

Exploração do Sistema Aquífero Guarani em Araraquara *Guarani Aquifer System exploitation in Araraquara*

Ricardo Hirata¹, Marcus Sangiorgio Ucci¹, Ingo Wahnfried², Juliana Baitz Viviani-Lima¹

¹Laboratório de Modelos Físicos, Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, Rua do Lago 562 - Cidade Universitária, CEP 05508-080, São Paulo, SP, BR
(rhirata@usp.br; marcus.ucci@usp.br; jbviviani@gmail.com)

²Departamento de Geociências, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, AM, BR
(iwahn@yahoo.com)

Recebido em 11 de outubro de 2011; aceito em 06 de junho de 2012

RESUMO

Araraquara é um dos núcleos urbanos paulistas abastecidos pelo Sistema Aquífero Guarani. A cidade tem mais de 245 poços tubulares que exploram aproximadamente 70.500 m³/d; dos quais 12 poços, representando 50% desta vazão, são operados pela concessionária municipal de água. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a potencialidade do Sistema Aquífero Guarani nesta cidade, avaliando a evolução da exploração e dos níveis potenciométricos ao longo do tempo. Em testes de bombeamento específicos, o Sistema Aquífero Guarani mostrou uma excelente transmissividade ($T = 120$ a 333 m²/d), com vazões médias de 108 m³/h e capacidade específica entre 0,1 e 13 m³/h/m. Os níveis de água históricos (mapas potenciométricos de 1972 a 1983, 1985 a 1995 e 1996 a 2003) demonstram a evolução da exploração na área urbana, com rebaixamento da potencimetria. No centro da cidade, a redução média é de 10 a 15 m, mostrando que as interferências hidráulicas ainda são razoáveis e gerenciáveis. A avaliação das interferências entre poços mostrou que um poço bombeando 200 m³/h gera rebaixamentos de 32 e 21 m, em distâncias de 100 e 1.000 m, respectivamente. Tal situação permite concluir que a evolução do rebaixamento ao longo dos mais de 30 anos avaliados não é suficiente para gerar uma situação de superexploração.

Palavras-chave: Aquífero; Araraquara; Hidrogeologia; Sistema Aquífero Guarani; Superexploração.

ABSTRACT

Araraquara is one of the many urban centers in the State of São Paulo that are supplied by the Guarani Aquifer System. This city has more than 245 production wells that exploit over 70,500 m³/d. Only 12 of these wells represent 50% of the total yield and are operated by the public water supply company. The objective of this paper was to characterize the potentiality of the Guarani Aquifer System in the area, by assessing both exploitation and hydraulic head evolution over time. Specific pumping tests have shown that the Guarani Aquifer System has an excellent transmissivity ($T = 120$ to 333 m²/d), with average flow rates of 108 m³/h and specific capacity from 0.1 to 13 m³/h/m. The historic water levels (maps for 1972 to 1983, 1985 to 1995 and 1996 to 2003) demonstrated the evolution of the drawdown. In the city center, the average drawdown is 10 to 15 m, which shows that the hydraulic interferences are still within a reasonable and manageable range. An assessment of the interferences between wells was also carried out, and showed that a well pumping at a rate of 200 m³/h would produce a drawdown of 32 and 21 m at distances of 100 and 1,000 m, respectively. From this situation, it is possible to conclude that the exploitation over a 30-year period does not point to an overexploitation problem.

Keywords: Aquifer; Araraquara; Guarani Aquifer System; Hydrogeology; Overexploitation.

INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas cumprem um importante papel nos abastecimentos público e privado da cidade de Araraquara, no estado de São Paulo. Em todo o município, há 245 poços perfurados, extraindo conjuntamente uma vazão superior a 70 mil m³/dia, dos quais 12 deles são operados pelo Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE). A grande produtividade aquífera, aliada à excelente qualidade natural das águas do Sistema Aquífero Guarani (SAG) nesta região, tem feito deste recurso uma opção atrativa, continuamente procurada por usuários públicos e privados. Na Figura 1 encontram-se os poços selecionados e a área de estudo abrangida no trabalho.

O bombeamento excessivo de um aquífero causa desde o aumento dos custos de extração até a perda completa do recurso. É fundamental, portanto, que todos os municípios, dependentes fortemente do recurso subterrâneo, façam avaliações periódicas da evolução do rebaixamento do nível de água e das vazões exploradas, e, sobretudo,

calcularem os custos associados a essa extração conjunta de poços (Foster et al., 2011).

Este trabalho teve como principal objetivo mostrar a evolução da exploração e dos níveis potenciométricos do SAG, desde os anos de 1970 até o início dos anos 2000, avaliando a sustentabilidade do uso atual e futuro da água subterrânea na região de Araraquara.

GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Araraquara está localizado, em sua maior parte, sobre os sedimentos da Formação Adamantina (Grupo Bauru), de Idade Cretácea Superior (Pucci e Campos, 1984) (Figura 2). Esta unidade é composta por arenitos finos e lamitos silíticos de origem fluviolacustre, com estratificação cruzada, de coloração rósea à castanha, além de intercalações com argilas de coloração avermelhada, abundantes nódulos e horizontes de concreções carbonáticas (Goldberg e Garcia, 2000).

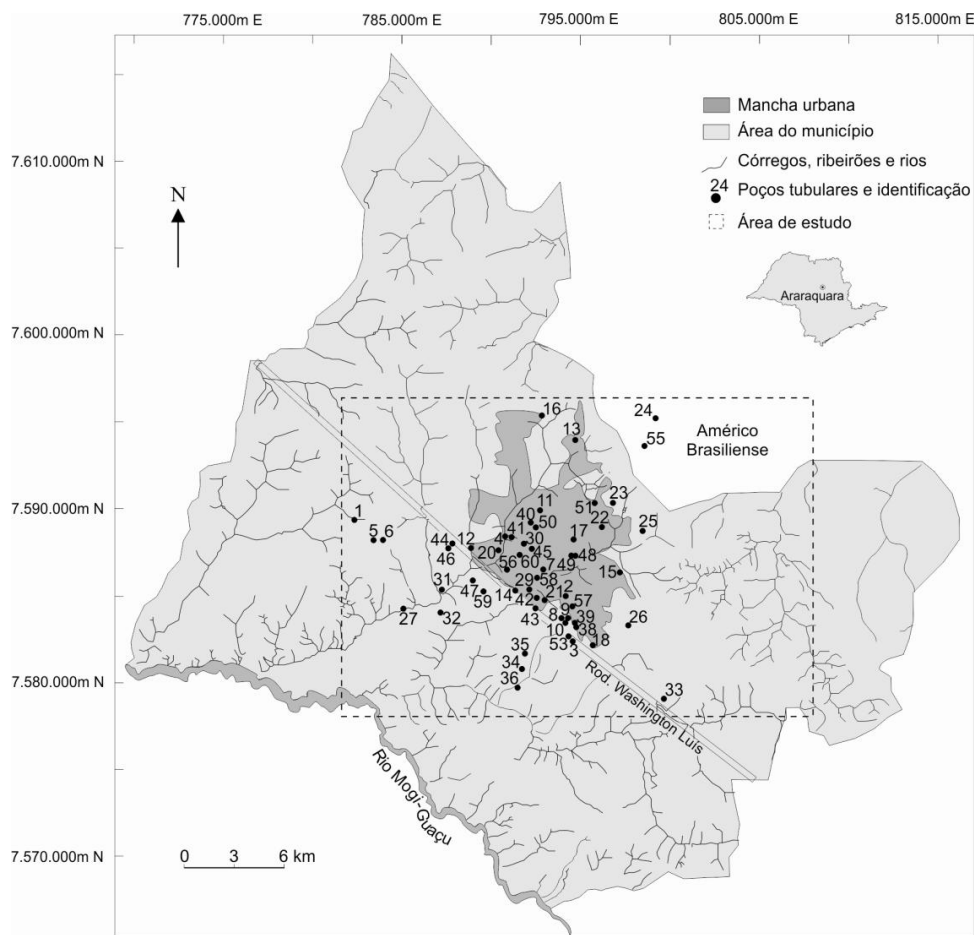


Figura 1. Poços tubulares de produção perfurados no município de Araraquara e arredores considerados neste estudo.

Sotopostos aos sedimentos da Formação Adamantina, encontram-se os basaltos da Formação Serra Geral, de Idade Juro-Cretácea, cujo contato ocorre de forma direta e discordante. Esta formação é composta por um conjunto de derrames de lavas basálticas, cor cinza-escuro a negra, afaníticas, por vezes amigdaloidais, anteriormente acreditados como de natureza toleítica e atualmente reconhecidos como uma cobertura basáltica de natureza variada de termos ácidos e básicos (Marques e Ernesto, 2004). Ainda, essa unidade apresenta uma grande variação de espessura, atingindo até 266 m no município, com valores de média e mediana de 107 e 113 m, respectivamente.

A análise do mapa da distribuição de isoesspessura dos basaltos da Formação Serra Geral (Figura 3) mostra duas tendências de espessamento na cidade: uma a Centro-sul e outra a Norte-nordeste. Tais variações na espessura estão provavelmente associadas a um sistema de falhas ou mesmo às irregularidades do paleorrelevo na sedimentação dos arenitos Botucatu, em ambiente eólico-dunar (seções geológicas A-A' e B-B', Figura 4). Nos locais onde esta formação aflora, nota-se um manto de intemperismo, formado por solo vermelho argiloso e espessura aproximada de 12 m, podendo alcançar valores de até 30 m. Entre os derrames, ocorrem lentes de arenitos

intertrapianos finos a médios, com estratificação cruzada tangencial e espessura entre 2 a 26 m (Raposo, 1992).

Sotopostos à Formação Serra Geral, encontram-se os arenitos das formações Botucatu e Piramboia, que hidroestratigraficamente integram o SAG (Foster et al., 2009). A Formação Botucatu, de Idade Jurássica, é composta por arenitos finos a médios, bem selecionados, estratificações cruzadas, planar ou acanalada, de médio a grande porte, originadas em campos de dunas eólicas (Assine et al., 2004). A Formação Piramboia, de Idade Triássica, é predominantemente composta por arenitos de origem eólica, com estratificação cruzada e subordinadamente planoparalela, de médio porte, originada em campos de dunas eólicas com interdunas úmidas e canais fluviais (Hirata et al., 2011). Nenhum poço perfurado no município chegou até os argilitos, siltitos, folhelhos e arenitos finos da Formação Corumbataí, que atua como aquitarde na base do SAG. Desconhece-se a espessura total desta unidade na área, pois nenhum poço atingiu a Formação Corumbataí. A maior espessura do SAG na área é de 328 m, observada no poço 26, a Sudeste da área de estudo, com redução da espessura na direção Oeste. Provavelmente, a espessura máxima se encontra próxima a 350 m.

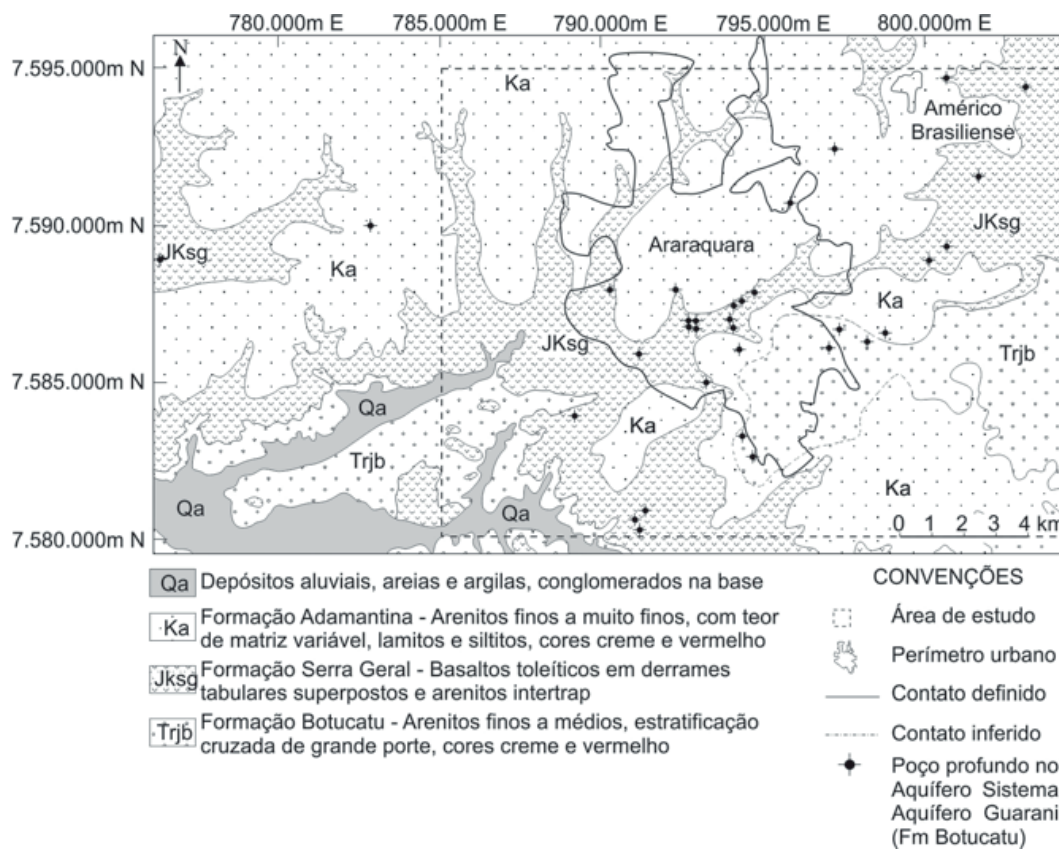


Figura 2. Geologia da região de Araraquara (Piuci e Campos, 1984).

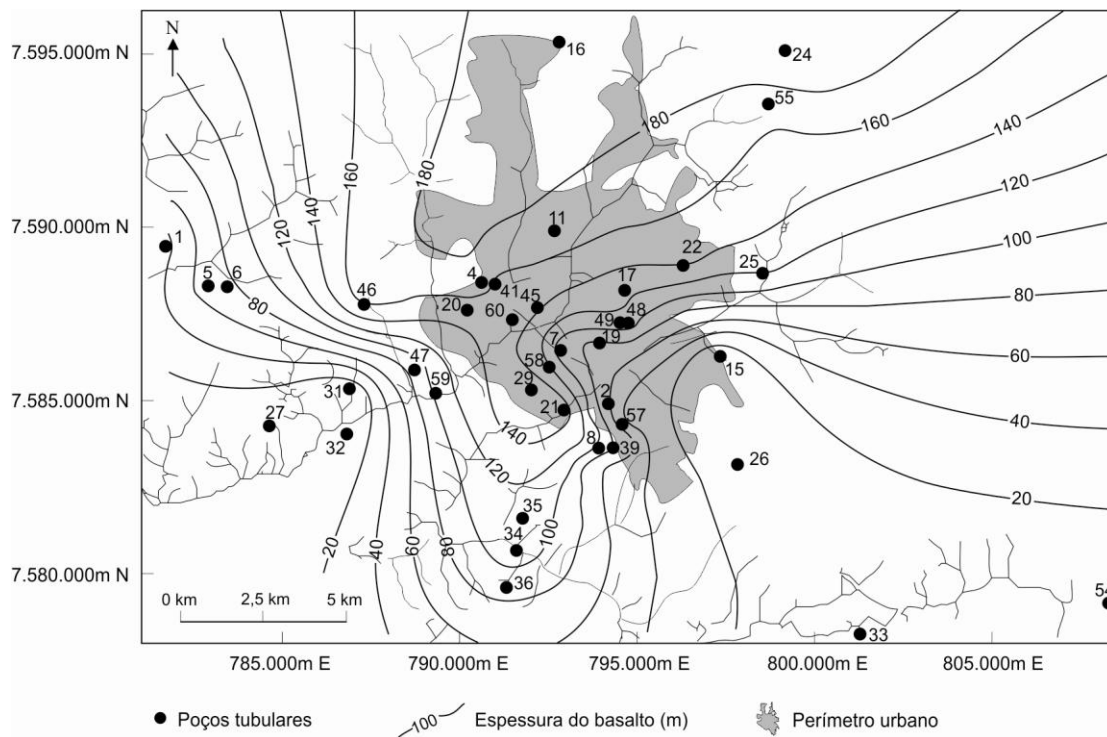


Figura 3. Espessura da Formação Serra Geral.

Em várias perfurações, observou-se a ocorrência de *sills* de diabásio em meio aos arenitos das formações Botucatu e Piramboia e/ou em sua base. As espessuras são variáveis, entre 0,3 a 21 m.

Na porção Sudeste da área de estudo, a Formação Adamantina estava em contato direto com a Formação Botucatu (Figura 2).

HIDROGEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

O Aquífero Adamantina (Sistema Aquífero Bauru) é uma unidade regionalmente livre e localmente semiconfinada, com zonas de recarga associadas às suas áreas de afloramento.

Na maior parte das áreas onde os basaltos da Formação Serra Geral cobrem os sedimentos do SAG, este é confinado (Figura 2). Há, porém, locais onde o contínuo bombeamento rebaixou o nível potenciométrico a uma cota inferior ao contato entre SAG e Formação Serra Geral. Nestes pontos, o aquífero não pode mais ser considerado confinado, estando apenas recoberto pelo basalto. Nos locais em que o SAG está em contato direto com a Formação Adamantina ou em que a Formação Botucatu é aflorante, o aquífero é livre, sendo estas as áreas de recarga do SAG. A principal

está localizada a Sudeste da zona urbana, havendo também uma mais distante, ao Leste. Na área de recarga a Sudeste da cidade, os níveis potenciométricos alcançam valores de até 654 msnm (metros sobre o nível do mar), gerando fluxo em direção Nordeste e alimentando as áreas de confinamento. Localmente, pode haver recargas do SAG por meio das discontinuidades rúpteis do basalto. A descarga ocorre através de três meios: bombeamento, escoamento para Oeste e acompanhando o fluxo regional e descarga no rio Mogi-Guaçu e afluentes, localizado aproximadamente a 7 km a Sudoeste da região de estudo, no qual o SAG é livre (nível potenciométrico da ordem de 500 msnm).

Quanto às características hidráulicas, tal aquífero apresenta valores de transmissividade (T) entre $2,6 \times 10^{-3}$ a $5,8 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ e valores de condutividade hidráulica (K) entre $0,9 \times 10^{-5}$ e $4,1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. As capacidades específicas (Q/s) variam no intervalo entre 0,1 e 13,0 $\text{m}^3/\text{h/m}$. Esses parâmetros atribuem ao sistema uma boa produtividade aquífera (Tabela 1). A Tabela 1 relaciona estatisticamente os 61 poços do cadastro do DAEE levantados até 2003, não incluindo os 184 restantes do cadastro do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) elaborados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), devido à heterogeneidade de informações entre os dois bancos de dados.

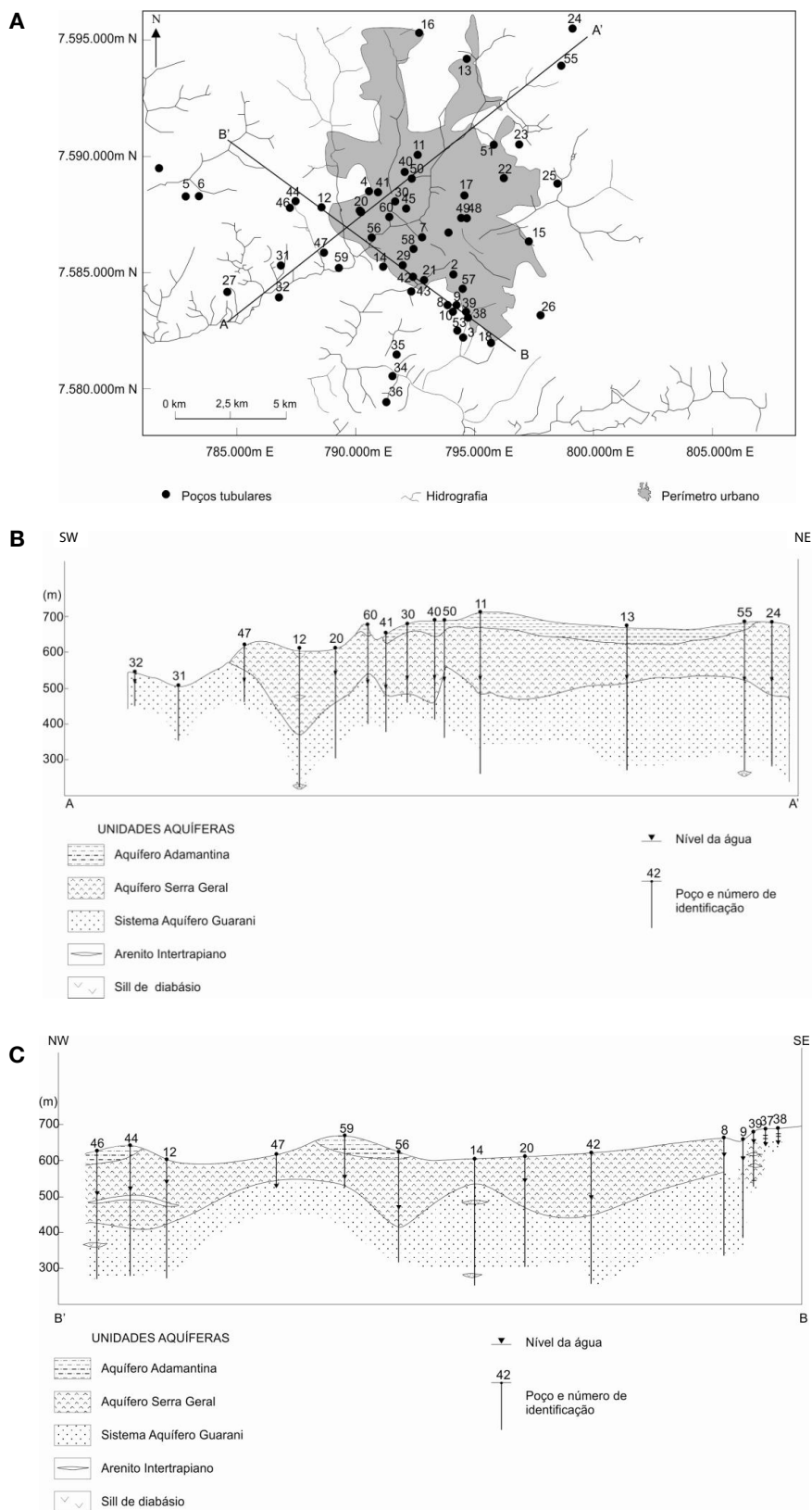


Figura 4. (A) mapa de localização das seções geológicas da região de Araraquara; (B) seção geológica A-A' da área de estudo (Escala Horizontal 1:65.000); (C) seção geológica B-B' da área de estudo (Escala Horizontal 1:65.000).

Tabela 1. Características hidráulicas do SAG – Q refere-se à vazão; ND, ao nível dinâmico; NE, ao nível estático e Q/s, à capacidade específica. Estatística baseada em 61 poços do cadastro de outorga do DAEE levantados até 2003.

	Vazão total máxima	Média aritmética	Mediana	Mínima	Máxima
Espessura do basalto (m)	-	107,27	113,00	0	266,00
Espessura do SAG (m)	-	147,59	152,00	2,50	328,00
Q máx. teste (m ³ /h)	5.676,57	108,60	75,00	2,00	427,00
Cota do ND - teste Q máx. (msnm)	-	533,48	500,04	402,19	682,00
Cota do NE - último medido (msnm)	-	551,92	527,87	485,00	654,00
Q/s (m ³ /h/m)	-	3,26	2,77	0,08	12,99
Transmissividade (m ² /d)	-	197,10	175,06	120,65	333,00

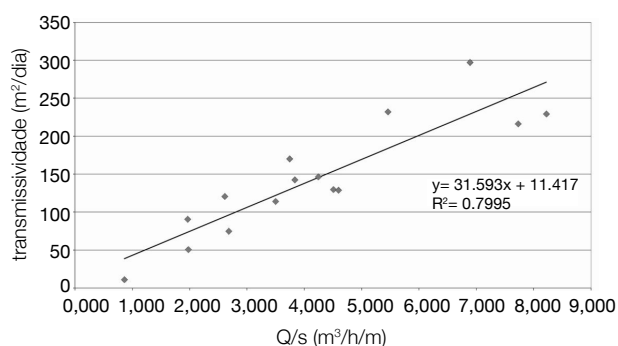
A transmissividade (T) foi obtida por teste de bombeamento de vazão máxima e pelo de recuperação, interpretados pelo método de Cooper e Jacob (1946) em 16 poços tubulares, inclusos na listagem de 61 poços avaliados estatisticamente e apresentados na Tabela 1. Esse método, embora tenha sido desenhado para avaliar aquíferos totalmente confinados, é uma alternativa para se estimar, de forma aproximada, a transmissividade em aquíferos desde livres a confinados (Domenico e Schwartz, 1990), quando não há poços de monitoramento associados a testes hidráulicos. A falta dos dados de transmissividade para os poços implicou na determinação da relação entre estes e a capacidade específica (Q/s), como visto na Figura 5. É nítida a relação entre os parâmetros: $R^2 = 0,7995$, em que $T = 31,6Q/s + 11,4$. A avaliação da T não levou em consideração as correções necessárias para penetração parcial dos poços no SAG, uma vez que se desconhecia a profundidade total do aquífero. Desta forma, espera-se que os valores de transmissividade do SAG na região sejam superiores aos apresentados nos testes.

A Figura 6 mostra a distribuição das linhas de igual valor de capacidade específica, indicando as áreas mais produtivas. Ocorreu um aumento nos valores de capacidade específica para a direção Sudeste da área de estudo, na qual o aquífero deixou de ser caracterizado como livre e tornou-se confinado, atingindo seus maiores valores (máxima de 8,2 m³/h/m). Os menores valores (mínimo de 0,6 m³/h/m) estão localizados a Centro-sudoeste da cidade.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a viabilização dos objetivos, foram realizadas as seguintes atividades, de acordo com os métodos para a caracterização do SAG:

- levantamento de dados históricos no cadastro de poços tubulares do DAEE e do SIAGAS (CPRM), relativos aos municípios de Araraquara e Américo Brasiliense, resultando em 245 poços que exploram o SAG na área de estudo;

**Figura 5.** Relação entre capacidade específica (Q/s) e transmissividade (T) dos poços tubulares em Araraquara.

- busca e avaliação dos estudos hidrológicos e hidrogeológicos sobre as condições e a utilização dos recursos hídricos subterrâneos, particularmente aqueles relacionados à exploração dos aquíferos Botucatu e Piramboia (SAG);
- consulta a bases topográficas referentes às folhas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 1971, em escala 1:50.000, dos municípios de Araraquara, Rincão e Boa Esperança do Sul, e aos mapas geológicos da área. Essas cartografias serviram de base para o posicionamento dos poços, identificação de poços na região e, sobretudo, identificação das possíveis inconsistências (como localização e perfis geológico e construtivo descritos em cadastro e real);
- reinterpretação dos testes de bombeamento de poços existentes, a fim de confirmar os dados anteriores, pois notou-se que em alguns poços os resultados não apresentavam compatibilidade entre Q/s e T;
- compilação da base de dados, no programa Microsoft Excel, das informações hidrodinâmicas levantadas sobre o SAG e projeção dos mesmos em *softwares* de interpolação de dados (por exemplo, SURFER®);
- interpretação dos dados obtidos e avaliação dos resultados por meio de técnicas tradicionais de Hidrogeologia e cartografia hidrogeológica.

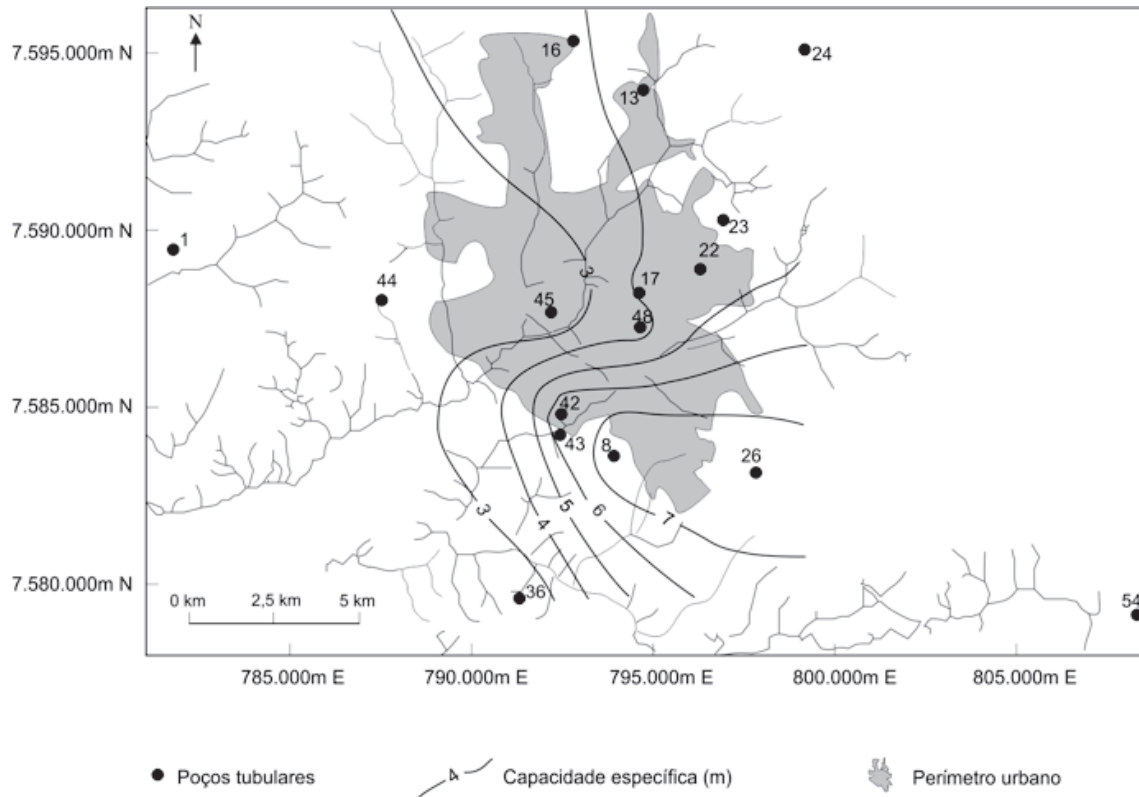


Figura 6. Distribuição das isolinhas de capacidade específica (Q/s) [m³/h/m].

EXPLOTAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

A perfuração no município de Araraquara para a exploração do SAG iniciou-se com a construção de dois poços pela Geopesquisadora Brasileira, em 1972. Até 1983, a cidade contava apenas com sete captações. A evolução das perfurações ao longo dos anos, baseada nos dados deste estudo, pode ser observada na Figura 7. É nítido o maior interesse do usuário privado na exploração deste recurso nas últimas décadas.

Segundo o cadastro de poços do SIAGAS (CPRM), há, no município de Araraquara, um total de 245 captações, algumas delas abandonadas ou perdidas, reduzindo a exploração atual. Embora acessado em 2011, os dados estão atualizados até 2003.

O DAAE possui 12 poços tubulares em atividade, embora o número efetivo em exploração varie devido ao abandono ou à manutenção. Cinco poços foram abandonados por problemas diversos, incluindo a queda de bombas e equipamentos, ruptura de tubulações e revestimento, entre outros. A idade média dos poços é de 11 anos, sendo os mais antigos com mais de 18 anos (dados de idade referidos à época por Perroni, em 2003).

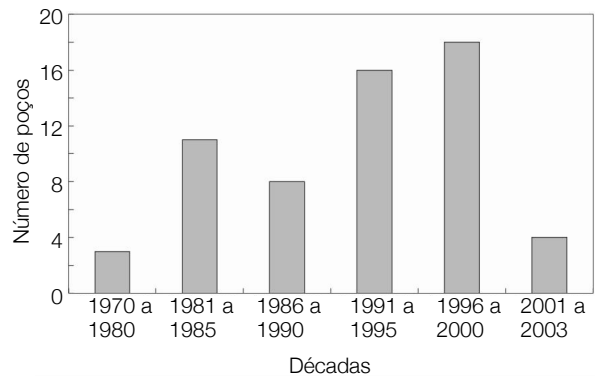


Figura 7. Evolução das perfurações no Sistema Aquífero Guarani na área de estudos entre 1970 a 2003.

A Tabela 2 apresenta as vazões exploradas e o perfil dos usuários em Araraquara. O maior usuário é o DAAE (62,5%), seguido das indústrias (29,3%), do comércio (7,0%) e da agricultura (1,2%). A vazão total de teste (soma das vazões do teste dos poços) ascende a 5.580 m³/h e a vazão média outorgada junto ao DAAE é de 33.815 m³/dia, até 2003.

Tabela 2. Perfil do usuário de águas subterrâneas em Araraquara (cadastro de outorgas do DAAE: situação em 2003).

	Agrícola	Industrial	Comercial	Abastecimento público
Usos da água (número de poços)	5	19	16	13
Usos da água (m ³ /h – vazão máxima outorgada)	69,6	1.633,1	392,5	3.485,5
Usos da água (%)	1,2	29,3	7,0	62,5

Interferência e outros problemas na exploração do Sistema Aquífero Guarani na cidade

Qualquer bombeamento de um aquífero causa o rebaixamento de seus níveis hidráulicos. A exploração sustentável (em oposição à superexploração) garante que a queda destes níveis não cause um dos seguintes problemas (Foster et al., 2011): custos excessivos de bombeamento dos poços, pelo aumento no gasto de energia elétrica ou de troca de equipamentos ou aprofundamento de poços; perdas consideráveis do reservatório, devido à redução do volume de água armazenada; redução no fluxo da base de corpos de água superficial (rios e lagos), com impacto em áreas ecologicamente sensíveis; problemas geotécnicos, como subsidência; e equidade social (conflito de uso envolvendo pequenos – geralmente com recursos financeiros limitados e grandes usuários). O conhecimento adequado das capacidades aquíferas é fundamental para se evitar problemas de superexploração do aquífero.

A interferência entre poços está associada à distância entre as captações, à transmissividade do aquífero e às vazões de exploração. Quanto maior a proximidade entre os poços e a vazão, maior será esta interferência. Quanto à transmissividade, quanto maior o valor, mais extensivo será essa interferência. A Figura 8 mostra a interferência esperada em um poço de bombeamento com diferentes vazões (50 até 300 m³/h), para diferentes distâncias, a partir de um poço ativo. Também apresenta as equações em que y é o rebaixamento esperado e x é a distância entre o poço e o ponto que se quer conhecer o rebaixamento. Os valores apresentados são aproximados e genéricos. É importante indicar que se existirem outros poços bombeando na mesma região, o rebaixamento causado por estes se somará àquele existente.

Segundo o gráfico da Figura 8, se um poço estiver bombeando 200 m³/h, causará um rebaixamento de 31 m a uma distância de 100 m e de 20 a 1.000 m. Para o cálculo foram utilizados valores de transmissividade de 175 m²/d (valor de mediana dos poços da região); coeficiente de armazenamento de 0,0001 (aquífero confinado); tempo de bombeamento de 3.650 dias e ausência de recarga. O método de interpretação foi o de Cooper-Jacob.

As perdas das reservas de um aquífero podem ocorrer quando a exploração é superior à capacidade de reposição das águas, geralmente associada à sua recarga (Foster et al., 2009).

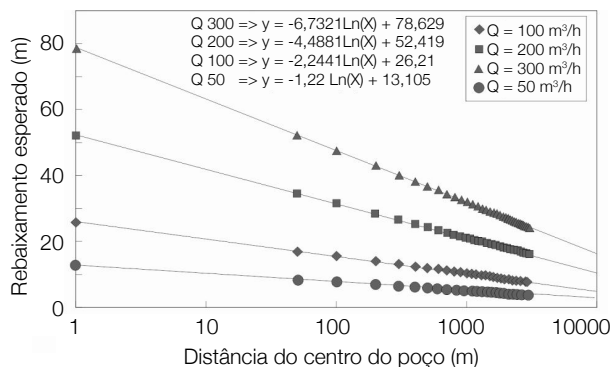


Figura 8. Rebaixamento causado por um poço em bombeamento ($Q = 50$ a 300 m³/h), em diferentes distâncias (1 a 3.000 m). As equações representam cada caso na mesma ordem das vazões. O aquífero é considerado confinado e sem recarga. Aproximação de Cooper-Jacob. Transmissividade = 175 m²/d; coeficiente de armazenamento = 0,0001 e tempo de bombeamento de 3.650 dias (y = rebaixamento e x = distância entre os poços).

Em aquíferos livres e semiconfinados ou em confinados próximos à zona de recarga (quando há indução de recarga pelo bombeamento), como observado em Araraquara, essas perdas ocorrem quando a extração ocorre em vazões superiores à da recarga. A quantificação da recarga do SAG em Araraquara é bastante complexa e foge ao escopo deste estudo.

Uma análise dos mapas das cotas dos níveis estáticos medidos em poços segundo o ano de perfuração tem mostrado um rebaixamento na região central da cidade (Figura 9), que também foi descrito por Perroni (2003), em um estudo para o DAAE.

O trabalho de Perroni (2003) comparou os níveis estáticos, dinâmicos e de vazão dos poços do DAAE em dois momentos, um logo após a perfuração e outro em 2003. Notou-se que em alguns poços os níveis estáticos se reduziram drasticamente, alcançando uma média de 20,31 m de diferença do nível d'água (NA), levando-se em consideração os 13 poços apontados pelo estudo. O valor máximo de rebaixamento foi evidenciado no poço 19 com até 50 m de diferença do NA, inclusive com redução de vazão.

A Tabela 3 apresenta os dados relevantes dos poços utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, somados a informações pertinentes de Perroni (2003).

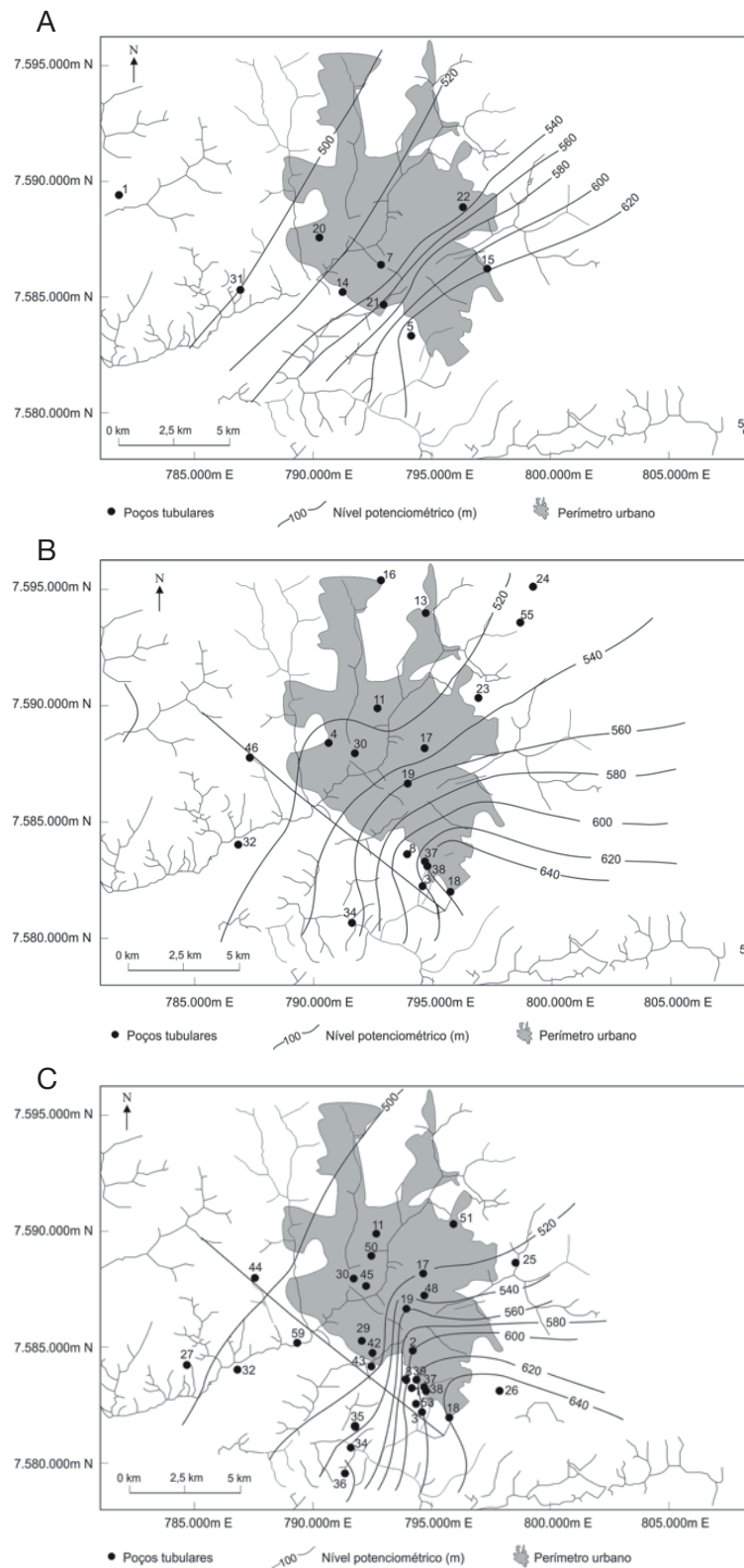


Figura 9. (A) potenciometria do Sistema Aquífero Guarani na região de Araraquara de 1972 a 1983; (B) potenciometria do Sistema Aquífero Guarani na região de Araraquara de 1985 a 1995; (C) potenciometria do Sistema Aquífero Guarani na região de Araraquara de 1996 a 2003.

Tabela 3. Dados gerais dos poços selecionados.

Poço	Número do poço	Data de perfuração	Profundidade (m)	Cota (m)	Descrição geológica				Medidas de nível estático			Vazão máxima outorgada (m³/h)	Vazão média outorgada (m³/h)
					Topo basalto (m)		Topo Botucatu/ Pirambola (m)		NE último medido (m)	NE msnm	Data de Medição do NE		
					prof.	msnm	prof.	msnm					
Boa Vista	1	jan-92	260,00	641	30	650	65	615	64,53	615,47	20/07/2002	20,00	5,83
Cequil	2	jan-03	98,50	678	38	640	96	582	69,62	608,38	04/03/2003	5,00	5,00
Chác. Bambina	3	abr-95	121,00	645	18	627	41	604	64,00	581,00	25/10/2002	5,00	0,83
Clube 22 de agosto	4	fev-91	185,00	630	0	630	180	450	100,85	529,15	NI	8,00	3,33
CTEEP (1)	5	jan-72	162,00	660	60	600	130	530	30,10	629,90	11/04/2003	5,50	0,46
CTEEP (2)	6	jan-72	180,00	650	60	590	135	515	26,00	624,00	14/04/2003	5,50	0,46
Cutral	7	jan-83	365,00	625,5	16	609,5	106	519,5	89,00	536,50	01/01/1983	160,00	124,45
Cutral	8	out-91	340,88	660	0	660	106	554	52,52	607,48	01/10/1991	180,00	NI
Cutral (Pack House P1)	9	mai-85	276,00	680	77	603	122	558	47,30	632,70	01/05/1985	75,00	NI
Cutral P.2 (Pack House)	10	abr-03	270,00	645	75	570	120	525	39,65	605,35	05/05/2003	80,00	53,33
DAAE (ETA-Fonte)	11	mar-95	448,00	690	54	636	227	463	178,30	511,70	24/03/1995	NI	NI
DAAE Paiol	12	dez-85	385,50	600	0	600	190	410	66,39	533,61	07/12/1985	220,00	NI
DAAE Selmi Dei	13	jan-92	405,00	660	28	632	156	504	140,74	519,26	11/01/1992	300,00	NI
DAAE Santa Lúcia	14	nov-83	340,00	600	0	600	80	520	70,50	529,50	25/11/1983	200,00	NI
DAAE Ouro	15	jul-82	256,00	650	0	650	0	650	32,00	618,00	26/07/1982	220,00	NI
DAAE Chácara Flora	16	nov-99	453,00	660	54	606	240	420	157,01	502,99	29/11/1999	300,00	250,00
DAAE Gramado	17	mai-92	413,00	665	26	639	150	515	139,68	525,32	29/05/1992	250,00	NI
DAAE Iguatemi	18	fev-94	333,84	710	0	710	82	628	68,90	641,10	17/02/1994	330,00	NI
DAAE Standard II	19	ago-90	331,50	660	21,76	638,24	97,5	562,5	96,16	563,84	04/08/1990	250,00	NI
DAAE (Santana)	20	nov-74	300,00	601,5	0	601,5	145	456,5	92,00	509,50	30/11/1974	NI	NI
DAAE Corr. Paiva II	21	mar-81	356,00	625,85	0	625,85	154	471,85	98,38	527,47	30/03/1981	150,00	NI
DAAE Pinheirinho	22	jun-85	378,00	643	0	643	142	501	109,21	533,79	01/06/1985	NI	NI
DAAE Pinheirinho	23	jul-92	380,00	697	10	687	185	512	168,77	528,23	31/07/1992	250,00	NI
DAAE São Judas Tadeu	24	set-88	415,00	680	0	680	215	465	155,62	524,38	15/09/1988	150,00	NI
DAAE SP-255	25	mai-96	409,00	660	10	650	133	527	141,45	518,55	02/05/1996	350,00	290,00
DAAE Aldo Lupo	26	ago-98	362,00	720	23	697	34	686	65,71	654,29	10/02/2000	350,00	291,66
DAEE (margens do Ribeirão das Cruzes)	27	ago-00	103,00	495	0	495	0	495	3,15	491,85	08/00	50,00	16,66
DAEE/CETESB	28	jan-88	400,00	680	0	680	180	500	150,00	530,00	21/01/1988	NI	NI
Empresa Cruz	29	dez-87	201,00	600	0	600	158,75	441,25	115,00	485,00	11/12/1987	25,00	NI
Externato Santa Therezinha	30	out-94	218,00	670	29	641	203	467	150,44	519,56	07/04/1997	2,00	2,00
Faz. Salto Grande (Lupo S/A)	31	jul-83	152,00	500	0	0	0	500	0,00	500,00	19/08/1998	19,80	6,60
Fazenda Morro da Uva	32	set-89	96,00	540	0	540	0	540	31,50	508,50	30/09/1989	9,60	0,80

(continua...)

Tabela 3. Continuação.

Poço	Número do poço	Data de perfuração	Profundidade (m)	Cota (m)	Descrição geológica				Medidas de nível estático			Vazão máxima outorgada (m³/h)	Vazão média outorgada (m³/h)
					Topo basalto (m)		Topo Botucatu/ Piramboia (m)		NE último medido (m)	NE msnm	Data de Medição do NE		
					prof.	msnm	prof.	msnm					
Fazenda Santa Joana	33	fev-96	60,00	640	18	622	25	615	18,00	622,00	01/02/1996	18,00	3,75
Fazenda São Joaquim (Usina Zanin)	34	mai-87	212,00	600	0	600	113	487	46,50	553,50	26/05/1998	108,00	108,00
Fazenda São Joaquim (Usina Zanin)	35	set-97	307,00	610,9	0	610,9	115	495,9	77,00	533,90	27/09/1997	99,20	99,20
Fazenda São Joaquim (Usina Zanin)	36	jan-97	225,00	622,75	0	622,75	86	536,75	91,45	531,30	24/02/1997	60,00	15,00
Fertibrás	37	fev-92	67,00	682	23	659	35	647	37,50	644,50	01/02/1992	12,00	2,00
Fertibrás P2	38	mai-95	62,00	682	21	661	35	647	35,00	647,00	01/07/1995	12,00	2,00
FMC	39	jan-96	180,00	675	27,3	647,7	137	538	21,80	653,20	28/10/1996	22,50	2,33
Hospital SP	40	set-84	286,00	680	41	639	239	441	155,40	524,60	03/07/1997	6,00	3,00
Instituto de Educação e Cultura Liceu Monteiro Lobato	41	set-99	182,63	645	28	617	180	465	143,52	501,48	01/09/1999	3,27	0,41
Kaiser	42	set-94	418,00	620	0	620	176	444	126,36	493,64	01/12/1994	250,00	NI
Kaiser	43	nov-94	406,00	650	10	640	192	458	152,58	497,42	15/01/1995	250,00	NI
Lupo S/A	44	ago-99	362,04	635	22	613	236	399	137,36	497,64	24/08/1999	180,00	180,00
Lupo S/A	45	ago-02	306,00	660	22	638	166	494	158,00	502,00	25/08/2002	30,00	17,42
Lupo S/A	46	jan-90	360,00	630	29	601	198	432	120,99	509,01	23/01/1990	150,00	125,00
Maktub	47	out-97	152,00	618	0	618	85	533	90,50	527,50	31/10/1997	12,00	0,50
Nestlé	48	dez-98	350,00	640	0	640	108	532	122,70	517,30	03/12/1998	100,00	83,33
Nestlé	49	fev-85	322,50	620	0	620	128	492	123,30	496,70	01/02/1985	30,00	23,33
Nigro	50	dez-98	319,53	670	30	640	137	533	157,62	512,38	04/05/1999	20,00	16,67
Penitenciária	51	fev-94	400,00	701	43	658	309	392	199,95	501,05	01/03/2002	NI	NI
Penitenciária - P3	52	jun-90	250,00	NI	41	ND	212	ND	157,00	ND	25/06/1990	NI	NI
Posto Morada do Sol	53	mai-98	110,00	680	25	655	50	630	37,98	642,02	05/04/1998	6,50	3,25
Ripasa	54	out-85	84,00	630	ND	ND	0	630	ND	ND	14/10/1985	10,20	NI
Sadia Concorórdia	55	ago-94	418,00	680	12	668	175	505	159,55	520,45	19/08/1994	NI	NI
SESC	56	mai-98	286,00	650	20	630	210	440	149,50	500,50	13/05/1998	16,50	8,25
Sun Home Indústria de Alimentos	57	fev-96	120,00	680	29	29	72	608	64,00	616,00	01/02/1996	NI	NI
Tropical Shopping Center	58	mar-96	170,00	600	0	600	121	479	105,00	495,00	08/03/1996	15,00	4,00
UNESP Farmácia (poço 2)	59	jul-02	271,00	630	36	594	142	488	122,35	507,65	15/06/2002	30,00	13,75
UNESP-Odonto	60	mar-97	263,20	670	32	638	186	484	159,50	510,50	18/03/1997	15,00	12,50
DAAE Santana II	61	NI	390,00	610	ND	ND	ND	ND	92,00	518,00	01/03/2002	250,00	250,00

ND: não determinado; NI: não informado; NE: nível estático.

Entretanto, é a análise dos mapas potenciométricos (Figura 9) que permite uma melhor visualização dos níveis pretéritos e atuais na cidade de Araraquara, devido ao bombeamento.

O mapa da Figura 9A representa os níveis próximos à condição original do aquífero, antes do início da exploração. Essa condição é presumida, pois foram utilizados os dados dos primeiros poços perfurados na região e outros em áreas distantes da interferência de poços em exploração. Nele, pode-se verificar o fluxo de Sudeste para Noroeste, com gradiente de 0,0002 a 0,02 m/m entre a área de afloramento (recarga direta) e a confinada do aquífero.

Na sequência, os mapas entre 1985 a 1995 (Figura 9B) e entre 1996 a 2003 (Figura 9C) mostram a inflexão e o estreitamento entre as linhas potenciométricas em torno da área Centro-sudeste do perímetro urbano de Araraquara. Isto evidencia o abatimento dos níveis na região central da cidade, que é resultado da exploração principalmente dos poços do DAAE. Contudo, a perfuração e o bombeamento dos poços no distrito industrial (região Sudeste da área estudada) não têm sido suficientes para causar rebaixamentos significativos no local, mantendo a área como zona de recarga.

Os dois últimos mapas mostram que há perdas de potencial hidráulico de 10 a 15 m em áreas próximas ao centro da cidade em um período de 20 anos. Provavelmente, essas perdas estão associadas somente ao regime de bombeamento e às interferências entre poços, não sendo indicativas de perda das reservas pela extração maior que a capacidade do aquífero em recompor o armazenamento.

Notou-se, pela análise dos poços perfurados no período entre 1996 e 2003 (Figura 9C), que não houve redução sensível dos níveis potenciométricos no centro da cidade, mostrando, provavelmente, que os níveis potenciais estão mais estáveis. Isto indicaria que, com a manutenção do regime de bombeamento e da densidade dos poços tubulares no centro de Araraquara, os níveis potenciométricos se estabilizariam em valores não muito diferentes dos observados atualmente. É importante ressaltar que a repetição de poços em mapas de diferentes períodos deve-se à existência do registro do nível piezométrico destes em mais de uma data.

Muito embora somente um trabalho de detalhe, envolvendo uma modelação numérica tridimensional, poderia estabelecer as reais capacidades de exploração do aquífero sem comprometer as reservas, é seguro afirmar que o SAG em Araraquara tem mostrado que suportaria ainda forte incremento nas extrações, com novos poços, sobretudo se estes fossem totalmente

penetrantes e respeitassem as distâncias mínimas entre poços, de 1.000 m. Essas afirmações foram obtidas por meio da estimativa de rebaixamentos teóricos causados por um poço bombeando 200 m³/h, a 100 e 1.000 m: 32 e 21 m, respectivamente. Portanto, aceitando o rebaixamento adicional de 15 m (mais o nível dinâmico do futuro poço), pode-se reforçar que a distância de 1.000 m é adequada.

CONCLUSÕES

O SAG, constituído pelas formações Botucatu e Piramboia, apresenta em Araraquara uma excelente capacidade de produção. Os poços bem construídos, avaliados de acordo com a descrição de seus perfis, apresentam vazões médias de 108 m³/h (máxima de 427 m³/h), com capacidade específica entre 0,1 a 13,0 m³/h/m. A espessura máxima medida no SAG em Araraquara é de 328 m (poço 26), mas possivelmente alcança 350 m.

O SAG em Araraquara é explorado por 245 poços. O DAAE é responsável por uma extração total medida de 35.598 m³/dia, por meio da operação de 12 poços. Essa extração não tem causado problemas ao SAG. O acompanhamento dos níveis potenciométricos tem mostrado rebaixamentos no setor central da cidade, provavelmente como resultado do próprio bombeamento e da interferência entre poços próximos. Foram registradas quedas nos níveis em algumas captações, mas estes são pontuais. O pequeno rebaixamento adicional ocorrido entre 1996 e 2003 é uma forte evidência de que o SAG tem capacidade para suportar uma exploração muito mais pronunciada, sobretudo se os novos poços de produção forem distribuídos longe da zona central da cidade.

Usando os parâmetros hidráulicos obtidos pela interpretação dos testes de bombeamento, foram estimados os rebaixamentos teóricos causados por um poço bombeando a 200 m³/h, a 100 e 1.000 m: 32 e 21 m, respectivamente. Portanto, aceitando o rebaixamento adicional de 15 m (mais o nível dinâmico do futuro poço), a distância de 1.000 m é adequada. Vale ressaltar que a distância proposta é conservadora, uma vez que o método de cálculo baseou-se estritamente em uma situação de aquífero confinado.

Por fim, a melhor adequação entre demanda, exploração e custos não deve prescindir de uma modelação numérica que simule a exploração atual e os cenários futuros de expansão da cidade.

REFERÊNCIAS

- ASSINE, M. L.; PIRANHA, J. M.; CARNEIRO, C. D. R. Os Paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, A. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 77-93.
- COOPER, H. H.; JACOB, C. E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *American Geophysical Union*, v. 27, p. 526-534, 1946.
- DOMENICO, P. A.; SCHWARTZ, W. *Physical and chemical hydrogeology*. New York: John Willey & Son, 1990. 824 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; VIDAL, A.; SCHMIDT, G.; GARDUÑO, H. The Guarani Aquifer initiative – towards realistic groundwater management in a transboundary context. *Case Profile Collection 9*. The World Bank, Washington (DC), 2009. 28 p.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; HOWARD, K. Groundwater use in developing cities – Policy issues arising from current trends. *Hydrogeology Journal*, v. 19, p. 271-274, 2011.
- GOLDBERG, K.; GARCIA, A. J. V. Paleogeography of the Bauru Group, a Dinosaur-bearing Cretaceous Unity, Northeastern Paraná Basin, Brazil. *Cretaceous Research*, v. 21, p. 241-254, 2000.
- HIRATA, R.; GESICKI, A.; SRACEK, O.; BERTOLO, R.; GIANNINI, P. C.; ARAVENA, R. Relation between sedimentary framework and hydrogeology in the Guarani Aquifer System in São Paulo state, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 31, p. 444-456, 2011.
- MARQUES, L. S.; ERNESTO, M. O. Magmatismo Toleítico da Bacia do Paraná. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, A. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca, 2004. p. 245-264.
- PERRONI, J. C. *Otimização dos sistemas de bombeamento dos poços tubulares profundos*. Geo Hidro, Araraquara, São Paulo, 2003.
- PIERRE, A. B.; PERRONI, J. C. Avaliação dos poços tubulares profundos do município de Araraquara. *Corner Perfurações de Poços Ltda.*, v. 4, Araraquara (SP), 1994.
- PIUCI, J.; CAMPOS, H. Potencial do aquífero Botucatu na região de Araraquara (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1984, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ABAS, 1984. p. 323-342.
- RAPOSO, M. *Paleomagnetismo do enxame de diques do Arco de Ponta Grossa*. Tese (Doutorado) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- SOUZA FILHO, M. N.; PIERRI, A. B. Água subterrânea em Araraquara: uma alternativa que deu certo! *Relatório ao DAAE*, v. 1, Araraquara (SP), 1996.