



CARACTERIZAÇÃO HIDROFACIOLÓGICA E MONITORAMENTO DOS NÍVEIS D'ÁGUA NO SISTEMA AQUIFERO GUARANI NA CIDADE DE ARARAQUARA (SP)

HYDROFACIOLOGIC CHARACTERIZATION AND WATER LEVEL MONITORING IN THE GUARANI AQUIFER SYSTEM IN THE ARARAQUARA CITY – SP

Bruno Tambellini Scalvi¹; Didier Gastmans²

Artigo recebido em: 07/06/2016 e aceito para publicação em: 22/08/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i3.28643>

Resumo: O Sistema Aquífero Guarani (SAG) constitui uma das maiores unidades hidroestratigráficas do continente sul-americano e está entre os aquíferos mais explorados no Estado de São Paulo. Nesse contexto o presente trabalho teve como objetivo a caracterização do arcabouço hidroestratigráfico do SAG na cidade de Araraquara, bem como a avaliação do rebaixamento dos níveis d'água no aquífero, decorrente da extração atual, por meio do monitoramento contínuo dos níveis d'água em poço tubular abandonado. Na área de estudo foram reconhecidas três formações geológicas: Formação Pirambóia; Formação Botucatu e a Formação Serra Geral. No SAG foram caracterizadas quatro hidrofácies: A, B e C, que representam a Formação Pirambóia e D constituída pela Formação Botucatu. As unidades estão separadas por descontinuidades geológicas, reconhecidas nos perfis, e foram diferenciadas em função do conteúdo argiloso presente nos arenitos, que condicionam as propriedades hidráulicas do reservatório. Ao longo de 710 dias de monitoramento foi observado um rebaixamento total de 4,98 m no poço monitorado, decorrentes do bombeamento realizado na cidade. A contribuição de cada um dos poços, para o rebaixamento total, foi estimada utilizando-se a equação de Cooper-Jacob. Utilizando as vazões médias históricas para cada poço de bombeamento o rebaixamento calculado foi de 4,96 metros. Observou-se que poços em um raio de 4200 metros do poço de observação apresentaram contribuições significativas no rebaixamento observado.

Palavras-Chave: Sistema Aquífero Guarani. Águas Subterrâneas. Arcabouço Hidroestratigráfico. Monitoramento de Nível D'água. Araraquara.

Abstract: The Guarani Aquifer System (GAS) is one of the most important hydrostratigraphic unit from South America, and groundwater is highly explored in the São Paulo State (BR). This current study aimed to characterize the hydrostratigraphic framework of GAS in the city of Araraquara, and evaluate the drawdown of water levels in the aquifer through the automated and continuous monitoring in an abandoned well located in the central region of the city. In the study area were recognized three geological formations: Pirambóia, Botucatu and Serra Geral. Four Hydrofacies were characterized: A, B and C, representing the Pirambóia Formation and D the Botucatu Formation. After 710 days it was observed a total drawdown of 4.98 m on the monitored well and the contribution of each well was estimated using the Cooper-Jacob equation. The calculated drawdown was 4.96 m using the historical average flow rates for each pumping well. Wells with maximum distance of 4200m had higher contribution to the drawdown.

Keywords: Guarani Aquifer System. Groundwater. Hydrostratigraphic Framework. Water Level Monitoring. Araraquara

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam uma importante fonte de suprimento de água, utilizadas tanto no abastecimento público,

quanto como insumo para as atividades econômicas, contribuindo para o bem estar da população. Nesse sentido, o Sistema Aquífero Guarani (SAG), que constitui uma das mais importantes unidades hidroestratigráficas da

1 Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho" (UNESP). E-mail: btscalvi@gmail.com

2 Centro de Estudos Ambientais (CEA)- (UNESP). E-mail: gastmans@rc.unesp.br

porção meridional do continente sul americano, além de apresentar usos relacionados a atividade agroindustrial, cumpre um importante papel no abastecimento público de água. A unidade ocupa uma área superior a 1.000.000 km² que se estende pelos territórios de Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai (GASTMANS *et al.*, 2012).

Em sua porção setentrional, o SAG apresenta grande relevância para o abastecimento público, seja devido a sua produtividade quanto a excelente qualidade natural de suas águas, fazendo com que a unidade se apresente como uma opção atrativa para o abastecimento, continuamente procurada por usuários públicos e privados (HIRATA *et al.*, 2012). Esse cenário é observado especialmente no Estado de São Paulo, onde inúmeros municípios exploram suas águas, como é o caso do município de Araraquara, situado na porção central do Estado, no qual o abastecimento de água, a partir da década de 1970, vem sendo parcialmente suprido por poços perfurados no SAG.

Entretanto, para uma adequada gestão dos recursos hídricos subterrâneos contidos no SAG, é necessária a consolidação do conhecimento em relação ao arcabouço geológico do aquífero. Neste contexto, se faz apropriada a busca pela identificação de heterogeneidades e arquitetura dos reservatórios, que permitam fornecer informações importantes para a tomada de decisão para futuros investimentos em locações de poços e, conseqüentemente, otimização no abastecimento de água.

Além disso, em função da intensa exploração das águas subterrâneas do SAG no estado de São Paulo, efeitos dessa extração representados pelo rebaixamento da superfície piezométrica e perda de volumes armazenados, vêm sendo observados em vários municípios. De acordo com o Instituto Geológico do Estado de São Paulo, na cidade de Ribeirão

Preto a extração ocasionou rebaixamentos nos níveis piezométricos superiores a 40 metros na região central da cidade, e a implantação de ações de restrição à perfuração de novos poços foi necessária (IG, 2004).

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivos caracterizar o arcabouço hidrogeológico do SAG no município de Araraquara, com base na utilização de perfis e seções geofísicas e descrições litológicas de poços perfurados. Também se constitui em objetivo deste trabalho avaliar o rebaixamento na superfície piezométrica do aquífero devido ao bombeamento de poços de abastecimento público, através do monitoramento de um poço de observação localizado na região central da cidade, possibilitando a estimativa de parâmetros hidrodinâmicos que poderão ser utilizados futuramente, para simulações numéricas de fluxo das águas subterrâneas.

2 ASPECTOS GEOLÓGICOS E HIDRO-GEOLÓGICOS DO SAG

O SAG está associado ao conjunto de rochas sedimentares mesozoicas continentais siliciclásticas, que ocorrem na bacia sedimentar do Paraná, com limites estratigráficos marcados pela discordância permo-eotriássica em sua base, e no topo pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Sua geometria, compartimentação e arquitetura do preenchimento sedimentar e fluxo das águas subterrâneas são controlados pelos principais elementos estruturais dessa bacia (LEBAC, 2008a). Na área de estudo o arcabouço geológico do aquífero é representado por um quadro estratigráfico simples, constituído pelas formações Botucatu e Pirambóia, que se assentam de maneira discordante sobre a Formação Corumbatai e são recobertos pelos basaltos da Formação Serra Geral (Figura 1).

Período	Grupo	Formação
Cretáceo		Fm. Serra Geral
Jurássico	São Bento SAG	Fm. Botucatu
Triássico		Fm. Pirambóia
Permiano	Passa Dois	Fm. Corumbataí

Figura 1 - Unidades estratigráficas constituente do SAG na área de estudo – Unidades em vermelho constituem o SAG (Modificado de PAULA e SILVA et al., 2005)

Figure 1 - Stratigraphic units of the Guarani Aquifer System in the study area – Units in red constitute the GAS (Modified from PAULA e SILVA et al., 2005)

A Formação Corumbataí, unidade que representa o substrato geológico do SAG, foi depositada em um ambiente de sedimentação essencialmente marinho, durante o Permiano. É limitada no topo por uma discordância regional que marca o início de um processo de continentalização dos depósitos sedimentares da Bacia do Paraná (MILANI, 1997).

Assentada sobre a discordância regional permo-eotriássica, a Formação Pirambóia, constitui a unidade inferior do SAG, sendo reconhecida pela predominância da deposição eólica sobre a deposição fluvial, caracterizada por diferentes associações de fácies de duna, interduna e de lençóis de areia, que por vezes apresentam interação com depósitos de canais fluviais e planícies de inundação (CAETANO-CHANG, 1997). Esta formação é caracterizada pela ocorrência de sucessivas camadas arenosas, geralmente avermelhadas e de granulação média a fina, depositados durante o final do Triássico e início do Jurássico. Os arenitos desta unidade geralmente apresentam estratificações plano-paralelas e cruzadas de médio e grande porte e apresentam porosidades variando entre 12% e 35% (CAETANO-CHANG, 1997;

CAETANO-CHANG; WU, 2006).

Na cidade de Ribeirão Preto, em subsuperfície, Paula e Silva et al. (2008) identificam na Formação Pirambóia a predominância de arenitos argilosos, com altos valores de radioatividade em perfis de raios gama. Os autores subdividem a unidade em três hidrofácies, individualizadas por seus atributos geofísicos peculiares.

A erosão causada pela intensa abração eólica ocorrida no final do Mesozoico foi responsável pela formação de uma superfície sobre a qual se depositaram extensos campos de dunas da Formação Botucatu (MILANI et al., 2007). Essa superfície foi muito bem caracterizada por Paula e Silva et al. (2008) na cidade de Ribeirão Preto, marcando a passagem de arenitos argilosos radioativos, pertencentes a Formação Pirambóia, para arenitos pouco argilosos e com baixa radioatividade da Formação Botucatu.

A unidade é caracterizada pela presença predominante de arenitos finos a médios, friáveis, quartzosos, bem arredondados, bem selecionados, com estratificações cruzadas de grande e médio porte. De acordo com Soares (1975), as espessuras da Formação Botucatu não ultrapassam os

150 metros. Entretanto, é consenso entre diversos autores que sua espessura é bastante variável (PAULA e SILVA, 2008; SOARES, 1975; ASSINE et al., 2004). Segundo Assine et al. (2005), a variação das espessuras da Formação Botucatu ocorre, em grande parte, em função da distribuição dos campos de dunas e de seu recobrimento pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

No município de Araraquara, que se localiza na porção central do estado de São Paulo na área da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê/Jacaré (UGRHI-13), as águas subterrâneas cumprem um importante papel no abastecimento público e privado. Dados oficiais indicam que existem cerca de 245 poços perfurados no município, que extraem conjuntamente uma vazão superior a 70.000 m³.dia⁻¹. Desses, doze deles são operados pelo Departamento Autônomo de Água e Esgoto (DAAE), contribuindo com cerca de 50% do volume de água potável consumido pela população local, e o restante é provido por captações superficiais.

O clima de Araraquara é considerado tropical de altitude com invernos secos e registra temperaturas médias anuais na casa dos 20°C. Os índices pluviométricos apresentam médias anuais de 1430 milímetros. Os meses com maiores volumes

de chuva estão concentrados entre novembro e fevereiro. Os outros meses apresentam menores volumes de chuva registrados. Os meses de junho, julho e agosto são os que apresentam os menores índices.

A área urbana do município de Araraquara encontra-se em sua maior parte assentada sobre sedimentos da Formação Adamantina (Grupo Bauru), do Cretáceo Superior, enquanto basaltos da Formação Serra Geral afloram na porção noroeste do município, e os sedimentos das formações Botucatu e Pirambóia ocorrem na porção leste do município (PIUCI & CAMPOS, 1984) (Figura 2).

Na área de estudo o SAG apresenta comportamento hidrogeológico variável, comporta-se como aquífero confinado nas áreas em que é recoberto pelos basaltos da Formação Serra Geral, ou como aquífero livre a semi confinado em áreas afetadas pelo bombeamento. Nas áreas em que se encontra em contato direto com a Formação Adamantina, ou em algumas regiões onde a Formação Botucatu aflora também é possível observar as condições de semi confinamento até o não confinamento da unidade. O fluxo das águas subterrâneas apresenta direção predominante SE-NW, e a avaliação temporal das variações dos níveis d'água em poços perfurados na unidade indica que, apesar da intensa retirada de água realizada na cidade, pouca influência na direção regional do fluxo foi observada ao longo do tempo (HIRATA et al., 2012).

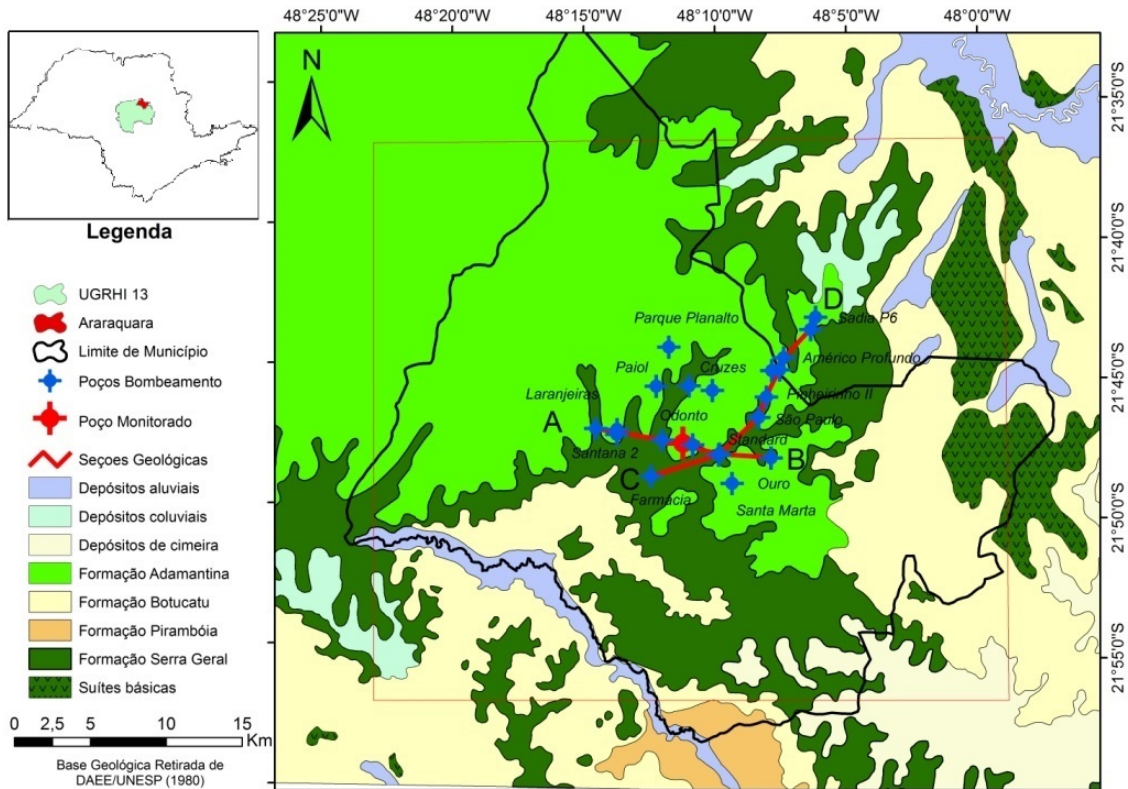


Figura 2 - Mapa geológico do município de Araraquara e adjacências. Em destaque observam-se os poços e seções geológicas utilizadas no trabalho. O quadrado no mapa principal representa a área de referência para os mapas das figuras 5 e 6.

Figure 2 - *Geological Map from Araraquara. Wells and sections used in the work are presented. The square in the main map represents the reference area for the maps presented on figures 5 and 6.*

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização do arcabouço hidrogeológico do SAG, em subsuperfície na cidade de Araraquara, foi efetuada a partir de dados geológicos de poços perfurados na cidade (Figura 2), obtidos por meio da consulta ao acervo de dados do escritório do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Também foram analisados perfis geofísicos calibrados de quatorze desses poços, constituídos por: curvas de raios gama (RG), resistividade normal curta (SN), resistividade induzida (IL) e sônico compensado (BCS), cujos arquivos foram obtidos junto a empresa HYDROLOG.

A variação temporal do nível d'água foi monitorada continuamente em um poço abandonado, perfurado nas dependências da Faculdade de Odontologia da UNESP, localizado na região central da

cidade. O período da aquisição dos dados de nível d'água estendeu-se por 710 dias, com início em setembro/2013 e final em agosto/2015, com perda de dados adquiridos ao longo de 75 dias entre fevereiro e abril de 2014, devido a problemas no equipamento utilizado no monitoramento, um transdutor de pressão do tipo *Level Logger*, da Schlumberger, sem correção barométrica. O transdutor foi configurado para leituras de nível a cada 5 minutos, possibilitando grande flexibilidade temporal para as interpretações. Para a discussão dos resultados, foram calculadas as médias diárias da profundidade do NA, o que minimiza os efeitos da não correção dos dados originais pela variação da pressão barométrica.

Os dados de precipitação da estação C5-125 (DAEE-Araraquara), contemplando o período de realização do estudo, foram obtidos no banco de dados do DAEE

(disponível em: <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>).

Dados de ensaios de bombeamento realizados nos poços do DAAE de Araraquara, armazenados nos arquivos do DAAE em Araraquara, foram reavaliados com o objetivo de se estimar os valores de transmissividade do SAG, a serem utilizados na estimativa do rebaixamento observado no poço de monitoramento devido ao bombeamento na cidade. Essa estimativa foi realizada aplicando-se a solução de Cooper-Jacob (COOPER et al., 1946), que tem como base a equação de Theis (1935), e considera que para distâncias muito pequenas entre os poços de bombeamento e de observação, associado a um prolongado tempo de observação, o parâmetro “u”, da função W(u), pode ser aproximado, simplificando a solução da equação de Theis. Essa simplificação é apresentada na equação 1, abaixo:

$$s = 2.3Q/4T \log[(2.25Tt)/(r^2S)] \quad (1)$$

Onde:

s – rebaixamento observado no poço de observação

Q – vazão no poço de bombeamento

T – Transmissividade

t – Tempo de observação no poço de observação

r – Distância entre o poço de observação e de bombeio

S – Coeficiente de armazenamento estimado do aquífero

O rebaixamento observado no poço monitorado consiste na somatória dos rebaixamentos devidos a cada poço de bombeamento situado em seu entorno, sendo possível estimar a contribuição individual de cada um desses poços com base na equação acima. A parametrização das variáveis da equação obedeceu aos seguintes critérios: as vazões de bombeamento de cada poço foram estimadas com base nas médias históricas de vazões dos poços operados

pelo DAAE – Araraquara, valores fornecidos pela autarquia; a transmissividade média calculada a partir dos ensaios de bombeamento, única para todos os poços; o tempo de observação de 710 dias; e a distância entre o poço de bombeamento e o de observação, estimada a partir do Google Earth.

Esses dados permitiram a estimativa dos valores do coeficiente de armazenamento para o aquífero na cidade de Araraquara, com base no rebaixamento observado no poço de monitoramento. O valor do coeficiente de armazenamento foi ajustado por tentativa e erro, buscando-se uma aproximação entre o rebaixamento medido no poço de observação e o calculado. Iniciou-se esse processo adotando-se o valor do coeficiente de armazenamento proposto por Hirata et al. (2012), de 1×10^{-4} .

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Arcabouço Geológico de Subsuperfície do SAG

O reconhecimento de superfícies que representam discordâncias geológicas (*datum*) é o primeiro passo no entendimento da sucessão deposicional e das relações entre as unidades geológicas. No caso do SAG, a superfície regional mais importante, reconhecida por diversos autores, é representada pelo contato entre as formações Pirambóia e Corumbataí, e constitui o substrato impermeável do aquífero (LEBAC, 2008 a,b; GASTMANS et al, 2012). Entretanto, na cidade de Araraquara, nenhum dos poços perfurados alcançou essa superfície. Para a análise aqui apresentada, uma segunda superfície regional importante, representada pelo contato entre as formações Pirambóia e Botucatu, foi reconhecida em subsuperfície e utilizada como *datum* estratigráfico.

Na área de estudo, o arcabouço geológico de sub-superfície do SAG é formado pelas formações Pirambóia e Botucatu, tendo os basaltos da Formação Serra

Geral como camada sobreposta (Figuras 3 e 4).

Em sub-superfície a Formação Pirambóia é constituída basicamente por arenitos com matriz argilosa, intercalados com raros estratos de rochas pelíticas, principalmente na sua porção inferior, alternando para pacotes mais espessos e de menor conteúdo de material argiloso em sua porção superior. Uma vez que nenhum poço alcançou a unidade subjacente, as espessuras totais da Formação Pirambóia na área de estudo não puderam ser determinadas, e as espessuras parciais variaram de 60 até 230 m, com máxima observada no poço Paiol, situado a oeste da área urbana de Araraquara.

As feições observadas nos perfis geofísicos indicam que sedimentação dos arenitos da Formação Pirambóia ocorreu inicialmente em ambiente de menor energia, passando a ambientes fluviais de maior energia, caracterizados pela granocrescência ascendente observada, traduzida pela diminuição dos valores de Raios Gama (RG) em direção ao topo da unidade. A avaliação é corroborada pelos perfis de resistividade (RES), uma vez que sedimentos mais finos apresentam resistividades menores. As exceções são feitas nas ocorrên-

cias de pacotes de arenitos que aparecem interdigitados aos pelitos na unidade e apresentam alguma porosidade, que por consequência aumenta os valores da resistividade medida.

O contato entre as formações Botucatu e Pirambóia é caracterizado por uma superfície de discordância, possivelmente gerada por abrasão eólica quando da implantação das dunas associadas a desertificação associada a Formação Botucatu. Nos perfis geofísicos essa superfície é caracterizada pelo aumento brusco nos valores de RG e diminuição da RES.

Em subsuperfície a Formação Botucatu é constituída quase essencialmente por camadas arenosas, caracterizadas por valores baixos de RG e mais altos no perfil de RES, devido à presença de poros preenchidos por água. A ocorrência de camadas de arenitos da Formação Botucatu interdigitados aos derrames de basaltos da Formação Serra Geral foi observada em alguns dos poços avaliados. Entretanto, para efeitos de correlação, a base do primeiro derrame foi considerada como início das atividades vulcânicas na bacia, e sua profundidade utilizada na definição do contato entre as formações (Figura 4).

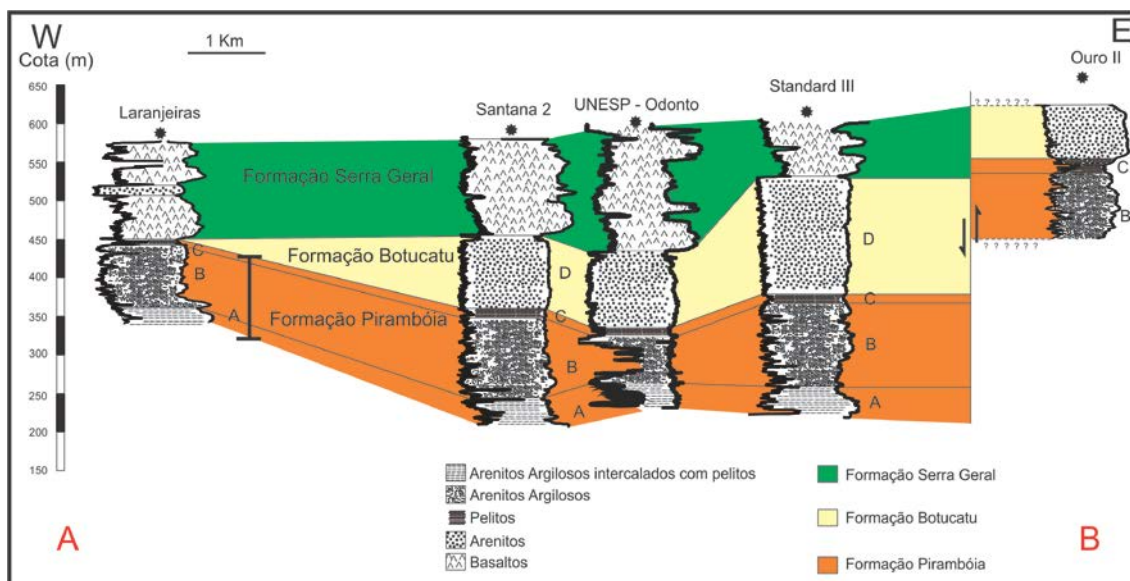


Figura 3 - Seção geológica A-B (E-W). Curva à esquerda representa os dados de Raios Gama e curva da direita os de Resistividade

Figure 3 - Geological cross section A-B (E-W). The left log curve shows the Gama Ray data and the right one the resistivity data

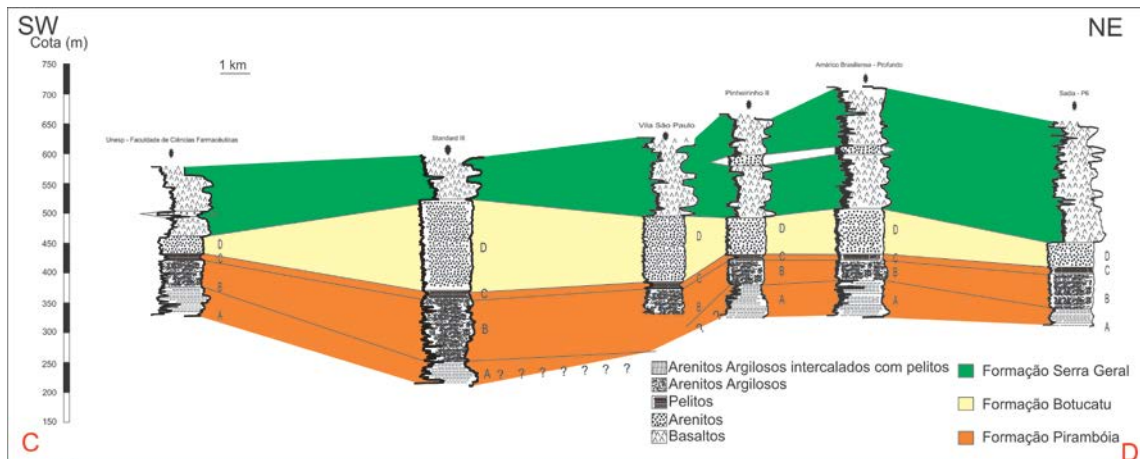


Figura 4 - Seção geológica C-D (SW-NE). Curva à esquerda representa os dados de Raios Gama e curva da direita os de Resistividade

Figure 4 - Geological cross section C-D (SW-NE). The left log curve shows the Gama Ray data and the right one the resistivity data

A Formação Botucatu apresenta espessuras variáveis, que vão de 150 metros no poço Standard III, localizado na porção central da cidade, até sua ausência total, observada à oeste da cidade, como mostrado nas seções geológicas das figuras 3 e 4. As maiores espessuras da unidade estão localizadas na porção central da área urbana. Na região leste da cidade existem evidências de movimentação tectônica que teriam promovido o soerguimento das unidades e causado a erosão da porção superior da Formação Botucatu e todo o pacote de basaltos (Figura 3). A variação das espessuras dos arenitos da Formação Botucatu (Figura 5), observada na região leste da cidade, também pode estar associada às condições de deposição da unidade em ambiente desértico, refletindo a formação de

dunas e sua geometria, que posteriormente foram soterradas pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral. Devido à ausência de evidências tectônicas na porção oeste da área, a pequena espessura ou inexistência dos arenitos da Formação Botucatu nesta região ocorre associada às condições deposicionais em ambiente desértico.

As espessuras dos basaltos da Formação Serra Geral são bastante variáveis, apresentando uma tendência de aumento em direção a NE, possivelmente associadas ao preenchimento do paleorrelevo associado ao modelo de deposição de campos de dunas eólicas. As maiores espessuras são encontradas na porção centro-norte da área, em poços perfurados no município de Américo Brasiliense (Figura 6).

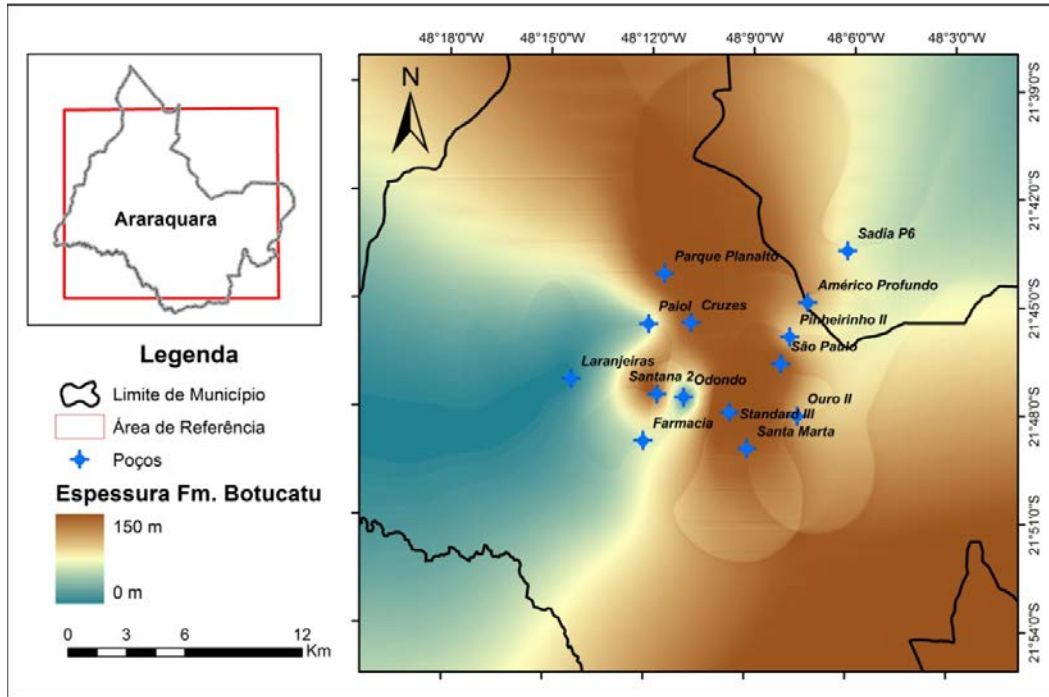


Figura 5 – Mapa de Isópachas da Formação Botucatu
Figure 5 – *Isopach map from Botucatu Formation*

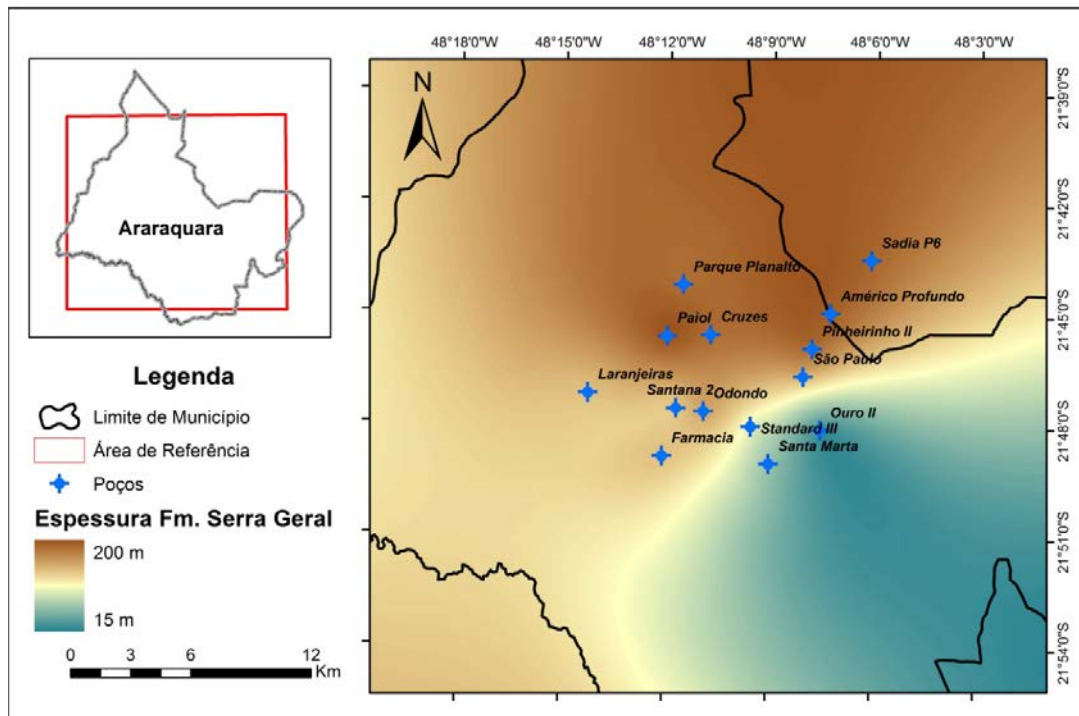


Figura 6 – Mapa de Isópachas da Formação Serra Geral
Figure 6 – *Isopach map from Serra Geral Formation*

As porosidades dos arenitos constituintes do SAG foram calculadas a partir dos valores de tempo de trânsito (sônico) com correção por argilosidade (Equação

2). A partir dos resultados obtidos é possível observar maior conteúdo argiloso na matriz dos arenitos da Formação Pirambóia que apresenta valores médios inferiores aos

da Formação Botucatu, constituída por arenitos bem selecionados e com pouca ou nenhuma presença de argila, respectivamente 24,5% e 33% (Tabela 1).

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m} - VSH \left(\frac{\Delta t_{SH} - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m} \right) \quad (2)$$

Onde:

Δt_m = tempo de trânsito na matriz;

Δt_f = tempo de trânsito na mistura de fluidos;

Δt = tempo de transito em um pé de rocha (matriz + fluido);

ϕ = porosidade total da rocha;

VSH é o índice de argilosidade;

Δt_{SH} é o tempo de trânsito nos fofinhos posicionados abaixo da camada da rocha reservatório.

Tabela 1 – Valores de porosidades médios calculados a partir dos perfis geofísicos (em %)

Table 1 – Average values of porosities calculated based on geophysical loggings (expressed on %)

Poços	Fm. Pirambóia	Fm Botucatu	Fm. Pirambóia			Fm Botucatu
			Hidrofacies			
			A	B	C	D
Santana	22,7	32	13,5	25,6	29,1	32
Santa Marta	28,4	33,4	26,9	28,9	29,4	33,4
Ouro II	16,9	36,8	-	27,9	22,7	36,8
Laranjeiras	12,5	-	-	20,6	17	-
Pinheirinho	23,8	31,5	23,3	28	20,1	31,5
Vila São Paulo	25,0	33,9	24,9	27,8	22,2	33,9
Parque Planalto	26,5	33,5	22,1	28,7	28,6	33,5
Paiol	24,9	31,8	19,1	26,6	29,1	31,8
Cruzes	25,2	31	23,2	27,6	24,8	31
Standard III	24,4	34	21,5	24,8	26,9	34
Média	24,5	33,1	21,8	26,7	25	33,1

Obs: “—” indicam que a unidade não foi observada no determinado poço

Obs: “—” indicate that the unit is absent

6 CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES HIDROFACIOLÓGICAS

Variações observadas no conteúdo argiloso das unidades geológicas, apresentadas acima, alteram suas propriedades hidráulicas, e permitiram a definição e discriminação de quatro hidrofacies, constituintes do SAG na área de estudo. As hidrofacies

foram designadas por meio das letras: A, B, C e D. As hidrofacies A, B e C representam variações dentro da Formação Pirambóia, da sua base para o topo respectivamente, enquanto apenas uma hidrofacies, a hidrofacies D, representa a Formação Botucatu, devido a sua homogeneidade litológica (Figura 7).

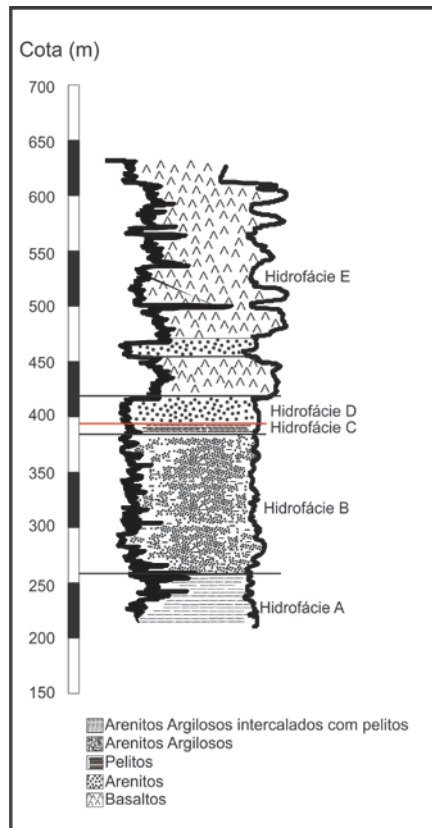


Figura 7 - Perfil esquemático do poço Paiol interpretado por Raios Gama (curva da esquerda) e Resistividade (curva da direita). Destaque em vermelho para superfície superior da hidrofacies C (contato entre as Formações Pirambóia e Botucatu).

Figure 7 - Schematic profile of Paiol well interpreted based on Gama Ray (left curve) and Resistivity (right curve). Highlight, in red, to the superior surface of the hydrofacies C (limit between Pirambóia and Botucatu formations)

Hidrofacies A

Esta unidade representa a base da Formação Pirambóia na área, sendo constituída por intercalações de arenitos com matriz argilosa e rochas pelíticas. Altos valores de RG indicam a presença de material argiloso, também foi observado que os valores para RES apresentam grandes variações devido às intercalações. A porosidade média estimada para esta hidrofacies é de aproximadamente 22%, podendo variar entre 13% e 27% (Tabela 1). A espessura da hidrofacies A não pôde ser determinada, pois nenhum dos poços perfurou esta seção por completo. As características hidráulicas dessa hidrofacies não foram consideradas boas devido à quantidade de argila presente no pacote rochoso, o que diminui os valores de condutividade hidráulica e consequentemente de transmissividade.

Hidrofacies B

Unidade pertencente a porções superiores da Formação Pirambóia que, apesar de apresentar pequenas intercalações entre arenitos finos e arenitos com matriz argilosa, tem como característica maior espaçamento entre as camadas visivelmente mais argilosas. A diminuição no *background* dos valores de RG e RES, somada a maior homogeneidade no pacote rochoso, consolidam uma porção mais arenosa, que tem como característica a granocrescência ascendente. As características hidráulicas e o potencial aquífero desta unidade foram considerados maiores que a da hidrofacies A e a porosidade média estimada gira em torno de 27%, com variações entre 20,6% e 28,9% (Tabela 1).

Hidrofácies C

A hidrofácies C, também inserida na Formação Pirambóia, é constituída por uma delgada camada de rochas pelíticas que apresentam valores altos de RG e baixos valores de RES, evidenciando o caráter argiloso. Os limites inferior e superior desta unidade são caracterizados pela presença de discordâncias erosivas. A porosidade média desta unidade é baixa (Tabela 1).

Hidrofácies D

A hidrofácies D é basicamente constituída pelos sedimentos arenosos da Formação Botucatu. O perfil RG apresenta valores bastante baixos e os valores de RES se apresentam maiores devido ao menor conteúdo argiloso da unidade. Apresentando variações entre 31% e 36,8%, a porosidade média desta unidade, na casa dos 33%, é considerada muito boa e com grande potencial aquífero (Tabela 1).

6.1 Temporal dos Níveis d'água do SAG

O poço monitorado apresenta profundidade útil de 295 metros e seção filtrante, em diâmetro de 6", a partir dos 201 metros. O perfil geológico indica que o topo da Formação Botucatu está localizado à 195 metros de profundidade, recoberto por basaltos da Formação Serra Geral.

Quando de sua perfuração (março/2012) o nível d'água do poço monitorado se encontrava a 175,33 metros de profundidade. Apesar da profundidade do NA, observa-se que o mesmo encontra-se próximo ao topo do aquífero, denotando que o mesmo comporta-se como semi-confinado, ou mesmo livre, a depender do rebaixamento causado pelo bombeamento.

Em setembro/2013, quando do início do monitoramento, o nível d'água já apresentava sinais do rebaixamento causado pelo bombeamento na cidade, medido a uma profundidade de 177,35 metros. Ao final do período de monitoramento, em agosto/2015, o nível d'água encontrava-se a 182,33 metros, representando um rebaixamento total de 7 metros, considerando-se o nível d'água na época da construção, ou um rebaixamento de 4,98 metros para o período de monitoramento. O rebaixamento observado é aproximadamente linear, indicando uma taxa de depleção dos níveis d'água de aproximadamente 2,22 metros por ano (Figura 8).

Com base nessa evolução temporal observada, e considerando-se que não existam variações nas taxas de bombeamento na cidade de Araraquara, é possível estimar que em cinco anos os níveis d'água medidos nesse poço estejam a 193,43 metros, significando um rebaixamento dos níveis de 11,10 metros abaixo da profundidade atual.

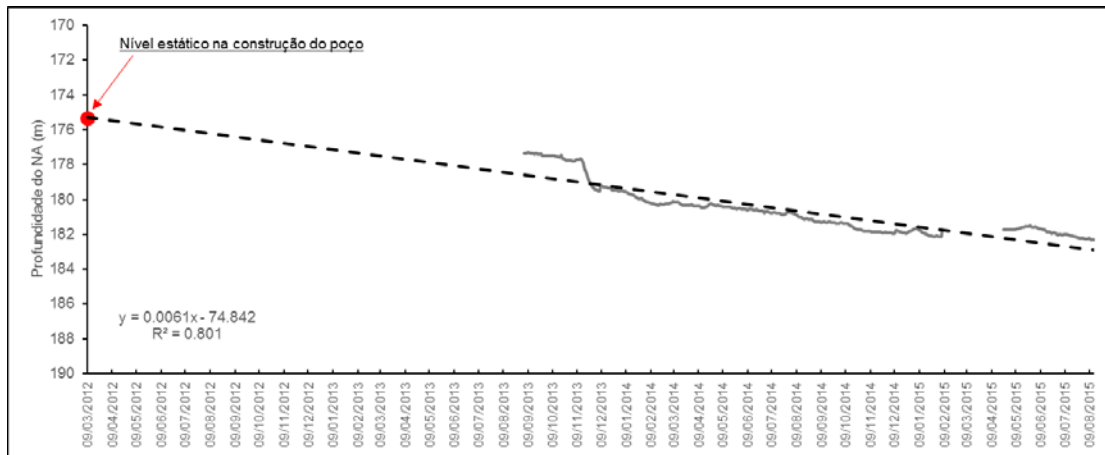


Figura 8 - Rebaixamento observado no poço de monitoramento. Observar que a reta de regressão representa de maneira conveniente o comportamento do nível d'água ao longo de todo o período, desde a instalação do poço

Figure 8 - Drawdown observed in the monitoring well. It should be noticed that the regression line represents in a convenient way the behavior of the water level during the whole period, since the well installation

Em função do bombeamento constante na cidade, não é possível estabelecer uma relação entre a variação dos níveis d'água, ou de sua recuperação, em razão da existência de algum tipo de recarga (Figura 9). Entretanto, podem ser observados, no comportamento temporal, períodos em que o rebaixamento é um pouco mais acentuado, intercalado a períodos em que ocorre uma pequena recuperação dos níveis, conforme indicado na figura 9. Essas variações, apesar de serem cíclicas e serem as-

sociadas a períodos chuvosos anteriores, também podem ser associadas a variações nas taxas de bombeamento. A avaliação conjunta dessa informação e do histórico de bombeamento dos poços do DAEE poderia elucidar essa relação.

Apesar dos dados terem sido perdidos devido à falha técnica no equipamento, observa-se entre os meses de fevereiro e junho de 2015, uma recuperação nos níveis d'água, após o período chuvoso.

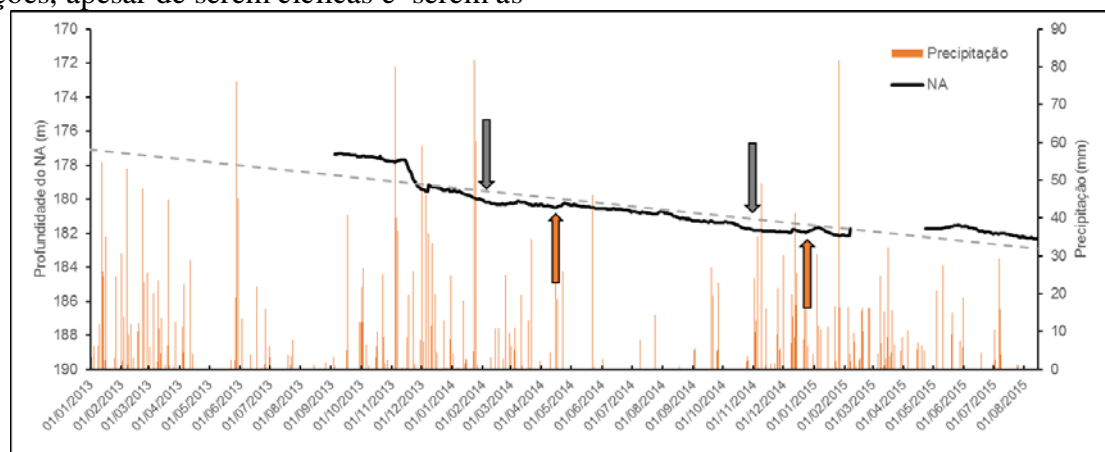


Figura 9 - Rebaixamento observado no poço de monitoramento e a precipitação no período. Observar períodos de rebaixamento um pouco mais acentuado nos meses de verão, indicados pelas setas cinza, possivelmente reflexo da diminuição da recarga no período de inverno, ou aumento do consumo, e períodos de recuperação, indicados por setas laranja, subsequentes aos rebaixamentos

Figure 9 - Drawdown observed in the monitored well and the rainfall in the period. Observe shaper drawdown in the summer times, indicated by the gray arrows, possibly associated with the minor rain content in the winter time or even increase in the consume, and recovery periods, indicated by orange arrows

6.2 Avaliação dos Parâmetros Hidrodinâmicos do SAG

A reinterpretação dos ensaios de bombeamento disponíveis indicou que a transmissividade média do SAG na cidade de Araraquara é de $239,6 \text{ m}^2 \text{ dia}^{-1}$, próximo aos valores apresentados por Hirata et al. (2012).

Utilizando-se a equação simplificada de Cooper-Jacob foi calculada a contribuição específica de cada poço em operação pelo DAAE na cidade de Araraquara para o rebaixamento observado no período compreendido entre o início do monitoramento (setembro/2013) e o final do monitoramento (agosto/2015), sendo possível o

ajuste, e consequente estimativa, dos valores do coeficiente de armazenamento para o SAG, assim como estimar as distâncias a partir das quais não existe uma interferência efetiva nos níveis para o tempo de bombeamento especificado.

Para a reprodução do rebaixamento observado no poço de observação, os valores do coeficiente de armazenamento ajustados são da ordem de 4×10^{-2} , indicando condições de semi confinamento na área (Tabela 2). Esses valores de parâmetros hidrodinâmicos indicam que, para o período de observação, poços situados a distâncias maiores que 4.200 metros não influenciam no rebaixamento observado na área (Figura 10).

Tabela 2 - Rebaixamentos e parâmetros hidrodinâmicos utilizados na simulação do rebaixamento produzido por cada um dos poços

Table 2 - *Drawdown and hydrodynamic parameters used in the simulation which aimed to calculate the contribution of each well in the total drawdown*

Poço	Distância (m)	s	T (m ² /dia)	Q (m ³ /dia)	Rebaixamento (m)
Poço Santana	1350	4,00E-02	240	3200	1,761
Poço Santa Lúcia	2200	4,00E-02	240	4300	0,974
Poço Pq. Gramado	2400	4,00E-02	240	3100	0,695
Poço Standard	2500	4,00E-02	240	4300	0,611
Poço Fonte	2900	3,50E-02	240	6900	0,608
Poço Cruzes	3800	2,50E-02	240	6000	0,119
Poço Paiol	4200	2,00E-02	240	3900	0,107
Poço Santa Marta	4200	2,00E-02	240	3000	0,082
Poço Lupo	4400	3,00E-02	240	7000	----
Poço Ouro	5850	3,00E-02	240	2900	----
Poço Iguatemi	6400	3,00E-02	240	7000	----
Poço Pinheirinho	6300	3,00E-02	240	4600	----
Poço Selmi Dei	6500	3,00E-02	240	4900	----
Poço Rodovia	7200	3,00E-02	240	5600	----
Rebaixamento Total Calculado					4,957

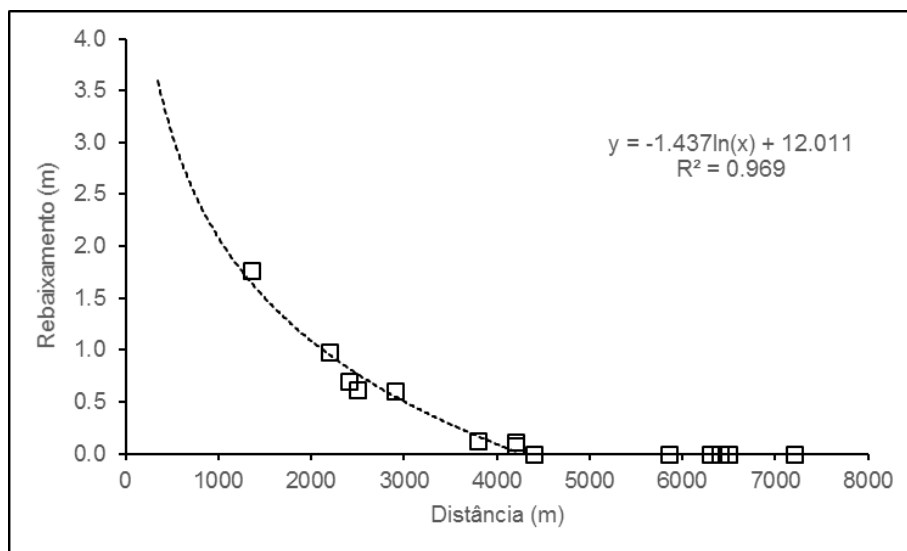


Figura 10 - Rebaixamentos calculados versus distâncias dos poços de bombeamento
Figure 10 - Calculated drawdown versus the distance of each pumping well

Utilizando-se a mesma hipótese para projeções de rebaixamentos futuros (cinco anos), considerando que ocorra a manutenção das vazões de exploração e o número de poços, mostra que para os parâmetros hidráulicos calculados o rebaixamento esperado seria de 15,46 metros, muito maior que aquele calculado a partir da relação de rebaixamento de 2,22 metros por ano (11,10 metros).

Para a reprodução do rebaixamento esperado, alterações no coeficiente de armazenamento seriam esperadas, assim a condição de semi confinamento seria mantida, mas o coeficiente de armazenamento passaria para 0,06-0,07.

Deve-se considerar que esse é um exercício inicial, realizado com uma solução analítica para o problema do rebaixamento, sem considerar variações nas taxas de recarga e de bombeamento ao longo do tempo, entretanto serviria como parametrização inicial na elaboração de modelos numéricos de fluxo, que visassem a predição dos comportamentos dos níveis d'água no SAG na cidade de Araraquara, em condições de regime transiente.

7 CONCLUSÕES

A avaliação de informações de sub-superfície permitiu a caracterização do arcabouço geológico SAG no município de

Araraquara. O SAG é constituído pelas formações Pirambóia e Botucatu, tendo os basaltos da Formação Serra Geral como camada selante. A superfície de contato entre as formações Corumbataí e Pirambóia, reconhecida como a discordância regional no marco estratigráfico do SAG na Bacia do Paraná, não foi alcançada por nenhuma perfuração na cidade de Araraquara, e para efeitos de correlação outra superfície, o contato entre as formações Botucatu e Pirambóia, foi utilizada como *datum* estratigráfico.

A Formação Pirambóia é aflorante apenas no extremo sul do município e possui espessuras máximas observadas entre 60 m e 230 m. A sedimentação da unidade obedece a um regime de granocrescência ascendente e o pacote apresenta porosidade média de 24,5%.

A Formação Botucatu por sua vez aflora nas regiões sul e leste do município de Araraquara e apresenta porosidade elevada em relação à Formação Pirambóia, com valor em 33,1%, entretanto existe grande variação na espessura desta unidade. As maiores espessuras se encontram na porção central da área de estudo, enquanto que as de menor, ou ainda inexistentes, ocorrem a extremo oeste e leste. A grande variação na espessura da Formação Botucatu poderia decorrer de processos tectônicos ou, simplesmente, da deposição

dos derrames de basalto Serra Geral que preservaram o paleorrelevo. A segunda possibilidade foi considerada mais coerente ao analisar a ausência da Formação Botucatu com a base de dados disponíveis.

Os derrames de basalto Serra Geral recobrem grande parte da área de estudo, estando ausentes nas porções onde as formações Botucatu e Pirambóia afloram. As espessuras observadas para esta unidade são bastante variáveis, sendo as de maior espessura, entre 210 e 235 metros, encontradas na porção centro-norte da área.

A partir da análise dos perfis geofísicos, combinados com descrição de amostras de calha, foram discriminadas 4 hidrofacies: A, B, C e D. Estas unidades foram diferenciadas e segregadas devido ao conteúdo de argila nos pacotes analisados que, por consequência, apresentam diferentes propriedades hidráulicas.

As maiores espessuras observadas da Formação Botucatu (hidrofacies D) se encontram na região central da área de estudo e, devido ao seu ótimo potencial aquífero, os próximos poços de abastecimento deveriam ser perfurados nessa área. Por outro lado, o baixo potencial aquífero da hidrofacies A não apresenta justificativa econômica para uma eventual perfuração que corte a unidade por inteiro, porém poderia ser importante para o melhor entendimento geológico da seção do SAG.

O rebaixamento observado no poço de monitoramento foi de 7 m durante os

710 dias de observação, passando de 175,33 metros de profundidade para 182,33 metros, apresentando comportamento quase linear, com taxa de abatimento dos níveis de 2,22 metros/ano. Ao longo do período de execução do estudo foram observados períodos de recuperação dos níveis, que podem estar relacionados tanto com a recarga quanto às variações nas taxas de bombeamento.

O valor médio encontrado para transmissividade do SAG na cidade de Araraquara é de $239,6 \text{ m}^2 \text{ dia}^{-1}$. A somatória dos valores de rebaixamento calculados, utilizando a equação de Cooper-Jacob e o valor médio de transmissividade, consiste em 4,957 metros para o período. Os valores do coeficiente de armazenamento são da ordem de 4×10^{-2} , indicando condições de semiconfinamento para o aquífero na área de estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Pró-Reitoria de Pesquisa da UNESP pelo auxílio financeiro concedido, a direção da Faculdade de Odontologia de Araraquara (UNESP) pela cessão do poço para a realização do monitoramento e aos revisores autônomos pelas valiosas considerações que contribuíram para a versão final do artigo.

REFERÊNCIAS

ASSINE M.L., PIRANHA J.M., CARNEIRO C.D.R. - Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C. D. R., Brito Neves B.B. (org.). **Geologia do continente sul-americano**: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Beca, p. 77-92, 2004.

ASSINE, M.L. PIRANHA, J.M.; CARNEIRO, C.D.R. Os paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: Mantesso Neto, V. et al. (Eds.)

Geologia do continente sul-americano - evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Brasil: Beca, 2004.

CAETANO-CHANG, M.R., **A Formação Pirambóia no centro-leste do estado de São Paulo**. Habilitation Thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Rio Claro, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 1997.

- CAETANO-CHANG, M.R., WU, F.T, Arenitos flúvio-eólicos da porção superior da Formação Pirambóia, na porção centro-leste paulista. **Rev. Brasil. Geol.** 36, p. 296–304, 2006.
- CETESB. **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.** Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo, 2010-2012, 222 p, São Paulo, 2013.
- COOPER, H.H., JACOB, C.E – A Generalized Graphical Method for Evaluating Formation Constants and Summarizing Well Field History, **Am. Geophys. Unions Trans.**, v. 27, pp. 526-534, 1946.
- DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. **Portal do Departamento de Águas e Energia Elétrica**, Disponível em <http://www.hidrologia.dae.sp.gov.br/>, Data de Acesso 08 de Set 2015.
- GASTMANS, D. REIS, M.M., CHANG, H.K. Geotermometria das águas hipertermais do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências.** p. 208-225, 2012.
- HIRATA, R.; SANGIORGE, M.; WAHN-FRIED, I.; LIMA, J. B. V. - Exploração do Sistema Aquífero Guarani em Araraquara, Geologia Série Científica USP. **Revista do Instituto de Geociências – USP**, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 111-127, Agosto 2012.
- IG, Instituto Geológico – **Sistema de Informação para o Gerenciamento Ambiental do Recurso Hídrico Subterrâneo no Afloramento do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo**, Abril 2004.
- LEBAC. Laboratório de Estudo de Bacias – UNESP, Informe Final - Hidrogeologia do Sistema Aquífero Guarani. GASTMANS, D.; CHANG, H.K. (Coord). Equipe: PAULA e SILVA, F.; CORREA, S.F.; PRESSINOTTI, M.M.N. **Informe Técnico – Consórcio Guarani.** Rio Claro, 127p. 2008a.
- LEBAC. Laboratório de Estudo de Bacias – UNESP, **Mapa Hidrogeológico do Sistema Aquífero Guarani.** Coord.: SINELLI, O. Equipe: CHANG, H.K.; GASTMANS, D.; PAULA e SILVA, F.; CORREA, S.F.; PRESSINOTTI, M.M.N. Informe Técnico – Consórcio Guarani. Rio Claro, 54p. e 8 mapas. 2008b.
- MILANI, E. J. **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental.** 1997. 2 v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.
- MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15. p. 265-287, Maio/Nov.2007.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M.R. Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 77-88, mar.2005.
- PAULA E SILVA, F., CHANG, H. K., CAETANO-CHANG, M. R., SINELLI, O. Arca-bouço geológico e hidrofácies do Sistema Aquífero Guarani, no município de Ribeirão Preto (SP). **Revista Brasileira de Geociências**, 38(1): 56-67, 2008.
- PIUCI, J.; CAMPOS, H. Potencial do aquífero Botucatu na região de Araraquara (SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1984, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: ABAS, p. 323-342, 1984.
- SOARES P.C. Divisão estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, 5, p. 229-251, 1975.
- THEIS, C.V. – The Relation Between the Lowering of the Piezometric Surface and the Rate and Duration of Discharge of a Well Using Groundwater Storage, **Am. Geophys. Union Trans.**, v. 16, pp 519-524, 1935.