



Estimativa da recarga do aquífero freático na bacia do Rio Una, no município de Taubaté, SP (doi:10.4136/ambi-agua.20)

Jair Santoro; Helio Nóbile Diniz; Nathália Torras Correia; Felipe Rodrigues Carbone; Luciana Campos de Oliveira Sciotta

Instituto Geológico do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente
E-mail: igeologico@igeologico.sp.gov.br, {jairsantor,heliodiniz1,fr_carbone}@yahoo.com.br,
{nathytorras, lu_sciotta}@hotmail.com

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos relacionados com a estimativa da recarga do aquífero freático na bacia do rio Una, Município de Taubaté. O objetivo deste estudo foi desenvolver políticas públicas a fim de viabilizar o uso sustentável dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos no Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU. As principais atividades realizadas foram: a determinação dos índices físicos do solo, a caracterização textural do perfil, a construção de piezômetros, o monitoramento do nível d'água do aquífero freático, realização de balanço hídrico climatológico e análises físico-químicas e bacteriológicas. Os ensaios de caracterização geotécnica realizados mostraram que o solo é bastante poroso, com porosidade em torno de 53% e umidade natural de aproximadamente 30%. Quanto aos resultados das análises granulométricas verificou-se que quanto maior a profundidade mais uniforme é a distribuição da textura dos sedimentos, desde finos argilosos, até grossos arenosos. Estabeleceu-se uma relação consistente entre excedente hídrico, porosidade, grau de saturação e medidas piezométricas em uma série histórica diária no período de um ano. Os métodos utilizados e as medidas obtidas permitiram calcular a descarga de água do aquífero freático nas fontes, sendo de 14,5 mm/dia no período mais chuvoso, e de 1,9 mm nos outros períodos do ano. A existência de coliformes fecais no aquífero freático mostrou que há presença de bactérias oriundas da infiltração de águas provenientes de fossas sépticas ou, do ribeirão Itaim, contaminadas por esgoto doméstico.

Palavras-chave: recarga; aquífero freático; solos; infiltração.

Estimation of the phreatic aquifer recharge of Una watershed in Taubaté, SP

ABSTRACT

This paper presents results related to the estimation of the phreatic aquifer recharge of the Una watershed in Taubaté, SP. The goal of this study was to develop public policies for the sustainable use of superficial and phreatic water at the Department of Agrarian Sciences of the University of Taubaté. The main results of this study are: determination of the soil physical indices, characterization of the textural profile, construction of piezometers, monitoring of the watertable, determination of the hydric climatological balance, and physico-chemical and bacteriological analyses of phreatic water. The geotechnical characterization showed that the soil have high total porosity (about 53%), and natural moisture of about 30%. Regarding the results of soil particle size measurements, it was observed that the deeper the soil the more uniform is the sediments texture distribution, varying from fine loamy, to coarse sandy. It is established a consistent relation between hydric balance and porosity, saturation

and piezometric measurement in a daily historical series during one year. Methods and results allowed to calculate the phreatic aquifer discharge of several springs, that varied from 14.5 mm/day in the rainy period to 1.9 mm/day in other periods. The existence of faecal coliforms in phreatic aquifer, in variable amounts, showed that there are bacterias in the water infiltrated from septic cesspools or from the nearby Itaim River, contaminated by domestic sewage.

Keywords: recharge; phreatic aquifer; soils; infiltration.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos desenvolvidos em uma área localizada na bacia hidrográfica do rio Una, afluyente da margem direita do rio Paraíba do Sul, no Município de Taubaté. O objetivo deste estudo foi desenvolver políticas públicas a fim de viabilizar o uso sustentável dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Ao longo dos trabalhos pôde-se destacar como principais atividades realizadas, a determinação dos índices físicos do solo; a caracterização textural do perfil do solo; a construção de piezômetros; o monitoramento do nível d'água do aquífero freático visando estabelecer uma série histórica de medidas piezométricas; realização de balanço hídrico climatológico com os dados hidroclimáticos cadastrados no Posto Meteorológico da UNITAU/INMET, para fins de comparação entre a disponibilidade de água e a água contida no perfil do solo; o lançamento das águas pluviais escoadas nos pátios e arruamentos em bacias de infiltração; a coleta e análise físico-química e bacteriológica das águas contidas no aquífero freático.

A área do trabalho situa-se no bairro Itaim, no Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté, no Município de Taubaté.

O Município de Taubaté está situado em uma área com elevada quantidade de precipitação hídrica, de modo que, em quase todos os meses do ano, excetuando o mês de agosto, há excedente hídrico. No Município, a média multianual de excedente hídrico, já descontando a água dos processos de evapotranspiração, situa-se em torno de 410,4 mm (média obtida no período 1993-2002).

Devido às características físicas dos solos sobrepostos aos sedimentos terciários do Grupo Taubaté, geralmente formados por latossolos vermelho-amarelos, profundos, muito porosos e permeáveis, existe uma tendência à percolação profunda das águas infiltradas provenientes do excedente hídrico. O escoamento superficial fica restrito às áreas impermeabilizadas pela ação antrópica, ou naquelas onde ocorrem solos hidromórficos, constituídos por argilas orgânicas, como em alguns locais da várzea do rio Paraíba do Sul. Assim, em Taubaté, os aquíferos recebem grande quantidade de recarga todos os anos.

1.1. Contexto geológico regional

A bacia hidrográfica do rio Una está inserida, em parte sobre terrenos Pré-Cambrianos do Complexo Embu e, em parte, sobre depósitos da Bacia Sedimentar de Taubaté.

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). Sua origem é relacionada com a reativação de falhas transcorrentes E-NE do assoalho Pré-Cambriano, durante o processo de abertura do Atlântico Sul, ao longo das quais ocorreram deslizamentos gravitacionais e basculamento de blocos (Coltrinari, 1992). Os compartimentos apresentam-se como grabens assimétricos, com basculamento ora para SE, ora para NW.

As espessuras admitidas para a Bacia de Taubaté (Hasui et al., 1978; Melo et al., 1986) variam até 850 m, sendo essa a profundidade máxima estimada para a porção próxima à Serra da Mantiqueira, na sub-bacia de Roseira.

Hasui e Ponçano (1978) elaboraram uma coluna estratigráfica para essa bacia, reunindo no Grupo Taubaté, a Formação Tremembé e a Formação Caçapava, sendo essa designação também proposta por Carneiro et al. (1976) para os depósitos de canais e planícies de rios anastomosados na região de São José dos Campos e Caçapava.

Franco Filho e Souza (1994), ao analisarem a exploração de água em São José dos Campos, reconhecem na Bacia Sedimentar de Taubaté duas unidades, a Formação Tremembé, na base, constituída por folhelhos com níveis pirobetuminosos e argilitos de cores verde acinzentadas, com intercalações centimétricas a decimétricas de arenitos, siltitos e brechas intraformacionais, originadas 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, originadas em ambiente fluvial.

1.2. Pedologia

Os solos do Município de Taubaté, seguindo as normas vigentes no Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (Oliveira et al., 1999), são classificados, considerando os três principais domínios estratigráficos que ocorrem na região: as rochas cristalinas (Complexo Embu), sedimentos terciários e sedimentos quaternários (Grupo Taubaté).

Nas áreas de ocorrência dos sedimentos quaternários, ao longo do rio Paraíba do Sul, os solos são classificados como Gleissolos Melânicos, com textura argilosa, e Neossolos Flúvicos, com textura média, intercalados por solos orgânicos, sendo todos em relevo plano, de várzea. Segundo Verdade e Hungria (1966), os solos hidromórficos orgânicos, no vale do rio Paraíba do Sul, são encontrados na planície aluvial do rio e nas depressões junto aos córregos ou na parte inicial de pequenos cursos d'água.

A bacia hidrográfica do rio Una situa-se na região sul-sudeste do Município de Taubaté. Na região, nas áreas de ocorrência do Complexo Embu, o solo é classificado como argissolo eutrófico, com textura média argilosa, em relevo forte ondulado e montanhoso (início da Serra do Mar).

Nas áreas de ocorrência de sedimentos terciários do Grupo Taubaté, ocorrem os latossolos vermelho-amarelos, parte com variação Una, intercalados por argissolos vermelho-amarelos, latossólicos, ambos com textura argilosa, em relevo suave ondulado e plano (Oliveira et al., 1999).

1.3. Hidrogeologia regional

No vale do rio Paraíba do Sul há dois sistemas aquíferos principais: o das coberturas sedimentares cenozóicas (Formações Caçapava e Tremembé, e sedimentos quaternários), e o das rochas cristalinas. 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.

As rochas cristalinas ígneas e metamórficas Pré-Cambrianas não formam um aquífero regional contínuo, mas apresentam localmente condições aquíferas pelas falhas, fraturas e outras descontinuidades que permitem a circulação das águas subterrâneas que possibilitam a exploração por poços tubulares profundos.

O sentido dos fluxos subterrâneos é predominantemente efluente, isto é, do aquífero freático para os rios e córregos. Segundo DAEE (São Paulo, 1977a, 1977b), a maior parte da região está sob condições freáticas e pouco confinadas, enquanto algumas áreas limitadas ficam sob pressão, formando raros aquíferos confinados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa constou da coleta de amostras para determinação de parâmetros físicos do solo (massa específica dos grãos, massa específica natural e umidade natural), em algumas áreas do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU e Fazenda Piloto da Faculdade de Agronomia, em profundidades de 0,2 e 0,4 m e, em taludes situados junto à estrada que limita a parte sul do Departamento, nas posições topo, meio e base, em profundidades variáveis entre 0,3 e 6 m; realização de ensaios granulométricos e caracterização físico-química e bacteriológica das águas do aquífero freático; construção de seis piezômetros e de pequenas barragens para favorecer a infiltração de água das chuvas nos solos das encostas.

Os resultados dos ensaios de massa específica dos grãos, massa específica natural e umidade natural foram utilizados, por meio de fórmulas de correlação, para determinação do índice de vazios, porosidade, grau de saturação e grau de aeração. Os ensaios granulométricos tiveram a finalidade de determinar a textura dos solos que auxiliaram na determinação do perfil geológico.

Os piezômetros, perfurados com trado de 4", tiveram a finalidade de obtenção de amostras para análises granulométricas e, após a instalação ter sido concluída, foram revestidos com tubos geomecânicos lisos e de filtros, e completados com pré-filtro, para serem utilizados em medidas históricas do nível d'água do aquífero freático assim como, para coleta de amostras de água destinadas à caracterização físico-química e bacteriológica das águas subterrâneas do aquífero freático. Nos piezômetros também foram realizados ensaios de bombeamento para determinação da condutividade hidráulica do aquífero freático, sendo que a cota do nível d'água, na data de 16/03/2007, no piezômetro de nº5, era de 8,85 metros abaixo do nível do terreno.

As etapas da construção dos piezômetros foram as seguintes:

- a) execução de furo a trado manual de 4", até 1m abaixo do nível d'água atual;
- b) instalação de 1m de tubo de filtro (PVC azul, geomecânico, diâmetro de 2 ½", com ranhura de 0,75 mm), tipo bolsa e luva, na parte inferior, e tubos lisos (PVC azul, geomecânico, nervurado, diâmetro de 2 ½"), tipo bolsa e luva, na seção superior, até 0,4 m acima do nível do terreno;
- c) instalação de tampa de PVC para isolamento superior e cap para isolamento inferior;
- d) colocação de pré-filtro tipo pérola com granulometria entre 1 e 3 mm entre a perfuração de 4" e os tubos lisos e tubo de filtro de 2 ½" ;
- e) construção de proteção lateral (0,6 m x 1 m) de alvenaria para isolamento de águas escoadas superficialmente e colocação de cascalho no interior para impedir crescimento de vegetação.

Na Figura 1 é mostrado o esquema construtivo dos piezômetros.

2.1. Mapa de localização da área

O Município de Taubaté está localizado no Vale do Paraíba, região sudeste do Estado de São Paulo (Figura 2). Apresenta uma extensão territorial de 655 km². Possui clima tropical com inverno seco cuja temperatura média anual é de 21°C e índice pluviométrico médio anual de 1400 mm. A principal bacia hidrográfica que caracteriza o município é a de um importante afluente da margem direita do rio Paraíba do Sul, a do rio Una.

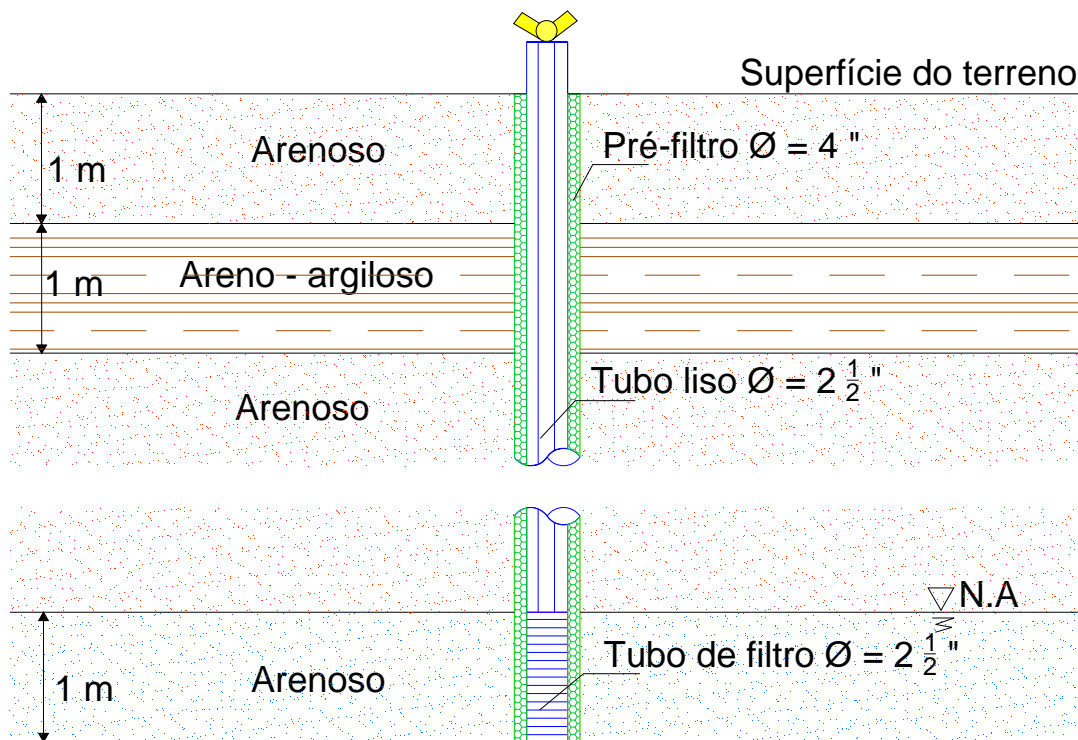


Figura 1. Esquema construtivo dos piezômetros.

2.2. Ensaios de caracterização geotécnica dos solos

Dentre os ensaios de caracterização do solo, foram realizados os seguintes: análises granulométricas; determinações dos índices físicos; massa específica dos grãos; umidade natural e massa específica natural (úmida e seca).

Segundo Bueno e Vilar (1984), os Índices Físicos são relações de massas e volumes entre as fases ar, água e sólidos, que servem para caracterizar as condições físicas naturais em que o solo se encontra. Tem por finalidade caracterizar o solo, com parâmetros representativos do estado em que o mesmo se encontra durante a amostragem (Stancati et al., 1981).

Para determinar os Índices Físicos foram coletadas amostras de solos. No laboratório foram determinados diretamente três índices, como segue: umidade natural (%), segundo a NBR-6457, massa específica dos grãos (g/cm^3), segundo a NBR-6508, e massa específica natural (g/cm^3), úmida e seca. Os demais parâmetros foram determinados por meio de fórmulas de correlação (Nogueira, 1995). Esses parâmetros são: índice de vazios (e), a porosidade (n), o grau de saturação (S_r) e o grau de aeração (A_r). As análises granulométricas foram feitas em ensaios à parte, e, segundo Santoro (1991), completam o conhecimento dos Índices Físicos do solo.

As fórmulas de correlação utilizadas foram as seguintes:

- Índice de Vazios:

$$e = \frac{\gamma_s(1+w) - \gamma}{\gamma}$$

em que:

γ_s = massa específica dos sólidos; w = teor de umidade; γ = massa específica natural (seca)

- Porosidade:

$$n = \frac{e}{1+e}$$

em que:

e = índice de vazios

- Grau de Saturação:

$$Sr = \frac{\gamma_s \cdot W}{e \cdot \gamma_w}$$

em que:

γ_w = massa específica da água (1 g/cm³).

- Grau de aeração:

$$A = 1 - Sr$$

em que:

S_r = grau de saturação

A síntese dos resultados dos ensaios geotécnicos realizados nas amostras de solo encontra-se nas Tabelas 5 e 6.

2.3. Análises granulométricas

Os ensaios granulométricos têm por finalidade a obtenção das curvas de distribuição granulométrica do material amostrado (curva de porcentagens acumuladas). Estas, por sua vez (Bueno e Vilar, 1984), encontram aplicação prática na caracterização textural do material, na estimativa do coeficiente de permeabilidade e no dimensionamento de filtros de proteção de poços tubulares profundos.

Foram construídos 6 piezômetros na área do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté, em grupos de dois (distantes entre si de 0,6 a 0,7 m), localizados no mapa da Figura 2. As coordenadas e cotas desses piezômetros são mostradas na Tabela 1.

Uma perfuração realizada próximo dos piezômetros 5 e 6 mostrou que o solo atinge profundidade de 16,0 m, no local. Considerando que, na época da perfuração desses piezômetros, em abril de 2006, o nível d'água estava a 8,4 m, a espessura do aquífero freático (sobrepuesto aos sedimentos terciários da Formação Tremembé, do Grupo Taubaté) era de 7,6 m.

Tabela 1. Localização dos piezômetros do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU.

| Piezômetro n ^o | Coord.UTM m EW | Coord.UTM m NS | Cota (m) | Profund. (m) |
|---------------------------|----------------|----------------|----------|--------------|
| 1 | 447734 | 7453020 | 564 | 4,0 |
| 2 | 447738 | 7453024 | 564 | 6,0 |
| 3 | 447734 | 7453020 | 564 | 5,4 |
| 4 | 447738 | 7453024 | 564 | 4,5 |
| 5 | 447810 | 7453042 | 568 | 9,4 |
| 6 | 447810 | 7453042 | 568 | 9,4 |

Quando da perfuração desses piezômetros, foram coletadas amostras de metro em metro e enviadas para laboratório para caracterização granulométrica dos solos. Em alguns locais amostrados para caracterização geológico/geotécnica dos solos, também foram coletadas amostras para ensaios granulométricos.

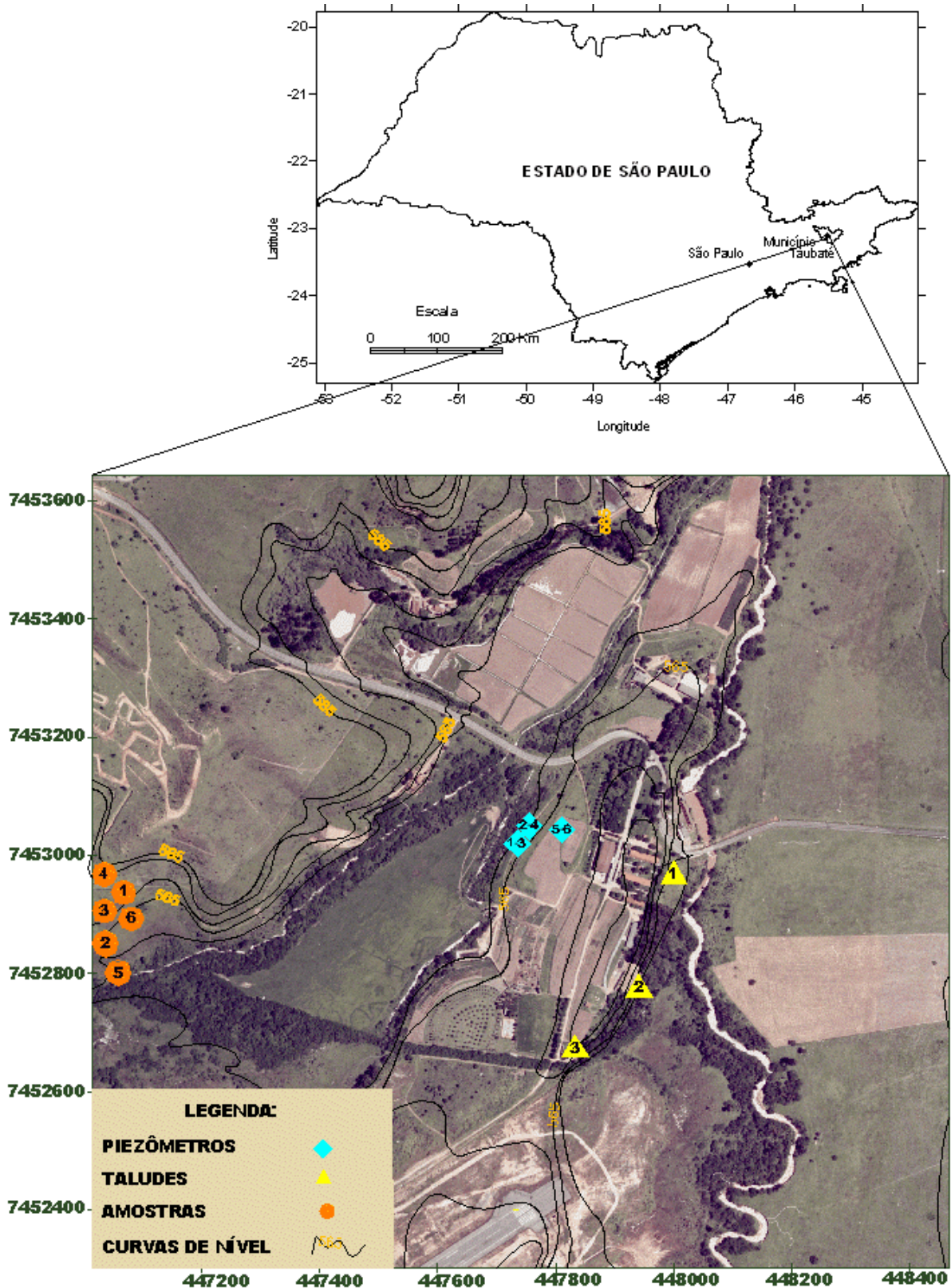


Figura 2. Mapa de localização do Município de Taubaté no Estado de São Paulo, das amostras coletadas, piezômetros instalados e taludes amostrados.

No laboratório, as análises granulométricas foram executadas, utilizando-se o método do peneiramento para separação das frações areia e pedregulho, e da sedimentação (ou do densímetro) para a quantificação das frações silte-argilosas.

Na Tabela 2, são mostrados os resultados encontrados para as análises granulométricas realizadas em amostras de solo obtidas durante a perfuração dos piezômetros e, nas Figuras 7 e 8 são apresentadas curvas granulométricas de duas amostras coletadas no piezômetro 1.

Tabela 2. Resultados dos ensaios granulométricos das amostras de solos obtidas durante a perfuração dos piezômetros.

| Piezôm. | Profund. (m) | Areias (%) | Silte (%) | Argila (%) | Tipo de solo |
|---------|--------------|------------|-----------|------------|-------------------------|
| 1 | 1 | 49,20 | 17,66 | 33,13 | Franco argiloso arenoso |
| 1 | 2 | 31,57 | 33,72 | 34,71 | Franco argiloso |
| 1 | 3 | 71,45 | 13,81 | 14,74 | Franco arenoso |
| 1 | 4 | 78,93 | 15,14 | 5,93 | Areia franca |
| 1 | 4,3 | 69,06 | 19,06 | 11,88 | Franco arenoso |
| 2 | 1 | 72,44 | 6,94 | 20,62 | Franco argiloso arenoso |
| 2 | 2 | 36,71 | 31,93 | 31,39 | Franco argiloso |
| 2 | 3 | 77,25 | 18,95 | 3,8 | Areia franca |
| 2 | 4 | 77,06 | 15,39 | 7,55 | Areia franca |
| 2 | 5 | 79,61 | 15,68 | 4,71 | Areia franca |
| 2 | 6 | 79,28 | 14,90 | 5,82 | Areia franca |
| 3 | 2 | 37,24 | 31,60 | 31,16 | Franco argiloso |
| 3 | 4 | 76,89 | 15,06 | 8,05 | Areia franca |
| 4 | 3 | 76,49 | 18,45 | 5,06 | Areia franca |
| 4 | 4,5 | 73,68 | 17,83 | 8,49 | Franco arenoso |

2.4. Ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico pode ser quantificado a partir da equação hidrológica, que se baseia na lei de conservação das massas. É expressa por: entradas d'água = saídas +/- mudanças no armazenamento.

Rushton e Ward (1979) adotam a seguinte expressão para o balanço hídrico: $P = E + R + \Delta A$ (1), em que; P = precipitação, E = evapotranspiração, R = escoamento superficial e ΔA = mudanças no armazenamento.

O balanço hídrico é a aplicação do princípio da conservação das massas (equação da continuidade) a certa região cujo volume é conhecido e definido por determinadas condições de contorno. Durante o período em que o balanço é realizado, a diferença entre o total das entradas e o total das saídas deve ser igual às mudanças de água no armazenamento. As medidas podem ser efetuadas em massa ou em volume, desde que a densidade da água seja considerada constante.

No Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté, pode-se estabelecer um balanço hídrico reescrevendo-se a equação (1) sob a forma: $R + \Delta A = P - E$, e admitindo-se que a condição $P - E$ represente o excedente hídrico (quando positiva) ou a deficiência hídrica (quando negativa). Assim, pode-se comparar a expressão $R + \Delta A$ com o excedente ou déficit hídrico calculado pelo método de D'Angiolla e Vasconcelos (2002).

A diferença de armazenamento de água no solo ΔA , em certo período, pode ser conhecida pela Porosidade (n) e Grau de Saturação (S_r) encontrados no solo, e definindo-se a Capacidade de Armazenamento (C_A) como sendo igual à diferença entre a porosidade (n) e a porosidade (n) \times quantidade de poros preenchidos com água (S_r), ou seja: $C_A = n - n \times S_r$

Assim sendo, a Capacidade de Armazenamento é igual à porosidade (dada em porcentagem) menos o porcentual de poros já preenchidos com água (saturação).

A Capacidade de Armazenamento (C_A) pode ser conhecida pela porosidade e grau de saturação que são parâmetros encontrados por fórmulas de correlação, por meio dos índices físicos do solo.

Para um armazenamento unitário (A_U), considerando um volume de solo com 1 m de altura, 1 m de largura e 1 m de extensão, temos: $A_U = 1 \text{ m}^3 \times C_A$

Definindo-se a infiltração d'água no solo em um período chuvoso, como sendo $I = A_U \times (h_2 - h_1)$, em que h_2 é o nível d'água do solo após um período de tempo quando o nível d'água medido inicialmente era h_1 , temos que: $\Delta A = A_U \times (h_2 - h_1)$, ou seja, $R + I = P - E$, sendo I igual à altura da coluna d'água infiltrada no período considerado e R igual à lâmina d'água escoada.

Ainda, $I + R = \text{infiltração} + \text{escoamento superficial} = \text{excedente hídrico}$ (2).

Assim, conhecendo-se o excedente hídrico em um período chuvoso e medindo-se as diferenças de nível d'água do aquífero freático em piezômetros, pode-se comparar com a expressão $A_U \times (h_1 - h_2) = I$, que possibilitará o conhecimento do total infiltrado e do total escoado superficialmente.

Caso o valor encontrado para $A_U \times (h_1 - h_2)$ seja igual ao excedente hídrico, conclui-se que toda a água disponível na superfície infiltrou, ou seja, o excedente hídrico é igual à infiltração.

Caso seja inferior ao excedente hídrico haverá uma parte dessa água que escoou superficialmente e não infiltra, e que, mesmo assim, ainda pode ser determinada pela expressão (2) descrita acima.

2.5. Caracterização hidroclimática

A bacia hidrográfica representa um sistema fechado nas condições climáticas do sudeste brasileiro. A entrada de água advém das precipitações, as saídas d'água do sistema são devidas à evapotranspiração e descarga nas fontes que abastecem o fluxo de base do rio principal. Como o aquífero freático está saturado e em equilíbrio com as águas superficiais, já que normalmente há excedente hídrico, não devem ocorrer mudanças de armazenamento para uma série histórica de medidas multianual, podendo ocorrer pequenas mudanças somente durante o ano hidrológico, em relação aos períodos de máxima e mínima pluviosidades. Nesses períodos, as mudanças de armazenamento da água do aquífero freático são devidas ao acréscimo de água proveniente do fluxo vertical que percola o perfil do solo ou, ao decréscimo devido às descargas nas fontes.

Para o cálculo da disponibilidade de água nas camadas superficiais do solo e sua migração para o aquífero freático, utiliza-se do balanço hídrico. O balanço hídrico climatológico, em Taubaté, foi calculado pelo método proposto por D'Angiolella e Vasconcelos (2002). Nesse método são utilizadas informações meteorológicas tais como: temperatura média, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação e insolação. Esses parâmetros dão-nos o cálculo da evapotranspiração potencial e real. Com adição da capacidade de campo, esse modelo também calcula o excedente (água disponível que vai percolar para o aquífero freático) ou a deficiência hídrica (água necessária para ser adicionada ao solo para evitar o murchamento das plantas).

Os dados hidroclimatológicos utilizados foram obtidos no Posto Meteorológico da Estação UNITAU/INMET nº 83784, do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, situado na Latitude 23° 02' S e, Longitude 45° 31' W, e na altitude de 577 metros.

Os resultados do balanço hídrico multianual, utilizando dados históricos do Posto Meteorológico da Estação UNITAU/INMET nº 83784, obtidos no período entre 1992 a 2003 (Figura 3) mostram que há um grande excedente hídrico (com média de 410,4 mm/ano) que ocorre nos meses de novembro a março. A deficiência hídrica ocorre nos meses de abril, junho e julho (com média de 17,7 mm/ano).

A diferença entre o excedente e a deficiência hídrica resulta no total da água disponível no solo para a infiltração e percolação profunda, ou seja, caso não haja condições geológicas

favoráveis, ou de cobertura, para a total infiltração dessa água, ela irá escoar superficialmente. Esta subtração (excedente menos deficiência) para Taubaté, no período 1993-2002, é de 392,7 mm/ano.

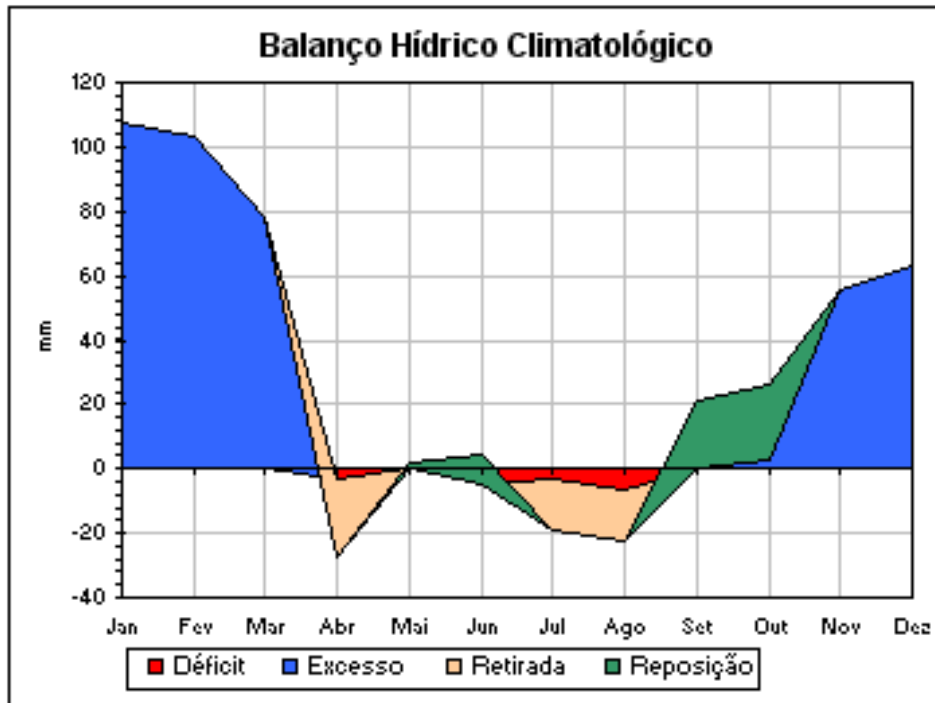


Figura 3. Balanço hídrico multianual, com os dados da Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, em Taubaté, no período 1992-2003.

Essa metodologia de cálculo do balanço hídrico, proposto por D'Angiolella e Vasconcelos (2002) é viável para períodos multianuais. Mas esses autores disponibilizam, no modelo, o método de Penman (Pereira et al., 1997), que pode ser utilizado para períodos de tempo muito curtos, diários, semanais ou mensais, quando há registros de chuvas nos períodos considerados.

A construção de piezômetros proporcionou medidas diárias de níveis piezométricos do aquífero freático, obtidas desde novembro de 2005 até janeiro de 2007. Para comparar as oscilações do nível piezométrico do aquífero freático, com o aporte de água proveniente do excedente hídrico e acompanhamento da recarga natural do aquífero freático, além do total infiltrado e a quantidade excedente que escoar superficialmente, optou-se por fazer balanços hídricos, utilizando o método de Penman (Pereira et al., 1997), totalizando 3 períodos consecutivos de 60 dias, cada um dividido em 12 frações de 5 dias, compreendendo o período de 16 de novembro de 2005 até 14 de janeiro de 2006, de 15 de janeiro de 2006 a 15 de março de 2006 (Figura 4), e de 16 de março a 15 de maio de 2006.

A partir de maio sucede-se um período seco, sem chuvas, e o espaçamento de tempo obrigatoriamente tem que ser maior para comportar períodos chuvosos, com excedente hídrico. Assim sendo, a partir de 16 de maio até 10 de novembro de 2006, procedeu-se a um balanço hídrico, com duração de 6 meses (180 dias), divididos em frações de 15 dias. Na Figura 5 é mostrado o balanço hídrico realizado nesse período.

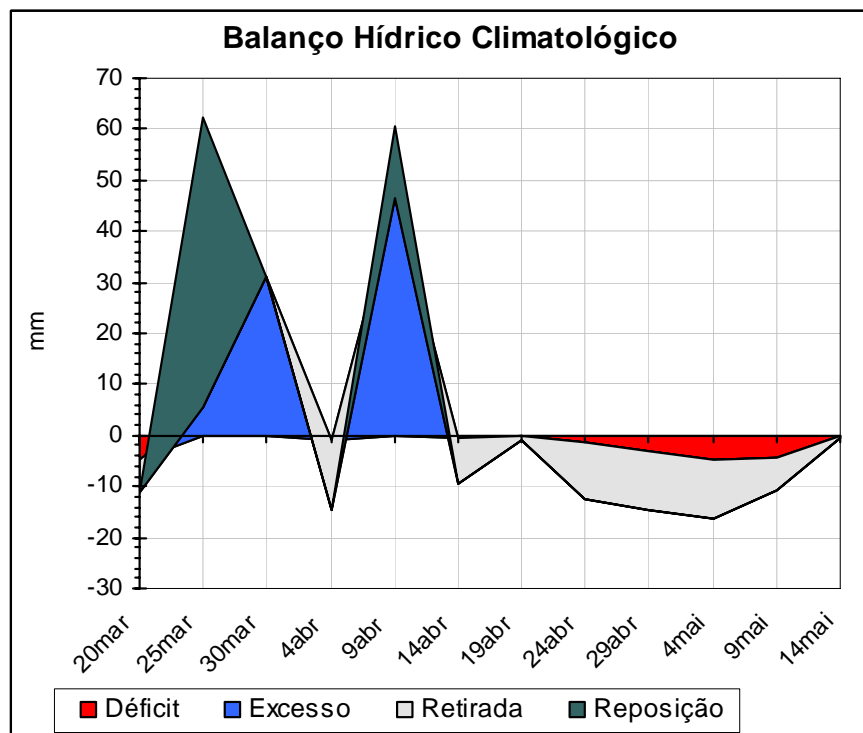


Figura 4. Balanço hídrico multianual, com os dados da Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, em Taubaté, no período 16 mar. – 14 mai. 2006.

2.6. Determinação da condutividade hidráulica do solo saturado

Um dos métodos utilizados para se conhecer a capacidade de infiltração do solo é pela determinação da Condutividade Hidráulica que é máxima quando aquele se encontra saturado.

Existem vários métodos para a determinação da Condutividade Hidráulica (K) de um solo, e entre eles está a realização de ensaios de infiltração ou de bombeamento no aquífero freático. No caso do aquífero freático, no local do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, onde foram instalados piezômetros aos pares, optou-se por realizar um teste infiltrando-se água em um piezômetro, e mediu-se a subida de nível no seu par, ao lado. Para isso, utilizaram-se os piezômetros 5 e 6, com profundidades de 9,4 m para a determinação da Condutividade Hidráulica do solo saturado. A distância entre os dois piezômetros é de 0,68 m.

Os dados do teste de infiltração (com duração de 4 h) estão discriminados na Tabela 3. O gráfico com a interpretação do teste é mostrado na Figura 6.

Com o ensaio de infiltração, obteve-se a Transmissividade (T) de $0,09 \text{ m}^2/\text{h}$, sabendo-se que $K = T/b$, em que b é a espessura saturada do intervalo ensaiado, antes do início da infiltração (no caso, igual à diferença entre a profundidade do piezômetro e o nível d'água ($9,40 \text{ m} - 8,58 \text{ m} = 0,82 \text{ m}$)).

Assim, $K = 0,09/0,82 = 0,11 \text{ m/h}$ ou $2,64 \text{ m/dia}$, um valor bastante elevado já que a Condutividade Hidráulica em areias limpas é de 1 m/dia . Com esse valor de Condutividade Hidráulica ($2,64 \text{ m/dia}$), o solo mostra alta capacidade de infiltração, tendo sido observado, em algumas pequenas bacias de infiltração construídas na área do Departamento de Ciências Agrárias, rápida absorção das águas acumuladas durante as chuvas.

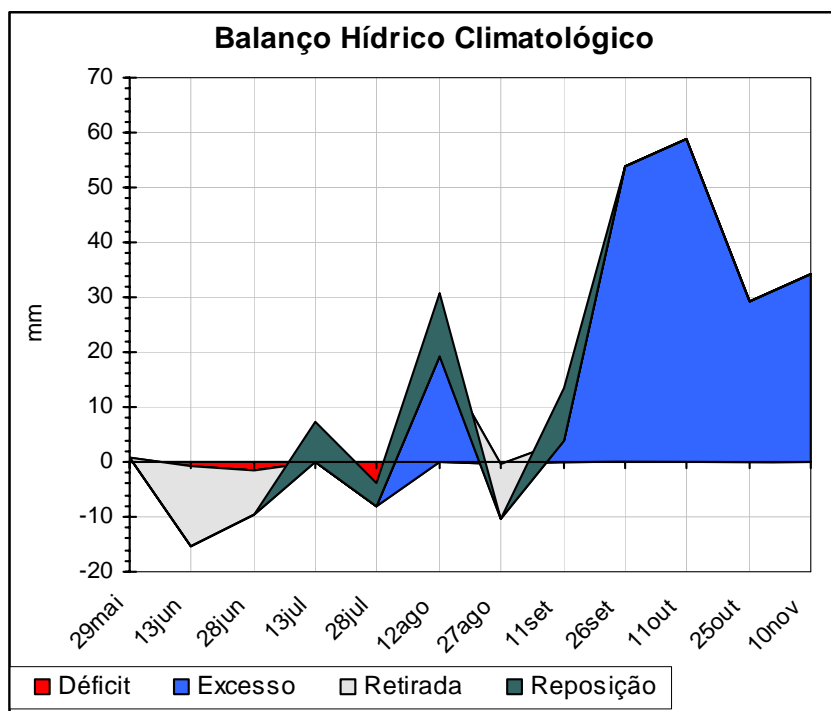


Figura 5. Balanço hídrico multianual, com os dados da Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, em Taubaté, no período 15 mai. - 10 nov. 06.

Tabela 3. Teste de infiltração realizado em 11/05/2006 nos piezômetros 5 e 6.

| HORA | Tempo (min) | Nível (m) | Recuperação (m) | Vazão (m ³ /h) |
|-------|-------------|-----------|-----------------|---------------------------|
| 08:10 | 0 | 8,58 | 0,000 | |
| | 1 | 8,46 | 0,120 | 1,012 |
| | 2 | 8,28 | 0,300 | 1,012 |
| | 4 | 8,00 | 0,580 | 1,012 |
| | 5 | 7,86 | 0,720 | 1,012 |
| | 10 | 7,57 | 1,010 | 1,012 |
| | 20 | 7,22 | 1,360 | 1,012 |
| | 30 | 7,01 | 1,570 | 1,012 |
| | 60 | 6,93 | 1,650 | 1,012 |
| | 120 | 6,87 | 1,710 | 1,012 |
| 13:10 | 180 | 6,84 | 1,740 | 1,012 |
| | 240 | 6,80 | 1,780 | 1,012 |

2.7. Análises físico-químicas das águas do aquífero freático

Essas análises foram realizadas no laboratório da SABESP, Divisão de Controle Sanitário de São José dos Campos. Foram investigados 30 parâmetros, principalmente o conteúdo em metais pesados. Nessas análises, o conteúdo de monocloraamina foi o único orgânico levantado.

Na Tabela 4, são mostrados os resultados de análises físico-químicas efetuadas em águas coletadas nos piezômetros em 26/04/2006. Os resultados encontrados mostram que, dos 30 parâmetros analisados, cerca de 7 (realçados em amarelo) apresentaram-se acima do limite recomendado pela Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde, indicando poluição do solo e do aquífero freático, no local.

O ferro dissolvido está presente em níveis acima do permitido em todos os piezômetros. Sua origem provável é consequência da alteração intempérica dos minerais ferro-magnesianos

Curva de recuperação do aquífero freático, no local dos piezômetros 5 e 6

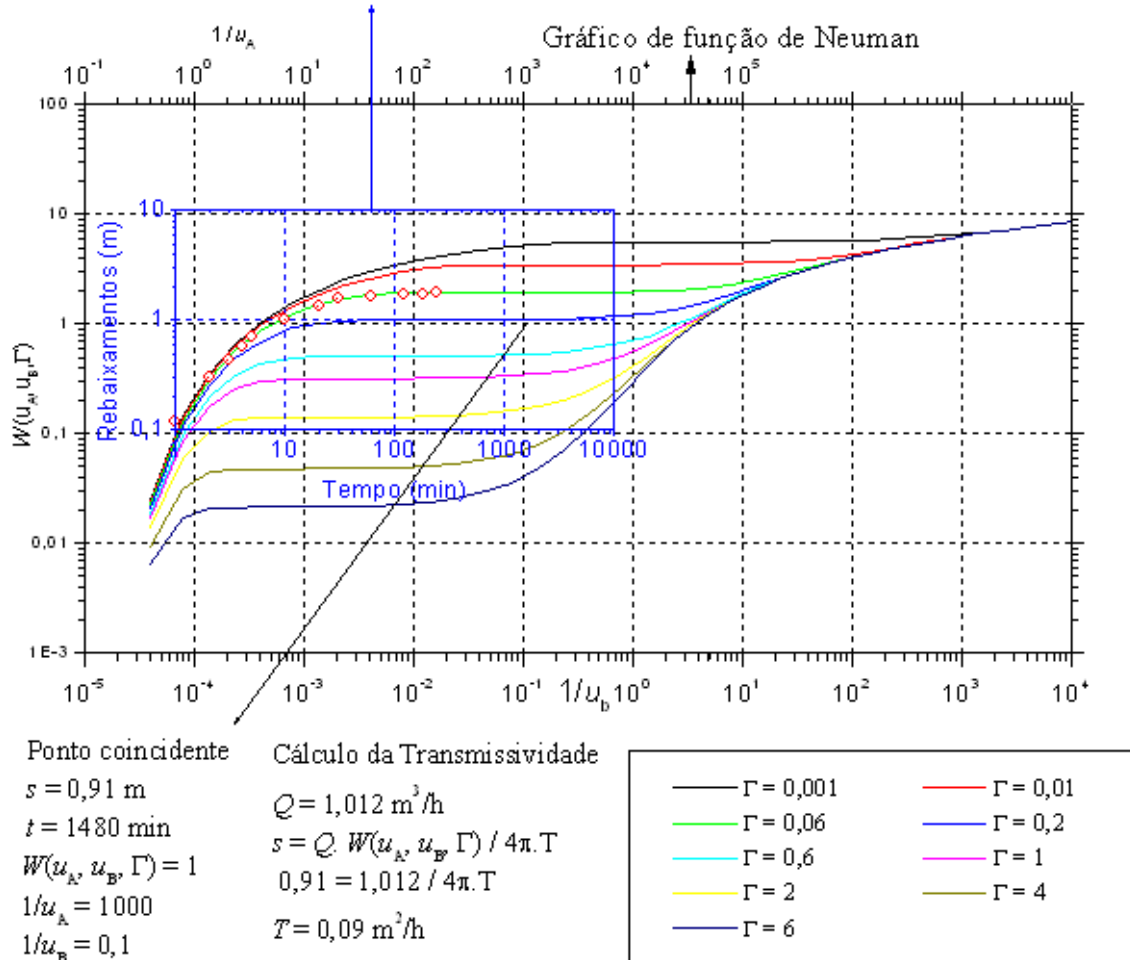


Figura 6. Método da superposição da família de curvas de Neuman (Fetter, 1988) com os dados de rebaixamento \times tempo, obtido no teste de infiltração realizado nos piezômetros 5 e 6 para determinação da Transmissividade do aquífero freático, no Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU.

existentes nas rochas cristalinas, situadas em posição topográfica superior, mas distantes da área ou, então, provenientes da dissolução da montmorilonita, mineral freqüente no substrato constituído por sedimentos terciários da Formação Tremembé. Da mesma forma, o manganês também se encontra acima dos limites. Sua origem é semelhante à do ferro dissolvido. O teor alto encontrado para estes elementos é atribuído ao particulado coloidal existente nas águas do aquífero freático já que as análises deles foram realizadas pelo método de Espectrometria de Absorção Atômica (Greenberg et al., 1998), usando amostra total (sem filtração).

Encontrou-se bário acima dos limites no piezômetro 4. É um elemento natural proveniente de sais de bário (barita) existente no cimento nos grãos dos sedimentos terciários da Formação Tremembé, existentes no local, em profundidade.

A primeira avaliação dos resultados das análises das águas coletadas nos piezômetros, no dia 26/04/2006, mostrou que as águas do aquífero freático, coletadas no piezômetro 4, apresentavam o maior índice de contaminação entre os cinco piezômetros analisados (Tabela 4). Assim sendo, foi realizada uma nova coleta em 23/08/2006 para uma análise química mais

completa nas águas obtidas nesse piezômetro. Desta vez, as análises foram realizadas pelo Laboratório Quimlab, da Universidade do Vale do Paraíba, situado em Jacareí, abrangendo um espectro maior e que atende todos os parâmetros de potabilidade da Portaria 518/2004. Os resultados dessa análise encontram-se nas Tabelas 7, 8 e 9, e os parâmetros acima do Limite da Portaria 518/2004 encontram-se realçados em amarelo.

Tabela 4. Resultados das análises químicas realizadas pela SABESP, de São José dos Campos, em amostras coletadas nos piezômetros em 26/04/2006.

| Parâmetros | Unidades | Limite de Detecção | Limite Portaria 518/2004 | Piezômetros=profundidades (m) | | | | |
|----------------------------|----------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | | P1=4,0 | P2=6,0 | P3=5,4 | P4=4,5 | P5=9,4 |
| Alumínio | mg/L | 0,02 | 0,2 | 0,02 | <0,02 | 0,03 | <0,02 | 0,11 |
| Amônia | mg/L | 0,02 | 1,5 | 0,12 | 0,12 | 0,09 | 0,15 | 0,13 |
| Antimônio | mg/L | 0,003 | 0,005 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 |
| Arsênico | mg/L | 0,005 | 0,01 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Bário | mg/L | 0,05 | 0,7 | 0,65 | 0,38 | 0,68 | 1,21 | 0,2 |
| Cádmio | mg/L | 0,001 | 0,005 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| Cianeto | mg/L | 0,03 | 0,07 | <0,03 | <0,03 | <0,03 | 0,03 | <0,03 |
| Chumbo | mg/L | 0,005 | 0,01 | 0,274 | 0,116 | 0,222 | 0,745 | 0,076 |
| Cloreto | mg/L | 1 | 250 | 23,01 | <1 | 11,88 | <1 | <1 |
| Cobre | mg/L | 0,05 | 2 | 0,06 | <0,05 | 0,07 | 0,18 | 0,22 |
| Cond. Especifica | µS/cm | 0,1 | | 109,9 | 24,2 | 51,5 | 16 | 15,5 |
| Cor Aparente | UC | 5 | 15 | 3000 | 1250 | 1750 | 5000 | 500 |
| Cromo Total | mg/L | 0,005 | 0,05 | 0,053 | 0,027 | 0,059 | 0,15 | 0,031 |
| Ferro | mg/L | 0,05 | 0,3 | 105,56 | 42,78 | 103 | 211,6 | 25,18 |
| Fluoreto | mg/L | 0,2 | 1,5 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 |
| Manganês | mg/L | 0,05 | 0,1 | 2,46 | 1,24 | 2,24 | 7,64 | 0,83 |
| Mercurio | mg/L | 0,0002 | 0,001 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 |
| Monocloramina | mg/L | 0,06 | 3 | <0,06 | <0,06 | <0,06 | <0,06 | <0,06 |
| Nitrato | mg/L | 0,05 | 10 | 0,92 | 1,2 | 1,22 | 0,6 | 0,7 |
| Nitrito | mg/L | 0,01 | 1 | 0,02 | <0,01 | 0,01 | <0,01 | <0,01 |
| pH | pH | | | 4,9 | 5,3 | 5,1 | 5,4 | 5,7 |
| Selênio | mg/L | 0,005 | 0,01 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Sódio | mg/L | 0,05 | 200 | 4,75 | 2,06 | 1,5 | 1,25 | 0,64 |
| Sulfato | mg/L | 2 | 250 | 6,4 | 3,15 | 2,21 | 26,58 | 2,22 |
| Sulfeto | mg/L | 0,03 | 0,05 | <0,03 | <0,03 | <0,03 | <0,03 | <0,03 |
| Surfactantes | mg/L | 0,03 | 0,5 | <0,03 | <0,03 | <0,03 | <0,03 | <0,03 |
| Turbidez | NTU | 0,1 | 5 | 1840 | 780 | 1280 | 4010 | 318 |
| Zinco | mg/L | 0,05 | 5 | 0,175 | 0,162 | 0,269 | 0,42 | 0,272 |
| Sólidos Totais Dissolvidos | mg/L | 1 | 1000 | 56 | 11 | 24 | 7 | 7 |
| Temperatura da amostra | °C | | | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 |

Obs.: Realçados em amarelo valores acima dos limites da Resolução 518/2004.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para os índices físicos calculados por correlação nas amostras retiradas dos taludes, em diversas profundidades, variáveis entre 0,3 m e 6 m, obteve-se a média de 53% de porosidade, 29,3% de saturação e 70,7% de aeração (Tabela 5). Verifica-se que esses resultados são bastante coerentes com os resultados obtidos em amostras de solos retiradas em diversos outros pontos do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, nas profundidades de 0,2 m e 0,4 m, já que, os valores de porosidade variaram entre 47 e 57%, a saturação entre 30 e 45% e a aeração entre 55 e 70% (Tabela 6).

Esses valores médios encontrados, Porosidade (n) de 53% e Grau de Saturação (S_r) de 29,3%, foram utilizados para determinar a Capacidade de Armazenamento (C_A) e o Armazenamento Unitário (A_U), conforme abaixo descrito.

Como, $C_A = \theta - \theta \times S_r$, então,

$$C_A = 0,53 - 0,53 \times 0,293 = 0,375.$$

Sendo, $A_U = 1 \text{ m}^3 \times C_A$, então

$$A_U = 0,375 \text{ m}^3.$$

Ou seja, teoricamente, para cada 0,375 m de lâmina d'água infiltrada obter-se-á 1 m de subida do nível d'água do aquífero freático. Usa-se a expressão teoricamente porque para cada acréscimo na subida do nível d'água ou aumento do potencial hidráulico haverá, como mecanismo compensatório, um aumento equivalente na descarga da água do aquífero freático nas fontes.

De qualquer forma, é objetivo deste trabalho comparar o valor encontrado para o Armazenamento Unitário com as medidas diárias de variações dos níveis d'água nos piezômetros para se conhecer a recarga natural do aquífero freático no local do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU e, também, as taxas de descarga nas fontes que vão alimentar o fluxo de base do ribeirão Itaim.

Tabela 5. Resultados dos índices físicos calculados por correlação com os parâmetros obtidos nas amostras dos taludes (profundidade de 0,3 a 6 m).

| Talude | Posição e profund. | Coord. UTM EW (m) | Coord. UTM NS (m) | Cota (m) | γ_s (g/cm ³) | w (%) | γ (g/cm ³) | e | n (%) | S_r (%) | A (%) |
|--------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------|---------------------------------|---------|-------------------------------|-------|-----------|-------------|-------------|
| 1 | Topo – 2 m | 447996 | 7452971 | 590 | 2,68 | 12,9 | 1,383 | 1,188 | 54,3 | 29,1 | 70,9 |
| | Meio – 4 m | | | | 2,65 | 7,9 | 1,518 | 0,884 | 46,9 | 28,0 | 72,0 |
| | Base – 6 m | | | | 2,64 | 9,6 | 1,449 | 0,999 | 50,0 | 25,4 | 74,6 |
| 2 | Topo – 3 m | 447938 | 7452776 | 591 | 2,64 | 5,7 | 1,449 | 0,862 | 46,3 | 17,5 | 82,5 |
| | Meio – 4,5m | | | | 2,67 | 12,9 | 1,417 | 1,118 | 52,8 | 29,6 | 70,4 |
| | Base – 6 m | | | | 2,65 | 11 | 1,429 | 1,058 | 51,4 | 27,6 | 72,4 |
| 3 | Topo – 0,3m | 447829 | 7452670 | 578 | 2,65 | 20 | 1,395 | 1,28 | 56,1 | 41,4 | 58,6 |
| | Meio – 1,5m | | | | 2,67 | 17,3 | 1,278 | 1,451 | 59,2 | 31,8 | 68,16 |
| | Base – 3 m | | | | 2,66 | 18,7 | 1,265 | 1,496 | 59,9 | 33,6 | 66,75 |
| Média | | | | | | | | | 53 | 29,3 | 70,7 |

Verificou-se que, na amostra coletada a 1 m de profundidade, as areias mostram uma distribuição uniforme entre areia muito fina até areia média (Figura 7) e, na amostra coletada a 2 m de profundidade, as areias mostram uma distribuição muito uniforme desde muito fina até grossa (Figura 8). Isso demonstra uma característica encontrada nos solos da Faculdade de Agronomia: baixo grau de seleção em profundidade, ou seja, quanto maior a profundidade

mais uniforme é a distribuição da textura dos sedimentos, desde finos, argilosos, até grossos, arenosos.

Tabela 6. Resultado dos índices físicos calculados por correlação com os parâmetros obtidos nas amostras de campo da Faculdade de Agronomia da UNITAU (prof. 0 a 0,4 m).

| Ponto | Profund. (m) | Coord. UTM EW (m) | Coord. UTM NS (m) | Cota (m) | γ_s (g/cm ³) | w (%) | γ (g/cm ³) | e | n (%) | Sr (%) _r | A (%) |
|-------|--------------|-------------------|-------------------|----------|---------------------------------|-------|-------------------------------|------|-------|---------------------|-------|
| 1 | 0,20 | 447040 | 7452930 | 580 | 2,79 | 15,71 | 1,47 | 1,20 | 54 | 37 | 63 |
| 2 | 0,20 | 446991 | 7452890 | 572 | 2,86 | 14,09 | 1,40 | 1,32 | 57 | 30 | 70 |
| 3 | 0,20 | 447027 | 7452914 | 577 | 2,68 | 16,45 | 1,57 | 0,99 | 50 | 45 | 55 |
| 4 | 0,20 | 447006 | 7452930 | 575 | 2,60 | 12,80 | 1,55 | 0,89 | 47 | 37 | 63 |
| 5 | 0,20 | 447059 | 7452801 | 567 | 2,64 | 16,01 | 1,40 | 1,20 | 54 | 35 | 65 |
| 6 | 0,20 | 447082 | 7452893 | 568 | 2,82 | 16,55 | 1,42 | 1,31 | 57 | 36 | 64 |
| 1 | 0,40 | 447040 | 7452930 | 580 | 2,93 | 17,38 | 1,50 | 1,30 | 56 | 39 | 61 |
| 2 | 0,40 | 446991 | 7452890 | 572 | 2,76 | 13,24 | 1,52 | 1,05 | 51 | 35 | 65 |
| 3 | 0,40 | 447027 | 7452914 | 577 | 2,69 | 14,81 | 1,56 | 0,98 | 49 | 41 | 59 |
| 4 | 0,40 | 447006 | 7452930 | 575 | 2,72 | 15,50 | 1,63 | 0,93 | 48 | 45 | 55 |
| 5 | 0,40 | 447059 | 7452801 | 567 | 2,78 | 14,30 | 1,58 | 1,01 | 50 | 39 | 61 |
| 6 | 0,40 | 447082 | 7452893 | 568 | 2,86 | 13,48 | 1,56 | 1,08 | 52 | 36 | 64 |

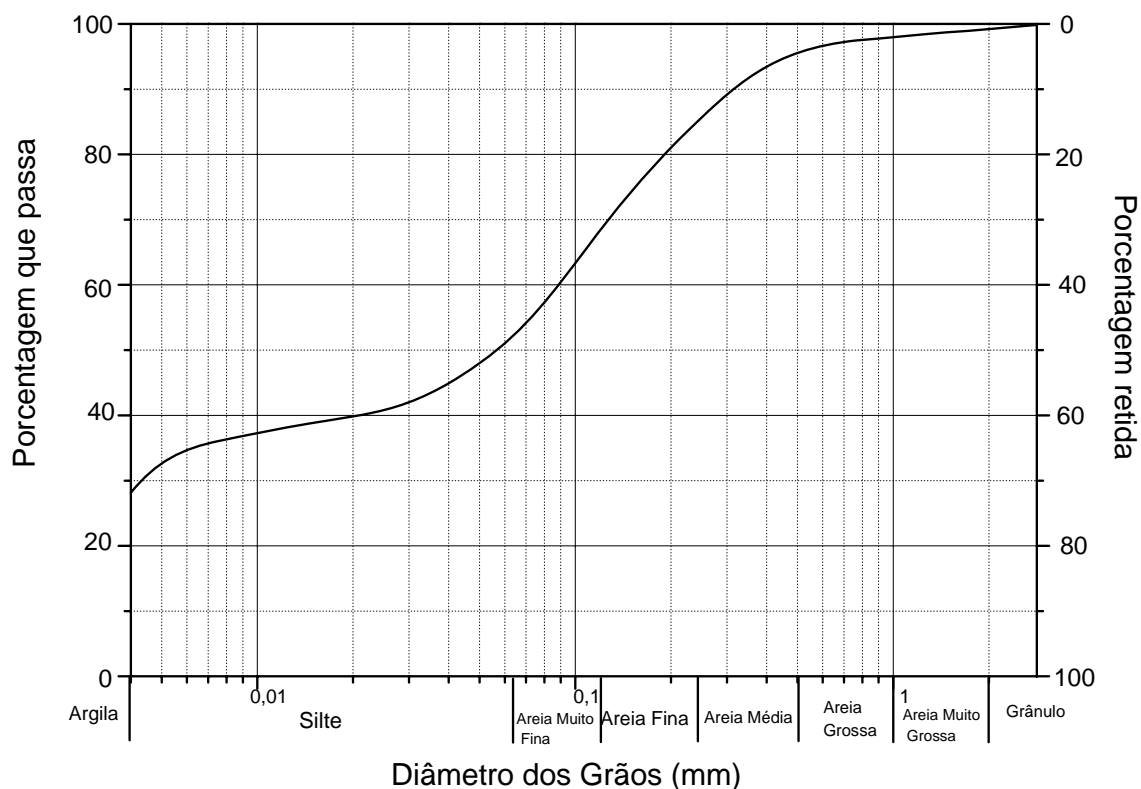


Figura 7. Curva granulométrica da amostra de 1 m profundidade do Piezômetro 1, do Departamento de Ciências Ambientais da UNITAU.

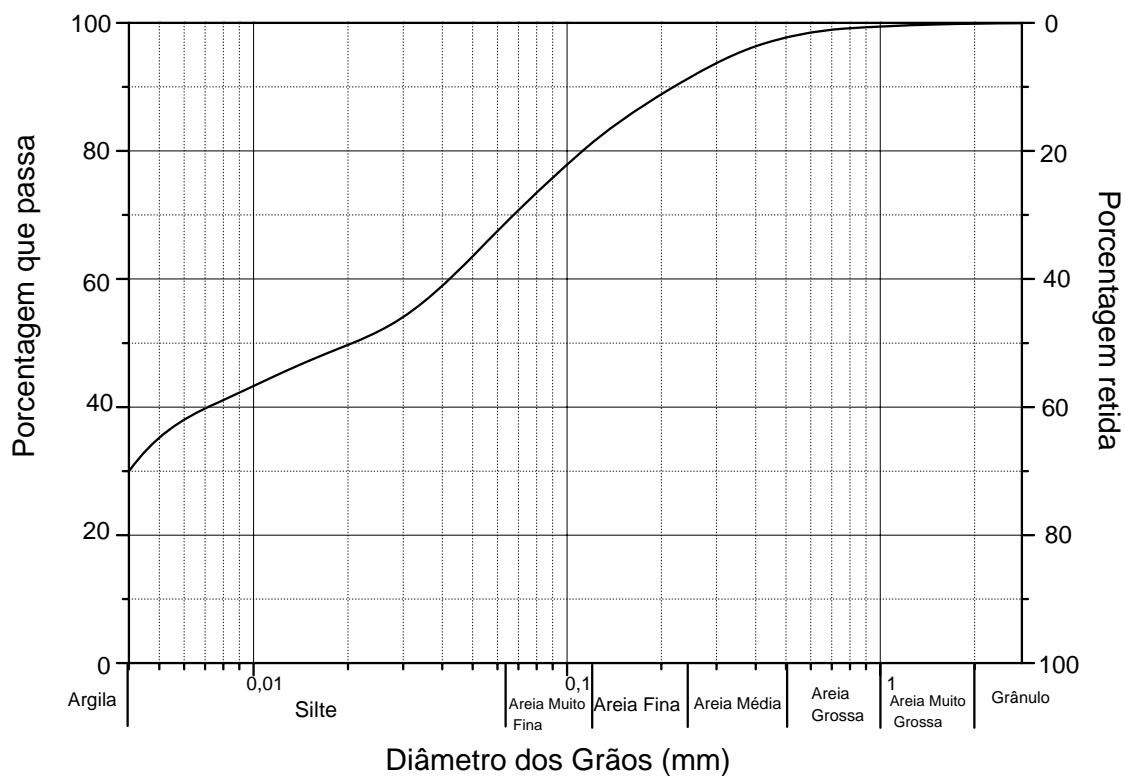


Figura 8. Curva granulométrica da amostra 2 m de profundidade do Piezômetro 1, do Departamento de Ciências Ambientais da UNITAU.

3.1. Avaliação da recarga natural

Como foi visto anteriormente, baseado nos índices físicos, para cada 0,375 m de lâmina d'água infiltrada tem-se 1 m de subida do nível d'água do aquífero freático.

Sabendo-se o excesso de água disponível no perfil do solo pelo cálculo do balanço hídrico (realizado em três períodos consecutivos de 60 dias, de 16 de novembro de 2005 a 15 de maio de 2006, em um período de 180 dias, de 16 de maio de 2006 a 10 de novembro de 2006 e, em um período de 60 dias, de 11 de novembro de 2006 a 4 de janeiro de 2007) e conhecendo as variações do nível d'água do aquífero freático, medidas nos piezômetros por comparação, pode-se estimar a recarga natural e saber como ela ocorre em função das chuvas.

Observou-se que, no piezômetro 1, nenhuma medida do nível d'água é inferior ao Datum -3,46 m abaixo do nível do solo. Assim, o gráfico da Figura 9 foi confeccionado adotando-se o Datum -3,46 m abaixo do solo no local do Piezômetro 1, como nível zero e assim, para que as oscilações do nível d'água sempre sejam positivas em relação ao Datum, todas as medidas históricas do nível d'água obtidas foram subtraídas de 3,46 m. O gráfico da variação do nível d'água, no tempo (em linha, em vermelho), disposto junto com o gráfico das precipitações (em colunas, em verde), mostra que, após o início do período chuvoso, a partir de novembro, o nível d'água do aquífero freático sobe continuamente e rapidamente, atingindo o nível máximo no dia 18 de fevereiro de 2006. Após essa data, há um período de recessão curto e com forte abatimento do nível, que dura até 8 de março de 2006.

Traçando-se a reta média nesse período curto (Figura 9), obtém-se um coeficiente angular de 38,75 mm/dia que corresponde a 14,53 mm/dia de queda da altura da lâmina d'água contida no aquífero freático (igual a 38,75 dividido por 0,375), considerando que, para cada 0,375 m de lâmina d'água infiltrada, o nível d'água do aquífero sobe 1 m de altura (conforme descrito anteriormente). Esse é o valor da taxa de descarga de água armazenada no

aquífero freático, nas fontes onde há exudação, no período considerado, quando o potencial hidráulico é alto (maior que 0,6 m acima do Datum 3,46 m, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 9). Essa taxa mostra que a descarga média da água do aquífero freático nas fontes (para essa altura de potencial hidráulico) é de 1 m³/dia para cada área de 79,8 m² do terreno. Enquanto há infiltração de água das chuvas, até 23/4/2006, o nível d'água se mantém praticamente constante, ou seja, a perda de água nas fontes se iguala à água infiltrada proveniente das precipitações.

De 23/04/2006 a 27/07/2006, ocorre um longo período de recessão. Traçando-se a reta média nesse período (quando as medidas são inferiores ao potencial hidráulico de 0,6 m acima do Datum 3,46 m, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 9), obtém-se o coeficiente angular igual a 4,92 mm/dia. Considerando que, para cada 0,375 m de lâmina d'água infiltrada, ocorre 1 m de subida do nível d'água, resulta em 1,85 mm/dia de taxa de recessão da lâmina d'água no aquífero freático, em média (igual a 4,92 dividido por 0,375). Esta é a taxa de descarga da água armazenada no aquífero freático, nas fontes de exudação, durante o período seco. Essa taxa mostra que a descarga média da água do aquífero freático nas fontes, nesse período, é de 1 m³/dia para cada área com 540,5 m² do terreno.

O gráfico em linha (violeta) da Figura 9 representa as medidas equivalentes de excedente hídrico no perfil do solo, considerando que, para cada 0,375 m de lâmina d'água excedente, o nível d'água do aquífero freático sobe 1 m. Quando os pontos em azul escuro estão acima do nível d'água, conclui-se que há escoamento superficial (igual à diferença entre o ponto considerado, em azul escuro, e o ponto situado abaixo, na vertical, na curva do nível d'água, em vermelho, dividido pelo fator 0,375 m).

Nos períodos situados entre 12 de outubro e 5 de novembro, e entre 16 de novembro e 15 de dezembro, o nível d'água do aquífero freático (linha em vermelho) sobe mais do que há água disponível no balanço hídrico (linha em violeta). Verifica-se que, é justamente nesses períodos (final do período seco e início do período chuvoso), quando há germinação das culturas, há máxima recarga do aquífero freático (recarga artificial involuntária) devido ao lançamento, por aspersão, da água bombeada do ribeirão Itaim nas plantações experimentais da Faculdade de Agronomia situadas a montante da área onde estão instalados os piezômetros.

Como esse é um fator de recarga efêmero, a subida do nível d'água é rápida assim como o seu descenso.

3.2. Contaminação das águas do aquífero freático

Os resultados das análises bacteriológicas são preocupantes na região, pois no piezômetro 4 foram encontrados índices elevados da bactéria *Escherichia Coli* (Tabela 7), um coliforme fecal. A presença de bactérias fecais no piezômetro 4 a 4,5 m de profundidade indica que o aquífero freático é muito vulnerável na região, pois o solo possui alta porosidade (53%, em média), e horizontes predominantemente franco-arenosos, com pouca argila para adsorver ou absorver poluentes e/ou bactérias que migram facilmente até o aquífero freático juntamente com a água que percola o solo advinda das chuvas ou, do ribeirão Itaim, bombeada para irrigar as culturas existentes na Faculdade de Agronomia da UNITAU durante o período de germinação.

A análise química detalhada do piezômetro 4 mostra as condições das águas subterrâneas do aquífero freático. A cor e turbidez elevada demonstram que há muitos sólidos nessas águas, a maior parte em estado coloidal. O teor alto de ferro em relação a outros elementos mostra que esses sólidos coloidais são constituídos, preferencialmente, por óxidos e hidróxidos de ferro e, em menor quantidade, por óxidos e hidróxidos de manganês.

O teor relativamente alto de sulfatos, entre os ânions analisados, mostra que entre os compostos de ferro estão incluídos, também, alguns sulfatos (constituindo parte da fração coloidal). O gráfico da Figura 11 mostra que somente uma quantidade pequena de sulfatos encontra-se dissolvida (para que haja equilíbrio entre os cátions e ânions presentes), sendo que, a maior parte provavelmente encontra-se como compostos de ferro e manganês.

Metais como o chumbo e bário também estão presentes, e os seus pesos atômicos elevados mostram que somente podem estar sendo transportados como parte da massa coloidal. O teor de dureza mostra que também existem, nessa massa, carbonatos de cálcio. Sulfatos de chumbo e carbonatos de bário, em estado iônico, também devem estar presentes em pequena quantidade, já que os seus índices de dissolução são baixos.

A presença de bactérias (coliformes fecais e totais) indica que elas são transportadas junto com os colóides e sobrevivem no solo até a profundidade de 4,5 m, ao menos, já que o piezômetro 4 atinge essa profundidade.

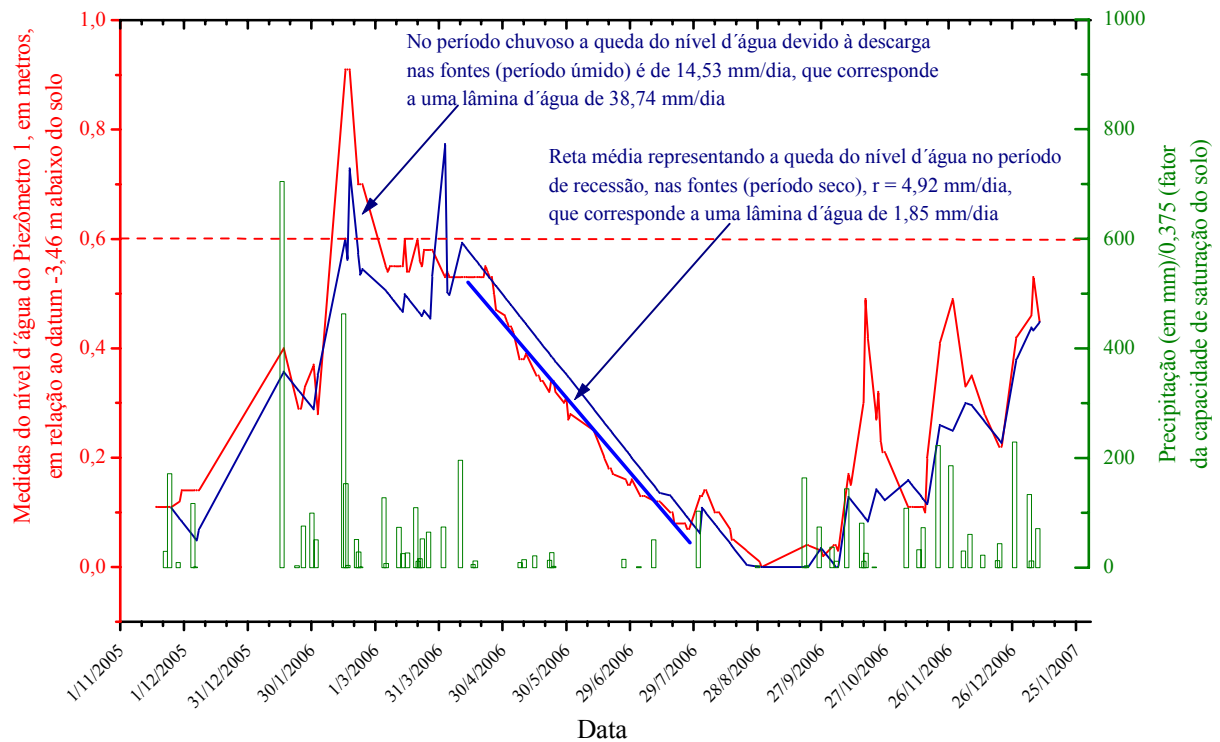


Figura 9. Gráfico das medidas do nível d'água no Piezômetro 1 (linha, em vermelho), precipitação (colunas, em verde) e alturas equivalentes do nível d'água, considerando os dados do balanço hídrico (linha, em violeta), no Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, no período 1 nov 2005-25 jan. 2007.

Embora a área do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU tenha sido utilizada para fins agrícolas há bastante tempo, e de forma metódica há pelo menos 30 anos, não há vestígios de agrotóxicos ou desinfetantes nas águas do aquífero freático (Tabelas 8 e 9). Da mesma forma, existe uma pista para pouso e decolagem de helicópteros e aviões do Exército Brasileiro, em uma área vizinha ao Departamento de Ciências Agrárias, na Base Aérea da Aviação do Exército (BAVEX) e, mesmo assim, apesar do uso freqüente de hidrocarbonetos (combustíveis) e solventes, não há vestígios de orgânicos nas águas subterrâneas do aquífero freático (Tabela 9). Esses fatos mostram que, embora as camadas de solo que contêm o

aquífero freático sejam bastante porosas e permeáveis, permitindo inclusive a sobrevivência de bactérias, elas possuem um poder depurativo bastante efetivo quanto aos pesticidas, adubos e materiais orgânicos.

Tabela 7. Análise físico-química e bacteriológica realizada com amostra de água coletada no piezômetro 4, em 23/08/2006.

| PARÂMETROS | UNIDADES | Limite de detecção | Limite Portaria 518/2004 | Piezômetro 4 – Prof. 4,5 m |
|--------------------------------|-----------|--------------------|--------------------------|----------------------------|
| Características físicas | | | | |
| Temperatura | °C | - | - | 24 |
| pH | pH | - | - | 5,4 |
| Condutividade Específica | µS/cm | 0,1 | - | 16 |
| Sólidos Totais Dissolvidos | mg/L | 1 | 1000 | 7 |
| Cor Aparente | UC | 5 | 15 | 5000 |
| Turbidez | NTU | 0,1 | 5 | 4010 |
| Metais | | | | |
| Alumínio | mg/L | 0,02 | 0,2 | <0,02 |
| Bário | mg/L | 0,05 | 0,7 | 1,21 |
| Cádmio | mg/L | 0,001 | 0,005 | <0,001 |
| Chumbo | mg/L | 0,005 | 0,01 | 0,745 |
| Cobre | mg/L | 0,05 | 2 | 0,18 |
| Cromo Total | mg/L | 0,005 | 0,05 | 0,15 |
| Ferro | mg/L | 0,05 | 0,3 | 211,6 |
| Manganês | mg/L | 0,05 | 0,1 | 7,64 |
| Mercúrio | mg/L | 0,0002 | 0,001 | <0,0002 |
| Zinco | mg/L | 0,05 | 5 | <0,05 |
| Semimetais | | | | |
| Antimônio | mg/L | 0,003 | 0,005 | <0,003 |
| Arsênio | mg/L | 0,005 | 0,01 | <0,005 |
| Ametais | | | | |
| Fluoreto | mg/L | 0,2 | 1,5 | <0,2 |
| Selênio | mg/L | 0,005 | 0,01 | <0,005 |
| Sulfeto | mg/L | 0,03 | 0,05 | <0,03 |
| Bactérias | | | | |
| Coliformes Totais | NMP/100ml | 1 | 0 | 25 |
| Escherichia Coli | NMP/100ml | 1 | 0 | 25 |

Obs.: Realçados em amarelo valores acima dos limites da Resolução 518/2004.

Tabela 8. Análises de compostos e agrotóxicos realizadas com amostras de água coletadas no piezômetro 4, em 23/08/2006.

| PARÂMETROS | UNIDADES | Limite de detecção | Limite Portaria 518/2004 | Piezômetro 4 – Prof. 4,5 m |
|---------------------------------|----------|--------------------|--------------------------|----------------------------|
| Compostos | | | | |
| Amônia | mg/L | 0,02 | 1,5 | 0,27 |
| Dureza Total | mg/L | - | 500 | 14,3 |
| Cianeto | mg/L | 0,03 | 0,07 | <0,03 |
| Nitrito | mg/L | 0,01 | 1 | <0,01 |
| Sílica | mg/L | - | - | 3 |
| Surfactantes | mg/L | 0,03 | 0,5 | <0,03 |
| Agrotóxicos | | | | |
| Aclor | µg/L | - | 20 | <1 |
| Aldrin e Dieldrin | µg/L | - | 0,03 | <0,01 |
| Atrazina | µg/L | - | 2 | <1 |
| Bentazona | µg/L | - | 300 | <10 |
| Clordano (Isômeros) | µg/L | - | 0,2 | <0,1 |
| 2,4 D | µg/L | - | 30 | <5 |
| DDT(Isômeros) | µg/L | - | 2 | <0,5 |
| Endossulfan | µg/L | - | 20 | <3 |
| Endrin | µg/L | - | 0,6 | <0,1 |
| Glifosato | µg/L | - | 500 | <10 |
| Heptacloro e Heptacloro epoxido | µg/L | - | 0,03 | <0,01 |
| Hexaclorobenzeno | µg/L | - | 1 | <0,5 |
| Lindano(g-BHC) | µg/L | - | 2 | <0,5 |
| Metolacloro | µg/L | - | 10 | <3 |
| Molinato | µg/L | - | 6 | <2 |
| Metoxicloro | µg/L | - | 20 | <5 |
| Pendimetalina | µg/L | - | 20 | <5 |
| Pentaclorofenol | µg/L | - | 9 | <2 |
| Permetrina | µg/L | - | 20 | <6 |
| Propanil | µg/L | - | 20 | <4 |
| Simazina | µg/L | - | 2 | <1 |
| Trifluralina | µg/L | - | 20 | <5 |

Tabela 9. Análises dos orgânicos, desinfetantes, cátions e ânions principais em amostras de água coletadas no piezômetro 4, em 23/08/2006.

| PARÂMETROS | UNIDADES | Limite de detecção | Limite Portaria 518/2004 | Piezômetro 4 – Prof. 4,5 m |
|------------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------------|
| Orgânicos | | | | |
| Acrilamida | µg/L | - | 0,5 | <0,1 |
| Benzeno | µg/L | - | 5 | <0,5 |
| Benzo(a)Pireno | µg/L | - | 0,7 | <0,1 |
| Cloreto de Vinila | µg/L | - | 5 | <1 |
| 1,2 Dicloroetano | µg/L | - | 10 | <2 |
| 1,1 Dicloroetano | µg/L | - | 30 | <5 |
| Diclorometano | µg/L | - | 20 | <5 |
| Estireno | µg/L | - | 20 | <1 |
| Tetracloroeto de Carbono | µg/L | - | 2 | <1 |
| Tetracloroetano | µg/L | - | 40 | <2 |
| Triclorobenzenos | µg/L | - | 20 | <5 |
| Trihalo Benzenos | µg/L | - | 20 | <5 |
| Tricloroetano | µg/L | - | 70 | <5 |
| Monoclorobenze-no | mg/L | - | 0,12 | <0,05 |
| Etilbenzeno | mg/L | - | 0,2 | <0,05 |
| Tolueno | mg/L | - | 0,17 | <0,05 |
| Xileno | mg/L | - | 0,3 | <0,05 |
| Desinfetantes | | | | |
| Monocloramina | mg/L | 0,06 | 3 | <0,06 |
| Trihalometano Total | mg/L | - | 0,1 | <0,05 |
| Cátions principais | | | | |
| Cálcio | mg/L | - | - | 3,17 |
| Potássio | mg/L | - | - | 0,47 |
| Magnésio | mg/L | - | - | 1,55 |
| Sódio | mg/L | 0,05 | 200 | 1,25 |
| Ânions principais | | | | |
| Alcalinidade em bicarbonatos | mg/L CaCO ₃ | - | - | 18 |
| Cloreto | mg/L | 1 | 250 | 2,72 |
| Nitrato | mg/L | 0,05 | 10 | 0,6 |
| Sulfato | mg/L | 2 | 250 | 26,58 |

Quanto ao tipo de água subterrânea, as águas do aquífero freático são classificadas como sendo sulfatadas cálcicas, conforme é mostrado no diagrama triangular de Piper (1944) da Figura 10.

Na Figura 11, é mostrada a distribuição relativa dos cátions e ânions principais.

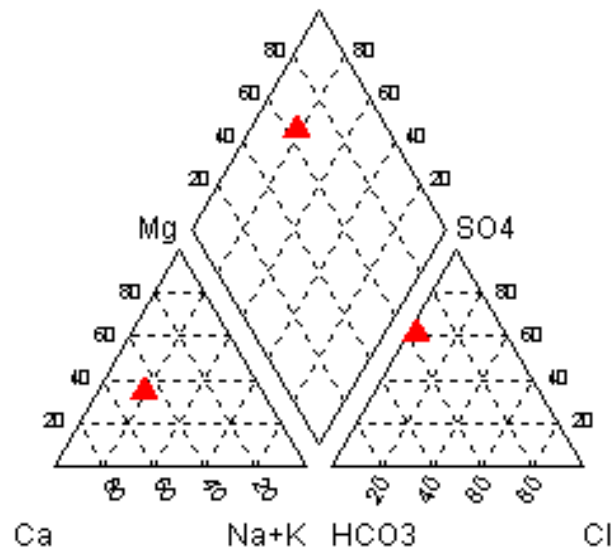


Figura 10. Ponto representativo das águas do Piezômetro 4, no diagrama triangular de Piper.

A quantidade de sólidos totais dissolvidos (apenas 7 mg/L) com predomínio dos cátions cálcio e magnésio e dos ânions sulfato e bicarbonato mostra que no aquífero freático, os elementos dissolvidos em estado iônico, perfazem uma pequena quantidade.

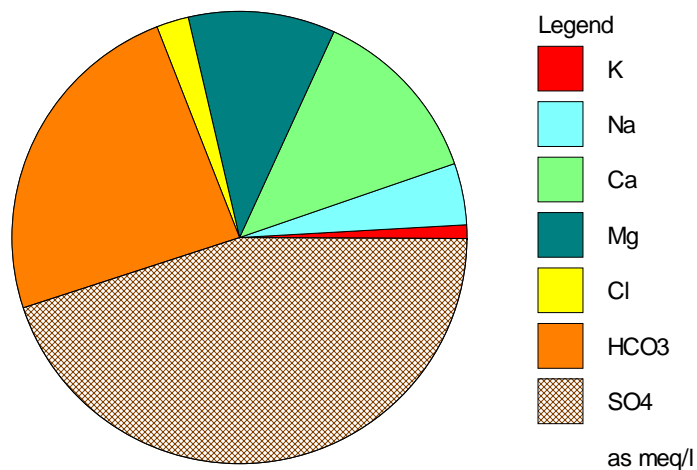


Figura 11. Gráfico da distribuição relativa dos principais elementos que se encontram dissolvidos nas águas subterrâneas do aquífero freático.

4. CONCLUSÕES

Na área da bacia do rio Una, onde está localizado o Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, ocorrem latossolos vermelho-amarelos (conhecidos como variação Una), constituídos principalmente, pelos argilo-minerais caulinita e illita, e grãos de quartzo. A espessura desse solo, coluvionar, no local, desenvolvido sobre sedimentos terciários da Formação Tremembé, varia entre 10 e 20 m, com as menores espessuras no talvegue e planícies de inundação do ribeirão Itaim e rio Una e, as maiores, nos topos das colinas tabulares.

Ensaio geotécnicos realizados em amostras coletadas na área do Departamento de Ciências Agrárias, em laboratório de solos do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU e no laboratório de solos da Alphageos e de sedimentologia do Instituto Geológico do Estado de São Paulo, para conhecimento dos Índices Físicos, mostram que esse solo é bastante poroso, em torno de 53%, e com umidade natural de aproximadamente 30%. Com esses parâmetros, a cada 0,375 m de infiltração de água no solo, haverá um metro de correspondente elevação da coluna de água do aquífero freático. Neste trabalho, essa capacidade de armazenar água por m³ de solo, foi definida como sendo o Armazenamento Unitário do Solo.

Medidas históricas do nível d'água do aquífero freático, realizadas em 6 piezômetros construídos aos pares (para aferição das medidas de nível d'água e, para que um possa ser usado para injeção de água e outro para as medidas de subida de nível, possibilitando o cálculo da Condutividade Hidráulica do solo), sendo 2 localizados em uma encosta e 4 na base de uma colina tabular, mostraram que as variações da altura da água (medidas reais) apresentam uma correspondente variação da água disponível para infiltrar, obtida pelo balanço hídrico realizado no mesmo período (dados obtidos no Posto Meteorológico da Estação UNITAU/INMET n° 83784, do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU), e multiplicada pelo correspondente Armazenamento Unitário do Solo.

Os métodos utilizados e as medidas obtidas permitiram calcular a descarga de água do aquífero freático nas fontes, sendo na média de 12,53 mm/dia no período chuvoso (entre 8 de fevereiro e 3 de março de 2006), e na média de 1,85 mm nos outros períodos do ano. Em relação aos piezômetros 1, 2, 3, e 4, o nível d'água não desceu abaixo de -3,46 m. Considerando esse *datum*, quando o aquífero freático possui carga hidráulica acima de 0,6 m, haverá descarga de 12,53 mm/dia e, quando a carga hidráulica for inferior a 0,6 m, a descarga nas fontes será de 1,85 mm/dia.

O piezômetro 1 (com profundidade de 4 m) está situado a montante do piezômetro 4 (com profundidade de 4,5 m), a apenas 6 m de distância, mas mostra diferenças significativas. Ambos possuíam o nível d'água, na época da coleta, de 3,5 m de profundidade. A existência de coliformes fecais no piezômetro 4, situado a jusante, denota bactérias oriundas de infiltração de águas provenientes de fossas sépticas ou contaminadas por esgoto doméstico, como as provenientes do ribeirão Itaim. Baixos teores de bário (respectivamente, 0,32 e 0,11 mg/L) e chumbo (respectivamente, 0,08 e 0,05 mg/L) mostram a presença, em pequenas quantidades, de elementos nocivos à saúde, de origem natural. O pH das amostras é ácido (4,9) e indica águas de circulação rápida, o causador deste pH baixo é o gás carbônico contido na atmosfera e dissolvido nas águas das chuvas infiltradas, onde se dissocia em bicarbonato e ácido carbônico. O pequeno tempo de residência dessas águas do aquífero freático não permite a reação com os carbonatos sedimentares que poderiam aumentar o pH e a alcalinidade que, no caso, é baixa.

5. AGRADECIMENTOS

Somente foi possível realizar este trabalho graças aos recursos provenientes da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por meio do Projeto nº 2003/07183-1, da colaboração efetiva do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU, por seus professores Paulo Fortes Neto, Getulio Teixeira Batista e Marcelo dos Santos Targa, e dos ex-alunos do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UNITAU, Dr. Adilson Peloggia, M.Sc. José Luiz Gonçalves, M.Sc. Mário Pero Tinoco e M.Sc. Jorge Luiz Monteiro. Para os trabalhos de campo, foi importante o apoio material como também dos funcionários do Instituto Geológico do Estado de São Paulo, principalmente dos sondadores, Santo Duarte Camargo e Aparecido Magalhães, e dos técnicos do laboratório de análises de sedimentologias, Ivete Costa da Silva e José Alves de Andrade. Agradecemos também, à empresa Alphageos pela realização dos ensaios geotécnicos.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. **The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil**. Rio de Janeiro: Anais da Academia Brasileira de Ciências, 1976. p. 15-26. Suplemento 48.
- BUENO, B. S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 1984. 131p. Publicação 004/85.
- 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., 1976, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBG, 1976. p. 247-256. vol. 4.
- COLTRINARI, L. Geomorfologia e dinâmica quaternária no sudeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia da FFLCH/USP**, São Paulo, n. 6, p. 7-16, 1992.
- D'ANGIOLELLA, G. L. B.; VASCONCELLOS, V. L. D. Cálculo do balanço hídrico climatológico com diferentes métodos para estimativa da evapotranspiração potencial, em planilhas ExcelTM. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Brasília: SBMET, 2002. 1 CD-ROM.
- FETTER, C. W. **Applied hidrogeology**. 2. ed. Nova York, Macmillan Publ., 1988. 592 p.
- 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., 1994, Recife. **Anais...** Recife: ABAS, 1994, p. 113-123. vol. 1.
- GREENBERG, A. E.; CLESCERI, L. S.; EATON, A. D. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington: American Public Health Association, 1998. 400 p.
- HASUI, Y.; GIMENEZ, A. F.; MELO, M. S. Sobre as bacias tafrogênicas do sudeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...** Recife: SBG, 1978. p. 382-392. vol. 1.

- SANTORO, J.; DINIZ, H. N.; CORREIA, N. T.; CARBONE, F. R.; SCIOTTA L. C. O. Estimativa da recarga do aquífero freático na bacia do Rio Una, no município de Taubaté, SP. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 2, n. 1, p. 57-82, 2007. ([doi:10.4136/ambi-agua.20](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.20))
-
- HASUI, Y.; PONÇANO, E. W. Organização estrutural e evolução da bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...** Recife: SBG, 1978. p. 368-381. vol. 1.
- 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., 1986, Goiânia. **Anais...** Goiânia: SBG, 1986. p. 321-336. vol. 1.
- NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos solos**: ensaios de laboratório. São Carlos: EESC-USP, 1995. 248p.
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M., CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, Embrapa Solos, 1999. 64 p. 1 mapa.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.
- PIPER, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. **American Geophysical Union Transaction**, Washington, v. 25, p. 914–923, 1944.
- RICCOMINI, C. **O Rift Continental do Sudeste do Brasil**. 1989. 256f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- RUSHTON, K. R.; WARD, C. The estimation of ground water recharge. **Journal of Hidrology**, Washington, v. 40, p.49-65, 1979.
- SANTORO, J. **Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro – S.P.**: estudo da fenomenologia com ênfase geotécnica. 1991. 140f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1991.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 3 – São José dos Campos e faixa litorânea. São Paulo: DAEE, 1977a. 112 p. vol. 1.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Estudo de águas subterrâneas: região administrativa 3 - São José dos Campos e faixa litorânea. São Paulo: DAEE, 1977b. 160p. vol. 5. (mapas e tabelas).
- STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B.; VILAR, O. M. **Ensaio de laboratório em mecânica dos solos**. São Carlos: EESC, 1981. 208p. il. Publicação 004/87.
- VERDADE, F. C.; HUNGRIA, L. S. Estudo genético da bacia orgânica do Vale do Paraíba. **Revista Bragantia**, Campinas, v. 25, n. 16, p. 189-202, 1966.