

# **RECARGA ARTIFICIAL POR MEIO DE POÇO TUBULAR PROFUNDO, NO MUNICÍPIO DE TAUBATÉ, SP**

**Hélio Nóbile Diniz<sup>1</sup>; Mário Pero Tinoco<sup>2</sup>; Jorge Luiz Monteiro<sup>2</sup>**

## **RESUMO**

Neste trabalho são mostrados os resultados obtidos com a perfuração e realização de ensaios de vazão e de recarga artificial em dois poços tubulares profundos, na área do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté, no Município de Taubaté, SP. Um modelo funcional de recarga artificial de aquíferos foi construído por meio da captação de água das chuvas no telhado da Fábrica de Alimentos da Universidade de Taubaté. No modelo, as águas pluviais podem ser injetadas por gravidade por meio do poço de extração/recarga no Aquífero Tremembé que possui nível potenciométrico em situação topográfica abaixo da água captada e lançada no poço. A descrição detalhada do perfil geológico, obtida por meio de testemunhos das sondagens, mostram a presença de sequências arenosas e conglomeráticas persistentes, intercaladas por camadas de folhelhos, argilitos maciços e nódulos calcáreos, do período Paleogênico. Adicionalmente às metodologias consagradas para interpretação, são empregadas e demonstradas novas técnicas para interpretação hidrodinâmica da recarga artificial dos aquíferos por meio da aplicação da teoria do poço imagem, complementada com uma nova teoria, a do poço imagem espelho d'água.

## **ABSTRACT**

This paper shows the results of the drilling, pump test interpretation and artificial recharge tests conducted in two tubular deep wells built in the Agricultural Sciences Department of the Taubaté University, Taubaté Municipality, São Paulo State, Brazil. A functional model of aquifers artificial recharge was built through the rain water capture on the roof of Taubaté University Food Factory. In the model, the rain water can be injected by gravity in the Tremembé Aquifer through the one well that has potentiometric level below the rain water release pipes. A detailed description of the geological profile, obtained through the drill samples show the presence of sand and conglomeratics persistent sequences, intercalated with shale and massive argillaceous layers, of the Paleogenic period. In addition to the usual methodologies, are demonstrated and employed new techniques for the aquifers artificial recharge hydrodynamics interpretation by the application of the well image theory, complemented with a new postulation, the well water-mirror image theory.

**Palavras-chave:** aquífero sedimentar, recarga artificial de aquíferos, poço tubular profundo

<sup>1</sup> Instituto Geológico do Estado de São Paulo – Secretaria do Meio Ambiente: Av. Miguel Stéfano, 3900 – CEP: 04301-903 – Água Funda – São Paulo, SP, Fone: (11) 5073-5511, Fax: (11) 5077-2219, heliodiniz1@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo: Av. Heitor Vila Lobos, 1229 – CEP: 12243-260 – Vila Ema – São José dos Campos, SP, Fone (12) 3947-1526, Fax: (12) 3941-7927, mtinoco@sabesp.com.br

## **1 - INTRODUÇÃO**

A recarga artificial dos aquíferos, mesmo em uma região com grande quantidade de excedente hídrico, como é o caso do sudeste brasileiro, é alternativa interessante para a conservação dos recursos hídricos, mantendo as águas precipitadas na bacia hidrográfica e diminuindo o escoamento superficial, causador de danos nas áreas urbanas ocupadas, produzidos pelas cheias, e erosão nas áreas rurais.

No Brasil, a recarga artificial dos aquíferos, ainda não é utilizada, embora esta técnica possa trazer benefícios ambientais. Assim sendo, nesta pesquisa, foi estabelecido um modelo prático de recarga artificial de aquíferos utilizando poços tubulares profundos e captação de água das chuvas em telhados.

Esta pesquisa hidrogeológica foi efetuada em aquíferos formados por sedimentos da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté, na bacia hidrográfica do rio Una, bairro Itaim, Município de Taubaté, no Estado de São Paulo.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram construídos dois poços tubulares profundos, um para extração de água subterrânea e recarga artificial do Aquífero Tremembé, e que tem por objetivo suprir as demandas do uso da água subterrânea para irrigação do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté e, outro, auxiliar, para medidas de níveis d'água variáveis devido à injeção de água das chuvas no aquífero.

### **1.1 - Localização e caracterização geomorfológica e climática**

O Município de Taubaté está localizado no Vale do Paraíba, região sudeste do Estado de São Paulo, a aproximadamente 160 km da cidade de São Paulo (figura 1). Os acessos à cidade de Taubaté são feitos pela Rodovia Presidente Dutra, e pela Rodovia Carvalho Pinto.

Situado no Vale do Paraíba, entre a Serra da Mantiqueira e a Serra do Mar, Taubaté apresenta, no seu perímetro urbano, bairros localizados em colinas aplainadas, sustentadas pelos sedimentos do período Paleogênico (época Oligocênica) do Grupo Taubaté. A zona rural, na parte sul-sudeste, avança pela Serra do Mar, enquanto a porção norte-noroeste, pela Serra da Mantiqueira, ambas áreas são caracterizadas por relevo montanhoso (constituído por morros sustentados por rochas cristalinas do Complexo Embu). Na parte central do Município ocorrem as extensas várzeas do rio Paraíba do Sul.

Possui extensão territorial de 655 km<sup>2</sup>, clima tropical com inverno seco, temperatura média anual de 21°C e índice pluviométrico médio anual de 1400 mm.

### **1.2 - Geologia regional**

A Bacia Sedimentar de Taubaté no Estado de São Paulo é constituída por coberturas sedimentares da era cenozóica, está inserida no bloco tectônico Paraíba do Sul, caracterizado pelos

Terrenos Embu e Apiaí, do Complexo Cristalino de idade Pré-Cambriana (Hasui e Ponçano, 1978). A falha de Buquira, ao norte e a falha do Alto da Fartura, ao sul, limitam lateralmente a Bacia Sedimentar de Taubaté das rochas cristalinas.



Figura 1. Mapa de localização do Município de Taubaté, no Estado de São Paulo.

A origem da Bacia Sedimentar de Taubaté deve-se à reativação dos grandes falhamentos E-NE que compõem a Zona de Transcorrência São Paulo (Hasui et al., 1978), representados pelos falhamentos Monteiro Lobato (Sadowski e Carneiro, 1974), do Rio Jaguari (Cavalcante e Kaefer, 1974); e os de Buquira e Bom Retiro (Carneiro et al., 1976). As falhas normais do Palmital, Parateí, São José e Rio Comprido, descritas por Carneiro et al. (1976) representam os deslizamentos gravitacionais e basculamento de blocos (Coltrinari, 1992) que caracterizam as reativações recentes (era Cenozóica) destas antigas falhas transcorrentes.

Os Terrenos Embu e Apiaí que, na região são denominados Grupo ou Complexo Embu e Grupo São Roque, apresentam gnaisses e migmatitos, bandados e oftálmicos, com diferentes graus de migmatização, intercalados por metassedimentos e injeções graníticas retrabalhadas no Ciclo Brasileiro (Santoro et al., 1991).

A Bacia Sedimentar de Taubaté faz parte de um conjunto de bacias tafrogênicas continentais, “o sistema de rifts da Serra do Mar” de Almeida (1976) e, mais recentemente, de “Rift Continental do Sudeste do Brasil” de Riccomini (1989). Estes processos tectônicos ocorreram durante a abertura do Atlântico Sul, formando grabens assimétricos, com basculamento ora para SE, ora para NW,

preenchidos por sedimentos desde o período Paleogênico. Possui formato alongado com aproximadamente 170 km de comprimento e entre 10 e 20 km de largura.

A espessura dos sedimentos (Hasui et al., 1978; Melo et al., 1986) é variável, atingindo, na porção próxima à Serra da Mantiqueira, na sub-bacia de Roseira, 850 m.

A sedimentação ocorreu de maneira sin-tectônica (Souza, 2004), com depósitos psefíticos, decorrentes de processos de *debris-flow*, atuantes nas bordas falhadas da bacia sedimentar, além de depósitos psamíticos e pelíticos, na sua parte central, originados em sistemas flúvio-lacustres.

A bacia sedimentar é parcialmente seccionada por três altos estruturais transversais (Alto de Caçapava, Alto Capela Nossa Senhora do Socorro e Alto Capela Santa Luzia), que formam um conjunto de quatro sub-bacias, intituladas, de norte para sul, Lorena, Roseira, Quiririm e Eugênio de Melo (Marques, 1990).

Neste trabalho adota-se a coluna estratigráfica de Hasui e Ponçano (1978) que reúne no Grupo Taubaté, as Formações Tremembé e Caçapava, sendo estas designações propostas inicialmente por Carneiro et al. (1976) para os depósitos de canais e planícies de rios anastomosados na região de São José dos Campos e Caçapava.

### **1.3 - Hidrogeologia da bacia do rio Paraíba do Sul no Estado de São Paulo**

Na UGRHI-2 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Rio Paraíba do Sul) há dois sistemas aquíferos principais: o das coberturas sedimentares da era cenozóica (Formações Caçapava e Tremembé, e sedimentos recentes do período quartenário), e o das rochas cristalinas, do Pré-Cambriano. Os terrenos sedimentares cenozóicos formam o principal e melhor aquífero da região. Suas características não são uniformes e variam segundo a litologia das formações sedimentares.

Franco Filho e Souza (1994), reconhecem na Bacia Sedimentar de Taubaté duas unidades, a Formação Tremembé, na base, constituída por folhelhos com níveis pirobotuminosos e argilitos de cores verde acinzentadas, com intercalações centimétricas a decimétricas de arenitos, siltitos e brechas intraformacionais, originada em ambiente lacustre. Na parte superior descrevem a Formação Caçapava, que é constituída por sedimentos arenosos e siltosos, com intercalações pelíticas, nas cores cinza, amarelo e vermelho, originada em ambiente fluvial.

As rochas cristalinas ígneas e metamórficas Pré-Cambrianas não formam um aquífero regional contínuo, mas apresentam localmente condições aquíferas através de falhas, fraturas e outras discontinuidades que permitem a circulação das águas subterrâneas.

O Paraíba do Sul, é um rio efluente, cujo fluxo de base é proveniente das fontes que o abastecem. Devido à grande demanda de águas subterrâneas ao longo da rodovia Presidente Dutra, exploradas pelos sistemas de bombeamentos em poços tubulares profundos, e que abastecem grande

parte das populações e das indústrias, principalmente nos Municípios de Jacareí, São José dos Campos e Lorena, o rio Paraíba do Sul mudou de comportamento e passou a recarregar os aquíferos nestes locais (DAEE, 1977b). Nestes locais, o rio Paraíba do Sul, de rio efluente tornou-se um rio influente, infiltrando suas águas que recarregam o Aquífero Caçapava, intensamente explorado.

Devido às características físicas dos solos sobrepostos aos sedimentos paleogênicos do Grupo Taubaté, geralmente constituídos por latossolos vermelho-amarelos, profundos, muito porosos e permeáveis, existe uma tendência à percolação subterrânea das águas precipitadas. O escoamento superficial fica restrito às áreas impermeabilizadas pela ação antrópica, ou então, nas áreas onde ocorrem solos hidromórficos, constituídos por argilas orgânicas pouco permeáveis, na várzea do rio Paraíba do Sul. Assim sendo, em Taubaté, onde predominam latossolos, os aquíferos recebem grande quantidade de recarga, todos os anos.

No Vale do Paraíba, no solo, que pode atingir profundidades de até 70 m, ocorre o aquífero freático, livre, e nos sedimentos paleogênicos, abaixo do solo, ocorrem aquíferos de pouco confinados a confinados.

### *1.3.1 - Sistema aquífero sedimentar Paraíba do Sul ou Taubaté*

O modelo de circulação regional aceito para o Sistema Aquífero Sedimentar Paraíba do Sul – SASPS, segundo o Consórcio ICFKaiser-Logos (1999) mostra que as águas das chuvas recarregam os aquíferos freáticos e sedimentares, em toda a sua extensão não impermeabilizada (figura 2). As águas dos aquíferos fluem em direção às drenagens superficiais, suas áreas de descarga. As condições hidrogeológicas de armazenamento e fluxo subterrâneo destes aquíferos estão relacionadas com os ambientes deposicionais que deram origem à Bacia Sedimentar de Taubaté. Neste sentido, podem-se distinguir, regionalmente, duas unidades com diferentes comportamentos hidráulicos, de acordo com o ambiente em que os sedimentos foram depositados.

A primeira unidade, nas porções sudeste e noroeste da Bacia Sedimentar de Taubaté (respectivamente, Jacareí/São José dos Campos e Lorena/Cachoeira Paulista), está associada ao ambiente sedimentar fluvial com altas vazões em poços profundos (até 200 m<sup>3</sup>/h) e médias de 50 m<sup>3</sup>/h, e Transmissividades em torno de 100 m<sup>2</sup>/dia. A outra, ocorre na região entre Taubaté e Pindamonhangaba, no centro da Bacia Sedimentar, e está associada ao ambiente sedimentar lacustre, apresentando valores menores de vazão, da ordem de 20 a 30 m<sup>3</sup>/h, e com Transmissividade entre 10 e 50 m<sup>2</sup>/dia.

Embora o rio Paraíba do Sul represente a zona de descarga regional dos aquíferos, as fontes que abastecem seus afluentes comportam-se como áreas de descarga local, conferindo curtos tempos de trânsito para as águas subterrâneas. Reconhece-se, também, pela geometria de alguns

aquíferos e composição química de suas águas, a presença de uma circulação regional de longo período.



Figura 2. Modelo de circulação regional para o sistema aquífero sedimentar da Bacia de Taubaté (modificado de Consórcio ICFKaiser-Logos, 1999).

## 2 - MATERIAL E MÉTODOS

Na área do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, em Taubaté, foram construídos dois poços tubulares profundos, ambos com sonda nacional rotativa a aço granulado do Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. A construção dos poços teve por objetivo propiciar os meios para pesquisas hidrogeológicas sobre a recarga artificial e comportamento hidráulico do aquífero sedimentar da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté.

Para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero sedimentar da Formação Tremembé, foram realizados diversos testes de vazão, à medida em que as perfurações avançavam e, com os poços completados, foram realizados testes de vazão máxima e de recarga artificial de aquíferos.

O primeiro poço perfurado foi denominado de poço de extração/recarga pois está sendo utilizado para irrigar culturas experimentais no Departamento de Ciência Agrárias da UNITAU, numa área de 2 hectares e, também, possui um aparato para realizar a recarga artificial do aquífero da Formação Tremembé. Este poço foi ensaiado (por meio de testes de vazão) quando a perfuração estava nas profundidades de 48 m, 66 m e 115 m. Os dados obtidos com os testes de vazão realizados nestas profundidades indicaram que os modelos de aquíferos encontrados foram, sequencialmente, semi-confinado, semi-livre e confinado, ou seja, a sequência sedimentar saturada primeiramente constituiu um aquífero freático (no solo, entre 9 e 16 m, não ensaiada), semi-confinado (em sedimentos terciários entre 16 e 48 m, Transmissividade de  $0,58 \text{ m}^2/\text{h}$ ), depois semi-livre (entre 48 e 66 m, Transmissividade de  $0,58 \text{ m}^2/\text{h}$ ) e, por último, confinado (entre 66 e 115 m, Transmissividade de  $8 \text{ m}^2/\text{h}$  e Coeficiente de Armazenamento de  $0,002$ ). Neste poço, a partir dos 40 m de profundidade, o nível estático encontrado situou-se ao redor de 8 m, enquanto o nível d'água do aquífero freático, situou-se em torno de 9 m de profundidade, indicando que o potencial

hidráulico do aquífero profundo, confinado, está aproximadamente 1 m acima do nível d'água do aquífero freático. Um outro poço, denominado de auxiliar, foi perfurado distante 13,2 m do primeiro (figura 3).

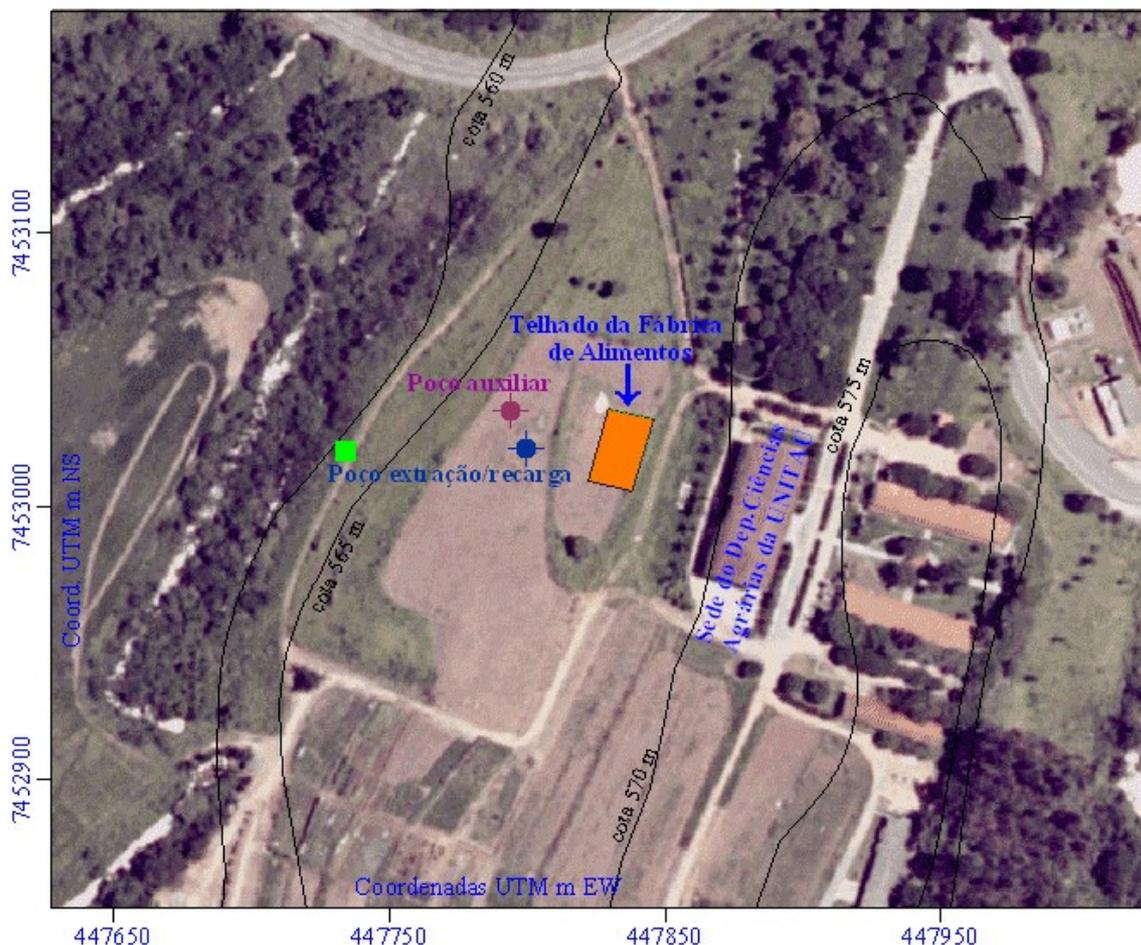


Figura 3. Ortofoto com a localização dos poços no Dep. de Ciências Agrárias da UNITAU.

No poço auxiliar foram realizados testes de vazão quando o mesmo estava com as profundidades de 49 m (aquífero do tipo semi-confinado, Transmissividade de  $0,36 \text{ m}^2/\text{h}$ ) e de 91,7 m (aquífero do tipo confinado, Transmissividade de  $11,7 \text{ m}^2/\text{h}$  e Coeficiente de Armazenamento de 0,0004, figura 4). Este poço foi usado como poço de observação, para medição dos níveis d'água durante a realização de testes de vazão no poço de extração/recarga e, para estudos de recarga artificial no Aquífero Tremembé. Assim, a construção de dois poços tubulares profundos, próximos, possibilitou uma boa avaliação hidrodinâmica do Aquífero Tremembé.

Para a recarga artificial do aquífero sedimentar optou-se pela captação de água proveniente do telhado da Fábrica de Alimentos do curso de Engenharia de Alimentos da UNITAU.

O poço de extração/recarga foi construído a 19,5 m da Fábrica de Alimentos, na sua parte lateral, em local plano, mas com cota 3,3 m abaixo do piso desta (figura 5).

Para a interpretação dos testes de vazão foram utilizados os modelos de Theis (Theis, 1935) para aquíferos confinados, de Hantush (Hantush, 1956) para semi-confinados e de Neuman (1972)

para semi-livre, conforme os tipos de aquíferos indicados pelos dados de rebaixamento  $\times$  tempo obtidos nos testes de vazão realizados nas diferentes profundidades.

Rebaixamento do Poço Auxiliar do Departamento de Ciências Agrárias (poço de extração), em teste de vazão máxima (18/07/2007)

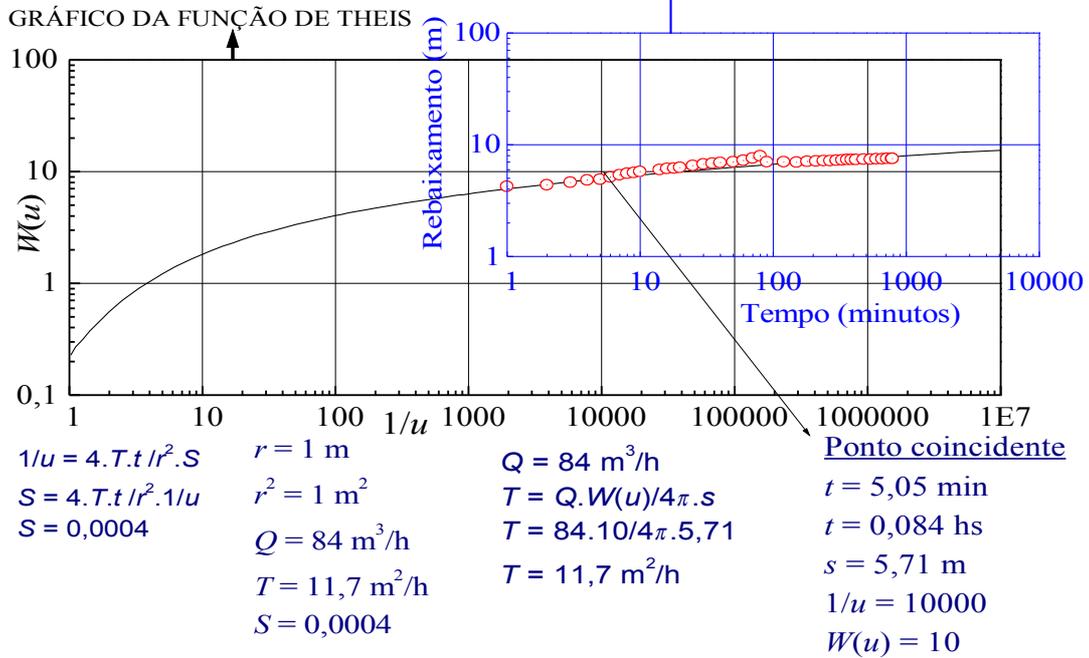


Figura 4. Interpretação dos dados do teste realizado no poço auxiliar, com vazão de  $84 \text{ m}^3/\text{h}$  e rebaixamento medido no próprio poço bombeado.

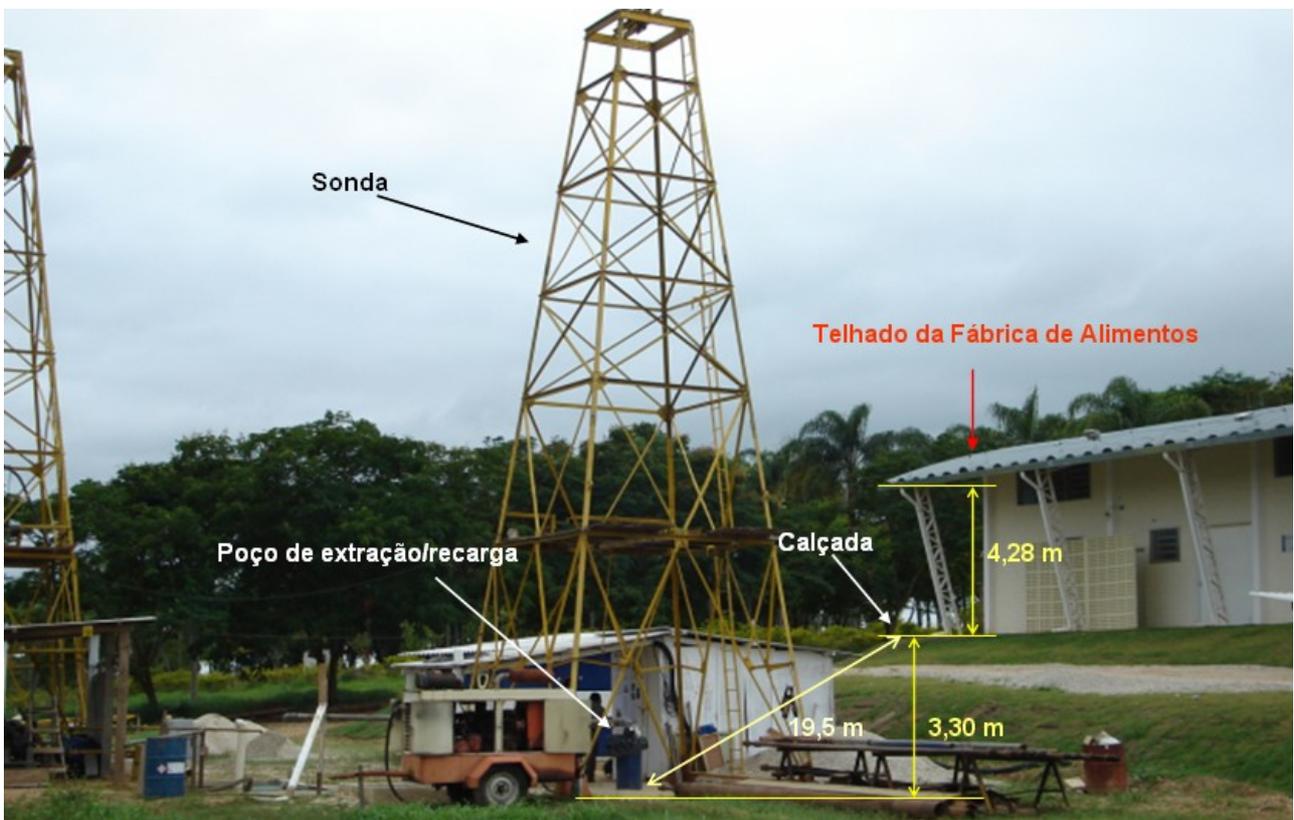
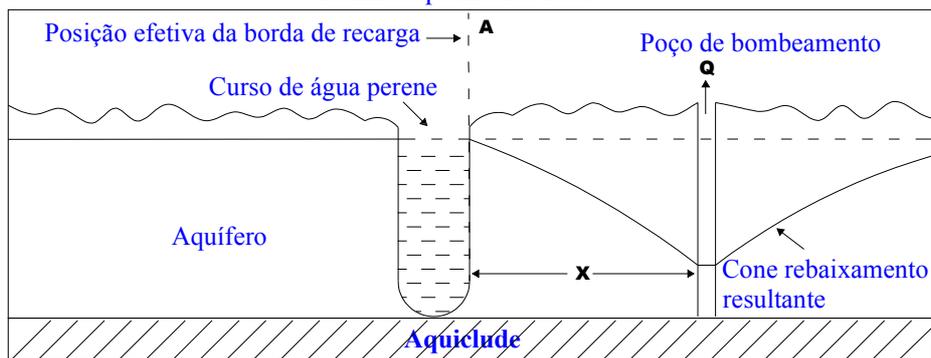


Figura 5. Posição da Fábrica de Alimentos e do poço de extração/recarga.



Cone de rebaixamento de um poço ao encontrar uma barreira positiva  
 Perfil esquemático real



Perfil esquemático idealizado

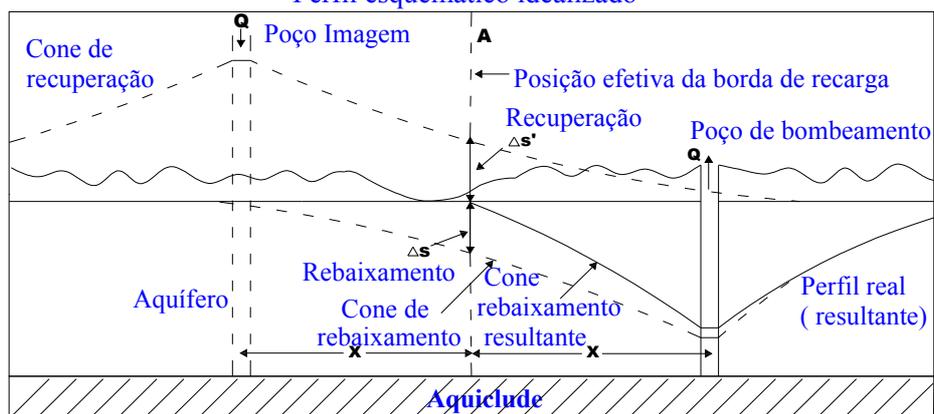


Figura 7. Representação esquemática do efeito poço imagem (modificado de U.S.Geological Survey, 1977) em um cone de rebaixamento limitado por barreira positiva.

Uma outra condição imposta é para a interpretação da influência dos limites horizontais no cone de rebaixamento dos poços. Dois casos são bastante flagrantes, tal qual, quando a barreira negativa horizontal é formada pela superfície do nível d'água em um aquífero livre e qual será o efeito desta barreira negativa quando cessa o bombeamento (início da recuperação) do poço, ou então, qual o efeito da barreira positiva horizontal formada pelo nível d'água de um aquífero livre, quando ocorre injeção de água em um poço de recarga.

Nas condições mencionadas, o efeito quando a barreira negativa horizontal é formada pelo nível d'água de um aquífero livre e, quando cessa o bombeamento de um poço, o efeito resultante (cone de recuperação) é semelhante ao de uma imagem do cone de rebaixamento do poço, invertido em um espelho horizontal (espelho d'água, como ocorre com as imagens refletidas em um lago, porém invertidas, figura 8). Assim, da mesma forma como ocorre quando os limites são laterais, nos limites horizontais (topo do aquífero) a teoria do poço imagem também é válida.

Quando cessa o bombeamento, o cone de recuperação será igual à imagem (barreira negativa) do cone de rebaixamento em um espelho d'água, ou seja, igual ao cone de rebaixamento invertido mas, com vazão de recuperação igual à vazão de bombeamento e com sinal invertido (figura 8).

Quando ocorre injeção de água em um poço de recarga (aquífero livre) o efeito do nível d'água é o de uma barreira positiva no cone de recarga. O resultado é igual ao de um cone de

bombeamento invertido, com a mesma vazão, mas com sinal invertido, ou seja, é o efeito de um espelho d'água (espelho horizontal plano). Assim, a injeção de recarga (vazão injetada) produz um cone invertido ao cone de rebaixamento (figura 9).

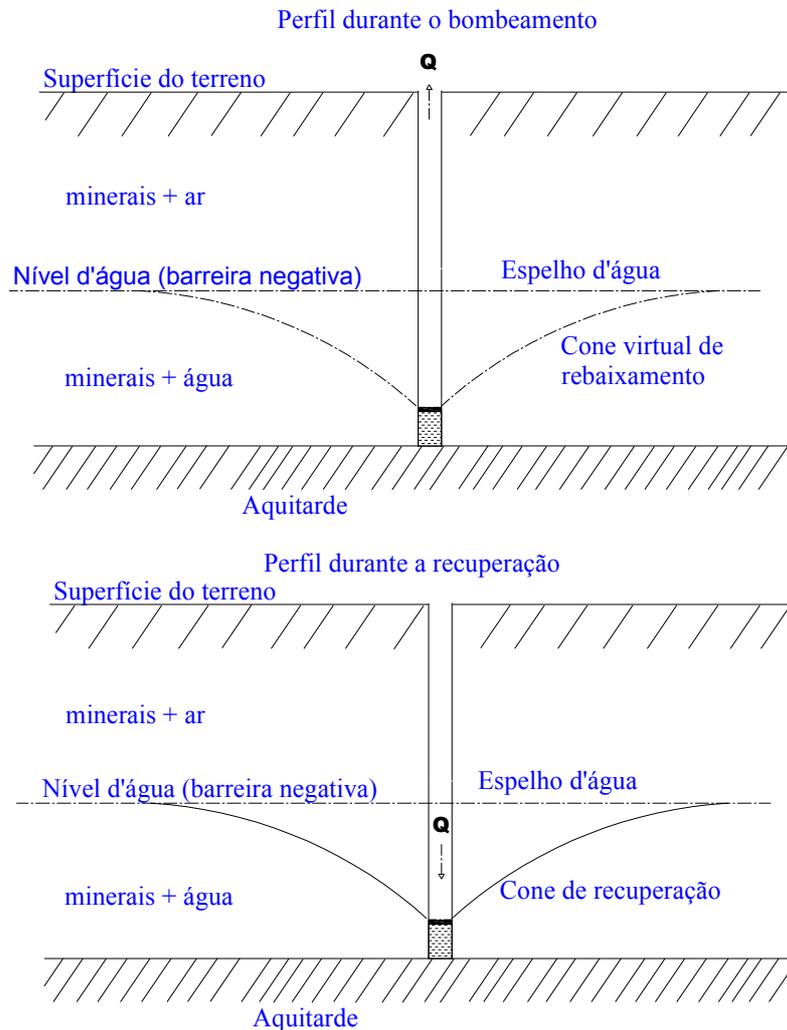


Figura 8. Cone de recuperação de um poço após encerrado o bombeamento (efeito poço espelho d'água, com imagem invertida).

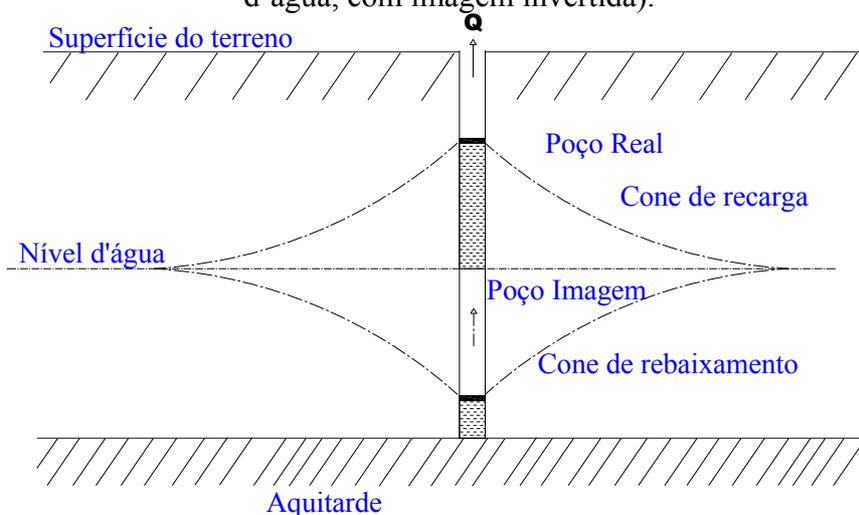


Figura 9. Representação esquemática do efeito poço imagem limitado por barreira horizontal positiva (efeito espelho d'água).

A teoria do poço imagem espelho d'água (espelho horizontal plano), tem duas aplicações imediatas:

1) Na análise dos resultados de testes de vazão, os dados de recuperação × tempo (poço real) serão similares aos dados de rebaixamento × tempo (poço virtual - imagem espelho d'água), e assim, são aplicáveis, nos dados de recuperação, todos os métodos utilizados na hidráulica de poços para rebaixamentos, e suas aproximações. Estes métodos são: de Theis (1935) para aquíferos confinados, de Hantush (1956) para aquíferos semi-confinados, ou de Neuman (1972) para aquíferos semi-livres. Ocorre de forma análoga ao observado nas teorias de rebatimento de planos em relação a uma linha de terra, conforme postulados da geometria descritiva.

2) Embora toda a hidráulica de poços tenha sido desenvolvida para aplicação em dados de ensaios de bombeamento considerando vazões constantes, isto raramente ocorre pois, durante os testes de vazão ocorre rebaixamento do nível d'água no poço, o que acarreta variação da carga hidráulica (aumento da altura manométrica) e que afeta o rendimento do equipamento de extração, de forma que, a vazão decresce no decorrer do bombeamento, sendo, então, variável. Durante a recuperação este efeito não existe pois o poço se recupera com a média das vazões de bombeamento. Sendo assim, é mais preciso utilizar-se os dados de recuperação × tempo do que os de rebaixamento × tempo pois, neste caso a vazão não é constante.

A vazão média durante o rebaixamento (vazão de recuperação) é dada pela equação (1):

$$Q_m = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i \cdot (t_i - t_{i-1})}{t_{\text{total}}} \quad (1)$$

onde  $Q_i$  é a vazão obtida durante um intervalo de tempo igual a  $t_i - t_{i-1}$  e  $t_{\text{total}}$  é o tempo total do teste de vazão.

## 2.2 - Sistema de segurança para a recarga artificial

As obras para a implantação deste projeto de recarga artificial foram realizadas de forma a proporcionar segurança na qualidade da água a ser injetada nos aquíferos profundos.

O desnível entre as calhas para coleta de águas das chuvas e o piso da Fábrica de Alimentos é de 4,28 m (figura 4). O desnível entre este piso da calçada da Fábrica de Alimentos e o piso da laje de proteção do poço de extração/recarga é de 3,30 m, o que totaliza uma diferença de 7,58 m entre as calhas e a entrada de água para injeção no poço de extração/recarga. A pressão resultante desta diferença de níveis proporciona a recarga artificial somente utilizando a força gravitacional.

A água da chuva coletada nas calhas é conduzida por meio de tubos de PVC branco para uma caixa de distribuição (figura 10). A caixa de distribuição das águas das chuvas foi construída em alvenaria (medidas de 2,04 m de comprimento × 0,87 m de largura × 1,47 m de altura, figura 11).

Como a altura do topo da caixa à superfície do terreno é de 1,02 m, sempre há uma coluna de água de 0,45 m abaixo da superfície. Esta caixa foi coberta com tela de proteção em alumínio, de forma a impedir o acesso a ela, por insetos prejudiciais (mosquitos) e que podem depositar ovos ou larvas, o que torna o local impróprio para desenvolvimento de vetores como os da dengue.

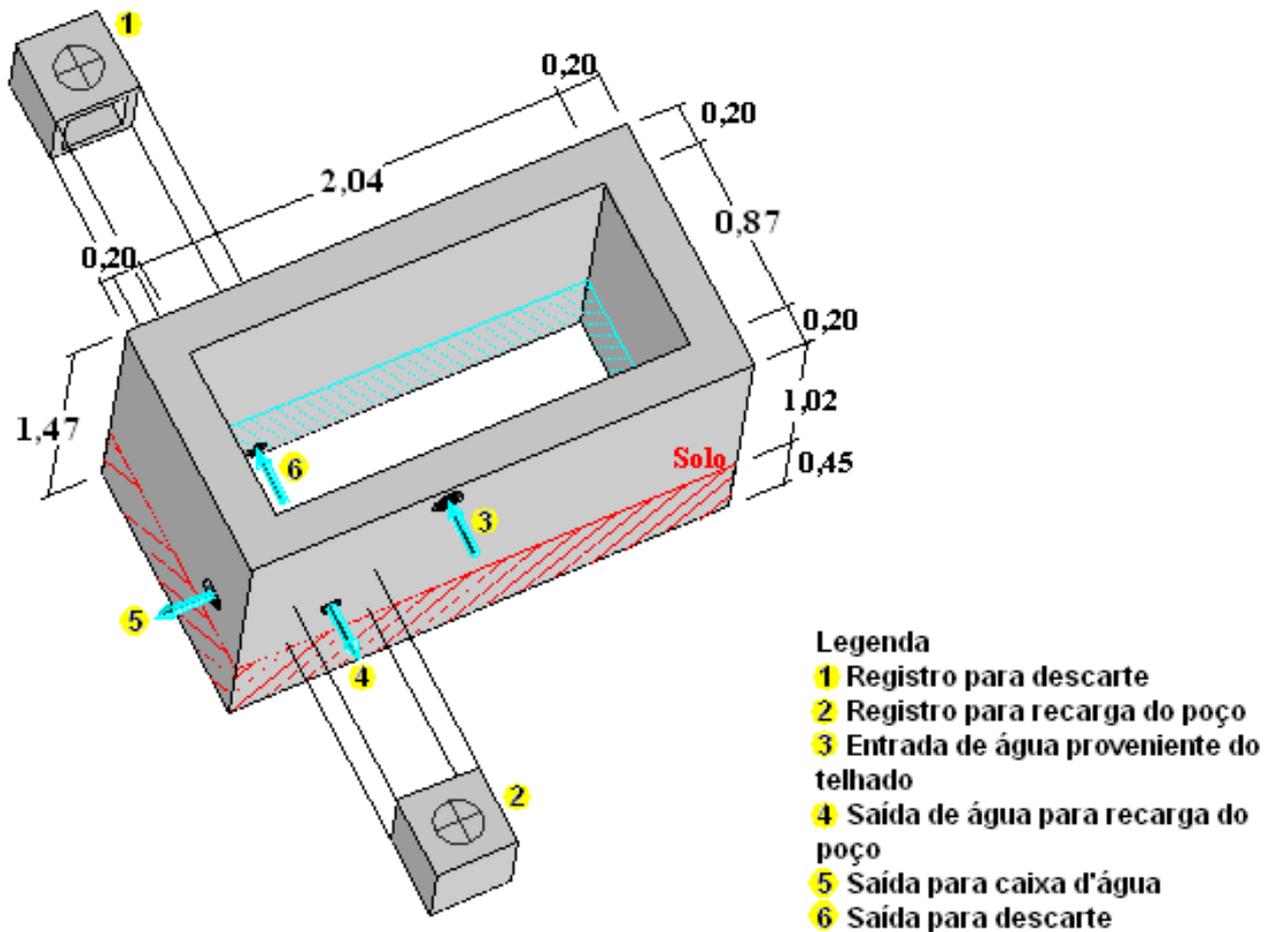


Figura 10. Caixa de distribuição de água proveniente do telhado da Fábrica de Alimentos.

A diferença de nível entre a altura do centro do tubo de lançamento das águas das chuvas (em PVC branco, de 6", item 3 da legenda da figura 10) na caixa de distribuição, e o piso do tubo enterrado proveniente da Fábrica de Alimentos é de 1,45 m. Esta diferença de nível entre o piso do poço e tubo de lançamento (1,45 m) faz com que esta altura do tubo esteja permanente preenchida com água da chuva. Esta forma de lançamento das águas pluviais (1,45 m acima do nível do piso do tubo enterrado proveniente do telhado da Fábrica de Alimentos), com o tubo parcialmente inundado permanentemente, impede que animais (ratos, gambás e insetos) ocupem este espaço (por meio de acesso eventual, pelo telhado), protegendo a qualidade da água injetada.

Uma vez lançada a água da chuva, por gravidade, na caixa de distribuição, esta água passa por um engradado retangular feito de esquadrias de ferro, cercadas por telas de alumínio, apropriado para reter impurezas vindas do telhado da Fábrica de Alimentos, tais como insetos mortos (besouros) e folhas. O acesso fácil a este engradado retangular proporciona a limpeza periódica das impurezas provenientes do telhado.



Figura 11. Lançamento de água do poço na caixa de distribuição.

Na caixa de distribuição há três opções para o fluxo da água das chuvas captadas no telhado da Fábrica de Alimentos:

- 1) ser descartada através do tubo de descarte (em PVC marrom, de 4") situado a 0,45 m abaixo do nível do terreno e, lançada a 8,72 m de distância, em cota de 0,75 m abaixo do piso do poço de extração/recarga. A descarga da água pelo tubo de descarte é controlada por um válvula (registro de gaveta em bronze, de 4") em cuja ponta, no local de lançamento, foi construída uma caixa de proteção em alvenaria contendo uma válvula de retenção (em bronze, de 4") para impedir o acesso ao tubo, vindo do ambiente externo, de insetos, répteis e outros animais;
- 2) ser lançada na caixa d'água de uso geral (como água de reuso), por meio de um tubo em PVC branco, de 6". Este tubo está em um nível mais alto que o tubo de descarte, mas em altura inferior ao tubo de recarga, e não possui válvula ou registro, de forma que está permanentemente aberto e lançando a água da chuva captada no telhado da Fábrica de Alimentos para a caixa d'água de reuso;
- 3) ser lançada, por meio de um tubo de recarga de 4" (em PVC marrom), na lateral interna (no nível do terreno) do tubo de boca (de 15", em chapa de ferro com espessura de 1/8") do poço de extração/recarga e recarregar o aquífero profundo, por gravidade.

Nota-se que, o sistema de recarga da água da chuva não interfere no sistema de bombeamento do poço de extração/recarga pois a água é bombeada por meio de motobomba submersa instalada na ponta de um tubo edutor de ferro galvanizado de 4", vertical, e a água de recarga é lançada na lateral interna do tubo de revestimento.

Como a saída da água das chuvas, para o tubo de recarga, fica em um nível superior ao de descarte e, também ao de lançamento na caixa d'água de uso geral, a recarga somente pode ser efetivada após o fechamento da válvula de descarte e tamponamento do tubo de acesso à caixa d'água de reuso. Ainda, o tubo de recarga possui, junto à caixa de distribuição, uma válvula (registro de gaveta em bronze, de 4") que impede o lançamento involuntário das águas das chuvas no poço de extração/recarga.

Foi instalado um plug de 6", em PVC branco, na entrada do tubo de recarga do poço (na caixa de distribuição) e todo perfurado com broca de 3 mm de diâmetro, como medida suplementar para impedir a introdução de insetos ou partículas pequenas no poço de extração/recarga durante os episódios de recarga artificial.

Assim sendo, todo o sistema possui um bom esquema de segurança para o lançamento da água das chuvas no poço de extração/recarga, o que evitará eventuais problemas futuros de contaminação dos aquíferos profundos.

### **3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Foi realizado, no dia 26/07/2007 um teste de injeção de água no poço auxiliar, com medidas de rebaixamento e recuperação no poço auxiliar (poço onde a água foi injetada) e no poço de extração/recarga (poço utilizado como de observação), com medidas de subida de nível (injeção) e de descida (cessada a injeção de água).

Para não haver alterações na qualidade da água do aquífero, primeiramente foi bombeada água do poço de extração/recarga para a caixa d'água de reuso com capacidade de 15,4 m<sup>3</sup> no dia anterior ao do teste (no dia 25/07/2007). O teste de recarga foi realizado utilizando esta água, injetada através de uma bomba de esgotamento com capacidade de injeção de 27 m<sup>3</sup>/h. Como o volume armazenado na caixa d'água era pequeno para a vazão de injeção, o teste de recarga teve duração de apenas 30 minutos, mas mostrou resultados promissores (figura 12).

De acordo com a teoria do poço imagem espelho d'água mostrada na figura 9 (item 2.1), em um evento de injeção de água (vazão de injeção = -  $Q$ ) realizado em um poço tubular profundo, o nível d'água funciona como uma barreira positiva e o cone de subida do nível devido à recarga é igual à imagem de um cone de rebaixamento (vazão de bombeamento =  $Q$ ) refletida em um espelho d'água (espelho plano horizontal). Desta forma, para os dados de subida de nível ou de descida após encerrada a injeção de água, utiliza-se o modelo de Theis (1935) para interpretação do ensaio de recarga e determinação dos parâmetros hidrodinâmicos de um aquífero livre (ou confinado).

Na figura 13 são mostrados os dados de subida do nível d'água observado no poço de extração/recarga com injeção de água no poço auxiliar e, na figura 14, os de descida do nível d'água, no poço de extração/recarga, após encerrada a injeção de água no poço auxiliar.

Dados de subida de nível d'água do Poço Auxiliar do Departamento de Ciências Agrárias (poço de injeção), no teste de recarga artificial em 26/07/2007

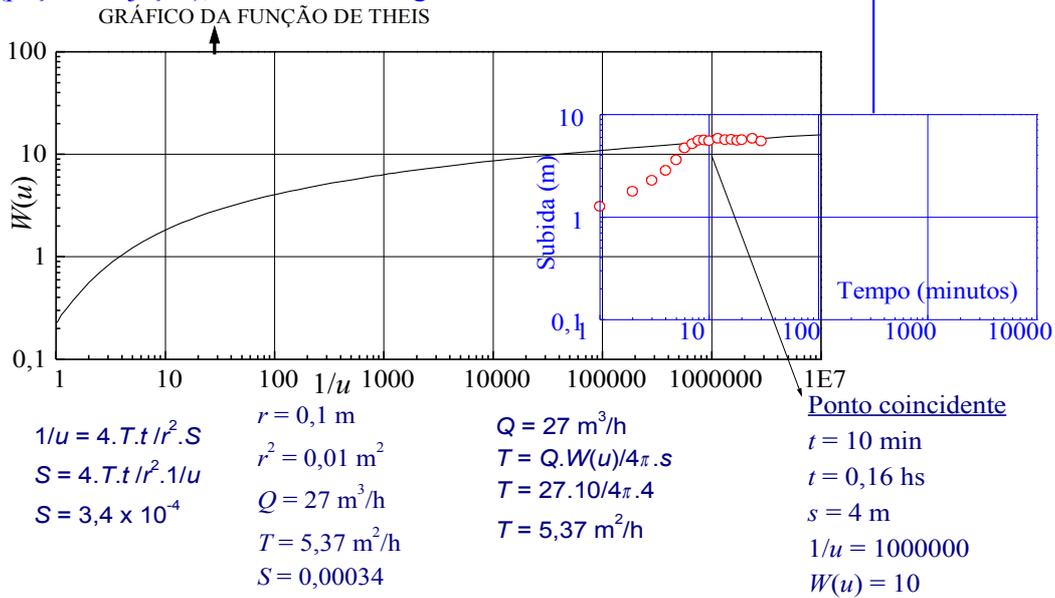


Figura 12. Ensaio de recarga realizado no poço auxiliar, com vazão injetada de 27 m<sup>3</sup>/h e medidas de subida de nível d'água realizado no próprio poço injetado.

Subida do nível d'água no Poço Extração/Recarga do Departamento de Ciências Agrárias (poço de observação), situado a  $r = 13,2 \text{ m}$  do Poço Auxiliar (poço de injeção de água), em teste de recarga artificial

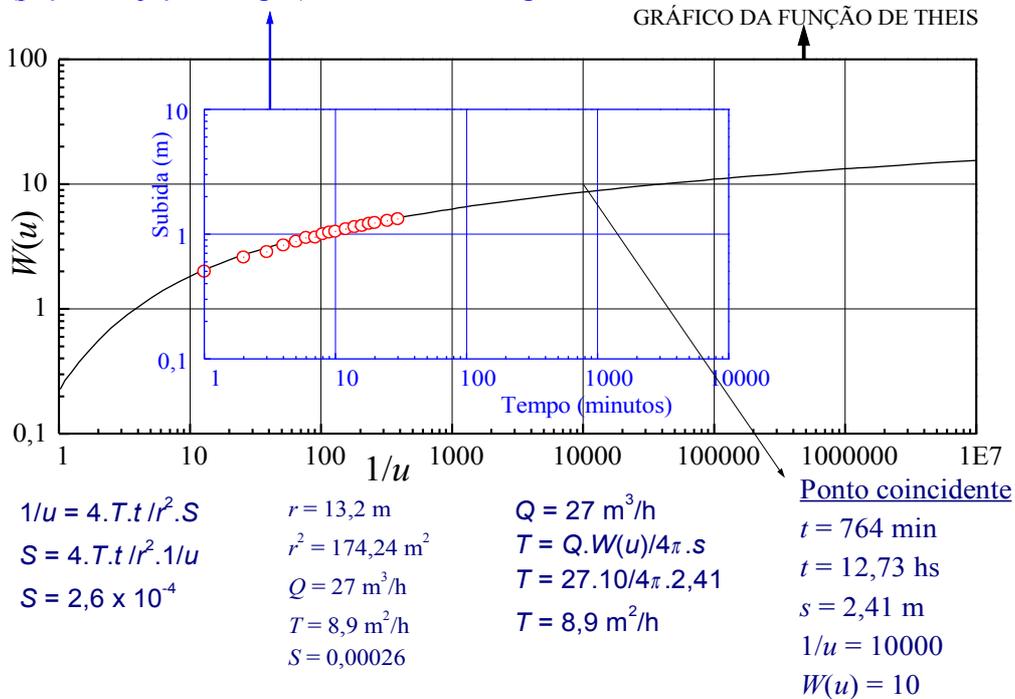


Figura 13. Ensaio de recarga artificial realizado no poço auxiliar, com vazão injetada de 27 m<sup>3</sup>/h e medidas de subida de nível d'água realizado no poço de extração/recarga (poço de observação).

Descida de nível d'água do Poço Extração/Recarga do Departamento de Ciências Agrárias (como poço de observação), situado a  $r = 13,2$  m do Poço Auxiliar, após cessada a injeção da água neste, em teste de recarga artificial em 26/07/2007

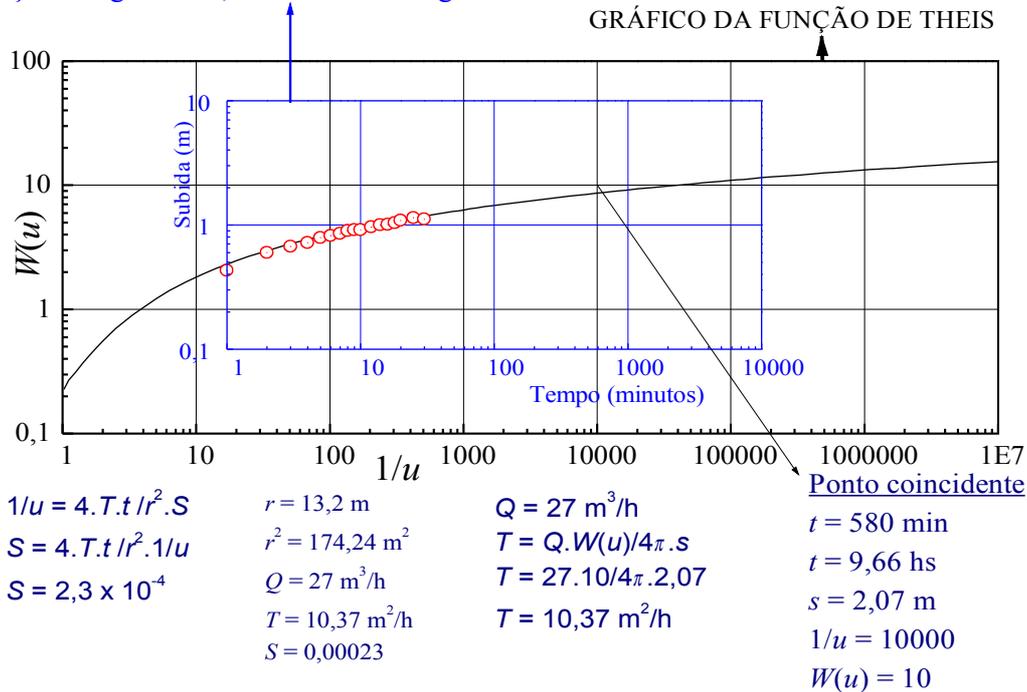


Figura 14. Ensaio de recarga artificial realizado no poço auxiliar, com medidas de descida do nível d'água (após cessada a injeção) realizadas no poço de extração/recarga (poço de observação).

Verificaram-se, com os dados obtidos no teste de recarga artificial, que os parâmetros hidrodinâmicos (Transmissividade e Coeficiente de Armazenamento) encontrados para o Aquífero Tremembé, no Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, são bastante coerentes com os obtidos por meio de ensaios de bombeamento realizados anteriormente e citados no item 2.

Como o nível potenciométrico do Aquífero Tremembé, situa-se a aproximadamente 8 m de profundidade nos locais dos poços, e utilizando este valor para rebaixamento, na equação de Cooper e Jacob (1946) temos, na distância interna do poço ( $r = 14''/2 = 7'' = 0,18$  m) e num tempo de injeção de água de 24 h (intensidade de chuvas de 24 h), a seguinte vazão máxima para haver recarga por gravidade sem extravasamento da água injetada pela boca do poço, e utilizando os valores de  $T = 8$  m<sup>2</sup>/h e  $S = 0,002$  (discriminados no item 2):

$$s = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \Rightarrow 8 = \frac{2,3 \cdot Q}{4\pi \cdot 8} \log\left(\frac{2,25 \cdot 8 \cdot 24}{(0,18)^2 \cdot 0,002}\right) \Rightarrow Q = 60 \text{ m}^3/\text{h} \quad (2)$$

Na equação (2) o valor encontrado para a vazão de 24 horas foi de 60 m<sup>3</sup>/h. Sabendo-se que na região de Taubaté raramente ocorrem chuvas de 24 horas com intensidade superior a 60 mm, com esta vazão (60 m<sup>3</sup>/h) poderia ser infiltrada, em um único poço tubular profundo, por gravidade, a água captada em uma área de 24.000 m<sup>2</sup> de telhados ( $60\text{m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h} / 0,006\text{m} = 24.000 \text{ m}^2$ ).

Assim, um poço perfurado na região é bastante efetivo para injetar água captada em telhados com a área de até 24.000 m<sup>2</sup>, para a recarga artificial de aquíferos.

#### 4 - CONCLUSÕES

A perfuração de dois poços tubulares profundos na área do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, na bacia hidrográfica do rio Una, em Taubaté, possibilitou a ampliação do conhecimento geológico e hidrogeológico da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté, no local.

Durante a perfuração dos poços obtiveram-se amostras intactas das litologias atravessadas caracterizando-se a geologia da Formação Tremembé, no local. Vários testes de vazão foram realizados para verificação da evolução hidrogeológica das camadas perfuradas.

Verificou-se que até a profundidade de 16 a 18 m ocorre um latossolo vermelho-amarelo, contendo o aquífero freático (livre) com nível estático situado em torno de 9 m de profundidade. A partir de 16 - 18 m até 48 m de profundidade ocorre uma sucessão de camadas de arenitos e conglomerados, formados por sedimentos terciários da Formação Tremembé, que constituem um aquífero semi-confinado devido às intercalações de argilitos compactos cinza escuro e folhelhos, nas quais o escoamento subterrâneo é lento e predominantemente vertical. Entre 48 m até 66 m de profundidade, predominam camadas de arenitos e conglomerados que, associadas à contribuição das camadas superiores, formam um aquífero do tipo semi-livre e cuja Transmissividade situa-se em torno de 0,6 m<sup>2</sup>/h e com nível d'água situado em torno de 8 m de profundidade.

Da profundidade de 66 m até 115 m ocorre uma sucessão de camadas de arenitos, conglomerados, argilitos, folhelhos e calcáreos, que constituem um aquífero do tipo confinado, com nível d'água situado a 8 m de profundidade, Transmissividade em torno de 8 m<sup>2</sup>/h e Coeficiente de Armazenamento ao redor de  $1 \times 10^{-4}$ . Com estas características hidrodinâmicas, um poço bem construído pode fornecer vazões de até 150 m<sup>3</sup>/h.

Para a interpretação dos ensaios de bombeamento (rebaixamento e recuperação) e recarga, nos poços, foi desenvolvida a teoria do poço imagem espelho d'água (espelho horizontal plano) e que pode ser aplicada em duas situações:

- a) Na análise dos resultados de testes de vazão, os dados de recuperação  $\times$  tempo (poço real) são considerados similares aos dados do rebaixamento  $\times$  tempo (poço virtual – imagem espelho d'água) devido à semelhança entre o cone de rebaixamento e cone de recuperação, e sendo assim, como o aquífero ensaiado é do tipo confinado, foi aplicado o método de Theis para obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos utilizando os dados de rebaixamento e, também, de recuperação.
- b) Durante a realização de ensaios de bombeamento a teoria do poço imagem espelho d'água permite considerar que o poço se recupera com a média ponderada (pelo fator tempo) das vazões de bombeamento. Sendo assim, os dados de recuperação  $\times$  tempo são mais precisos para determinação

dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero do que os dados de rebaixamento  $\times$  tempo, pois a vazão de recuperação (*ground water inflow rates*) é sempre constante, o que raramente ocorre com a vazão de rebaixamento (*flow rate*).

A teoria do poço imagem espelho d'água, desenvolvida e aplicada nos ensaios de recarga artificial realizados mostrou que o cone de recarga tem um comportamento similar ao de um cone de rebaixamento. Assim, da mesma forma que se pode extrair uma vazão  $Q$  (para um rebaixamento  $h$ ) de um poço, pode-se injetar a mesma vazão  $Q$  (para uma subida de nível  $h$ ).

Os estudos realizados mostraram que a recarga artificial do aquífero sedimentar de Taubaté, na bacia do rio Una, com águas provenientes das chuvas é factível. A recarga será implementada através de requerimento solicitando autorização do DAEE, de forma a atender ao disposto na legislação vigente no Estado de São Paulo já que, o artigo no 43 do Decreto nº 32.955 de 7/2/1991, estabelece que: “A recarga artificial dependerá de autorização do DAEE, condicionada à realização de estudos que comprovem a sua conveniência técnica, econômica e sanitária e a preservação da qualidade das águas subterrâneas”.

## 5 - AGRADECIMENTOS

O autor agradece o apoio recebido da FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, para a consecução desta pesquisa através do Processo nº 03/07.183-1.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, n.48 (Supl.), p.15-26, 1976.
- CARNEIRO, C.D.R.; HASUI, Y.; GIANCURSI, F.D. Estrutura da Bacia de Taubaté na região de São José dos Campos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 29. Ouro Preto, *Anais...Ouro Preto*, SBG, v.4, p.247-256, 1976.
- CAVALCANTE, J.C.; KAEFER, L.Q. Geologia da folha de Santos (parcial) In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28. Porto Alegre, *Anais...Porto Alegre*, SBG, v.4, p.227-245, 1974.
- COLTRINARI, L. Geomorfologia e dinâmica quaternária no sudeste do Brasil. *Revista do Departamento de Geografia da FFLCH/USP*, São Paulo, v.6, p.7-16, 1992.
- CONSÓRCIO ICFKAISER-LOGOS. Projeto Qualidade das Águas e Controle da Poluição Hídrica na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Meta I. SRHSO-SEPURB/MPO-BIRD-PNUD, São Paulo, maio/1999. Mimeografado.
- COOPER JR., H.H.; JACOB, C.E. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. *American Geophysical Union Transaction*, Washington, n.27, p.526-534, 1946.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. Hidrologia Subterranea. Ed. Omega, Tomo I, Barcelona, 1157 p, 1983.
- DAEE. Estudo de águas subterrâneas: Região Administrativa 3 – S.J. dos Campos e faixa litorânea. Enco/DAEE- – Departamento De Águas e Energia Elétrica, São Paulo, v.5, 160 p (mapas e tabelas), 1977b.

- FITTS, C.R. Groundwater Science. Academic Press, Londres, 450 p, 2002.
- FRANCO FILHO, F.W.B.; SOUZA, J.C.S. Exploração de água subterrânea em São José dos Campos – efeitos observados ao longo do tempo. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 8. Recife, *Anais...Recife*, ABAS, v.1, p.113-123, 1994.
- HANTUSH, M.S. Analysis of data from pumping tests in leaky aquifers. *American Geophysical Union Transaction*, Washington, n.37, p.702-714, 1956.
- HASUI, Y.; GIMENEZ, A.F.; MELO, M.S. Sobre as bacias tafrogênicas do sudeste brasileiro. In: Congresso Brasileiro Geologia, 30. Recife, *Anais...Recife*, SBG, v.1, p.382-392, 1978.
- HASUI, Y., PONÇANO, W. Organização estrutural e evolução da bacia de Taubaté. In: Congresso Brasileiro Geologia, 30, Recife, *Anais...Recife*, SBG, v.1, p.368-381, 1978.
- MARQUES, A. Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo, Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, v.4, n.3, p.253-262, 1990.
- MELO, M.S.; CAETANO, S.L.V.; COIMBRA, A.M. Tectônica e sedimentação nas áreas das bacias de São Paulo e Taubaté. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34. Goiânia, *Anais...Goiânia*, SBG, v.1, p.321-336, 1986.
- NEUMAN, S.P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, v.8, p.1031-1045, 1972.
- RICCOMINI, C. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de doutoramento - Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 256 p, 1989.
- SADOWSKI, G.R.; CARNEIRO, C.D.R. O charnoquito de São Francisco Xavier, São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 28. Porto Alegre, *Anais...Porto Alegre*, SBG, v.4, p.207-211, 1974.
- SANTORO, E.; ENS. H.H.; NAGATA, N. Geologia das folhas Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba - Parte 1: Embasamento Setentrional da Bacia de Taubaté. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 2. São Paulo, *Atas...*, São Paulo, SBG/SP – RJ, p.481-489, 1991.
- SOUZA, J.C.S. Estudo Hidrogeológico da Região de Lorena. Tese de doutoramento - Instituto de Geociências da USP, São Paulo, 174 p, 2004.
- THEIS, C.V. The relation between the lowering of piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *American Geophysical Union Transaction*, Part II, Washigton, p.519-524, 1935.
- U.S.GEOLOGICAL SURVEY. Ground water manual. Government Printing Office, Washington, 480 p, 1977.
- WALTON, W.C. Groundwater resource evaluation. Ed.McGraw-Hill, New York, 664 p, 1970.