente.

Dessa forma, mapas potenciométricos são essenciais na caracterização hidrogeológica de um aquífero. Para serem definidos, basta obter o mapa topográfico da região e conhecer as cargas hidráulicas dos poços, por meio da cota do local onde o poço foi perfurado e da profundidade do nível da água estático.

Mas, para definir as isolinhas de um mapa potenciométrico representativo, estas devem ser relacionadas com a profundidade do poço e com a data de quando o nível da água foi medido, devido às interferências de sazonalidade, bombeamento, recarga de um aquífero, dentre outras.

Como mencionado, na área de estudo houve uma evolução na construção de poços tubulares na região, principalmente do centro em direção às fronteiras da área urbana (Figura 23 e Gráfico 1), devido ao crescimento da população e ao aumento da demanda por água.

Figura 23 - Mapa de data de construção dos poços

Gráfico 1 - Evolução da construção de poços tubulares em SJRP ao longo do tempo

Além disso, os poços utilizados neste estudo são poços de bombeamento e possuem filtros em praticamente toda a extensão do poço, ou seja, os poços em geral exploram toda a extensão do SAB e possuem profundidades médias de 120 m (Figura 24).

Assim, uma primeira abordagem foi a construção de gráficos de correlação entre a profundidade dos poços e seus respectivos níveis estáticos. Os Gráficos 2 a 5, resultantes dessa abordagem, são apresentados a seguir.

Com exceção dos poços anteriores à década de 1980, nota-se que existe uma boa correlação positiva entre esses dois parâmetros (R^2 em torno de 0,5), ou seja, quanto maior é a profundidade do poço, mais profundo tende a ser o seu nível estático, como era esperado. O gráfico dos poços mais antigos do que 1980 não mostrou essa relação, principalmente devido ao fato de não apresentar variações em suas profundidades, concentrando-se aproximadamente em 100 metros.

A correlação positiva entre a profundidade e o nível freático ocorre devido ao SAB ser um aquífero livre, representar uma grande porção de área de recarga e, portanto, exibir um fluxo vertical que, em geral, é lento por ser influenciado pelas porções mais finas e argilosas, características das formações em estudo. Sendo assim, podem existir diferentes níveis potenciométricos, conforme a profundidade com que o poço é perfurado.

Figura 24 - Mapa de profundidade dos poços

A correlação é muito mais bem observada nos poços mais rasos, onde a mistura de água é menor. Já em poços mais profundos, por haver filtro em toda sua

extensão, o nível potenciométrico medido é, em geral, resultante de uma carga hidráulica média.

Gráfico 2 - Correlação entre a profundidade dos poços construídos anteriormente à década de 1980 e seus respectivos níveis estáticos

Gráfico 3 - Correlação entre a profundidade dos poços construídos nas décadas de 1980 e 1990 e seus respectivos níveis estáticos

Gráfico 4 - Correlação entre a profundidade dos poços construídos na década de 2000 e seus respectivos níveis estáticos

Gráfico 5 - Correlação entre a profundidade dos poços e seus respectivos níveis estáticos

Foram confeccionados, portanto, cinco mapas potenciométricos: poços anteriores à década de 1980; poços construídos entre as décadas de 1980 e 1990, com profundidades abaixo e acima de 90 m; poços da década de 2000, com profundidades abaixo e acima de 90 m.

Os poços utilizados para essa atividade muitas vezes não mostraram uma boa distribuição, já que a grande maioria dos poços de exploração existentes na área se concentra na área urbana de SJRP. Além disso, as divisões feitas com relação à data de construção dos poços e às suas profundidades não permitiram

uma distribuição ideal dos poços utilizados. Assim, as linhas equipotenciométricas foram desenhadas apenas onde existiam informações confiáveis de carga hidráulica, evitando-se inferências muito distantes das fontes de informações (Figuras 25 a 29).

Ainda assim, foi possível observar que nos mapas elaborados a partir dos poços construídos nas décadas de 1980 em diante há uma evolução no rebaixamento do nível potenciométrico, principalmente na região da área urbana de SJRP.

O rebaixamento é claramente observado se comparado aos mapas potenciométricos dos poços mais rasos, que são acima de 90 m (décadas de 1980 e 1990 e década de 2000). Nesse caso, observa-se um rebaixamento acentuado do nível da água nas porções sul e oeste da área urbana, sendo que em alguns locais os rios e córregos passaram a ceder água para o aquífero. Estes, portanto, são alimentados por um fluxo de água subsuperficial.

Em DAEE (2011), observou-se que o fluxo de água subsuperficial constitui-se por fluxos subterrâneos locais que mantêm menores tanto o nível freático como o nível de base de córregos. Constatou-se, assim, que não ocorre interferência dos bombeamentos nos níveis do freático.

Em geral, o fluxo das águas subterrâneas se dá em direção às principais drenagens, sendo que, por conta do rebaixamento observado nos últimos anos, existem fluxos locais influenciados por bombeamento de poços, principalmente observado na região sul da área urbana.

Dessa forma, o mapa com poços anteriores à década de 1980 representa um período com condição de fluxo natural de água subterrânea, sem interferência entre poços, onde os rios e córregos drenam o aquífero por toda a área.

Figura 25 - Mapa potenciométrico anterior à década 1980

Figura 26 - Mapa potenciométrico das décadas de 1980 e 1990 com poços rasos (acima de 90 m)

Figura 27 - Mapa potenciométrico das décadas de 1980 e 1990 com poços profundos (abaixo de 90 m)

Figura 28 - Mapas potenciométrico da década de 2000 com poços rasos (acima de 90 m)

Figura 29 - Mapa potenciométrico da década de 2000 com poços profundos (abaixo de 90 m)

5.2 Dados socioeconômicos

Para se fazer a gestão das águas subterrâneas não basta conhecer apenas os aspectos físicos da área estudada; é importante conhecer também as informações socioeconômicas, as quais, tal como os dados físicos, também necessitam de atualização constante para continuidade do planejamento e gestão.

Em se tratando de gestão das águas subterrâneas, torna-se mais relevante coletar informações sobre aspectos demográficos, desenvolvimento econômico, uso e ocupação do solo e infraestrutura sanitária.

5.2.1 Indicadores demográficos e de desenvolvimento social e econômico

A população de SJRP, segundo o censo de 2010, era de 408.258 habitantes, sendo que 94% desses habitantes concentram-se na zona urbana. A população estimada para o ano de 2012 era de 415.769 e, para 2020, 445.129 habitantes, com taxa anual de crescimento anual de 0,9% (IBGE, 2012). Entre os anos 1960 e 2000, a população de SJRP cresceu gradativamente, passando de 84.039 para 358.523 habitantes (IBGE, 2004). O Gráfico 6 ilustra o crescimento populacional.

Gráfico 6 - Crescimento da população de SJRP

A área urbana é subdividida em 61 regiões administrativas, agrupados em três distritos (Sede, Talhado e Engenheiro Schmitt) (LEME; FREITAS, 2012).

Conforme a distribuição da população estimada para 2007, as quatro regiões mais populosas estão localizadas à margem oeste do rio Preto, nas regiões central e noroeste do município, com média de 7,0 mil hab/km² (SERVMAR, 2011).

O Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) — ou seja, a média dos indicadores de esperança de vida ao nascer (longevidade), educação e renda — para o município foi de 0,834 no ano 2000, sendo colocado como 102º do país e o 27º do estado de São Paulo (LEME; FREITAS, 2012).

A taxa de mortalidade infantil (por mil nascidos) para o ano de 2010 é de 7,31, sendo que, nos últimos três anos, caiu de 10,2 para 7,31, registrando-se o segundo menor índice do estado de São Paulo no ano de 2009 (LEME; FREITAS, 2012). Neste período, a esperança de vida ao nascer era de 71,3 anos.

O Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* — que corresponde ao total dos bens e serviços produzidos, deduzindo-se o consumo intermediário, resultando na soma dos valores adicionados pelos diversos setores —, calculado com base na população de 2009, foi de R\$ 18.776,09, sendo mais representativo no setor industrial se comparado ao setor agropecuário e de serviços (LEME; FREITAS, 2012).

5.2.2 Uso e ocupação do solo

O levantamento dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo, ou seja, as atividades realizadas pelo ser humano num determinado espaço, podem auxiliar no conhecimento de aspectos qualitativos e quantitativos da água.

Quanto aos aspectos qualitativos, as atividades antrópicas podem ser possíveis fontes de contaminação do aquífero, possuindo maior ou menor potencial de contaminar as águas subterrâneas. De outra maneira, quanto aos aspectos quantitativos, a análise do uso e ocupação do solo permite conhecer a distribuição espacial dos tipos de usuários; além disso, permite conhecer, especialmente, a localização de áreas impermeabilizadas, advinda da ocupação urbana, o que provoca interferências diretas no balanço hídrico por influenciar na diminuição da recarga natural do aquífero e apresentar recargas artificiais, por conta de vazamentos nas redes de esgoto e de abastecimento.

Conforme IG/DAEE (2011), o uso e a ocupação do solo na área podem ser separados basicamente em duas zonas: zona rural e zona urbana. Cada uma dessas zonas apresenta ocupação, problemas e características muito distintas (Figuras 30 e 31).

Na área urbana de SJRP, com aproximadamente 119,48 km² de área, foram identificadas locais com usos predominantemente industrial, residencial e misto (comercial e residencial) e locais especiais. A maior parte da ocupação nesta área possui uma característica mista residencial e comercial, sendo circundadas pelas demais estruturas urbanas, como praças, áreas de lazer e cultura, serviços públicos, cemitérios, etc.

No município também há dois grandes lagos artificiais (represas), com cerca de 1 km de extensão cada, situados na parte centro-leste, sendo que o lago de montante é responsável pelo fornecimento de 26% da água distribuída pela Semae (DAEE/IG, 2011).

A ocupação industrial na área concentra-se em duas porções, a oeste e a norte da cidade, incluídas no perímetro urbano. As principais atividades econômicas são a metalúrgica, madeira e mobiliário, as atividades de serviços e de comércio, além da construção civil (BOLÇONE, 2006).

O número de empresas em SJRP cresceu 75% nos últimos três anos, passando de 25.011 empresas, em 2009, para 43.774 empresas em 2011, com predomínio nos setores de comércio e serviços (LEME; FREITAS, 2012) (Tabela 4).

Tabela 4 - Número de empresas em SJRP

	2007	2008	2009	2010	2011
Indústria	2.582	2.577	2.529	2.828	4.543
Serviços	7.950	8.656	8.712	11.166	18.165
Agronegócios	110	95	102	231	910
Comércio	13.708	13.597	13.668	11.793	20.156
Total	24.350	24.925	25.011	26.018	43.774

Fonte: Leme e Freitas (2012)

Figura 30 - Ortofotos do município de São José do Rio Preto

Figura 31 - Mapa de Uso e Ocupação do município de São José do Rio Preto

A zona rural do município é extremamente desmatada, observando-se poucas reservas de matas e florestas naturais (apenas 4,46%), a maior área estando ocupada por pastagens (52,19%) em 2011. 25% da área rural está ocupada pela agricultura, sendo que as maiores áreas plantadas correspondem às culturas de cana de açúcar, seguida de laranja e milho (SJRP, 2012) (Tabela 5).

Tabela 5 - Situação agropecuária de SJRP

Culturas	2008		2009		2010		2011	
	Área/ha	%	Área/ha	%	Área/ha	%	Área/ha	%
Culturas perenes	1.206,30	4,389	1.146,50	3,419	1.136,50	3,39	1.136,50	3,39
Culturas semiperenes (cana, mandioca, abacaxi, maracujá, etc.)	6.598	17,381	5.807,16	17,32	5.807,16	17,32	6.192,96	18,47
Culturas anuais	734,6	2,105	707,76	2,11	770	2,296	924,84	2,75
Culturas olerícolas	111,12	0,215	119,6	0,356	119,6	0,356	120	0,36
Pastagens	15.466,90	53,381	17.900,00	53,381	17.900,00	53,381	17.500,00	52,19
Florestas	1.532,60	4,465	149,71	0,446	149,71	0,446	1.497,10	4,46
Outras	7.882,80	18,064	7.701,59	22,968	7.649,35	22,82	6.160,92	18,38
TOTAL (zona rural)	33.532,32	100	33.532,32	100	33.532,32	100	33.532,32	100

Fonte: Leme e Freitas (2012)

5.2.3 Infraestrutura sanitária

A infraestrutura de uma cidade está relacionada à sua história e modelo de ocupação. No caso do município de SJRP, o crescimento teve predominância espontânea, mas com núcleo urbano original, até a década de 1950. Posteriormente, foram elaborados diversos Planos instituídos por legislação. O atual Plano de Sistematização Viária Urbana, no qual se estabelecem as diretrizes viárias para todo e qualquer novo parcelamento de solo do município, foi criado em 1992 e atualizado em 2002, compondo o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano (LEME; FREITAS, 2012).

SJRP notavelmente apresenta indicadores acima da média nacional, contando com 99% da população atendida por abastecimento de água e 95% atendida por sistema de esgoto (Figura 32 e 33). Contudo, apenas 3% do volume coletado é tratado (LEME; FREITAS, 2012).

Figura 32 - Mapa da Rede de abastecimento público e rede de esgoto do município de São José do Rio Preto

Figura 33 - Mapa da Rede de abastecimento público e rede de esgoto do município de São José do Rio Preto

Os serviços de fornecimento de água e coleta de esgotos são prestados e gerenciados pela autarquia municipal Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto – Semaes.

Os pontos de lançamento de esgoto domiciliar coletado em áreas urbanas, pelo Semaes são considerados fontes pontuais de poluição direta dos cursos d'água onde são lançados — no caso, o rio Preto e os córregos Canela, Borá e Piedade —, podendo também afetar a qualidade das águas subterrâneas e solos, de forma indireta.

Somente nos últimos anos foram construídas as redes de tratamento do esgoto descartado nos córregos. Ainda assim, 97% do esgoto coletado continua a ser descartado no rio Preto.

As águas do município provêm de três matrizes hídricas distintas, quais sejam: águas subterrâneas do SAB e do Sistema Aquífero Guarani (SAG) e águas superficiais do rio Preto, distribuídas por uma rede com mais de 1,3 milhões de quilômetros de extensão (BOLÇONE, 2009).

A Tabela 6 mostra a evolução, nos últimos quatro anos, dos volumes produzido, consumido, macromedido e micromedido, além da porcentagem da fonte de captação para cada matriz hídrica. Como observado, a maior parte da água provêm de águas subterrâneas, mas principalmente do SAB.

Os volumes captados dos mananciais subterrâneos são explorados a partir de 206 poços ativos instalados no SAB e 8 poços no SAG, totalizando 214 poços ativos explorados pelo Semaes (LEME; FREITAS, 2012).

Além disso, apesar de os volumes produzido e consumido de água serem maiores e terem crescido ao longo do tempo, os volumes medidos são menores, sendo que o macromedido, especificamente, sofreu uma diminuição. Essa diferença se deve à perda de água, que pode ser física ou financeira.

Tabela 6 - Informação sobre o abastecimento de água

Discriminação		2008	2009	2010	2011	Média
Fontes de captação de água	rio Preto (%)	26,32	26,54	26,54	26,54	
	SAB (%)	40,82	40,98	40,98	40,98	
	SAG (%)	32,86	32,48	32,48	32,48	
Vol. produzido (m ³ /dia)		114.574	112.002	115.602	118.302	
Vol. Consumido (m ³ /dia)		70.656	73.276	77.672	77.672	
Vol. Micromedido (m ³ /dia)		65.489	67.928	72.003	72.003	
Vol. Macromedido (m ³ /dia)		92.038	66.106	69.411	72.111	
Perda (m ³ /dia)		22.536	45.896	46.191	46.191	40.204

Fonte: (BOLÇONE, 2009; BOLÇONE, 2010; LEME; FREITAS, 2011; LEME; FREITAS, 2012)

É importante conhecer as perdas físicas de água pela rede de distribuição (volume produzido menos o volume macromedido), pois esta se deve a vazamentos da tubulação que aportam diretamente ao subsolo e complementam as recargas naturais prejudicadas em áreas impermeabilizadas.

5.3 Quantidade da água subterrânea

Em um estudo hidrogeológico, no qual interessa a realização de modelagem conceitual e numérica de fluxo das águas subterrâneas e, posteriormente, a gestão do recurso hídrico, é necessário avaliar tanto a quantidade de água subterrânea existente no manancial hídrico estudado e passível de ser explorada, ou seja, a disponibilidade hídrica, como também a quantidade de água que a população usa deste recurso, ou seja, a demanda pela água subterrânea.

A disponibilidade hídrica pode ser avaliada pelo balanço hídrico, e, a demanda, pela informação de vazão explorada dos poços. O conhecimento desses dois fatores é de suma importância, pois pode ajudar a entender se o recurso hídrico está sendo adequadamente utilizado, sem prejuízos ao meio ambiente, sociais e econômicos, provocados pela superexploração.

5.3.1 Balanço hídrico

A realização do balanço hídrico permite definir a quantidade de água nas diferentes fases do ciclo hidrológico numa bacia hidrográfica, quais sejam,

precipitação, escoamento (superficial, sub-superficial e básico), evapotranspiração, infiltração e armazenamento.

Um dos principais objetivos de se realizar o balanço hídrico é responder quanto de água infiltrada se converte em recarga para o aquífero e, a partir dessa informação, quanto de água está disponível no mesmo.

Segundo Devries e Simmers (2002), a recarga de um aquífero é o volume de água que infiltra no solo e atinge o nível d'água, sendo adicionado ao aquífero.

A quantidade de água de recarga que realimenta o aquífero pode ter origem natural (chuvas, rios, lagos, derretimento da neve ou mesmo de outro aquífero) e não natural, provindo de sistemas de irrigação, vazamentos das redes de abastecimento de água e de coleta de esgoto, de galerias pluviais, entre outros.

Para estimar-se a recarga de uma região, é necessário conhecer uma série de fatores que controlam a área de estudos. Entre eles, podem-se citar precipitação, topografia, escoamento superficial, uso e ocupação do solo, evapotranspiração, relação dos cursos d'água com o aquífero (se influentes ou efluentes), características do solo (composição, espessura), características hidráulicas, umidade, profundidade da zona de raízes, características da zona não saturada e, finalmente, do aquífero (mecanismo de fluxo, condutividade hidráulica e heterogeneidades) (LENER *et al.*, 1990).

Além disso, existem vários métodos de se calcular a recarga de um aquífero. A escolha por um método depende dos objetivos a serem alcançados, da escala do trabalho e das características hidrogeológicas locais.

Primeiramente, o potencial de recarga da área modelada foi obtido com a realização do balanço hídrico por meio da metodologia proposta por Thornthwaite e Matter (1948), segundo a equação 12:

$$P = ESC + \Delta ARM + ETR + R \quad (12)$$

Onde: P é a precipitação (mm); ESC é o escoamento superficial (mm), ETR é a evapotranspiração real (mm), ΔARM é a variação no armazenamento de água na zona não-saturada (mm) e R é a recarga (mm).

O escoamento superficial é o deslocamento da água na superfície da terra, indo de regiões mais altas para regiões mais baixas topograficamente. No ciclo

hidrogeológico, isso ocorre quando a retenção de água pela vegetação e a taxa de infiltração no solo são excedidas; dessa forma, alguns fatores — como tipo do solo, relevo, estação do ano e uso e ocupação do solo — influenciam nesse escoamento.

Quanto maior o teor de argila dos estratos que compõem o terreno e maior a declividade, maior será o escoamento superficial; conseqüentemente, menor será a recarga de um aquífero. O contrário pode ser observado, por exemplo, quando há predomínio de areia e menor declividade do terreno.

Em relação ao uso e ocupação do solo, a cobertura vegetal tende a retardar o escoamento, facilitando a infiltração. Já em áreas urbanas, o escoamento superficial é facilitado devido à impermeabilização do solo, diminuindo a recarga natural. Mas, por outro lado, a recarga dos aquíferos em áreas urbanas é incrementada por vazamentos das redes de esgoto, abastecimento de água e galerias pluviais.

Para a área rural, o cálculo do escoamento superficial foi avaliado a partir do cruzamento de informações do mapa pedológico (EMBRAPA, 1999) e do mapa de declividade, desenvolvido a partir do mapa topográfico (dados de SRTM disponibilizados gratuitamente pela Embrapa), considerando também a estação seca (meses de abril a setembro) e a chuvosa (outubro a março).

Na área de estudos ocorrem quatro tipos de solo:

- Argissolos vermelho-amarelos eutróficos abruptos com horizonte A moderado e textura arenosa/média, em relevo suave ondulado e ondulado;
- Argissolos vermelho-amarelos eutróficos abruptos ou não, com horizonte A moderado e textura arenosa/média e média, em relevo suave ondulado e ondulado;
- Argissolos vermelho-amarelos eutróficos + argissolos vermelhos distróficos e eutróficos, ambos com textura arenosa/média e média, relevo suave ondulado;
- Latossolos vermelhos distróficos com textura média, relevo plano, todos com horizonte A moderado.

Esses solos foram enquadrados em duas classes principais, com base na sua composição: arenosos (latossolos) e argilosos (Argissolos vermelho-amarelos).

Já no mapa de declividade foram definidos três intervalos de declividade (< 3%; 3% a 7%; > 7%), os quais foram associados a diferentes coeficientes de escoamento superficial.

Assim, o escoamento superficial é estimado aplicando-se o coeficiente de escoamento superficial (C') à precipitação mensal:

$$ESC = C' \times P \quad (13)$$

Sendo:

$$C' = \alpha \times C \quad (14)$$

Onde: C é o coeficiente que determina o volume da precipitação que escorrerá em superfície, em função do solo; e α é determinado em função da declividade e da estação do ano, seca ou úmida.

Portanto, e também considerando os estudos de Fenn *et al.* (1975), foram encontradas seis classes diferentes de recarga, com base no escoamento superficial, variando de classe 1 a classe 6 (Tabela 7).

Tabela 7 - Classificação do escoamento superficial

Classificação	Tipo de Solo	Declividade (%)	Coeficiente α	
			Estação seca	Estação úmida
Classe 1	Arenoso (C = 0,35)	< 3	0,43	0,65
Classe 2		3 a 7	0,54	0,70
Classe 4		> 7	0,60	0,70
Classe 3	Argiloso (C = 0,45)	< 3	0,53	0,63
Classe 5		3 a 7	0,75	0,65
Classe 6		> 7	0,70	0,85

Para o cálculo do balanço hídrico foram avaliados dados médios mensais de temperatura e precipitação das séries históricas (1994 a 2007) obtidos no sítio do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC-CIAGRO), com leituras na estação meteorológica da Casa da Agricultura Regional de São José do Rio Preto (CATI), localizada em 200 48' N, 490 23' E (Tabela 8).

Tabela 8 - Dados climáticos utilizados para o balanço hídrico

Precipitação média (mm)												
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual
314,82	203,93	165,33	65,1	67,16	32,59	15,88	20,71	51,23	94,78	158,66	223,99	1414,17
Temperatura média (°C)												
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual
21,74	21,83	21,32	19,99	16,12	15,05	14,37	16,31	18,51	20,44	20,88	21,64	19,01

O armazenamento (ARM) foi calculado com base nas simplificações propostas por Pereira (2005), segundo a equação 14:

$$ARM_{\eta} = ARM_{\chi-1} \exp \left[\frac{(P-ETP)\eta}{CAD} \right] \quad (14)$$

onde ETP é a evapotranspiração potencial (mm) e CAD é a capacidade de água disponível no solo (mm), adotada como 150 mm.

Para os meses onde $P - ETP > 0$, mas com valores insuficientes para que o ARM atinja o valor da CAD, aplica-se a seguinte equação:

$$ARM_{\eta} = ARM_{\chi-1} \exp(P - ETP)_{\eta} \quad (15)$$

A evapotranspiração potencial (ETP) foi calculada através do método proposto por Thornthwaite (1948), cuja aplicação é adequada em projetos de pesquisa e gestão (BLACK, 2007). A equação empírica é dada por:

$$ETP = 16b \left(10 \frac{T}{I} \right)^a, 0^{\circ}C \leq T \leq 26^{\circ}C \quad (16)$$

onde T é a temperatura média mensal (°C); I é o índice de calor disponível para a região; o expoente a é a função cúbica de I calculado a partir da soma dos índices de calor dos 12 meses; e b é um fator de correção referente ao período de insolação durante o dia que varia em função da latitude do local de estudo. O cálculo

de I, a e b é realizado a partir das seguintes equações:

$$I = \sum_{\eta=1}^{12} (0,2T_{\eta})^{1,514}, T_x > 0^{\circ}\text{C} \quad (17)$$

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} I + 0,49239 \quad (18)$$

$$b = \left(\frac{ND}{30} \right) \times \left(\frac{N}{12} \right) \quad (19)$$

onde ND é o número de dias no mês e N o fotoperíodo em horas.

Caso a temperatura média mensal seja acima de 26 °C, a ETP deve ser calculada pela equação apresentada por Willmott *et al.* (1985), baseada nas tabelas de Thornthwaite (1948):

$$ETP = -415,85 + 32,24 - 0,43T^2, T > 26^{\circ}\text{C} \quad (20)$$

A evapotranspiração real (ETR) foi obtida através das seguintes equações:

$$ETR = ETP, (P - ESC - ETP > 0) \quad (21)$$

ou

$$ETR = P - ESC - \Delta ARM, (P - ESC - ETP < 0) \quad (22)$$

Por fim, a recarga foi obtida aplicando-se as equações abaixo:

$$R = P - ESC - \Delta ARM, \Delta ARM \geq 0 \quad (23)$$

ou

$$R = 0, \Delta ARM < 0 \quad (24)$$

Através das equações anteriormente descritas foram obtidos os resultados dos parâmetros P, ETP e ESC para cada classe inserida na área de estudos e aplicada à equação do balanço hídrico, obtendo-se, assim, os valores de recarga para cada classe, com valor médio de 307 mm/ano. Observando o mapa pedológico (EMBRAPA, 1999, modificado), o solo arenoso ocorre apenas em declividades

baixas (menores que 3%); assim, na área de estudo ocorrem quatro classes (Tabela 9 e Figura 34).

Tabela 9 - Balanço hídrico para os blocos da SAB (mm/ano)

Classe 1 (Solo arenoso e declividade < 3%)	
Precipitação	1.414
Evapotranspiração	769
Escoamento	302
Recarga	354
Classe 3 (Solo argiloso e declividade < 3%)	
Precipitação	1.414
Evapotranspiração	733
Escoamento	390
Recarga	304
Classe 5 (Solo argiloso e declividade 3 a 7%)	
Precipitação	1.414
Evapotranspiração	707
Escoamento	425
Recarga	295
Classe 6 (Solo argiloso e declividade > 7%)	
Precipitação	1.414
Evapotranspiração	704
Escoamento	524
Recarga	214

A recarga também foi avaliada por meio da análise de hidrograma de vazão, conceito também defendido por Custódio e Llamas (2001) e Fetter (2001). Esse conceito baseia-se no fato de a descarga da água subterrânea manter o nível de base de uma drenagem (córrego, rio, etc.), quando os rios são considerados efluentes. Isso pode ser observado pelo período de estiagem de um hidrograma.

Figura 34 - Mapa de recarga

O período de estiagem foi verificado pelas vazões mínimas médias mensais medidas no posto fluviométrico de Ipiguá (6B-011) (Tabela 10), que se encontra instalado no rio Preto, tem área de contribuição de 576 km², está situado nas coordenadas 20°37'43"N e 49°21'18"E, a cerca de 4 km a jusante do limite da área de estudo e apresenta medidas de vazões do rio, das quais foram utilizadas uma série histórica de 12 anos, cujas medições estavam bastante completas.

Esses dados foram obtidos por meio do Sistema de Informações e Gerenciamento de Recursos Hídricos – SIGRH, para o período de 1989 a 2001. A média das vazões mínimas mensais é de 4,56 m³/s, ou seja, 143.804.160 m³/ano. (Tabela 10).

Tabela 10 - Vazões Mínimas Mensais (m³/s)

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
1989	6,97	5,90	5,94	5,60	---	---	4,49	4,03	3,76	3,15	3,05	3,73	
1990	5,14	4,49	4,41	6,10	5,62	5,38	5,06	4,92	4,34	3,69	3,48	3,44	
1991	3,57	6,80	6,85	7,36	6,20	5,67	5,15	4,38	4,03	3,65	3,73	4,09	
1992	5,81	6,11	6,26	6,16	6,01	4,97	4,69	4,22	4,31	4,22	3,93	3,98	
1993	3,59	---	---	4,70	4,24	4,33	3,76	3,46	3,21	2,80	2,60	3,12	
1994	6,62	---	---	---	4,70	4,16	4,16	3,42	2,89	2,48	3,22	3,61	
1995	4,06	8,36	6,95	---	---	---	---	---	3,22	3,22	3,14	3,01	
1996	5,46	4,38	5,56	4,89	4,66	---	4,24	---	---	---	3,61	3,53	
1997	5,37	---	---	4,20	---	4,80	4,52	3,40	3,05	2,72	2,85	4,42	
1998	5,03	5,61	5,61	5,75	5,37	4,89	3,93	3,93	3,61	3,97	3,12	---	
1999	7,30	6,66	7,10	5,89	5,43	5,24	4,61	3,91	3,53	2,84	2,84	2,77	
2000	4,61	---	7,25	5,52	5,20	4,79	4,57	4,08	---	---	3,53	4,13	
2001	4,79	4,97	5,20	4,26	3,96	4,13	3,62	3,00	2,53	3,16	3,00	4,43	
Média	5,26	5,92	6,11	5,49	5,14	4,84	4,40	3,89	3,50	3,26	3,24	3,69	4,56

Como pode ser observado no hidrograma de vazão (Gráfico 7), de uma série de 1989 a 2001, construído a partir dos dados de médias diárias, as vazões mínimas médias mensais estão em torno de 4 m³/s.

Em relação às áreas urbanizadas, a influência antrópica provoca modificações na recarga natural, principalmente devido à impermeabilização do terreno e ao vazamento de tubulações subterrâneas (redes de abastecimento de água e de coleta de esgoto, de galerias pluviais, entre outros) (FOSTER *et al.* 1999; LERNER 2002).

Gráfico 7 - Hidrograma do rio Preto com medidas de 1989 a 2001 (posto 6B-011 – Ipiguá)

A linha vermelha indica o escoamento básico

Fonte: Servmar (2010)

Viviani-Lima (2007), estudando os aquíferos da Região Metropolitana de São Paulo, confirmou a diferença de recarga em áreas mais e menos urbanizadas, chegando a um valor de 481 mm/a, em área urbanizada, e 311 mm/a, em área menos urbanizada, na Bacia do Alto Tietê.

Assim, a recarga neste trabalho foi diferenciada em: recarga na zona rural (R_{zr}), caracterizada pela recarga natural; e recarga na zona urbana (R_{zu}), caracterizada pela recargas natural e induzida.

A recarga natural considera o cálculo de balanço hídrico da bacia do rio Preto (representada pelos mananciais SAB e rio Preto).

Em relação à recarga na zona urbana, considera-se como 50% da recarga natural, dificultada pela impermeabilização, somada à quantidade das perdas da rede de distribuição de água, independentemente de sua fonte (SAB, SAG ou rio Preto), pois estas aportam diretamente no subsolo. O valor total atribuído às perdas corresponde a 40.204 m³/dia (14.674.460 m³/ano), com base nas médias de perdas dos últimos anos (2008 a 2011) (BOLÇONE, 2009; BOLÇONE, 2010; LEME; FREITAS, 2011; LEME; FREITAS, 2012).

Considerando-se que as vazões do posto Ipiguá refletem as contribuições de recarga (natural e induzida), bem como contribuições das águas captadas no SAG, consumidas pela população e lançadas nesta porção do rio como esgoto, pode-se também obter o cálculo de recarga a partir da Equação 25.

A contribuição do SAG (4.115.739,68 m³/ano) corresponde ao volume médio consumido nos últimos anos (8.895.885,58 m³/ano) menos a proporção média de perda na rede nos mesmos anos (4.780.145,90 m³/ano), já considerada em recarga induzida.

Sendo assim, por esse método, obtiveram-se valores de recarga na zona rural de 242 mm/ano, e recarga na zona urbana de 244 mm/ano (Tabela 11).

$$(Azr \times Rn) + (Azu \times 0,5 Rn) + Ri + SAG = 4,56 \text{ m}^3/\text{s} \quad (25)$$

Azr = Área da zona rural

Azu = Área da zona urbana

Rn = Recarga natural

Ri = Recarga induzida

SAG = Contribuição das águas do SAG

Tabela 11 - Valores de recarga para zona rural e urbana

	Área (Km ²)	Recarga natural (mm/ano)	Volume natural (m ³ /ano)	Recarga induzida (mm/ano)	Volume induzido (m ³ /ano)	Volume total (m ³ /ano)
Zona Rural	457	242	110.612.706	0	0	110.612.706
Zona Urbana	119	121	14.401.435	123	14.674.278	29.075.714
Área total	576		125.014.142		14.674.278	139.688.420
SAG						4.115.739,68
Total						143.804.160

Em relação à área de estudos (município de SJRP), que possui 431,30 km², pode-se dizer que a recarga do SAB é de 104.596.555 m³/ano, ou 3,36 m³/s. A partir dessa informação, é possível identificar o volume de água disponível no aquífero para exploração.

A disponibilidade hídrica considera o volume de recarga do aquífero subtraído do valor de Q7-10 da bacia de referência. Uma vez que a Q7-10 corresponde à vazão mínima anual de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos, esse valor corresponde ao nível de base do rio e tem correlação à recarga de água subterrânea, como explicado anteriormente. O uso desse conceito faz com que a vazão ecológica do rio seja respeitada.

O valor de Q7-10 foi obtido pelo banco de dados da Regionalização Hidrogeológica do Estado de São Paulo, do SIGRH¹. O valor calculado pelo sistema de regionalização, considerando toda a área de estudo (431,30 km²), foi de 0,683 m³/s.

O valor da disponibilidade hídrica, portanto, é de 83.057.467 m³/ano, ou 6.921.455,6 m³/mês (Tabela 12).

Tabela 12 - Valores de recarga, Q7-10 e disponibilidade hídrica da área

	m ³ /ano
Recarga total	104.596.555
Q7-10	21.539.088
Disponibilidade hídrica	83.057.467

¹ Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br>

O volume explotado pelos poços foi avaliado com base no banco de dados. Os 954 poços sem informação de vazão de exploração tiveram esta estimada, com base nos poços que possuem informação de vazão outorgada e informação de vazão medida. Dessa forma, a comparação entre a soma da vazão medida e a soma da vazão indicada no cadastro mostrou que a vazão explorada é cerca de 40% do valor da vazão indicada no cadastro. Após essa correção, obteve-se a vazão média por poço, $1.620 \text{ m}^3/\text{mês}/\text{poço}$, valor que foi adotado nos demais poços sem qualquer informação de vazão.

Assim, o volume explotado pelos 1.963 poços, equipados e localizados no município de SJRP, soma $3.164.151,4 \text{ m}^3/\text{mês}$. Sendo o valor da disponibilidade hídrica $6.921.455,6 \text{ m}^3/\text{mês}$, isso significa que cerca de 45% do recurso subterrâneo está sendo explorado. No entanto, considerando que cerca de 80% dos poços estão distribuídos em aproximadamente 20% da área, provocando desse modo um desequilíbrio entre a disponibilidade e a demanda nesta área, requer-se a adoção de medidas de controle.

5.3.2 Demanda da água subterrânea

A partir do georreferenciamento dos dados de poços e de análises simples de estatística, foi possível afirmar que, do total de 929 poços com essa informação, o SAB é o principal fornecedor de água para o município de SJRP (Figura 35), complementado pelo Sistema Aquífero Guarani, totalizando, assim, 70% do abastecimento por águas subterrâneas.

Na área de estudos foram cadastrados 2.068 poços tubulares. A maioria desses poços que apresentam informação (895 poços) encontra-se com equipamento (845 poços, ou 95%), ou seja, provavelmente estão ativos e com bombeamento (Figura 36), mas a grande maioria (1.637 poços, ou 79%) não apresenta outorga (Figura 4), como já discutido anteriormente.

MAPA DE SISTEMA AQUÍFERO EXPLOTADO

MAPA DE LOCALIZAÇÃO

Figura 35 - Mapa de sistemas aquíferos explotados por poços

MAPA DE ESTADO DO POÇO

LEGENDA

Área urbana atual	★ DESATIVADO
Limite municipal	● EQUIPADO
Hidrografia	■ TAMPONADO
Reservatório	

Fonte: DAEE, PMSJRP, IBGE

0 1 2 4 6 km

Projeção UTM Fuso 22 Sul
Datum Horizontal SAD 69

MAPA DE LOCALIZAÇÃO

Figura 36 - Mapa de estado dos poços

Em relação à informação de quantidade de vazão de exploração, esta será baseada na vazão corrigida. Nesse caso, o volume explotado pelos 1.963 poços, equipados e localizados no município de SJRP, soma 3.164.151,4 m³/mês, ou 105.471,7 m³/dia. Essa exploração de água subterrânea, somada ao consumo de água superficial do rio Preto, ou seja, 20.614 m³/dia (LEME; FREITAS, 2012), totaliza 126.086 m³/dia. Para uma população de 408.258 habitantes (IBGE, 2012), isso significa que o consumo de água é de 309 L/hab/dia.

Vale lembrar que, devido à outorga de poços não ser uma prática comum, o número real de poços existentes na área pode ser maior. Consequentemente, o volume diário de água consumido pela população também deve ser maior. No entanto, acredita-se que esse cadastro represente um percentual elevado do total de poços existentes.

O principal tipo de uso de água subterrânea, em SJRP, é o uso doméstico (31%). No entanto, os principais usuários têm como finalidade o abastecimento público (48%) (Figura 37 e Gráficos 8 e 9).

Os principais valores de vazão de exploração vão até 1.000 m³/mês, ocorrendo em 1.056 poços, sendo que as maiores vazões — de 6.000 m³/mês a 25.000 m³/mês —, ocorrem em apenas 137 poços, localizados na região do limite da área urbana de SJRP (Tabela 13 e Figura 38).

De maneira semelhante, o mapa de vazão específica, apesar de haver menos informações (532 poços), também ilustra que as principais vazões específicas vão até 1 m³/h/mês, ocorrendo em 451 poços, sendo que as de maiores valores, até 3 m³/h/mês (68 poços) e acima de 3 m³/h/mês (13 poços), tendem a ocorrer mais nas bordas da área urbana do município (Figura 39 e Tabela 14).

MAPA DE USO DA ÁGUA

MAPA DE LOCALIZAÇÃO

Figura 37 - Mapa de uso declarado da água dos poços

Gráfico 8 - Tipo de uso das águas subterrâneas por poço cadastrado

NI: dado não informado

Gráfico 9 - Vazão por tipo de uso das águas subterrâneas por poço cadastrado

NI: dado não informado

Tabela 13 - Vazão corrigida (m³/mês) para cada tipo de uso da água

Uso e Exploração da água						
Tipo de uso	Poços	Vazão corrigida (m³/mês)				
		Soma	Mín	Média	Mediana	Máx
Industrial (sanitário e processo)	120	139.222,74	4,4	1.609,77	928,2	16.000
Abastecimento público	241	1.509.065,08	25,02	6261,68	5472	24.783,75
Doméstico	623	1.045.867,43	16,2	3.272,18	3.246	11.223
NI	906	394.897,3	10	435,86	128	10.889,5
Outros	73	75.098,84	8,8	994,732	681	8600
TOTAL	1.963	3.164.151,4

Figura 38 - Mapa de vazão de exploração dos poços tubulares

Figura 39 - Mapa de vazão específica dos poços tubulares

Tabela 14 - Vazão específica dos poços tubulares

Vazão (m³/mês)	Poços	Vazão específica (m³/h/m)	Poços
< 1.000	1.056	< 1	451
1.000 - 6.000	770	1 - 3	68
> 6.000	137	> 3	13

O mapa de classes de vazão permite observar, claramente, que o maior volume de exploração, cuja soma é 2.633.225 m³/mês, está situado na zona urbana de SJRP. A concentração de poços com distâncias curtas um do outro pode provocar interferência entre eles, ocasionada pela sobreposição dos cones de rebaixamento de dois ou mais poços em bombeamento.

A interferência entre poços foi observada em SJRP, conforme estudos do DAEE (2011), em que resultados de ensaios de bombeamento e de monitoramento em 4 poços, pelo período de 24 h, indicaram interferência e maiores rebaixamentos dos níveis no período da tarde, período de maior demanda de água pela população, e recuperação dos mesmos no período noturno.

6 MODELO CONCEITUAL DE FLUXO

O SAB apresenta comportamento de aquífero granular, moderadamente permeável, livre, mas com condições de semiconfinamento em algumas áreas que apresentam níveis argilosos.

Na área de estudos, o SAB é constituído pelos aquíferos Adamantina e Santo Anastácio, sendo subdivididos em cinco camadas de comportamentos hidrogeológicos diferentes: solo, Adamantina A, Adamantina B, Santo Anastácio e Serra Geral (Figura 40). A camada de solo é geralmente pouco espessa, apresentando em torno de 30 m de espessura recobrando o Aquífero Adamantina. A Formação Adamantina apresenta maior espessura, média de 100 m, e é considerada moderadamente permeável devido ao teor relativamente elevado de material argiloso e siltoso. Esta camada é subdividida em duas, devido às diferentes características litológicas, sendo a camada Adamantina B mais rica em sedimentos finos e com presença de níveis pelíticos, o que confere uma menor condutividade hidráulica.

Figura 40 - Modelo Conceitual de fluxo para o Sistema Aquífero Bauru na região de São José do Rio Preto

Já a camada Santo Anastácio ocorre com espessura média de 50 m e possui características que permitem uma maior condutividade hidráulica. A última camada, Serra Geral, caracteriza-se por ser um aquífero fraturado de baixa permeabilidade.

A atribuição de parâmetros hidrogeológicos para cada camada (Tabela 15) se baseou em dados de campo e em valores encontrados na literatura (Tabela 3).

Tabela 15 - Parâmetros de cada camada modelada adotados como primeira tentativa de calibração do modelo numérico

Camada	Espessuras médias (m)	K (m/dia)	n _{ef}	n
Adamantina A	40	0,600	0,100	0,150
Adamantina B	60	0,400	0,090	0,130
Santo Anastácio	50	1,98	0,120	0,250
Serra Geral	-----	0,005	0,005	0,005

As áreas de recargas ocorrem, principalmente, nos altos topográficos com baixa declividade, sendo que a recarga é distinta na zona rural e urbana; já as áreas de descargas, nas drenagens (rios e córregos), sendo o rio Preto o principal local de descarga.

Na zona urbana, ocorre a recarga natural, que provém de águas pluviais. A recarga natural se soma à recarga artificial ou induzida, originada do vazamento da rede de esgoto e de distribuição de água. Já na zona rural, ocorre, basicamente, recarga natural.

Admite-se para o estudo uma sub-bacia do rio Preto, não havendo perda de água nas sub-bacias vizinhas e na base quase impermeável, na camada Serra Geral.

A análise dos mapas potenciométricos indica que os níveis são relativamente rasos, tendem a acompanhar a topografia e possuem sentido de fluxo para as drenagens, sendo o rio Preto a principal drenagem da área.

Constataram-se fluxos subterrâneos locais não interferidos por bombeamento, o que mantém o nível freático, bem como o nível de base de córregos menores.

A análise detalhada dos mapas potenciométricos de diferentes décadas deixa claro, principalmente ao observar poços com profundidades maiores que 90 m (Figuras 27 e 29), que ocorreu um rebaixamento acentuado dos níveis potenciométricos na área urbana do município, provavelmente devido ao grande aumento do número de poços ao longo do tempo e consequente aumento na exploração do SAB. As evidências para isso consistem na verificação da existência de cone de rebaixamento e espaçamento menor entre linhas potenciométricas, nas porções sul e oeste da área urbana de SJRP.

Já a condição próxima ao fluxo natural, ou seja, sem interferência de bombeamento de poços, é observada no mapa potenciométrico das décadas anteriores a 1980 (Figura 25), período com menor número de poços construídos, indicando um fluxo, principalmente para as drenagens.

O fluxo ocorre, sobretudo, horizontalmente e, de maneira mais lenta, verticalmente. No entanto, em camadas com altos valores de condutividade hidráulica, o fluxo tende a ser vertical, como no Aquífero Santo Anastácio; ao contrário, o fluxo tende a ser extremamente lento e horizontal, no Aquífero Serra Geral.

7 MODELO NUMÉRICO DE FLUXO

O modelo numérico de fluxo do SAB gerado para o município de SJRP foi, primeiramente, calibrado em regime estacionário para duas situações: pré-exploração e bombeamento atual, com extrações; e, posteriormente, foram gerados cenários futuros, sendo o modelo de bombeamento atual rodado em regime transiente.

O cenário definido como “pré-exploração” corresponde à época anterior à década de 1980, quando a expansão urbana era significativamente menor do que a atual, havendo menor influência da ocupação humana no sistema de fluxo do sistema aquífero em questão. Essa situação corresponde às condições normais de recarga e drenagem sem a interferência de poços no aquífero.

O modelo mostrou-se bastante consistente com o modelo conceitual, visto que sua calibração foi atingida valendo-se tanto dos critérios quantitativos quanto dos critérios qualitativos.

As principais premissas que baseiam a construção deste modelo numérico são que toda a água aportada à área modelada somente sai da área através do rio Preto e que o cálculo do modelo foi realizado em estado estacionário. Estas premissas regulamentam que não há perda de água subterrânea para bacias hidrográficas vizinhas e que o modelo não reconhece o fator tempo no fluxo das águas, sobretudo no deslocamento subterrâneo das mesmas.

O modelo pré-bombeamento tem a principal função de proporcionar um entendimento mais aprofundado do SAB na área de estudos, servindo como base para a construção do modelo atual de fluxo, no qual foram feitos cenários de exploração atual e futuros, servindo como indicador para a devida gestão dos recursos hídricos no município.

7.1 Definição da área a ser modelada e da malha de diferenças finitas

A área a ser modelada, de 369 km², foi definida de modo a que abrangesse toda a parte da área rural, mas principalmente toda a área urbana de SJRP. Foi delimitada através dos divisores de águas, delimitando uma bacia hidrográfica, nas quais foi atribuída condição de tipo 2 ou Neuman (fluxo especificado), admitindo-se a condição de “não-fluxo” (ou fluxo zero) para os divisores de águas (Figura 41).

Figura 41 - Área modelada mostrando a condição de contorno atribuída

Após a definição da área a ser modelada, foi definida também a malha de diferenças finitas para a construção do modelo. Como se trata de um modelo regional, optou-se por uma malha regular, com 120 linhas e 120 colunas, totalizando 14.400 células por camada. A área de cada célula é de aproximadamente 0,05 km², tendo cada célula um tamanho de 240 m x 240 m, representando apenas 0,015% da área total modelada.

A área urbana (aproximadamente 100 km²), onde há maior concentração de poços, foi subdividida em célula de aproximadamente 0,003 km² (60 m x 60 m), representando apenas 0,003% da área refinada ou 0,0009% área total modelada.

7.2 Entrada de dados

Após terem sido delimitadas a área a ser modelada e também a malha de diferenças finitas, pôde-se iniciar a entrada de dados no modelo. Tais dados consistiram na inserção: das elevações do terreno e dos contatos entre as quatro camadas litológicas, definidas quando da elaboração do modelo conceitual; das condições de contorno; da recarga; dos dados hidrogeológicos correspondentes às unidades (condutividade hidráulica, porosidade, porosidade efetiva, coeficiente de armazenamento); e dos poços de observação para a calibração do modelo.

7.2.1 Topografia e demais elevações

Primeiramente, foram importados os dados referentes à topografia da área, correspondente ao MDT gerado pelo software ArcGis 2010, e também às elevações dos contatos entre as unidades definidas no modelo conceitual.

Foram então verificadas e corrigidas algumas imperfeições, notavelmente nas bordas do modelo, geradas pela extrapolação de valores em áreas com menor concentração de informações (Figura 42).

Figura 42 - Topografia e elevações das camadas do modelo

7.2.2 Condições de contorno

A área modelada é amplamente cortada por rios e córregos de porte variado, tendo como principal drenagem o rio Preto, sendo este interpretado como a principal área de descarga do SAB na região.

Para representar a hidrografia da área interna do modelo, foram utilizadas condições de contorno do tipo 3 ou Cauchy (fluxo dependente da carga hidráulica).

O pacote *River* foi utilizado para representar a principal drenagem do modelo, ou seja, o rio Preto, e o pacote *Drain* representou os demais córregos e drenagens. E, como explicado anteriormente, para as condições em represa no centro da área modelada, utilizou-se condições do tipo 1 ou Dirichlet (carga especificada), admitindo-se cargas constantes para os mesmos, e condições de tipo 2 ou Neuman (fluxo especificado), admitindo-se a condição de “não-fluxo” para os divisores de águas e recarga na primeira camada (Figura 43).

Figura 43 - Condições de contorno da área do modelo.

Uma dificuldade encontrada ao se atribuir esse tipo de condição de contorno ao modelo foi a não disponibilidade da condutância dos rios e córregos da região. Assim, valores iniciais foram estimados para os drenos e para o rio Preto, tomando-se como base a condutividade hidráulica de uma areia siltosa para o leito do rio (aproximadamente 10^{-6} m/s) (FREEZE; CHERRY, 1979), estimando-se a largura do rio através do programa Google Earth. Para os drenos com corpos d'água maiores, assumiu-se uma condutância igual à do rio Preto e igual a 50% desse valor para as drenagens menores, como mostrado na Tabela 16.

Tabela 16 - Condições iniciais de condutância atribuídas às condições dos tipos rio e dreno

Cursos d'água	Condição de contorno	Condutância (m²/dia)
Rio Preto	<i>River</i>	100
Córregos	<i>Drain</i>	100
Drenagens menores	<i>Drain</i>	50

7.2.3 Recarga e evapotranspiração

Na área sem ocupação urbana foi adotado um valor médio de evapotranspiração de 728 mm/ano, com base no balanço hídrico e a uma profundidade média de 25 m, para o modelo exploração atual, e de 5 m para o modelo pré-exploração, com base no nível estático dos poços.

Quanto à recarga, determinou-se que para a área urbana o valor é similar à maior recarga determinada para a zona rural (354 mm/ano), ou seja, semelhante às áreas de solo arenoso e declividade baixa.

No modelo pré-exploração, a área urbana utilizada foi a da década de 1970, e, para o modelo de exploração atual, utilizou-se o limite da área urbana atual.

Os valores atribuídos foram semelhantes aos que foram determinados na modelagem realizada por Servmar (2008) para a mesma área de estudos. As Figuras 44 e 45 mostram a área modelada e as regiões onde foram adotadas as diferentes taxas de recarga, juntamente aos valores atribuídos para cada uma delas.

Figura 44 - Recargas atribuídas ao modelo pré-exploração (anterior à década de 1980)

Figura 45 - Recargas atribuídas ao modelo exploração atual

7.2.4 Parâmetros hidrogeológicos

Após a análise dos dados geológicos e hidrogeológicos da área de estudos foi possível a caracterização hidráulica das unidades definidas no modelo conceitual e a atribuição dos valores iniciais de condutividades hidráulicas horizontais e verticais e de porosidades total e efetiva para cada uma delas, a serem inseridos no modelo numérico.

Como já discutido anteriormente, a atribuição de valores de condutividade hidráulica para cada uma das unidades definidas não se mostrou uma tarefa simples, já que os testes de bombeamento disponíveis referem-se ao sistema aquífero como um todo e não distinguem os diferentes aquíferos e suas camadas.

Assim, para a atribuição desses parâmetros foram utilizadas as características litológicas de cada unidade, amparadas principalmente pela faixa de variação de condutividade hidráulica determinadas pelos ensaios de campo, mas também pelos valores encontrados na literatura.

Para a determinação das características hidráulicas da camada superior de solo também foram utilizados os valores de condutividade hidráulica determinados para os poços da região, já que se inferiu que este material provavelmente seja de alguma forma relacionado com a geologia presente em subsuperfície. Adicionalmente, analisou-se o mapa pedológico da área de estudos (IPT, 1999).

Admitiu-se para todas as camadas uma anisotropia vertical, sendo que os valores de condutividade hidráulica verticais têm magnitude igual a 10% do valor de condutividade horizontal (ANDERSON; WOESSNER, 1992). Como reforço a essa estimativa, Bertolo (2001) determinou para a Formação Adamantina na região de Urânia (SP) uma anisotropia vertical semelhante à adotada.

Quanto aos dados de porosidade, teve-se como base para os valores apenas os dados encontrados na literatura e a geologia das mesmas, já que o banco de dados desta pesquisa não contava com esse tipo de informações.

A Tabela 17 apresenta um resumo das principais características de cada unidade e os valores determinados como primeira tentativa de calibração do modelo numérico. A Figura 46 ilustra essas diferentes camadas.

Tabela 17 - Parâmetros de cada camada modelada adotados como primeira tentativa de calibração do modelo numérico

Camada	Características	Espessuras médias (m)	Kx=Ky (m/dia)	Kz (m/dia)	n _{ef}	n
Adamantina A	Arenitos de granulação fina, bem selecionados, relativamente pobres em níveis argilosos	40	0,600	0,060	0,100	0,150
Adamantina B	Arenitos de granulação fina, bem selecionados, mais ricos em sedimentos finos, por vezes apresentando níveis pelíticos	60	0,400	0,040	0,090	0,130
Santo Anastácio	Arenitos de granulação fina, mal selecionados, imaturos, com pouca matriz pelítica.	50	1,98	0,198	0,120	0,250
Serra Geral	Rochas basálticas com diferentes níveis de alteração	-----	0,005	0,0005	0,005	0,005

Figura 46 - Camadas hidrogeológicas

7.2.5 Poços de bombeamento e observação

Para o modelo do tipo pré-exploração, foram inseridos na área apenas os poços perfurados anteriormente às décadas anteriores a 1980, ativos e com informação de nível estático medido, totalizando, portanto, 19 poços. Para permitir a calibração do modelo, estes foram utilizados como poços de observação, tendo como base o nível dinâmico medido, e inseridos também como poços de bombeamento (Figura 47).

Figura 47 - Localização dos poços de observação na área do modelo pré-exploração

Para o modelo do tipo bombeamento atual, foram inseridos na área todos os poços que se encontram na área modelada, ativos, com informação de cota e profundidade do poço e/ou filtro e com informação de nível dinâmico medido, totalizando, portanto, 730 poços de bombeamento (vazão total de 66.602 m³/dia) e 411 poços de observação. Para permitir a calibração do modelo, os 411 poços de

observação foram utilizados tendo como base o nível dinâmico medido, tendo sido inseridos também como poços de bombeamento, sendo o valor de vazão um valor corrigido, com base nos poços que possuíam essa informação (Figura 48).

Figura 48 - Localização dos poços de observação e bombeamento na área do modelo atual

7.3 Calibração do modelo numérico

A calibração do modelo foi realizada para as duas situações pré-bombeamento e exploração atual, ambas pelo método da “tentativa e erro”, em que sucessivas simulações são processadas variando-se, principalmente, valores de condutividades hidráulicas, recarga e condutância dos rios.

É importante ressaltar que, durante a calibração do modelo, optou-se pela eliminação da camada de solo. O motivo para isso é o fato de que esta é uma camada de espessura muito irregular, mas em geral pouco espessa. Assim, uma

grande parte das células dessa camada ficava seca (nível d'água calculado abaixo da base da célula), como já era esperado. Por isso, preferiu-se sua eliminação, já que na grande maioria de sua extensão a camada de solo representa uma zona não-saturada, que não pode ser simulada pelo MODFLOW.

7.3.1 Modelo pré-exploração em estado estacionário

A escolha dos alvos de calibração baseou-se no fato de que este modelo representa a situação “pré-exploração”. Assim, foram selecionados 19 poços com informação de data de construção anterior aos anos de 1980 e com informação de nível estático.

Os parâmetros hidrogeológicos foram ajustados para obter a calibração, respeitando-se os valores definidos para a área com base em referência e valores dos poços. No entanto, avaliando-se os dados de condutividade hidráulica dos poços cadastrados na área (Tabela 3), percebeu-se que a condutividade hidráulica do Aquífero Adamantina no lado oeste é superior ao lado leste; com isso, a calibração foi ajustada considerando-se a porção oeste pouco mais condutível que a porção leste. A Tabela 18 apresenta os valores finais de condutividades hidráulicas e de porosidades total e efetiva.

Tabela 18 - Valores calibrados de condutividades hidráulicas e porosidades

Camada	Kx=Ky (m/dia)	Kz (m/dia)	n _{ef}	n
Adamantina A (leste)	0,650	0,0650	0,15	0,3
Adamantina A (oeste)	0,795	0,0795	0,15	0,3
Adamantina B (leste)	0,432	0,0432	0,10	0,15
Adamantina B (oeste)	0,599	0,0599	0,10	0,15
Santo Anastácio	1,99	0,199	0,12	0,25
Serra Geral	0,0005	0,00005	0,005	0,005

Os valores de recarga também foram ajustados para obter a calibração, respeitando-se os valores previamente definidos para a área. A evapotranspiração teve valor de 700 mm/ano e profundidade 5 m. A Tabela 19 mostra os valores de recarga e condutância dos rios e drenos, ajustados para o modelo calibrado.

Tabela 19 - Valores calibrados de condutância e recarga

Valores calibrados			
Condutância (m ² /dia)		Recarga mm/ano	
Rio	100	Área Urbana	374
Drenos (córregos)	100	Zona Rural	295, 234 e 324
Drenos (drenagens menores)	50		

A Tabela 20 apresenta os valores gerados pelo aplicativo Visual MODFLOW em relação ao balanço de massas. Pode-se observar que a discrepância foi de 0,00041%. Ou seja, muito inferior ao valor máximo aceitável de 1%. Pelo gráfico de balanço de massas (Gráfico 10), observa-se que, como esperado, a entrada de água se faz quase que totalmente pela precipitação (recarga) e que a descarga se dá pelas drenagens e represa.

A correlação dos resíduos de cargas (média normalizada) é apresentada no Gráfico 11. Pode-se observar que a média normalizada dos resíduos de carga foi de 9,183%, ou seja, menor do que o valor máximo permitido de 10%.

Utilizaram-se também como critério de calibração as vazões registradas no posto fluviométrico de Ipiguá (código 6B-11), localizado no rio Preto nas coordenadas 20°37'43"N e 49°21'18"E, distante aproximadamente 4 km a jusante do limite da área de estudos. Esta estação apresenta as vazões do rio, com 576 km² de área de contribuição. Para tal área, observa-se uma vazão de 1,43 E⁸ m³/ano.

Gráfico 10 - Balanço de massas

Gráfico 11 - Correlação entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas

Fazendo a proporção com a área modelada (369 km²), obtém-se a vazão de 0,91 E⁸ m³/ano. Esta vazão deve corresponder à soma dos volumes de descarga apresentados por todas as drenagens presentes na área modelada (rio, drenos e cargas constantes). Somando-se esses valores (apresentados na Tabela 20), obtém-se a vazão de 1,18 E⁸ m³/ano, ou seja, próxima do valor real.

Portanto, em relação aos critérios quantitativos de calibração, o modelo elaborado encontra-se devidamente calibrado.

Tabela 20 - Valores calibrados de condutância e recarga

Balanço de massas		
	Entrada (10 E⁸ m³)	Saída (10 E⁸ m³)
Cargas constantes	0,00290764	0,090354
Drenos	0	0,9985599
Rio	0,00183143	0,0944
Poço	0	0,00384683
Evapotranspiração	0	0,01309725
Recarga	1,195478	0
Total	1,200217	1,200258

Quanto ao critério qualitativo de calibração, foram comparados os mapas potenciométricos gerados pelo modelo numérico (Figuras 49 e 50) com o mapa elaborado para os poços construídos anteriormente a 1980 (Figura 25). De maneira geral, esses mapas se mostraram bastante similares, apresentando diferenças notadamente devido ao fato de o modelo numérico gerar mapas potenciométricos para cada uma das camadas modeladas, enquanto o mapa potenciométrico manual foi gerado através de dados de poços que possuíam filtros ao longo de toda a sua extensão.

Assim, o modelo gerado foi considerado calibrado valendo-se tanto dos critérios quantitativos quanto dos critérios qualitativos.

Figura 49 - Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Bauru resultante do modelo numérico de fluxo tipo "pré-exploração"

Figura 50 - Mapa potenciométrico e seção gerados pelo modelo numérico de fluxo tipo “pré-exploração”

7.3.2 Modelo bombeamento atual em estado estacionário

O modelo que representa a situação de exploração atual teve como base o modelo pré-exploração calibrado, embora com a zona urbana mais ampla e, portanto, recarga urbana em maior área. Além disso, foram inseridos os 411 poços com informação de perfil construtivo e carga hidráulica, a partir do nível dinâmico, para permitir a calibração, e 730 poços de bombeamento com a informação de perfil

construtivo, cota e vazão de exploração.

A situação atual baseia-se no cálculo das ações de bombeamento em suas respectivas vazões, calibrando-se o modelo a partir dos níveis dinâmicos conhecidos dos poços, das taxas de recargas indicadas acima e do balanço hídrico de entrada e saída de água do sistema.

Os parâmetros hidrogeológicos foram os mesmos para o modelo pré-exploração, assim como as condições de contorno (rio, drenos e carga constante). Já para os valores de recarga, apenas a recarga urbana foi alterada, ocupando maior área e com seu valor pouco ajustado para obter a calibração (350 mm/ano), respeitando-se os valores previamente definidos para a área. Além disso, a evapotranspiração teve profundidade maior, 25 m, devido ao rebaixamento provocado pelos poços em bombeamento.

A Tabela 21 apresenta os valores gerados pelo software Visual MODFLOW em relação ao balanço de massas. Pode-se observar que a discrepância foi de 0,000046%. Ou seja, muito inferior ao valor máximo aceitável de 1%. Pelo gráfico de balanço de massas (Gráfico 12), observa-se que, como esperado, a entrada de água se faz quase que totalmente pela precipitação (recarga) e que a descarga se dá pelas drenagens, rio e represa.

A média normalizada dos resíduos de carga foi de 9,816%, ou seja, menor do que o valor máximo permitido de 10% (Gráfico 13).

Utilizaram-se também como critério de calibração as vazões registradas no posto fluviométrico de Ipiguá (código 6B-11), localizado no rio Preto nas coordenadas 20°37'43"N e 49°21'18"E, distante aproximadamente 4 km a jusante do limite da área de estudo. Esta estação apresenta as vazões do rio, com 576 km² de área de contribuição. Para tal área, observa-se uma vazão de 1,43 E⁸ m³/ano.

Fazendo-se a proporção com a área modelada (369 km²), obtém-se a vazão de 0,91 E⁸ m³/ano. Esta vazão deve corresponder à soma dos volumes de descarga apresentados por todas as drenagens presentes na área modelada (rio, drenos e cargas constantes). Somando-se esses valores (apresentados na Tabela 21), obtém-se a vazão de 0,55 E⁸ m³/ano, ou seja, muito próxima do valor real.

Portanto, em relação aos critérios quantitativos de calibração, o modelo elaborado encontra-se devidamente calibrado.

Tabela 21 - Valores calibrados de condutância e recarga

Balanço de massas		
	Entrada (10 E ⁸ m ³)	Saída (10 E ⁸ m ³)
Cargas constantes	0.00486007	0,01328738
Drenos	0	0,3767888
Rio	0,00554172	0,1572965
Recarga	1,185759	0
Poços	0	0,2238886
Evapotranspiração	0	0,4248528
Total	1,196161	1,196114

Gráfico 12 - Balanço de massas

Gráfico 13 - Correlação entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas

Quanto ao critério qualitativo de calibração, foram comparados os mapas potenciométricos gerados pelo modelo numérico (Figuras 51 e 52) com o mapa elaborado para os poços construídos na década de 2000 (Figuras 28 e 29). De uma maneira geral, esses mapas se mostraram bastante similares, apresentando diferenças notadamente devido ao fato de o modelo numérico gerar mapas potenciométricos para cada uma das camadas modeladas, enquanto o mapa potenciométrico manual foi gerado através de dados de poços que possuíam filtros ao longo de toda a sua extensão.

Assim, o modelo gerado foi considerado calibrado valendo-se tanto dos critérios quantitativos quanto dos critérios qualitativos.

A diferença entre o modelo atual calibrado e o real pode ser atribuída em decorrência de alguns fatores, podendo-se destacar que:

- O modelo não considera a transiência do deslocamento da água subterrânea ao longo de toda extensão do aquífero; e
- O regime de bombeamento dos poços não é ininterrupto, sendo muitas vezes condicionado pela reserva dos aquíferos e pelo perfil de consumo dos diferentes usuários e, nesta condição, os níveis dinâmicos podem ser recuperados pela paralisação temporária do bombeamento.

Figura 51 - Mapa potenciométrico do Sistema Aquífero Bauru resultante do modelo numérico de fluxo tipo “bombeamento atual”

Figura 52 - Mapa potenciométrico e seção gerados pelo modelo numérico de fluxo tipo “bombeamento atual”

7.4 Análise de sensibilidade

Na análise de sensibilidade, os valores calibrados, condutividades hidráulicas e recarga foram sistematicamente variados dentro de uma margem estabelecida (+50% e -50%). Observou-se, então, como essas mudanças afetam as cargas hidráulicas simuladas.

7.4.1 Modelo pré-exploração em estado estacionário

A Tabela 22 mostra os resultados das sucessivas variações das condutividades hidráulicas horizontais de cada camada e dos valores de recarga, com variações dos parâmetros de +50% e -50%.

Tabela 22 - Análise de sensibilidade realizada para os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga

Análise de sensibilidade			
Parâmetro variado	Porcentagem	Valor	RMS normalizado (%)
K horizontal leste Adamantina A	+50%	0,972 m/d	9,149
	-50%	0,324 m/d	9,403
K vertical leste Adamantina A	+50%	0,0972 m/d	9,138
	-50%	0,0324 m/d	9,236
K horizontal oeste Adamantina A	+50%	1,198 m/d	9.290
	-50%	0,399 m/d	9.186
K vertical oeste Adamantina A	+50%	1,0198 m/d	9,153
	-50%	0,0399 m/d	9,173
K horizontal leste Adamantina B	+50%	0,648 m/d	9.158
	-50%	0,216 m/d	9.168
K vertical oeste Adamantina A	+50%	0,0648 m/d	9,127
	-50%	0,0216 m/d	9,341
K horizontal oeste Adamantina B	+50%	0,897 m/d	9.289
	-50%	0,299 m/d	9.286
K vertical oeste Adamantina B	+50%	0,0897 m/d	9,170
	-50%	0,0299 m/d	9,192
K horizontal Santo Anastácio	+50%	3,9 m/d	10.434
	-50%	1,3 m/d	8.877
K vertical Santo Anastácio	+50%	0,39 m/d	9,159
	-50%	0,13 m/d	9,152
K horizontal Serra Geral	+50%	0,00075 m/d	9.155
	-50%	0,00025 m/d	9.155
K vertical Serra Geral	+50%	0,000075 m/d	9,152
	-50%	0,000025 m/d	9,152
Recarga Área Urbana	+25%	467 mm/ano	9,007
	+50%	561 mm/ano	9,165
	-25%	280 mm/ano	9,770
	-50%	187 mm/ano	10,803

Continua

Continuação

Análise de sensibilidade			
Parâmetro variado	Porcentagem	Valor	RMS normalizado (%)
Recarga Área Rural 1	+25%	292 mm/ano	9,185
	+50%	351 mm/ano	9,189
	-25%	175 mm/ano	9,180
	-50%	117 mm/ano	9,177
Recarga Área Rural 2	+25%	368 mm/ano	9,138
	+50%	443 mm/ano	9,241
	-25%	221 mm/ano	9,408
	-50%	148 mm/ano	9,845

Pode-se observar claramente que o modelo é mais sensível a variações nos valores horizontais de condutividades, sendo que os valores da camada Santo Anastácio apresentaram maiores variações nas cargas hidráulicas simuladas. Maiores variações ocorreram, também, com valores da recarga urbana. O modelo mostrou-se pouco sensível às variações nas condutividades hidráulicas verticais e às mudanças nas taxas das demais recargas.

7.4.2 Modelo bombeamento atual em estado estacionário

A Tabela 23 mostra os resultados das sucessivas variações das condutividades hidráulicas horizontais e verticais de cada camada e dos valores de recarga.

Tabela 23 - Análise de sensibilidade realizada para os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga

Análise de sensibilidade			
Parâmetro variado	Porcentagem	Valor	RMS normalizado (%)
K horizontal leste Adamantina A	+50%	0,972 m/d	9,854
	-50%	0,324 m/d	12,032
K vertical leste Adamantina A	+50%	0,0972 m/d	9,915
	-50%	0,0324 m/d	11,909
K horizontal oeste Adamantina A	+50%	1,198 m/d	11,618
	-50%	0,399 m/d	11,987
K vertical oeste Adamantina A	+50%	1,0198 m/d	11,744
	-50%	0,0399 m/d	11,810

Continua

Continuação

Análise de sensibilidade			
Parâmetro variado	Porcentagem	Valor	RMS normalizado (%)
K horizontal leste Adamantina B	+50%	0,648 m/d	11.810
	-50%	0,216 m/d	11.884
K vertical leste Adamantina B	+50%	0,0648 m/d	11,766
	-50%	0,0216 m/d	12,039
K horizontal oeste Adamantina B	+50%	0,897 m/d	11.573
	-50%	0,299 m/d	11.797
K vertical oeste Adamantina B	+50%	0,0897 m/d	11,623
	-50%	0,0299 m/d	11,616
K horizontal Santo Anastácio	+50%	3,9 m/d	11.546
	-50%	1,3 m/d	12.164
K vertical Santo Anastácio	+50%	0,39 m/d	11,732
	-50%	0,13 m/d	11,767
K horizontal Serra Geral	+50%	0,00075 m/d	11.741
	-50%	0,00025 m/d	11.741
K vertical Serra Geral	+50%	0,000075 m/d	11,741
	-50%	0,000025 m/d	11,741
Recarga Área Urbana	+25%	437 mm/ano	10,536
	+50%	525 mm/ano	11,103
	-25%	262 mm/ano	10,436
	-50%	175 mm/ano	9,298
Recarga Área Rural 1	+25%	292 mm/ano	9,954
	+50%	351 mm/ano	9,956
	-25%	175 mm/ano	9,950
	-50%	117 mm/ano	9,948
Recarga Área Rural 2	+25%	368 mm/ano	10,098
	+50%	443 mm/ano	10,238
	-25%	221 mm/ano	9,825
	-50%	148 mm/ano	9,728

Pode-se observar claramente que o modelo é mais sensível a variações nos valores de condutividades horizontais, sendo que os valores das camadas Adamantina A e Santo Anastácio apresentaram maiores variações nas cargas hidráulicas simuladas. O modelo mostrou-se pouco sensível às variações nas condutividades hidráulicas verticais e às mudanças nas taxas de recarga.

8 CENÁRIOS DE EXPLOTAÇÃO FUTUROS E CENÁRIOS ALTERNATIVOS

Com base no estado atual e no crescimento da cidade e em sua ocupação, foram criados cenários prospectivos para antecipar problemas relacionados ao *stress* do aquífero, que se reflete, conseqüentemente, no prejuízo do abastecimento por água subterrânea.

Diferentes cenários podem ser criados, tais como um aumento da perfuração dos poços, a impermeabilização total da área urbana, a diminuição ou aumento da recarga, entre outros.

Modelar numericamente aquíferos e gerar cenários hipotéticos permitiu analisar a variabilidade espacial do fluxo subterrâneo e visualizar possíveis reações do sistema aquífero às mudanças inseridas no modelo, inclusive como o aquífero se comportaria em situação de *stress*, ou seja, em um cenário desfavorável do ponto de vista hídrico.

Para auxílio à gestão de águas subterrâneas, com base num modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas bem definido e, assim, com a construção de um modelo numérico de fluxo bem calibrado, podem-se simular cenários prováveis futuros e prever situações prejudiciais ao abastecimento da população, tais como a redução dos níveis e o aumento dos custos do bombeamento.

Para a realização dos cenários, foram inseridos no modelo os dados dos poços, tais como: coordenadas, vazão de exploração, profundidade de exploração e nível dinâmico. Para isso, foram considerados 730 poços, que apresentavam dados de coordenada, que exploram apenas o SAB e com as vazões corrigidas. Admitiu-se que os bombeamentos ocorrem 20 h/dia.

Sendo assim, foram simulados cenários no modelo numérico em estado estacionário, detalhados a seguir:

- O primeiro cenário simulado consistiu em utilizar os mesmos poços de bombeamento localizados na área, mas com suas vazões dobradas (133.206 m³/dia);
- O segundo cenário simulado triplicou as vazões atuais dos poços (199.809 m³/dia);
- O terceiro cenário simulado consistiu em avaliar o rebaixamento apenas nos poços públicos. Para isso, foi analisado, primeiramente, o rebaixamento

provocado apenas pelos 213 poços públicos cadastrados, com vazão de 39.662 m³/dia e com informações suficientes para essa avaliação e, posteriormente, foi comparada a situação de bombeamento atual, com 730 poços cadastrados com suas respectivas vazões.

Conforme a simulação dos três cenários de bombeamento comparando-os ao cenário atual, observou-se que:

- No primeiro cenário simulado, com as vazões dos poços dobradas (133.206 m³/dia), observa-se a geração de um cone de rebaixamento no centro da área modelada muito mais proeminente em relação às demais áreas do município (Figura 53), com rebaixamentos médios de 15 m. Na zona rural, também se observa um rebaixamento de 4 m. Grande parte dos drenos na região central do modelo torna-se seca, e o rio Preto passa a fornecer um volume de água significativo ao modelo.
- No segundo cenário simulado, triplicam-se as vazões atuais dos poços (199.809 m³/dia). Com isso, ocorrem enormes rebaixamentos na área central (média de 42 metros) e rebaixamentos significativos na zona rural (média de 17 metros). Grande parte dos drenos da área central seca, já que praticamente toda a primeira camada do modelo, e alguns pontos da segunda camada, torna-se seca (Figura 54).
- No terceiro cenário simulado, a vazão total se refere à dos poços públicos, que é de 39.662 m³/dia. Com isso, observou-se um rebaixamento na área central (média de 8 m) e na área rural (média de 5 m). Comparando-se esse cenário com o de bombeamento atual, observa-se que a exploração dos demais poços interfere na exploração dos poços públicos, provocando nestes um rebaixamento (Figura 55).

Com a simulação desses cenários, nota-se que há progressivo aumento do volume de água que entra no sistema através das cargas constantes e do rio Preto. As saídas de água pelos drenos se reduzem significativamente, com vários deles se tornando secos. A Tabela 24 resume os resultados da simulação de cenários.

Tabela 24 - Resumo dos resultados de rebaixamento da simulação de cenários de exploração

	Média área central (m)	Média área rural (m)
Exploração 2 vezes maior do que a atual (Q=133.206 m³/dia)	15	4
Exploração 3 vezes maior do que a atual (Q=199.809 m³/dia)	42	17
Exploração apenas dos poços públicos (Q = 39.662 m³/dia)	8	5

Figura 53 - Mapa potenciométrico e seção hidrogeológica gerados pelo modelo para o cenário 1 (exploração duas vezes maior do que a atual)

Figura 54 - Mapa potenciométrico e seção hidrogeológica gerados pelo modelo para o cenário 2 (exploração três vezes maior do que a atual)

9 RECOMENDAÇÕES PARA A GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM SJRP

A partir da compreensão da hidrogeologia do SAB, da definição do modelo conceitual e do modelo numérico de fluxo, é possível estabelecer critérios para uma exploração mais racional do SAB na zona urbana de SJRP.

A simulação de cenários de exploração do SAB, na região de SJRP, mostrou notável abatimento dos níveis potenciométricos na área central do modelo, onde se concentram a maioria dos poços, com cones de depressão cada vez mais proeminentes à medida que se aumenta a vazão dos poços. Já na zona rural, os abatimentos observados dos níveis foram muito mais discretos.

Esse cenário pode ser caracterizado como crítico, embora ainda não alarmante. Para se evitar que ocorram cenários críticos, tais como demonstrado, que haja exaustão do aquífero e, conseqüentemente, problemas no abastecimento público de água, a gestão deve ser orientada prioritariamente no sentido de aumentar o controle e o conhecimento da exploração.

Assim, faz-se necessário realizar algumas ações direcionadas: a) ao poço; b) à proteção do aquífero, e c) ao usuário.

Recomendações voltadas ao poço:

1. Regularizar as outorgas dos poços tubulares, junto ao órgão competente;
2. A partir da outorga, integrar e permitir que as informações dos poços sejam disponibilizadas de forma fácil de ser consultada;
3. Evitar que se construam mais poços na região central do município, exceto no caso de substituição de poços para abastecimento público;
4. Tamponar os poços abandonados e desativados ou, de maneira adequada, transformar estes em poços de monitoramento para estudos;
5. Para poços muito próximos, deve-se intercalar o período de bombeamento entre um e outro; e
6. Selecionar área, em zona rural, para a prática de campos de poços.

Recomendações voltadas ao aquífero:

7. Promover estudos, coleta de dados em diferentes intervalos de tempo, alimentar o modelo numérico e gerar novos cenários;
8. Implantar rede de monitoramento de níveis em poços, sobretudo na região central do município;
9. Controle do uso do solo, por meio da utilização de instrumentos técnicos e legais que orientem a ocupação do território de maneira adequada, bem como fiscalizar as atividades antrópicas realizadas na área, com vistas a monitorar a exploração da água.

Recomendações junto ao usuário:

10. Conscientizar, por meio de campanhas educativas, e incentivar a população para que sejam tomadas medidas de regularização e adequação dos poços de utilização particular. Entende-se que a educação ambiental e a cobrança pelo uso da água podem representar fatores decisivos no início deste processo.

O proprietário de poço é peça fundamental para o sucesso do gerenciamento, seja na sua conscientização para um consumo de maneira adequada e sem desperdícios, seja no fornecimento das informações, muito valiosas, aos órgãos gestores da quantidade e qualidade das águas.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme exposto na presente dissertação, o Sistema Aquífero Bauru apresenta comportamento de aquífero granular, moderadamente permeável, livre, mas com condições de semiconfinamento em algumas áreas que apresentam níveis argilosos. Na região ocorrem cinco camadas de comportamento hidrogeológico diferentes: Solo, Adamantina A, Adamantina B, Santo Anastácio e Serra Geral, sendo o aquífero Santo Anastácio o mais condutível.

A análise regional dos mapas potenciométricos, diferenciados por décadas de construção do poço e profundidade dos mesmos indica que os níveis são relativamente rasos, tendem a acompanhar a topografia e possuem sentido de fluxo para as drenagens, sendo o rio Preto a principal drenagem da área. Constatou-se um fluxo de água subsuperficial, ou seja, fluxos subterrâneos locais não interferidos por bombeamento, que mantém o nível freático, bem como o nível de base de córregos menores. No mapa potenciométrico das décadas anteriores a 1980, período com menor número de poços construídos, observa-se a condição próxima ao fluxo natural, ou seja, sem interferência de bombeamento de poços, indicando um fluxo, sobretudo para as drenagens.

O potencial de recarga da área modelada foi obtido com a realização do balanço hídrico por meio da metodologia proposta por Thornthwaite e Matter (1948), mas avaliando-se o escoamento superficial em relação ao uso do solo (zona urbana e rural) e, também, ao tipo de solo e declividade do terreno. Com isso, encontraram-se quatro classes diferentes de recarga, as quais variam de 214 mm/ano a 354 mm/ano. A fim de averiguar o resultado, a recarga foi avaliada por meio da análise de hidrograma de vazão, resultando em vazões mínimas médias mensais em torno de 4 m/s. A recarga ainda foi diferenciada na zona urbanizada, área impermeabilizada, mas que recebe água induzida por perda na rede de abastecimento, esgoto e galerias pluviais.

Em relação à área estudada, que possui 431,30 km², pode-se dizer que: a recarga do SAB é de 104.596.555 m³/ano, ou 3,36 m³/s; o valor do Q7-10 é de 0,683 m³/s; e a disponibilidade hídrica é de 83.057.467 m³/ano, ou 1.770.336 m³/mês.

O principal tipo de uso de água subterrânea, em SJRP, é o uso doméstico (31%). No entanto, os principais usuários têm como finalidade o abastecimento público (48%) (Figura 37 e Gráficos 8 e 9).

O mapa de classes de vazões permite observar, claramente, que o maior volume de exploração, cuja soma é 2.633.225 m³/mês, está situado na zona urbana de São José do Rio Preto. Dos 2.008 poços existentes em SJRP, 80% concentram-se na zona urbana, que representa 20% da área do município. Do total de poços, apenas cerca de 20% possuem outorga e muitos outros continuam desconhecidos. Não obstante, embora a maioria dos poços não possua outorga, a pesquisa foi possível porque boa parte deles consta em um cadastro, o qual possui algumas informações básicas, tais como a sua localização. Por esse motivo, recomenda-se que esse cadastro seja utilizado de maneira estratégica como instrumento auxiliar na outorga dos poços.

O volume explotado pelos 1.963 poços, equipados e localizados no município de SJRP, somam 3.164.151,4 m³/mês. Considerando que o valor da disponibilidade hídrica é de 6.921.455,6 m³/mês, isso significa que cerca de 45% do recurso subterrâneo está sendo explorado. No entanto, considerando que cerca de 80% dos poços estão distribuídos em aproximadamente 20% da área, sua exploração provoca um desequilíbrio entre a disponibilidade e a demanda nesta área, o que requer a adoção de medidas de controle. Vale lembrar que, devido ao fato de a outorga de poços não ser uma prática comum, o número real de poços existentes na área pode ser maior. Além disso, a concentração de poços com distâncias curtas um do outro pode provocar interferência entre eles, ocasionada pela sobreposição dos cones de rebaixamento de dois ou mais poços em bombeamento.

Diante desse cenário, o aumento da demanda do uso de águas subterrâneas no município de São José do Rio Preto levou à preocupação com a quantidade disponível desse recurso para a população.

Para subsidiar a exploração racional do SAB, na área urbana de São José do Rio Preto, realizaram-se os modelos conceitual e numérico de fluxo das águas subterrâneas do município, cujos resultados fundamentaram a recomendação de ações necessárias para reverter o cenário e não comprometer o aquífero nem, consequentemente, o abastecimento da população atual e futura.

A partir do modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas no município, foi possível definir o modelo numérico, utilizando-se o software Visual MODFLOW (GUIGUER; FRANZ, 1996), o qual foi calibrado em regime estacionário para duas situações: pré-exploração e bombeamento atual; posteriormente, foram gerados cenários futuros.

Os modelos calibrados têm a capacidade de representar a área de estudos em um cenário pré-exploração (década de 1970) e um cenário de exploração atual, podendo ser utilizados, em projetos posteriores, na modelagem da situação atual de fluxo.

O cenário definido como “pré-exploração” corresponde à época anterior à década de 1980, quando a expansão urbana era significativamente menor do que a atual, havendo menor influência da ocupação humana no sistema de fluxo do sistema aquífero em questão. Essa situação corresponde às condições normais de recarga e drenagem sem a interferência de poços no aquífero.

Foram simulados três cenários: a) exploração duas vezes maior do que a atual ($Q = 133.206 \text{ m}^3/\text{dia}$); b) exploração três vezes maior do que a atual ($Q = 199.809 \text{ m}^3/\text{dia}$); c) exploração apenas dos poços públicos ($Q = 39.662 \text{ m}^3/\text{dia}$), para os quais houve médias de rebaixamento na área central de 15, 42 e 8 m, respectivamente.

A simulação preliminar de cenários de exploração mostrou notável abatimento dos níveis potenciométricos na área central do modelo, onde se concentram a maioria dos poços, com cones de abatimento cada vez mais proeminentes à medida que aumenta a vazão dos poços. Já na zona rural, os abatimentos observados dos níveis foram muito mais discretos.

Dessa forma, a situação do município pode ser caracterizada como crítica, embora ainda não alarmante. Tal como demonstrado, para se evitar que ocorram cenários críticos, que haja exaustão do aquífero e, conseqüentemente, problemas no abastecimento público de água, a gestão deve ser orientada prioritariamente no sentido de aumentar o controle da exploração e o conhecimento da população sobre o tema.

Assim, faz-se necessário realizar algumas ações direcionadas, por exemplo, em relação ao poço, à proteção do aquífero e ao usuário.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; BARBOSA, M. C.; AZEVEDO, S. G.; CARVALHO, A. M. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos hídricos**. Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos – APRH, v. 32, p. 53-61, 2011.

ALLEY, W. M.; REILLY, T. E.; FRANKE, O. L. Sustainability of Groundwater Resources. **U.S. Geological Survey Circular**, v. 11, n. 86. Denver: USGS, 1999.

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. San Diego: Academic Press, 1992.

ARID, F.; CASTRO, P. R. M.; BARCHA, S. F. Estudos hidrogeológicos no município de São José do Rio Preto. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**. São Paulo, v. 19, n. 1, p. 43-69, 1970.

BARBOSA, C. M. S. Diretrizes para gestão participativa das águas subterrâneas. **Revista Holos**, v. 22, out. 2006.

BARREIRAS, N. M. J. 2009. 184 p. **Contribuição para a caracterização e modelação hidrogeológica do concelho do Seixal**. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Lisboa. Monte de Caparica/Portugal, 2009.

BEAR, J.; BEIJIN, M. S.; ROSS, R. R. 1992. **Fundamentals of Groundwater Modeling. Groundwater Issue**. United States Environmental Protection Agency – USEPA. EPA/540/S-92/005.

BEAR, J.; VERRUIJT, A. **Modeling Groundwater Flow and Pollution**. Dordrecht/Holanda: D. Reidel, 1994.

BERNICE, A. M. **Evolução da contaminação por nitrato em aquíferos urbanos: estudo de caso em Urânia (SP)**. 2010. 127 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

BERTOLO, R. A. 2001. 218 p. **Hidrodinâmica e hidrogeoquímica da zona não saturada do Aquífero Adamantina em Urânia – SP**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

BOLÇONE, O. J. (Org.); LEME, E. M. M. T. (Coord.). **Conjuntura econômica de São José do Rio Preto**. 21 ed. São José do Rio Preto/SP, Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Estratégica, 2006.

BOLÇONE, O. J. (Org.); LEME, E. M. M. T. (Coord.). **Conjuntura econômica de São José do Rio Preto**. 23 ed. São José do Rio Preto/SP, Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Estratégica, 2008.

BOLÇONE, O. J. (Org.); LEME, E. M. M. T. (Coord.). **Conjuntura econômica de São José do Rio Preto**. 24 ed. São José do Rio Preto/SP, Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Estratégica, 2009.

BOLÇONE, O. J. (Org.); LEME, E. M. M. T. (Coord.). **Conjuntura econômica de São José do Rio Preto**. 25 ed. São José do Rio Preto/SP, Secretaria Municipal de Planejamento e Gestão Estratégica, 2010.

BONGANHA, C. A.; GUIGUER, N.; PEREIRA, S. Y.; OLIVEIRA, L. C.; RIBEIRO, M. L. Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos. **Revista Analytica**. São Paulo, v. 30, ago./set., 2007.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ottawa: Pergamon, 1994.

CAETANO-CHANG, M. R.; WU, F. T. Bacia do Paraná: formações Pirambóia e Botucatu. In: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1992. Roteiro de Excursão, v. 2, p. 1-19.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para Projetos Ambientais**. 2. ed. São José dos Campos/SP, 1998.

CARVALHO FILHO, C. A.; COTA, S. D. S. Análise de sensibilidade para o parâmetro condutância na condição de contorno de tipo 3 do modelo MODFLOW. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo, n. 17, p. 23-30, 2003.

CARVALHO, A. M.; HIRATA, R. C. A. Avaliação de métodos para a proteção dos poços de abastecimento público do Estado de São Paulo. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. Série científica, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 53-70, 2012.

CAVALCANTI, M. A. M. P. 2002. 188 p. **A modelagem matemática associada ao sistema de informações geográfica como instrumento de previsão no estudo do impacto hidrogeológico de reservatórios**. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CAVICCHIA, M. E. 2007. 170 p. **Desenvolvimento de modelo numérico para gerenciamento de recursos hídricos na área do Projeto Piloto de Ribeirão Preto**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Hidráulica e Saneamento de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CLEARY, R. W. Hidrologia de águas subterrâneas. In: RAMOS, F. et al. **Engenharia hidrológica**. Rio de Janeiro: ABRH; EDUFRJ, 1989, p. 293-404.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB, **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo: 2007-2009**. São Paulo: Cetesb, 2010.

DE BIASI, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. **Revista de Pós-Graduação da USP**. São Paulo, n. 6. p. 45-53, 1992.

DELAUNAY, B. N. Sur la sphère vide. **Izvestia Akademii Nauk**. URSS, v. 7, p. 393-800, 1934.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Estudo das águas subterrâneas**: regiões administrativas 7, 8 e 9 (Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba). São Paulo, v. 3, 1976.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 2. ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2011.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2005. Coordenação geral: G. Rocha. Escala 1:1.000.000.

DEVRIES, J. J., SIMMERS, I. Groundwater Recharge: an Overview of Processes and Challenges. **Hydrogeology Journal**, n. 10, p. 5-17, 2002.

DIERSCH, H. J. **Finite-Element-Programmsystem FEFLOW**. Program description. Berlin/Alemanha: Institut für Mechanik der AdW der DDR, 1980.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: X REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS. **Súmula**. Rio de Janeiro, 1979.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. **WHOPAHO/ HPE-CEPIS Technical Manual**. Lima/Peru, 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; MISRA, S.; GARDUÑO, H. Urban Groundwater Use Policy: Balancing the Benefits and Risks in Developing Nations. **Sustainable Groundwater Management: Contributions to Policy Promotion**. Washington/EUA: GWMate World Bank, 2010.

FOSTER, S.; LAWRENCE, A.; MORRIS, J. Groundwater in Urban Development: Assessing Management Needs and Formulating Policy Strategies. **World Bank Technological Paper**, 1998.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. New Jersey/EUA: Prentice-Hall, 1979.

GIANNINI, P. C. F.; SAWAKUCHI, A. O.; FERNANDES, L. A.; DONATTI, L. M., Paleoventos e paleocorrentes subaquosas do sistema deposicional Pirambóia nos estados de São Paulo e Paraná, Bacia do Paraná: estudo baseado em análise estatística de dados azimutais. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 2, p. 282-292, 2004.

GORELICK, S. M. A Review of Distributed Parameter Groundwater Management Modeling Methods. **Water Resources Research**, v. 19. n. 2, p. 305-319, 1983.

GUANABARA, R. C. 2011. 132 p. **Modelo transiente de fluxo em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Hidráulica e Saneamento de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

GUIGUER, N.; FRANZ, T. **Visual MODFLOW**: User's manual. Waterloo/Canadá: Waterloo Hydrogeologic Inc., 1996.

HIRATA, R.; ZOBY, J. E. G.; OLIVEIRA, F. R. Águas subterrâneas: reserva estratégica ou emergencial. In: BICUDO, C. E.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. (Orgs.). **Águas do Brasil**: análises estratégicas. São Paulo: Instituto de Botânica, 2010, v. 1, p. 149-164.

HIRATA, R.; BERTOLO, R.; CONICELLI, B. P.; MALDANER, C. Hidrogeologia da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. In: TWIN CITIES: solos das regiões metropolitanas de São Paulo e Curitiba, 2012.

HUBBERT, M. K. The Theory of Ground-Water Motion. **The Journal of Geology**, v. 48, n. 8, parte 1, p. 785-944, nov./dez., 1940.

HUTCHINSON, M. F. A New Procedure for Gridding Elevation and Stream Line Data with Automatic Removal of Spurious Pits. **Journal of Hydrology**, n. 106, p. 211-232, 1989.

HUTCHINSON, M. F. Calculation of Hydrologically Sound Digital Elevation Models. In: III INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING. Sydney/Australia, 1988.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades**. São José do Rio Preto/SP. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acessado em: 15 nov. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Contagem da população**: 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2008. Disponível em: <http://www.ibge.com.br/servidor_arquivos_est>. Acesso em: outubro de 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Resultados da amostra do Censo Demográfico 2000**: malha municipal digital do Brasil: situação em 2001. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: <http://www.ibge.com.br/home/estatistica/populacao/censo2000/ufs.php?tipo=31o/tabela13_1.shtm>. Acesso em: outubro de 2009.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Diagnóstico da situação atual dos Recursos Hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande**. São Paulo: IPT, 1999. Relatório n. 40.515.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981. 2v. Escala 1:500.000.

IRITANI, M. A. 1998. 200 p. **Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 2. ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente – SMA, 2009.

KRESIC, N., **Quantitative Solutions in Hydrogeology and groundwater Modeling**. Boca Raton/EUA: CRC, 1997.

LEME, E. M. M. T.; FREITAS, G. M. (Coord.). **Conjuntura econômica de São José do Rio Preto**. 26 ed. São José do Rio Preto/SP: Secretaria Municipal de Planejamento Estratégico, Ciência, Tecnologia e Inovação, 2011.

LEME, E. M. M. T.; FREITAS, G. M. (Coord.). **Conjuntura econômica de São José do Rio Preto**. 27 ed. São José do Rio Preto/SP: Secretaria Municipal de Planejamento Estratégico, Ciência, Tecnologia e Inovação, 2012.

LENER, D. N. Groundwater Recharge in Urban Areas. **Atmos Environ**, v. 24B, n. 1, p. 29-33, 1990.

LIMA, A. A. 2004. 82 p. **Hidrogeologia do Sistema Aquífero Bauru no município de São José do Rio Preto (SP)**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro/SP, 2004.

MANCUSO, M. A.; FERREIRA, J. P. L.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. **Using GIS and modeling to assess groundwater discharge to Santos Estuary, Brazil**. In: XXXV IAH CONGRESS, GROUNDWATER AND ECOSYSTEMS. Proceedings. Lisboa/Portugal: Associação Internacional de Hidrogeólogos, 2007, p. 1-9.

MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. A Modular Three Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. **Techniques of Water-Resources Investigations**, v. 6, n. A1, Washington/EUA: Geological Survey, 1988.

MCWHORTER, D. B.; SUNADA, D. K. **Groudwater Hidrology and Hydraulics**. New York/EUA: Wiley and Sons, 1977.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da bacia do Paraná In: NETO, V. M.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Eds.). **Geologia do Continente Sul-Americano**: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca Produções Culturais, 2004, p. 265-279.

MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. Bacia do Paraná. **Boletim Geociências Petro**, v. 8, p. 69-82, 1994.

NERY, G. G. 1990. **Perfilagem Geofísica em poço aberto**. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas/SP: Instituto Agrônômico; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. Escala 1:500.000.

OLIVEIRA, J. N. 2002. 111 p. **Ferramental de Gestão de Águas Subterrâneas para a cidade de São José do Rio Preto, SP**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 2002.

OLIVEIRA, L. J. 2005. 183 p. **Avaliação do uso da perfilagem geofísica para obtenção de informações secundárias para utilização em co-estimativas de variáveis geológico-minerais**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

OLSTHOORN, T. N. The Power of the Electronic Worksheet: Modeling Without Special Programs. **Ground Water: Computer Notes**, v. 23, n. 3. p. 381-390, 1985.

OWEN, R.; MIRGHANI, M.; DIENE, M; TUINHOF, A.; TAYLOR, P. **Groundwater Management in IWRM**: Training Manual. International Network for Capacity Building in Integrated Water Resources Management; Africa Groundwater Network (AGW-Net); Ground Water Management Advisory Team (GW-MATE), 2010.

PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHAND, M. R. Perfis de referência do grupo Bauru (K) no estado de São Paulo. **UNESP Geociências**. São Paulo, n. 22, p. 21-32, 2003.

PORTO, M. F. A.; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Revista Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43-60, 2008.

REBOUÇAS, A. C. **Uso inteligente da água**. São Paulo: Escrituras, 2004.

ROCK, G.; KUPFERSBERGER, H. Numerical delineation of transiente capture zones. **Journal of Hydrology**, n. 269, 2002.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: FFLCH-USP; IPT, v. 1, 1997. Escala 1:500.000.

SANTOS, J.; HIRATA, R.; FERRARI, L. C. K. M. Modelagem matemática para aplicação de sistemas de wetlands no tratamento de aquíferos livres e rasos contaminados. **Águas Subterrâneas**. São Paulo, v. 20, p. 1-12, 2007.

SÃO PAULO. Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **Relatório de situação dos recursos hídricos do estado de São Paulo**. 2000. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br>>.

SARTORATO, A. C. L. 2011. 51 p. **Modelação numérica de fluxo das águas subterrâneas em São José do Rio Preto (SP)**. Trabalho de Formatura (Bacharelado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

SERVIÇOS TÉCNICOS E AMBIENTAIS LTDA. – SERVMAR. **Delimitação de áreas de restrição e controle de captação e uso de águas subterrâneas no município de São José do Rio Preto**: Bloco A: aquífero sedimentar: relatório final. In: FEHIDRO, São Paulo, 2008.

SERVIÇOS TÉCNICOS E AMBIENTAIS LTDA. – SERVMAR. **Delimitação de áreas de restrição e controle de captação e uso de águas subterrâneas no município de São José do Rio Preto**: Bloco A: aquífero sedimentar: relatório final. In: FEHIDRO, São Paulo, 2010.

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no estado de São Paulo: grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo, n. 10, p. 177-185, 1980.

SOUSA, C. J. S.; SILVA, M. M.; COSTA, K. S. P. **Análise do modelo numérico de terreno do Radar SRTM na área da Folha SA.23-Z-D-I, Urbano Santos – MA**. In: XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA. Viçosa/MG, 2009.

VIVIANI, J. B.; HIRATA, R.; MAXIMIANO, A. M. S. **Modelamento numérico de fluxo de águas subterrâneas como subsídio para tomada de decisões com base no risco**. In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Anais. Cuiabá/MT, 2004.

WATKINS, D. W.; MCKINNEY, D. C.; MAIDMENT, D. R.; LIN, M. D. Use of Geographic Information System in Groundwater Flow Modeling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 122, n. 2, p. 88-96, 1996.

WENDLAND, E.; OLIVEIRA, A. S. **Modelo numérico de escoamento subterrâneo na região de São José do Rio Preto**: relatório técnico. São Carlos/SP, 2010.

WENDLAND, E.; RABELO, J. L. Incertezas nos modelos de fluxo subterrâneo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**. São Paulo, v. 15, p. 147-160, 2010.