UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ESTIMATIVA DE RECARGA E CARACTERIZAÇÃO HIDROQUÍMICA
E ISOTÓPICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DOS AQUÍFEROS DA
REGIÃO DO CANAL DO JURUBATUBA**

JOSÉ ANGELO FERREIRA DA SILVA

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Antonio Bertolo

Tese de Doutorado

Nº 578

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Reginaldo Antonio Bertolo

Dra. Veridiana Teixeira de Souza Martins

Dr. Didier Gastmans

Dr. Rodrigo César de Araújo Cunha

Dr. José Luiz Albuquerque Filho

SÃO PAULO
2018

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

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

Silva, José Angelo Ferreira da
Estimativa de recarga e caracterização hidroquímica
e isotópica das águas subterrâneas dos aquíferos da
região do Canal do Jurubatuba./ José Angelo Ferreira
da Silva - São Paulo, 2017.
219 p. : il + anexos.

Tese (Doutorado) : IGc/USP
Orient.: Bertolo, Reginaldo Antônio

1. Recarga de aquíferos 2. Hidroquímica 3.
Isótopos estáveis 4. Hidrogeologia urbana 5. Bacia
do Alto Tietê I. Título

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Reginaldo pelo caminho, importante amizade, incentivo, paciência, ensinamentos e discussões.

À Prof. Dra. Veridiana, pela orientação e acompanhamento das análises isotópicas, e ao Prof. Dr. Ricardo Hirata pelas importantes discussões e críticas.

Ao amigo Carlos C. Alves pelo incessante apoio com o tratamento de dados, pelas infindáveis e decisivas discussões. À Ana pela atenção, disposição e pelos trabalhos de revisão e edição.

Ao Paulo Lima pelas conversas, ensinamentos e perspectivas; ao Carlos Maldaner pelas poucas, mas importantes conversas; e ao Marcos Barbosa pela constante atenção e apoio com as necessidades deste projeto.

À Juliane, minha esposa, pelo incentivo, apoio, infindáveis revisões e assistência no tratamento de dados. À minha pequena Isabella, pela paciência e espera quando não podia lhe dar atenção. Aos meus sogros, Júlia e Mário, pela ajuda e eterna disposição.

Ao amigo Bruno Civolani pelo constante e apoio e incentivo. Aos amigos Marcelo Braga e Fellippe Avarino pelo importante apoio na reta final dos trabalhos.

Ao José Luís pela amizade e apoio durante as etapas de trabalhos de campo. Ao Vítor Cavenaghi, Dênis Kamio, Sílvio Tavares e Jonatas pela assistência dada em campo. Agradecimento especial ao Raul Beber, César Kuzaqui e César Miyata pelo auxílio durante a etapa final dos trabalhos.

A toda a equipe do LAMO, Prof. Dra. Cláudia Varnier, Bruna Fiume, Rafael Terada, Paulo Galvão e Jonathan pelo companheirismo no início dos trabalhos. Agradecimento especial à Ana Paula, pelo auxílio com as análises de alcalinidade.

Ao Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas - CEPAS do Instituto de Geociências da USP, pela infraestrutura laboratorial desta pesquisa, especialmente, à Lúcia Helena e Eli do CEPAS pelo cuidado com as análises químicas e isotópicas.

Aos funcionários do IGc-USP, da secretaria de pós-graduação e da secretaria do Departamento de Geologia Sedimentar.

Ao Ronaldo, Ivan (Área 1), Artur (Área 3), Izaías (Área 4), Fernando e Gisele (Área 2) por todo apoio oferecido durante a execução das atividades de campo.

Ao Centro de Gerenciamento de Emergências do Município de São Paulo (CGE) pela cessão dos dados meteorológicos, e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), por meio do Departamento de Desenvolvimento e Gestão Metropolitana – MPD, pela disponibilização de informações de seu cadastro.

À CAPES (Demanda Social) - Cota do Programa, pela bolsa.

E a todos que participaram direta ou indiretamente deste trabalho.

“...não ambicionava qualquer glória, e as mais modestas escaladas deixavam-me louco de alegria. Para mim, a montanha não era mais que um reino maravilhoso onde, por qualquer mistério, eu me sentia mais feliz.”

Lionel Terray (Os Conquistadores do Inútil)

RESUMO

SILVA, J.A.F. Estimativa de recarga e caracterização hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas dos aquíferos da região do Canal do Jurubatuba. 2017. 223 p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, SP.

Os aquíferos da região do Canal do Jurubatuba são importantes no abastecimento industrial, comercial e residencial. Em 2001, foi detectada contaminação por solventes organoclorados nos solos e nas águas subterrâneas da região, atingindo o aquífero fraturado profundo, caracterizando risco para a população local e acarretando na paralisação de diversos poços de produção. Tratando-se de um aquífero fraturado, a contaminação apresentou-se complexa, devido a dificuldades na previsão de fluxos nesses sistemas. Este trabalho, inserido no projeto “Bases técnicas para a gestão de áreas contaminadas por solventes clorados” (GESOL), objetiva estimar a recarga dos aquíferos na região do Canal do Jurubatuba, por meio dos métodos de balanço hídrico, da variação do nível d’água do aquífero e isotópico; realizar as caracterizações hidroquímica e isotópica (O, H, e Sr) das águas subterrâneas e das potenciais fontes de recarga (água da chuva rede de abastecimento de água e de esgoto); e integrar os resultados para avaliar a atuação dos processos naturais e das possíveis influências antrópica e da dinâmica das águas subterrâneas na sua composição. Os trabalhos incluíram o monitoramento de dados meteorológicos e da variação do nível d’água subterrânea; e coleta de amostras de água para análises químicas e isotópicas. O acumulado de chuvas mensal e a respectiva variação do nível d’água dos poços monitorados, evidenciaram que a recarga dos aquíferos está sendo efetiva sob pluviometria média acima de 100 mm, confirmada pelo monitoramento da zona não saturada. As análises isotópicas da chuva permitiram elaborar a reta meteórica local, que apresentou boa correlação com a reta meteórica global, além de evidenciarem haver relação entre a quantidade de precipitação mensal e a variação no enriquecimento de isótopos estáveis. O enriquecimento isotópico nos resultados das amostras de água e de fontes, observado durante o período prolongado de seca de 2013/2014, apresentou correlação com poços com maior contribuição de fonte antrópica na recarga naquele período, indicando influência de diferentes comportamentos do clima na composição das fontes de recarga e das águas subterrâneas. Os isótopos de Sr apresentaram razoável eficácia na identificação de fontes antrópicas da recarga, mas não permitiram a distinção entre essas fontes. As caracterizações hidroquímica e isotópica mostraram que os aquíferos avaliados apresentaram alteração na qualidade de suas águas, em maior ou menor grau, em diferentes níveis, em decorrência de contribuição de fontes de recarga antrópica. O amônio se mostrou o indicador mais eficaz na determinação de contribuição antrópica na recarga por esgoto, e a presença de nitrato reflete a potencial atuação de processos de nitrificação nas águas subterrâneas. Os resultados dos métodos físicos utilizados para o cálculo de recarga, considerando-se as limitações de cada método, indicaram valores muito próximos. A recarga potencial pelo método do balanço hídrico apresentou média anual de 18,84% e a estimativa de recarga média pelo método da variação do nível d’água de 16,27% do total de precipitação. O método isotópico indicou média geral de 51,7% de contribuição antrópica na mistura das águas subterrâneas. A influência de fluxos ascendentes, identificada pelas cargas hidráulicas dos poços monitorados e pelas semelhanças hidroquímica e isotópica entre as águas dos poços profundos e rasos, está contribuindo para a mistura das águas subterrâneas dos aquíferos de porosidade intergranular.

Palavras-chave: Recarga, Hidroquímica, Isótopos Estáveis Hidrogeologia Urbana, Bacia do Alto Tietê, São Paulo.

ABSTRACT

SILVA, J.A.F. Recharge estimate and hydrochemical and isotopic characterization of aquifers groundwaters in the Jurubatuba Canal region. 2017. 223 p. Doctoral thesis, Geosciences Institute, University of São Paulo, SP.

The aquifers in the Jurubatuba Canal region are important for the industrial, commercial and residential supply. In 2001, a contamination by organochlorine solvents was detected in the soils and groundwater in the region, reaching the deep fractured aquifer, posing risk for the local population and causing the interruption in several production wells. As the aquifer is fractured, the contamination was found to be complex, due to the difficulty to predict the flows in these systems. This study, part of the project called "Technical base for the management of areas contaminated by chlorine solvents ⁽¹⁾", aims at estimating the recharge of the aquifers in the Jurubatuba Canal region using water balance, water table fluctuation and isotopic methods; developing the hydrochemical and (O, H and Sr) isotopic studies about the groundwater and the potential recharge sources (rainwater, water and sewage supply networks); and integrating the results in order to assess the action of natural processes and possible anthropic and dynamic influences in the groundwater composition. The studies have included monitoring meteorological data and groundwater level variation; and also collecting water samples for chemical and isotopic analyses. The total monthly rainfall and the correspondent variation of the water levels in the monitored wells have shown that the aquifers recharge has been effective, with an average rainfall above 100 mm, confirmed by the monitoring of the unsaturated zone. The isotopic analyses of the rainfall have enabled the elaboration of the local meteoric water line, which has presented a good correlation with the global meteoric water line, and they have also pointed out a relation between the monthly precipitation quantity and the variation in the enrichment of stable isotopes. The isotopic enrichment in the results of water and recharge sources samples, observed during the long dry period in 2013/2014, has presented a correlation with the wells that have a bigger contribution of anthropic source in the recharge of that period, indicating an influence of climate changes in the composition of the recharge sources and the groundwater. The Sr isotopes have presented a reasonable efficacy in the identification of anthropic recharge sources, but they have not allowed the distinction between these sources. The hydrochemical and isotopic characterizations have shown that the evaluated aquifers have presented a bigger or smaller alteration in their water quality in different levels, due to the contribution of anthropic recharge sources. Ammonium was found to be the most efficient index to determine the anthropic contribution for the sewage recharge and the presence of nitrate reflects the potential action of nitrification processes in the groundwaters. The results of the physical methods used for the recharge calculation, considering the limitations of each method, indicated very close values. The potential recharge by the water balance method has presented an annual average of 18.84% and the average recharge estimate of the water table fluctuation was 16.27% of the total precipitation. The isotopic method has shown a general average of 51.7% of anthropic contribution in the groundwater mixing. The influence of upward flows, identified by the hydraulic charges in the monitored wells and by the hydrochemical and isotopic similarities between the waters in the deep and shallow wells, is contributing for the mixing of the groundwaters of the intergranular porosity aquifers.

⁽¹⁾ In the original: "Bases técnicas para a gestão de áreas contaminadas por solventes clorados" (GESOL)

Keywords: Recharge, Urban Hydrogeology; Upper Tietê Watershed, São Paulo, Stable Isotopes

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1.1 - Localidades priorizadas na área de estudo. (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).	19
Figura 3.4.1 - Distribuição das unidades litoestratigráficas na área de estudo (Fonte: modificado de FUSP, 2002).	25
Figura 3.5.1 - Hidrogeologia da área de estudo (Fonte: modificado de FUSP, 2002).	27
Figura 5.1.1 - Localização dos poços e tensiômetros monitorados na Área 1 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).	45
Figura 5.1.2 - Localização dos poços monitorados na Área 2 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).	46
Figura 5.1.3 - Localização dos poços monitorados na Área 3 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).	46
Figura 5.1.4 - Localização do poço monitorado na Área 4 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).	47
Figura 5.1.5 - Localização dos poços monitorados na Área 5 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).	47
Figura 5.2.1 - Rede de distribuição da SABESP (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).	49
Figura 5.3.1 - Localização dos vazamentos na rede da SABESP no período de maio/2013 a abril/2015 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).	50
Figura 6.1.1.1 – Localização das seções geológicas e hidrogeológicas A-A' e B-B'.	65
Figura 6.1.1.2 – Seção geológica A-A'.	66
Figura 6.1.1.3 – Seção geológica B-B'.	67
Figura 6.1.2.1 – Mapa potenciométrico.	70
Figura 6.1.2.2 – Variação do nível d'água dos poços da Área 1, durante o período monitorado (dez/12 a out/15).	71
Figura 6.1.2.3 – Seção hidrogeológica A-A'.	72
Figura 6.1.2.4 – Seção hidrogeológica B-B'.	73
Figura 6.2.1 – Gráfico de distribuição da precipitação pluviométrica e da temperatura média mensal no período avaliado.	74
Figura 6.3.1.1 – Gráfico de variação do nível d'água x precipitação mensal acumulada, PMs 19 e 21, período de março/13 a setembro/15.	77
Figura 6.3.1.2 – Gráfico de variação do nível d'água x precipitação mensal acumulada, PMs 19A e 39A, período de março/13 a setembro/15.	77
Figura 6.3.1.3 – Gráfico de variação do nível d'água x precipitação mensal acumulada, PMNs 4A e 4B, e PM-23, período de março/13 a novembro/15.	78
Figura 6.3.1.4 – Gráfico de variação do nível d'água x precipitação mensal acumulada, PP-02, P-255, P-1204, P-1401 e P-1346, período de março/13 a agosto/15.	78
Figura 6.3.2.1 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, PMs 19 e 21, períodos março/13 e março/14.	80
Figura 6.3.2.2 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, PMNs 4A e 4B, e PM-23, períodos março/13 e março/14.	81
Figura 6.3.2.3 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, detalhe para o PM-23, períodos março/13 e março/14.	82
Figura 6.3.2.4 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, PMs 19A e 39A, períodos março/13 e março/14.	83
Figura 6.3.2.5 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, detalhe para os PMs 19A e 39A, período março/2013.	84

Figura 6.3.2.6 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, detalhe para os PMs 19A e 39A, período março/2014.	85
Figura 6.3.2.7 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, PP-02, P-255, P-1204, P-1401 e P-1346, períodos março/13 e março/14.	87
Figura 6.4.1 – Gráfico de variação da pressão dos tensiômetros durante o período monitorado.	90
Figura 6.5.1 - Diagramas <i>boxplot</i> para soma de íons, pH, OD, HCO ₃ , Cl e Na. Ra Asc = Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo ascendente; Ra Desc = Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo descendente; Interm = Aquífero de porosidade intergranular intermediário; RS = Aquífero fraturado (Ras = raso; Prof = Profundo).	94
Figura 6.5.2- Diagramas <i>boxplot</i> para N-NO ₃ , NH ₄ , SO ₄ , F, Fe e Mn. Ra Asc = Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo ascendente; Ra Desc = Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo descendente; Interm = Aquífero de porosidade intergranular intermediário; RS = Aquífero fraturado (Ras = raso; Prof = Profundo).	95
Figura 6.5.1.1 - Diagrama de Piper com amostras representativas de águas de Chuva, Esgoto e SABESP.	97
Figura 6.5.1.2 - Variação temporal das concentrações de nitrato e sulfato (Chuva, Esgoto e SABESP).	97
Figura 6.5.2.1 - Isoconcentrações de parâmetros selecionados em amostras representativas dos aquíferos raso e intermediário. Asc = fluxo vertical ascendente; Des = fluxo vertical desce.	99
Figura 6.5.2.2 - Isoconcentrações de parâmetros selecionados em amostras representativas dos aquíferos raso e intermediário. Asc = fluxo vertical ascendente; Des = fluxo vertical desce.	100
Figura 6.5.2.3 – Diagrama de piper apresentando a distribuição de amostras do aquífero raso com maiores concentrações de amônio. Destaque para as amostras com maior similaridade química com a amostra de esgoto.	101
Figura 6.5.2.4 - Histórico das concentrações das amostras do aquífero raso com maiores concentrações de amônio.	102
Figura 6.5.2.5 - Diagrama de Piper representativo do aquífero de porosidade intergranular raso com pouca influência de alteração antrópica.	104
Figura 6.5.2.6 - Diagrama <i>boxplot</i> representativo da soma de íons em amostras do aquífero de porosidade intergranular raso com pouca influência de alteração antrópica.	104
Figura 6.5.2.7 - Diagrama de piper representativo de amostras do aquífero de porosidade intergranular intermediário.	105
Figura 6.5.2.8 – Histórico das concentrações dos principais íons no poço PP-02.	106
Figura 6.5.2.9 – Histórico das concentrações de oxigênio dissolvido nos poços PM-D e PP-02.	106
Figura 6.5.3.1 - Diagrama de Piper representativo de amostras do aquífero fraturado.	107
Figura 6.5.3.2 - Gráficos de variação das concentrações com a profundidade nos poços WB-01, P-255 e P-1204.	108
Figura 6.6.1.1 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, reta meteórica local (LMWL), reta meteórica local (LMWL), reta meteórica global (GMWL, ROZANSKI et al., 1993) e médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm).	111
Figura 6.6.1.2 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, retas meteóricas local (LMWL), correspondentes aos períodos seco e úmido, reta meteórica global (GMWL, (ROZANSKI et al., 1993) e médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm).	111
Figura 6.6.1.3 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, reta meteórica local (LMWL), médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm), e resultados médios para os poços avaliados (2013 e abril/14).	116

Figura 6.6.1.4 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, reta meteórica local (LMWL), médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm), e resultados médios para os poços avaliados (CMT e <i>Westbay</i>).	117
Figura 6.6.1.5 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, reta meteórica local (LMWL), médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm), e resultados médios para todos os poços avaliados (outubro/14).	118
Figura 6.7.1.1 – Gráfico de distribuição das variáveis utilizadas no cálculo do balanço hídrico. ESC, escoamento superficial (mm); ETR, evapotranspiração real (mm); REC, recarga (mm); P, precipitação (mm).	126
Figura 6.7.1.2 – Gráfico de distribuição da recarga (mm) ao longo dos períodos avaliados; DEF, déficit de umidade (mm); R, recarga (mm).	128
Figura 6.7.2.1 - Exemplo de cálculo do Δh para aplicação no método WTF.	130
Figura 6.7.3.1 - Resultados dos valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na água subterrânea dos poços avaliados plotados na linha de mistura.	136
Figura 6.7.3.2 - Resultados dos valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na água subterrânea dos poços avaliados, referente à campanha de amostragem de outubro/14, plotados na linha de mistura.	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.4.1 - Resultados do monitoramento dos tensiômetros	89
Tabela 6.7.1.1 - Cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) mensal.	122
Tabela 6.7.1.2 - Cálculo do escoamento superficial, parâmetros e valores.	123
Tabela 6.7.1.3 - Cálculo da quantidade de água armazenada no solo (ARM).	124
Tabela 6.7.1.4 - Cálculos das recargas nos períodos avaliados.	125
Tabela 6.7.1.5 - Balanço hídrico.	127
Tabela 6.7.2.1 - Cálculos das recargas nos períodos avaliados.	131
Tabela 6.7.2.2 - Valores da recarga anual média para cada período avaliado, bem como os valores da recarga média para o período total avaliado.	131
Tabela 6.7.3.1 - Resultados do cálculo de contribuição antrópica e natural na recarga dos aquíferos avaliados	135
Tabela 6.7.3.2 - Resultados do cálculo de contribuição antrópica e natural na recarga dos aquíferos avaliados para a campanha de amostragem de outubro/14.	138

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.5.1 – Data de instalação e período monitorado em cada poço.	53
Quadro 5.7.1 – Informações gerais das amostragens realizadas.	56

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE QUADROS	X
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
3.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS	20
3.3 BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ	20
3.4 CONTEXTO GEOLÓGICO	21
3.5 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	26
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
4.1 ASPECTOS GERAIS RELACIONADOS À RECARGA DE AQUÍFEROS	31
4.2 RECARGA DE AQUÍFEROS EM ÁREAS URBANIZADAS	32
4.3 ESTUDOS DE RECARGA DE AQUÍFEROS FRATURADOS	35
4.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE RECARGA	36
4.4.1 <i>Métodos baseados na hidráulica do aquífero</i>	36
4.4.1.1 Balanço hídrico	36
4.4.1.2 Variação da profundidade do nível de água do aquífero	38
4.4.1.3 Estimativa darcyniana ou pela aplicação da Lei de Darcy	38
4.4.2 <i>Método baseado em técnica isotópica</i>	39
4.4.2.1 Isótopos estáveis	39
4.4.2.2 Isótopos radiogênicos	41
4.4.3 <i>Método baseado em traçador químico (ambiental)</i>	43
5 MATERIAIS E MÉTODOS	45
5.1 SELEÇÃO DOS POÇOS PARA MONITORAMENTO	45
5.2 LEVANTAMENTO E CADASTRO DAS REDES DE ÁGUA E ESGOTO NAS LOCALIDADES SELECIONADAS PARA MONITORAMENTO E EM SEU ENTORNO	48
5.3 LEVANTAMENTO DE PERDAS DAS REDES DE ÁGUA DO ABASTECIMENTO PÚBLICO NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DA PESQUISA E EM SEU ENTORNO	49
5.4 INSTALAÇÃO E MONITORAMENTO DE TENSÍOMETROS	50
5.5 MONITORAMENTO DOS NÍVEIS D'ÁGUA SUBTERRÂNEA	52
5.6 ACOMPANHAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS	53
5.7 COLETA E ANÁLISES QUÍMICAS E ISOTÓPICAS DE AMOSTRAS DE ÁGUA	54
5.7.1 <i>Coleta de amostras de água de chuva</i>	56
5.7.2 <i>Coleta de amostras da rede pública de distribuição (SABESP) e de esgoto</i>	57
5.7.3 <i>Coleta de amostras de água subterrânea</i>	57
5.8 ANÁLISES ISOTÓPICAS	59
5.9 TRATAMENTO DE DADOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS	60

5.10	CONTROLE DE QUALIDADE DOS RESULTADOS	60
6	RESULTADOS.....	63
6.1	ASPECTOS GEOLÓGICOS E HIDROGEOLÓGICOS	63
6.1.1	<i>Modelo geológico conceitual.....</i>	<i>63</i>
6.1.1.1	Depósitos tecnogênicos	63
6.1.1.2	Depósitos aluvionares.....	63
6.1.1.3	Sedimentos paleógenos da Bacia de São Paulo	64
6.1.1.4	Manto de alteração	64
6.1.1.5	Rocha alterada a rocha sã.....	64
6.1.2	<i>Modelo hidrogeológico conceitual</i>	<i>68</i>
6.1.2.1	Aquífero de porosidade intergranular	68
6.1.2.2	Aquífero fraturado.....	68
6.1.2.3	Potenciometria e fluxos subterrâneos.....	69
6.2	MONITORAMENTO DOS DADOS METEOROLÓGICOS.....	74
6.3	MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA DOS POÇOS	75
6.3.1	<i>Acumulado de chuvas mensal.....</i>	<i>75</i>
6.3.2	<i>Avaliação diária</i>	<i>79</i>
6.3.2.1	Poços de monitoramento dos aquíferos de porosidade intergranular	79
6.3.2.2	Poços do aquífero fraturado.....	86
6.4	MONITORAMENTO DOS TENSÍÔMETROS.....	87
6.5	HIDROQUÍMICA.....	91
6.5.1	<i>Chuva, esgoto e água da rede de abastecimento.....</i>	<i>96</i>
6.5.2	<i>Aquífero de porosidade intergranular</i>	<i>97</i>
6.5.2.1	Aquífero de porosidade intergranular raso	100
6.5.2.2	Aquífero de porosidade intergranular intermediário	105
6.5.3	<i>Aquífero fraturado.....</i>	<i>107</i>
6.6	ANÁLISES ISOTÓPICAS.....	109
6.6.1	<i>Análises isotópicas de O e H</i>	<i>109</i>
6.6.1.1	Águas de chuva	109
6.6.1.2	Águas da rede de abastecimento da SABESP.....	110
6.6.1.3	Esgoto	112
6.6.1.4	Água dos poços de monitoramento e tubulares profundos	112
6.6.2	<i>Análises isotópicas de Sr</i>	<i>119</i>
6.6.2.1	Águas de chuva	119
6.6.2.2	Águas da rede de abastecimento da SABESP.....	119
6.6.2.3	Esgoto	119
6.6.2.4	Água dos poços de monitoramento e tubulares profundos	120
6.7	RECARGA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	120
6.7.1	<i>Balanço hídrico</i>	<i>120</i>
6.7.2	<i>Variação do nível d'água do aquífero</i>	<i>129</i>
6.7.3	<i>Isótopos estáveis O e H.....</i>	<i>132</i>
6.7.3.1	Campanha de amostragem de outubro/14	136
7	DISCUSSÕES FINAIS	141
8	CONCLUSÕES	149
	REFERÊNCIAS	153

ANEXOS

ANEXO A – PERFIS LITOLÓGICOS E CONSTRUTIVOS DOS POÇOS DE MONITORAMENTO E TUBULARES PROFUNDOS ..	161
ANEXO B - RESULTADOS ANALÍTICOS DAS AMOSTRAS DE ÁGUA - PARÂMETROS QUÍMICOS INORGÂNICOS, ISÓTOPOS ESTÁVEIS O E H, RAZÃO ISOTÓPICA $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ E PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS MEDIDOS DURANTE A AMOSTRAGEM	171
ANEXO C - RESULTADOS DO MONITORAMENTO DOS TENSÍÔMETROS	183
ANEXO D - RESULTADOS DO MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA DOS POÇOS – DADOS OBTIDOS POR MEIO DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO	189
ANEXO E - DADOS METEOROLÓGICOS DO PERÍODO DE OUTUBRO/2012 A ABRIL/2016	193
ANEXO F - GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA DOS POÇOS X QUANTIDADE ACUMULADA DE CHUVAS E MENSAL	203
ANEXO G - GRÁFICOS DOS VALORES DE $\Delta^{18}\text{O}$ E $\Delta^2\text{H}$ NA ÁGUA SUBTERRÂNEA DOS POÇOS AVALIADOS PLOTADOS NA LINHA DE MISTURA.	213

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas da região do Canal do Rio Jurubatuba, mas também conhecido como, Canal do Jurubatuba, situado na Zona Sul do Município de São Paulo, apresentam-se em grande parte contaminadas por solventes halogenados alifáticos em decorrência das atividades das indústrias instaladas na região por mais de três décadas (DAEE, 2005). Foi detectado que essa contaminação atingiu o Aquífero Cristalino fraturado profundo, alcançando diversos poços de abastecimento, gerando riscos para a população local.

A Portaria do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) nº 1594/2005 (DAEE, 2005) definiu a região do Jurubatuba como “área de restrição e controle temporário para os usos dos recursos hídricos subterrâneos”, objetivando a proteção da água dos usuários e dos aquíferos. Desta forma, em uma área de 31,57 km² foi proibida a perfuração de novos poços de abastecimento e restringida a utilização de muitos outros poços existentes, justificando a necessidade de serem desenvolvidas pesquisas e estudos detalhados para a compreensão e gerenciamento do problema.

Considerando que a região do Jurubatuba é uma das que mais exploram a água subterrânea na Bacia do Alto Tietê (BAT), a presença de contaminação impede o seu consumo pela população e indústria locais, elevando, assim, a demanda de água da rede pública, que é limitada (DAEE, 2005).

A caracterização da hidrogeologia de aquíferos fraturados é complexa e requer a aplicação de inúmeras e complementares metodologias e técnicas. Dentre os estudos de destaque que caracterizam aquíferos fraturados no Brasil, estão os trabalhos pioneiros de Fernandes et al. (2011) que envolveram investigações de detalhe no Sistema Aquífero Serra Geral, e os trabalhos de Wahnfried (2010) que correlacionam dados de fluxo de água subterrânea com perfilagens geofísicas para a identificação de fraturas hidraulicamente ativas.

Trabalhos prévios realizados na região do Canal do Jurubatuba (L'APICCIRELLA, 2009) apontam duas possibilidades para a contaminação do aquífero fraturado profundo: a primeira, indicando que a contaminação atinge o aquífero profundo através do fluxo subterrâneo, onde os contaminantes se mobilizariam, a partir da superfície do solo, primeiramente pelo aquífero sedimentar até atingir o aquífero fraturado, onde se mobilizariam através de interconexões entre fraturas presentes no maciço rochoso; e uma segunda teoria, inferindo que a contaminação ocorre através dos próprios poços profundos do local, onde os contaminantes, em meio ao próprio aquífero, seriam escoados para suas porções inferiores através de fluxo gerado pelos poços.

Fiume (2013) realizou estudos que envolveram a investigação detalhada dos condicionantes geológicos da circulação de água em aquíferos fraturados para a elaboração

de modelo conceitual preliminar, fundamental para o planejamento de testes hidráulicos e amostragens do projeto GESOL. Dentre esses estudos, incluem-se a realização de perfilagens geofísicas em poços tubulares profundos, na região do Canal do Jurubatuba, que trouxeram contribuições à compreensão da existência e identificação de zonas que pudessem conter fraturas hidráulicamente ativas e, assim, atuar no transporte de contaminantes, como os solventes halogenados. Os métodos utilizados incluíram perfilagens: ótica, irradiação gama natural, calibre de poço, condutividade elétrica (CE) e temperatura (T) da água, além de medições de fluxo d'água utilizando a sonda Heatpulse Flowmeter.

Ademais, em relação à recarga dos aquíferos em áreas urbanas, segundo Lerner (2002), a interferência antrópica (presença de áreas cobertas, impermeabilização de terreno, tubulações subterrâneas) provoca mudanças nos padrões de recarga natural dos sistemas aquíferos. Dessa forma, conforme os autores, o mecanismo de recarga está em grande parte associado às perdas das redes de água e esgoto e de drenagens pluviais. Viviani-Lima (2007) e Maldaner (2010) destacam que a quantificação da contribuição desse tipo de recarga é, portanto, importante, sendo poucos os trabalhos científicos que quantificam a recarga em áreas urbanas (LERNER, 2002), sobretudo identificando suas origens.

Objetivando estabelecer as bases técnicas para a gestão de áreas contaminadas por solventes organoclorados em aquíferos fraturados, por meio de estudos de detalhe da geologia, hidrogeologia e da contaminação presente nas águas subterrâneas da região da Jurubatuba, está sendo desenvolvido pelo IGc-USP (Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo) o projeto GESOL (Bases técnicas para a gestão de áreas contaminadas por solventes clorados), vinculado ao CEPAS (IGc USP), ao qual o presente estudo encontra-se inserido.

Nesse contexto, este trabalho busca contribuir com o conhecimento, por meio de estudos de recarga, indispensáveis à gestão dos recursos hídricos, assim como pela caracterização hidroquímica e isotópica dos aquíferos da região do Canal do Jurubatuba, para avaliar a potencial contribuição de fontes de recarga natural e antrópica para as águas subterrâneas. O conjunto dos resultados desses estudos deverá permitir o detalhamento de estimativas de recarga dos aquíferos da BAT, assim como incrementar as informações do banco de dados hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos da região estudada.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é o aprimoramento do conhecimento hidrogeológico, hidroquímico e isotópico dos aquíferos da região do Canal do Jurubatuba, na Zona Sul da cidade de São Paulo, e aplicação dos resultados para determinar a atuação dos processos químicos e dinâmicos naturais e das possíveis influências antrópicas na composição de suas águas subterrâneas.

Os objetivos específicos, necessários para se alcançar o objetivo principal proposto são:

- 1) Estimar a recarga dos aquíferos da região do Canal do Jurubatuba, aplicando-se os métodos de balanço hídrico, da variação do nível d'água nos aquíferos e isotópicos;
- 2) Identificar as fontes por meio da caracterização hidroquímica e isotópica (isótopos estáveis de O e H, e radiogênico de Sr) das águas dos aquíferos da região do Canal Jurubatuba, como também das potenciais fontes de recarga, considerando aquelas de contribuição natural, representadas pela infiltração da água da chuva e do sistema coletor de águas pluviais, e antrópicas, decorrentes de perdas dos sistemas de abastecimento público de água e de coleta de esgoto; e
- 3) Avaliar a atuação dos processos naturais e das possíveis influências antrópicas na composição das águas subterrâneas com a integração dos resultados obtidos nos estudos de recarga, hidroquímicos e isotópicos.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido na região sul do município de São Paulo, entre as coordenadas UTM 7.376.000 e 7.388.000 m Norte e 320.000 e 330.000 m Sul, na área de abrangência da antiga Zona de Uso Predominantemente Industrial (ZUPI 131).

No interior da área de estudo, a pesquisa foi priorizada em quatro localidades, com facilidade de acesso e presença de poços de monitoramento e de produção: i) Área 1, na Av. Engenheiro Eusébio Stevaux, 823; ii) Área 2, na Avenida das Nações Unidas, nº 22.002; iii) Área 3, na Avenida das Nações Unidas, nº 22.540; e iv) na Rua Agostinho Togneri, nº 421 (Figura 3.1.1.).

Figura 3.1.1 - Localidades priorizadas na área de estudo. (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).

Posteriormente, uma quinta área, Área 5, localizada à Rua Arnaldo Magniccaro, 364, foi incluída no estudo. Nessa área, foram instalados os sistemas de poços multiníveis do tipo CMT (Continuous Multichannel Tubing) e do tipo Westbay, para o desenvolvimento de pesquisas nas áreas de hidrogeologia e de investigação de contaminação em aquífero fraturado. Além desses poços multiníveis, na área também existem outros poços de monitoramento de relevância à presente pesquisa.

3.2 Características gerais

A área de estudo possui 120 km² e é densamente urbanizada, apresentando, predominantemente indústrias, além de comércios e residências. Segundo IBGE (2000), a população na área de estudo é de 1.165.425 de habitantes.

Segundo DAEE e IG (2009) a região sofreu intenso processo de industrialização nas décadas de 50 e 60, onde se instalaram indústrias de médio e grande porte, majoritariamente do setor químico e metalúrgico. As principais matérias-primas utilizadas pelas indústrias locais são materiais ferrosos, não ferrosos, termoplásticos, componentes elétricos e eletrônicos.

A região do Canal do Jurubatuba está inserida na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT). O abastecimento por águas superficiais é realizado pela SABESP e é o maior do município de São Paulo. Em relação às águas subterrâneas, estima-se que na região do Jurubatuba sejam explorados mais de 315 milhões de m³ por ano (HIRATA e FERREIRA, 2001).

3.3 Bacia Hidrográfica do Alto Tietê

A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BAT) corresponde à unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Alto Tietê (UGRHI 06), conforme a Lei de Recursos Hídricos Estadual (SÃO PAULO, 1991). Localiza-se na região sudeste do Estado de São Paulo e abrange a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), na qual o Canal do Jurubatuba está inserido. Sua extensão é de, aproximadamente, 5.900 km², distribuída ao longo de 35 municípios, apresentando mais de um terço dessas áreas urbanizadas (MEYER et al., 2004; CONICELLI, 2014). Os limites da BAT, quase que coincidentes com aqueles da RMSP, representam um adensamento urbano, na atualidade, maior que 1000 hab/km² (CONICELLI, 2014).

Conicelli (2014) ao elaborar o mapa de uso do solo da BAT distinguiu três maiores grupos de tipo de uso, representados pelo uso urbano (35,26%), vegetação (47,79%) e demais usos (16,95%), esses abrangendo reflorestamento, hortifrutigranjeiro, mineração, espelho d'água, entre outros.

Os rios Tietê, Pinheiros, Tamanduateí, e os reservatórios Billings, Guarapiranga e Sistema Cantareira, são alguns dos principais corpos d'água da BAT, que disponibilizando em relativa abundância suas águas, desempenharam papel importante no desenvolvimento industrial da

região central da bacia. A urbanização decorrente desse desenvolvimento se reflete também nas extensas redes de abastecimento público de água e esgoto, distribuindo-se, respectivamente, em 97% e 85% da área da BAT (CONICELLI, 2014).

A sub-bacia hidrográfica Penha-Pinheiros, na qual insere-se o município de São Paulo, e a região do Canal do Jurubatuba, alcançou, segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), em média, 99,75% de acesso à rede de abastecimento público de água, e consumo médio per capita de água de 172,58 l/hab.dia, o maior dentre as demais sub-bacias da BAT. O mesmo se observa em relação aos índices médios de atendimento urbano de esgoto e tratamento de esgoto que, respectivamente, com médias de 91,68% e 61,55%, destacam a sub-bacia Penha-Pinheiros com os índices mais elevados (CONICELLI, 2014).

Viviani-Lima (2007), citando Rede das Águas (s/d), enfatiza que aproximadamente 37% do território da BAT corresponde à mancha urbana e, mesmo com a redução das taxas de crescimento populacional, não há indícios de planejamento da contenção da sua expansão em área. Como consequência, a ocupação desordenada em áreas de proteção de mananciais e de várzeas favorece e acelera a degradação ambiental.

O Sistema Integrado dos oito mananciais que abastecem a BAT, compostos pelos sistemas Cantareira (maior sistema produtor), Baixo Cotia, Alto Cotia, Guarapiranga (segundo maior sistema produtor), Rio Grande, Ribeirão da Estiva, Rio Claro e Alto Tietê, juntos somam uma vazão disponível de 66, 1 m³/s.

Segundo os dados da FUSP (2002), considerando a demanda de 69,28 m³/s e a disponibilidade hídrica de 67,90 m³/s, observa-se que esta produção já se apresenta insuficiente ao abastecimento da BAT. Conicelli (2014) ressalta que esses dados apresentados não incluem a participação dos 12 mil poços tubulares no incremento do fornecimento, que juntos somam mais de 10 m³/s, elevando a produção a 77,7 m³/s e, com isso, evitando-se um já previsível colapso do Sistema Integrado.

3.4 Contexto geológico

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) encontra-se inserida em áreas de terrenos sedimentares cenozóicos da Bacia de São Paulo, compreendida como uma das unidades integrantes do *Rift* Continental do Sudeste do Brasil (RCSB) (RICCOMINI, 1989; RICCOMINI et al., 1992; RICCOMINI et al., 2004). Posteriormente, Zalán e Oliveira (2005) o denominaram como Sistema de *Rifts* Cenozóicos do Sudeste do Brasil. Incluindo, além das bacias continentais, as oceânicas, para definir uma unidade tectônica única sob um modelo genético evolutivo para todo o conjunto de *rifts*, desenvolvido durante o Cenozóico, substituindo, dessa forma, o termo “continental” por “cenozóicos” (FIUME, 2013).

A origem admitida para o *rift* está relacionada às falhas menores normais, inversas e de empurrão associadas e à reativação normal de antigas zonas de cisalhamento do embasamento terciário, denominadas de Faixa de Cisalhamento de São Paulo (HASUI et al. 1984).

Riccomini et al. (1992) definem a borda norte da Bacia de São Paulo como sendo retilínea, controlada pela zona de cisalhamento Taxaquara-Jaguari, enquanto que ao sul os contatos com o embasamento são irregulares com o embasamento cristalino de idade pré-cambriana. Juliani (1992) considera a bacia um hemigráben de direção ENE, basculado para NNW e desenvolvido sobre terrenos cristalinos pré-cambrianos representados por granitos sin e pós-tectônicos e por rochas metamórficas relacionados ao Complexo Embu, pertencente ao Grupo Açungui, e aos Grupos São Roque e Serra do Itaberaba.

Os sedimentos terciários foram depositados durante o desenvolvimento do RCSB, essencialmente no Eoceno-Oligoceno, e constituem o Grupo Taubaté, composto, da base para o topo, pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo. A Formação Itaquaquetuba restringe-se à Bacia de São Paulo; sua relação com as outras unidades do Grupo Taubaté não é conhecida, pois foi depositada diretamente sobre o embasamento, tendo sido interpretada como um depósito discordante, em relação ao Grupo Taubaté, e provavelmente mais jovem.

Conforme proposto por Riccomini et al. (1992), a estratigrafia da Bacia de São Paulo relaciona-se ao Grupo Taubaté, de idade paleógena, composto, da base para o topo, pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo. São recobertas discordantemente pela Formação Itaquaquetuba (Neógeno), (RICCOMINI, 1989; RICCOMINI et al., 1992; RICCOMINI et al., 2004) e aluviões fluviais quaternários no domínio das planícies, e coluvionares nas encostas (RODRIGUEZ e TAKIYA, 2004). Os sedimentos preenchem um hemigraben basculado NNW, desenvolvido no embasamento cristalino (HIRATA e FERREIRA, 2001). A espessura média dos sedimentos é de 100 m, podendo atingir mais de 250 m em algumas áreas.

A unidade basal do Grupo Taubaté, a Formação Resende, compreende mais de 80% do preenchimento sedimentar da Bacia de São Paulo, sendo composta por depósitos de leques aluviais gradando para depósitos relacionados à planície aluvial de rios entrelaçados (RICCOMINI et al., 1992).

A Formação Tremembé compreende camadas tabulares de argila verde maciça, intercaladas com argilas cinza-escuro a preta, ricas em matéria orgânica (RICCOMINI et al. 1992; MELO et al. 1985), apresentando espessuras acima de 60 m.

Segundo Riccomini (1989) e Riccomini et al., (1992), a Formação São Paulo corresponde a depósitos de sistema fluvial meandrante, constituindo-se por duas litofácies principais, um primeira, composta por arenitos grossos, conglomeráticos, com granodecrescência ascendente para siltitos e argilitos; e a segunda, formada por arenitos de granulação média a grossa, com

granodecrescência ascendente para sedimentos arenosos, progressivamente mais finos, até siltitos e argilitos, apresentando estratificações planoparalelas horizontais.

A Formação Itaquaquetuba (COIMBRA et al., 1983 apud RICCOMINI et al. 1992) corresponde a depósitos de sistema fluvial entrelaçado que ocorrem sob os aluviões holocênicos dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí. Conforme os autores, sua diferença mais evidente em relação aos demais sedimentos da bacia, está na sua ocorrência exclusiva sobre as rochas do embasamento cristalino, na forma de contatos erosivos ou tectônicos, impossibilitando observar sua relação com as demais unidades sedimentares Terciárias.

As coberturas neocenozóicas correspondem essencialmente a coluviões e aluviões de pequena espessura e distribuição restrita (RICCOMINI et al. 1992).

Os depósitos holocênicos são representados por coluviões e aluviões em várzeas e baixos terraços, com espessuras geralmente menores de 10 m. Ocorrem cascalheiras com seixos arredondados de quartzo e quartzito (*stone lines*) separando esses depósitos coluviais de rochas do embasamento ou sedimentos terciários. O perfil litológico típico pode ser descrito como sedimentos argilo-silto-arenosos turfáceos até 1,5-2,0 m de profundidade, sotopostos sobre areias médias de até 2 m de espessura, com cascalho na base (ALMEIDA et al., 1984).

O embasamento cristalino sobre o qual foram depositados os sedimentos da Bacia de São Paulo constitui-se basicamente pelas rochas metamórficas definidas como Complexo Embu (JULIANI, 1992), que representa a mais extensa unidade pré-cambriana paulista. O Complexo Embu é uma das 2 subdivisões do Grupo Açungui, constituído por metassedimentos de médio a alto grau, representada por migmatitos e gnaisses migmatizados (HASUI e SADOWSKI, 1976; FERNANDES, 1991), e inserido no contexto geotectônico do Cinturão Ribeira, definido por Almeida et al. (1973). Outro conjunto litológico do Grupo Açungui, o Complexo Pilar, compõe-se por metassedimentos de menor grau, representados por metassedimentos de fácies xisto verde (HASUI e SADOWSKI, 1976). Um terceiro conjunto litológico, reconhecido por Juliani (1992), inclui os orto-gnaisses polimigmatizados e deformados descritos como Complexo Rio Capivari por Fernandes (1991), que corresponderiam ao embasamento dos metassedimentos descritos anteriormente.

As rochas metamórficas e granitóides intrusivos que compõem o embasamento Pré-Cambriano da Bacia Sedimentar de São Paulo, inseridos no contexto geotectônico da Província Mantiqueira (ALMEIDA et al., 1984), foram brevemente discutidas em Juliani (1992). Segundo o autor, a Bacia Sedimentar de São Paulo repousa quase que essencialmente sobre as rochas metamórficas definidas como Complexo Embu, ao qual reconhece a ocorrência de três conjuntos de litotipos.

Segundo Juliani (1992) as rochas granitóides intrusivas, aflorantes no entorno da RMSP, são parcialmente recobertas pelos sedimentos da Bacia Sedimentar de São Paulo, e apresentam dimensões variando entre batólitos e pequenos *stocks*.

Na área de estudo, ao longo do Rio Pinheiros e Canal do Jurubatuba, afloram rochas graníticas e micaxistos do Grupo Açungui, composto pelas rochas do Complexo Embu e Complexo Pilar, assim como quartzitos e anfibolitos do Grupo São Roque. A Bacia de São Paulo está representada pelos sedimentos terciários das formações Resende e São Paulo, como também pelas coberturas aluvionares do Quaternário (Figura 3.4.1.).

Figura 3.4.1 - Distribuição das unidades litoestratigráficas na área de estudo (Fonte: modificado de FUSP, 2002).

3.5 Contexto hidrogeológico

A área de estudos está inserida na Bacia do Alto Tietê. Nessa bacia, ocorrem basicamente dois sistemas aquíferos, segundo as 2 grandes unidades geológicas presentes, que correspondem ao embasamento cristalino e aos sedimentos terciários da Bacia Sedimentar de São Paulo: o Sistema Aquífero Cristalino (SAC) e o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), (HIRATA e FERREIRA, 2001; HIRATA et al., 2002). O primeiro de porosidade secundária e subdividido em aquíferos A e B (FUSP, 2002), e o segundo, subdividido em aquíferos Quaternário, São Paulo e Resende (Figura 3.5.1.).

O Sistema Aquífero Cristalino (SAC) corresponde a 75% da área da BAT (DAEE, 1975). Caracteriza-se por ser livre a semi-confinado, e é constituído por rochas pré-cambrianas que correspondem a rochas ígneas e metamórficas, relacionadas ao Complexo Embu e aos grupos São Roque e Serra do Itaberaba (HIRATA e FERREIRA, 2001), e suas altitudes variam entre 800 e 950 m acima do nível do mar (BERTOLO, 1996). Ele é formado por duas unidades características (HIRATA e FERREIRA, 2001). A primeira, denominada Aquífero A, corresponde ao aquífero instalado no manto de intemperismo, de natureza livre, heterogêneo e anisotrópico, onde a água circula por porosidade intergranular, com espessura média de 50 m, podendo chegar a 150 m (DAEE, 1975). A segunda unidade (DAEE, 1975), denominada Aquífero B, corresponde ao aquífero cristalino, onde a água circula através de estruturas como falhamentos, juntas associadas e fraturas abertas da rocha sã, sendo caracterizado como livre a semi-confinado, heterogêneo e anisotrópico. Conforme o autor, essa unidade apresenta coeficiente de transmissividade com valores amplamente variados de 0,4 e 14 m²/dia.

Figura 3.5.1 - Hidrogeologia da área de estudo (Fonte: modificado de FUSP, 2002).

O potencial de produção do SAC é baixo, variando de uma vazão média de 9,07 m³/h na porção granitóide a 17,48 m³/h no local composto por rochas metassedimentares (HIRATA e FERREIRA, 2001), sendo este último, portanto, o de maior produtividade. Também é comum encontrar poços próximos com vazões muito diferentes, devido à variação no número, tipo, abertura e conexão das fraturas (ROCHA et al., 1989).

O Aquífero A corresponde à associação de unidades que incluem rochas granitóides, gnáissicas, filitos e xistos subordinados. A vazão média individual por poço é da ordem de 9,1 m³/h e a capacidade específica é de 0,2 m³/h/m (L'APICCIRELLA, 2009). O Aquífero B compreende quartzitos, micaxistos, anfibolitos e rochas carbonáticas, com vazão média individual por poço de 17,5 m³/h e capacidade específica de 1,4 m³/h/m (L'APICCIRELLA, 2009).

O Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), sobreposto ao SAC, ocupa uma área aproximada de 25% da Bacia do Alto Tietê e se caracteriza como um aquífero de porosidade primária, livre a semi-confinado, heterogêneo, constituído por intercalações de camadas argilosas e arenosas de diferentes espessuras, descontínuas horizontal e verticalmente (BERTOLO, 1996). O autor, analisando dados de 326 poços tubulares profundos, verificou que o SAS apresenta espessuras de até 250 metros e geometria condicionada pelo comportamento do embasamento cristalino subjacente, de modo geral acidentado, onde são observados falhamentos gerando *grabens* e *horsts*.

Com base nas características hidráulicas, o SAS compreende duas unidades, conforme Hirata & Ferreira (2001): o Aquífero Resende e o Aquífero São Paulo. Segundo (DAEE, 1975), os aquíferos sedimentares são caracterizados como livres a semi-confinados, porosidade primária e elevada heterogeneidade apresentando valores de transmissividade médios entre 15 e 70 m²/dia. (DAEE, 1975). SABESP e CEPAS (1994) indicam que a porosidade efetiva do SAS é de 6%.

DAEE, IG-SMA, IPT e CPRM (2005) denominam Aquífero São Paulo todo o pacote referido como Aquífero Sedimentar, com sedimentos ocupando área de aproximadamente 1.000 km².

Somam-se ao SAS, porém, não definem unidades aquíferas: a) devido às pequenas espessuras, o Aquífero Quaternário, que engloba depósitos sedimentares aluviais, predominantemente areno-argilosos; b) devido às pequenas dimensões em área, as Formações neocenozóicas Tremembé e Itaquaquacetuba (HIRATA e FERREIRA, 2001).

O Aquífero São Paulo corresponde a depósitos de sistema fluvial meandrante, compostos por cascalho, areia e silte argiloso, com vazão média individual por poço de 9,5 m³/h e capacidade específica de 0,5 m³/h/m (L'APICCIRELLA, 2009). Hirata & Ferreira (2001) indicam vazões médias da ordem de 9,51 m³/h para o Aquífero São Paulo e 15,24 m³/h para o Aquífero Resende, sendo este, portanto, o de maior produtividade.

O Aquífero Resende corresponde a depósitos de sistema de leques aluviais e planícies fluviais entrelaçadas com predominância de lamitos arenosos e argilosos. A vazão média individual por poço é de 15,2 m³/h e capacidade específica é de 0,9 m³/h/m (L'APICCIRELLA, 2009).

L'Apicciarella (2009) estudando os sistemas de aquíferos na área do Canal de Jurubatuba cita que na sua porção leste, o SAS pode apresentar espessuras de mais de 100 m, repousando ainda sob uma camada de rocha alterada do embasamento cristalino, que varia de 10 a 70 m de espessura. O mesmo autor completa que na porção oeste do Canal, as rochas ígneas e metamórficas que compõem o Sistema Aquífero Cristalino são aflorantes.

Conforme L'Apicciarella (2009) o fluxo subterrâneo horizontal na área do Canal do Jurubatuba segue em sentido ao Canal do Jurubatuba e do Rio Pinheiros, que são as principais drenagens superficiais da região. Porém, devido à heterogeneidade dos pacotes quanto à condutividade hidráulica, pela influência da alternância de camadas de areias e argilas, além da contribuição de pontos de recargas antrópicas, podem ocorrer fluxos em direções contrárias aos das drenagens citadas.

Em seus estudos, L'Apicciarella (2009) observou, além dos fluxos subterrâneos horizontais, a existência de acentuados fluxos verticais descendentes, do aquífero freático sedimentar para o aquífero cristalino.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Aspectos gerais relacionados à recarga de aquíferos

A recarga de um aquífero pode ser definida, de modo geral, como a água que atinge o aquífero a partir de qualquer direção, seja ela de baixo, de cima, ou lateralmente (LERNER, 1997). De Vries e Simmers (2002), definem que a recarga ocorre quando a água, ao atingir o nível de água, adiciona um volume extra ao aquífero.

Segundo Fetter (2001) a água ao infiltrar e atingir a franja capilar, desloca o ar nos poros do solo, levando ao aumento do nível da água e, por consequência, da franja capilar, que passa a “carregar” em seu topo a água de recarga mais recente.

Custódio e Llamas (1981) e Lerner et al. (1990), definem e apresentam os potenciais controladores da recarga que devem ser compreendidos e avaliados em estudos nesse tema:

- segundo Custódio e Llamas (1981), envolve os seguintes fatores: 1) *condições de superfície*: uso e ocupação do solo, grau de compactação do terreno e topografia; 2) *características do terreno*: granulometria e textura do material de cobertura e de subsuperfície; grau de desenvolvimento do perfil de solo, estruturação do terreno e presença de macroporos; e calor específico do solo, que pode alterar a temperatura do fluido, variando sua viscosidade; 3) *condições ambientais*: umidade inicial do solo, que define a capilaridade e a sorção das águas iniciais da chuva; e 4) *características do fluido e intensidade da chuva*: espessura da lâmina da água sobre o solo e gradientes hidráulicos descendentes de infiltração, perdas pela evapotranspiração e balanço hídrico.

- Lerner et al. (1990) citam o ambiente externo (precipitação, incluindo a sua magnitude, intensidade, duração e distribuição; topografia; escoamento; uso e ocupação do solo; evapotranspiração); a irrigação do terreno; a hidrologia local (rios influentes e efluentes em relação ao aquífero); o solo, com a sua composição, espessura, propriedades hidráulicas, umidade; zona não saturada e seu mecanismo de fluxo, condutividade hidráulica e heterogeneidades; características do aquífero, como profundidade do nível freático e capacidade de armazenagem.

- O fator temporal no controle da recarga foi descrito por Viviani-Lima (2007) como um dos mais importantes. A disponibilidade do total da água que penetra no solo, e que atinge a zona saturada, com potencial de exploração, poderá ser reduzida sob os efeitos da evapotranspiração e se refletir de forma mais lenta, proporcionalmente, devido às diferenças na espessura da zona não saturada e da condutividade hidráulica não saturada vertical, encontradas nos diferentes tipos de solo (BALEK, 1987; DE VRIES e SIMMERS, 2002; FETTER, 2001).

A recarga natural, associadas às potenciais fontes, pode ocorrer por um dos três mecanismos descritos (LERNER et al., 1990; LERNER, 1997): 1) *Recarga direta*, a água da chuva infiltra e percola pela zona não saturada até alcançar o nível freático; porém parte desta água permanece retida como umidade do solo e/ou sofre evapotranspiração; 2) *Recarga indireta*, refere-se à água proveniente da infiltração de águas superficiais, como rios e lagos, para o aquífero; e 3) *Recarga localizada*, a água, previamente à infiltração, acumula-se em superfície devido à ausência de escoamento e/ou drenagem superficial.

Segundo Lerner et al. (1990), a estimativa de recarga alcançará resultados mais exatos e realísticos se os seguintes fatores forem considerados e ponderados: balanço hídrico, processos e mecanismos de recarga, erros associados na estimativa de recarga, aplicabilidade e potencial de extrapolação temporal do método selecionado.

4.2 Recarga de aquíferos em áreas urbanizadas

Em áreas urbanizadas, as fontes e caminhos da recarga dos aquíferos tendem a ser mais complexos e numerosos que em áreas não urbanizadas, tendo em vista que a impermeabilização dos solos, associada às redes de drenagem artificiais, modificam o caminho da água provinda da precipitação (VIVIANI-LIMA, 2007).

Conforme Hirata e Ferreira (2001), as águas das chuvas recarregam os aquíferos em toda a sua extensão não impermeabilizada. Porém, as águas das chuvas que se precipitam sobre áreas urbanizadas e escoam para o sistema coletor de águas pluviais podem se infiltrar no aquífero em eventuais pontos de vazamento desse sistema, incrementando a sua recarga. Esse exemplo, assim como vazamentos da rede pública de abastecimento de água e de coleta de esgoto, demonstram o potencial da influência antrópica no processo de recarga de aquíferos em áreas urbanas.

Segundo Lerner (2002) estudos de recarga efetiva em áreas urbanizadas são pouco frequentes. Esse autor destaca que, a urbanização, com a implantação de redes de distribuição de água, de coleta de esgoto e de águas pluviais, como componentes da infraestrutura, ao vazarem, representam fontes pontuais de recarga para o aquífero, alterando e interferindo na dinâmica natural dos fluxos subterrâneos. Lerner (2002), diante desse quadro, com inúmeras outras fontes contribuindo para o aumento da recarga, aponta que a impermeabilização das superfícies em áreas urbanizadas não seria a principal causa de redução de recarga nessas áreas.

Foster et al. (1999), descreve que, antes dos primeiros estudos de recarga realizados em áreas urbanas, acreditava-se que a impermeabilização do terreno, somada ao aumento do escoamento superficial, representassem o principal fator modificador da recarga, diminuindo-a. Porém, atualmente, o conhecimento aponta que a recarga em uma área urbanizada tende a

ser maior que em uma área equivalente agrícola, devido às constantes perdas de água pela rede de água e esgoto, irrigação de jardins, entre outros.

Segundo Yang et al. (1999) há duas principais fontes de recarga em áreas urbanizadas, representadas pela precipitação e pelos vazamentos da rede de distribuição de água e coleta de esgoto. Esse autor acrescenta que em cidades sem rede de esgoto, com disposição feita em fossas, estas podem representar as principais fontes.

Viviani-Lima (2007) explica que poucos são os trabalhos sobre a proporção de água quanto à origem natural ou antrópica.

Martins (2008) cita que, no Brasil, estudos que quantifiquem a recarga em áreas urbanas, assim como aqueles que estimem a proporção de contribuições naturais e antrópicas na recarga, quase que inexistem.

Os estudos de recarga de aquíferos em áreas urbanizadas no Brasil são muito pouco frequentes, destacando-se os estudos de Maldaner (2010), Lima (2002), Wahnfried e Hirata (2005), Maziero e Wendland (2008) e Viviani-Lima (2007) que contribuíram para a definição de valores de recargas, aplicando, principalmente, o método de variação do nível d'água; e os trabalhos de Viviani-Lima (2007) e Martins (2008) que avaliaram, a contribuição antrópica à recarga em áreas urbanizadas densamente e pouco ocupadas, utilizando os métodos isotópicos, estáveis de oxigênio e hidrogênio, e radiogênicos de chumbo.

Segundo Lerner et al. (1990) e Lerner (2002), cada uma das técnicas utilizadas para avaliar a recarga de um aquífero apresenta um erro associado e, por este fato, para a obtenção de um resultado mais consistente e confiável, recomenda-se que a estimativa da recarga de um aquífero seja realizada por meio de técnicas diferentes e independentes, comparando-se, ao final, os seus resultados. Ainda, conforme Lerner et al. (1990), as melhores estimativas de recarga histórica são obtidas considerando: a fonte de recarga, a rota de transmissão para a recarga e o sistema de água subterrânea.

Os estudos de Viviani-Lima (2007) e de Martins (2008), utilizando técnicas isotópicas, no primeiro aplicando-se isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio, e no segundo, além de isótopos estáveis, também radiogênicos de chumbo, definiram a contribuição antrópica à recarga em áreas urbanizadas.

Maldaner (2010), quantificou e determinou a origem da recarga do aquífero freático na zona urbana do município de Urânia (SP), identificando a água da chuva como origem principal da recarga, como também a ocorrência de contribuição de outras fontes, em decorrência de vazamentos das redes de água e de esgoto, em algumas áreas.

Vazquez-Suñé et al (2010) quantificaram as fontes de recarga dos aquíferos na área urbana de Barcelona, na Espanha, a partir de análises de íons principais, indicadores microbiológicos, metais pesados e os isótopos: ^{34}S , ^{18}O e ^2H . Os resultados indicaram que 22% da recarga total provém da rede de abastecimento de água, 30% de águas residuais, 17% da

precipitação que ocorre na área não urbanizada da área de estudo, 11% de rios e 20% a partir da infiltração da água de chuva após o escoamento.

Conicelli (2014), em estudo sobre recarga dos aquíferos na área da BAT, realizou o balanço hídrico por meio da metodologia de Thornthwaite e Matter (1955), associada ao escoamento superficial para diferentes tipos de solos e declividades topográficas. Os resultados apontaram que as maiores taxas estimadas de recarga, ou seja, 407 mm/ano, ocorriam nas áreas com solo arenoso, baixa declividade e maior precipitação relativa, que na sua maior parte está coberta por áreas urbanizadas, que reduzem a recarga natural. O autor assume, em seu estudo, o valor de 437 mm/ano para a recarga total em área urbanizada na BAT, que é a soma da recarga natural (183 mm/ano) com a recarga proveniente de fugas da rede pública de abastecimento (244 mm/ano), obtido por Viviani-Lima (2007). Complementa a sua explicação destacando que em áreas urbanizadas sem coleta de esgoto, a recarga é ainda maior, ultrapassando 560 mm/ano, provocada pela infiltração do esgoto proveniente de fossas.

Conicelli (2014) ao definir porcentagens das áreas da BAT por faixas de recarga, identificou que a recarga em áreas urbanizadas, que representam 36% de sua área total, encontram-se na faixa entre 401 a 450 mm/ano. Porém, segundo o autor, essa área decai a 0,15%, quando não existe rede coletora de esgoto, mas somente rede de abastecimento de água.

Existem outros métodos para quantificar a recarga urbana, tais como a aplicação de traçadores ambientais (YANG et al., 1999; LERNER, 2002), modelagem de fluxo de águas subterrâneas (VÁZQUEZ-SUÑÉ et al., 2005), análise de mistura de membros finais (VÁZQUEZ-SUÑÉ et al., 2010), a partir da identificação e caracterização da composição hidroquímica de potenciais fontes de recarga, seleção de traçadores, amostras de água mista, cálculo dos índices de mistura.

A aplicação de modelos de fluxo e transporte requer atenção às variações espaciais e temporais, a fim de quantificar o volume de recarga total, mas também às diferentes fontes de recarga, naturais e antrópicas. Esse método para a estimativa de recarga nas áreas urbanas é bastante robusto, mas depende da qualidade dos dados hidrogeológicos e hidroquímicos disponíveis, e a precisão do modelo de fluxo e transporte de águas subterrâneas (VÁZQUEZ-SUÑÉ et al., 2005).

Tubau et al. (2017) apresentaram uma metodologia para auxiliar na estimativa de recarga de aquíferos em áreas urbanas de Barcelona, Espanha, a partir da precipitação pluviométrica, considerando que esse tipo de recarga, consiste na principal contribuição de recarga em aquíferos urbanos. O método usado foi estruturado nas seguintes etapas: (1) definição do modelo conceitual; (2) implementação de um modelo numérico; (3) parametrização de funções da recarga aérea urbana; (4) calibração (em larga escala); e (5) iteração, baseando-se na metodologia de balanço de massa e flutuação de nível de água.

4.3 Estudos de recarga de aquíferos fraturados

Bockgård (2004) estimou a recarga de aquíferos cristalinos fraturados a partir da aplicação do método de datação de água subterrânea por clorofluorcarbono (CFC), execução de ensaios hidráulicos em campo e modelagem matemática. Em seu estudo, realizado em Finnsjön, Suécia, o autor definiu que a acurácia do método de datação de água subterrânea em aquíferos cristalinos fraturados, está relacionada à heterogeneidade das fraturas, que influenciam na recarga do aquífero avaliado. Identificou também que as mudanças de pressão das águas subterrâneas no aquífero cristalino estão relacionadas ao aporte de águas subterrâneas das porções mais superficiais, testando a hipótese de que a recarga do aquífero fraturado avaliado assume fluxo vertical em relação ao aquífero poroso sotoposto.

Bockgård (2004) concluiu no seu estudo que o método de datação por CFC é pouco confiável para áreas com cobertura florestal, úmidas e com solo onde ocorre a rápida degradação do CFC-11. Em relação às alterações de pressão identificadas no monitoramento de nível d'água de aquíferos cristalinos, identificou que uma porção substancial das mudanças no nível d'água estão associadas ao efeito de carregamento instantâneo de água, não envolvendo mudanças de armazenamento ou fluxo d'água subterrâneo. Este fato, segundo o autor, explicaria as respostas rápidas observadas na pressão das águas subterrâneas em eventos de precipitação.

Gleeson et al. (2009) estudou os mecanismos de recarga de aquíferos fraturados em Ontário, Canadá, buscando determinar se os controles dos processos de recarga são definidos pelas redes de fratura e/ou características e espessura do solo adjacente. Foram aplicados diversos traçadores para avaliar a dinâmica de água subterrânea e estabelecer, a partir de amostragens de controle e simulação numérica, os fatores que controlam os processos de recarga. Os resultados indicaram a presença de duas respostas hidráulicas distintas, térmica e isotópica, sugerindo que diferentes tipos de recarga estão ocorrendo simultaneamente na área de estudo, sendo um de resposta rápida e localizado, e outro lento e de ocorrência mais dispersa.

Jiménez-Martínez et al., (2013) estudando a resposta hidráulica de um aquífero cristalino fraturado, localizado em Ploemeur, França, com o uso de análises de frequência de domínios, revelou a variabilidade da recarga nesses sistemas complexos, em função do tempo e heterogeneidade em diversas escalas de análise. Os resultados indicaram que em parte dos poços avaliados há uma linearidade entre tempo e frequência, identificada em larga escala nos aquíferos. Em outros poços, foram reveladas curvas com redução em alta frequência, sendo relacionadas à existência de caminhos preferenciais na recarga.

Rathay et al., (2017) estudaram as respostas na recarga de aquíferos fraturados, na região das Ilhas do Golfo, na Columbia Britânica, Canadá, em eventos de precipitação elevada.

O modelo analítico, elaborado para avaliar o impacto de frequentes eventos de chuva intensa, envolveu a versão modificada do modelo Green e Ampt, no qual o tempo de escoamento superficial e a infiltração cumulativa em rochas fraturadas expostas, sem a presença de cobertura de sedimentos superficiais, foi calculado para vários eventos de chuva de diferentes magnitudes. A partir dos resultados, concluiu-se que a variação no nível d'água subterrânea está mais correlacionada a eventos de chuva de maior duração temporal do que a de eventos pontuais de chuva intensa. Durante os períodos de precipitação elevada se observa a rápida formação de superfícies de alagamento, resultando em uma menor infiltração quando comparadas às chuvas moderadas.

4.4 Métodos de avaliação de recarga

Segundo Lerner et al. (1990), Lerner (2002) e Scanlon et al. (2002) apesar de existirem diversas técnicas para a avaliação da recarga, cada uma apresenta um erro, justificando, assim, que a estimativa de recarga seja desenvolvida por meio da comparação de técnicas diferentes, para que se obtenha resultados mais confiáveis.

As técnicas principais, utilizadas para se estimar a recarga, segundo Lerner et al. (1990), são: 1) a medida direta, representada pela recarga por meio de precipitação ou perdas por drenagens; 2) balanço hídrico, quando para se estimar a recarga é aplicada a diferença entre o total de água que entra e o total de água que sai da área avaliada; 3) aproximações darcynianas, envolvendo a aplicação da fórmula de Darcy para o cálculo da velocidade do fluxo, possibilitando se estimar a recarga; e 4) utilização de traçadores, já naturalmente presentes no ambiente, ou artificialmente lançados, que permitem, por meio das diferenças entre as suas concentrações na fonte e na água subterrânea, o cálculo da recarga.

A presente pesquisa utilizou métodos baseados na hidráulica do aquífero e em técnicas isotópicas, estas representando a utilização de traçadores. Para os primeiros foram aplicados o balanço hídrico e as medidas da variação do nível d'água do aquífero; e para os segundos foram utilizados isótopos estáveis de O e H, e os radiogênicos de Sr.

4.4.1 Métodos baseados na hidráulica do aquífero

4.4.1.1 Balanço hídrico

Segundo Viviani-Lima (2007) e Maldaner (2010), a utilização do balanço hídrico na estimativa de recarga é bastante difundida devido aos trabalhos e simplificações adotados por Thornthwaite (1948). O balanço hídrico estima a recarga direta, através do cálculo das entradas (precipitação) e saídas (escoamento superficial e evapotranspiração) de água ao longo do tempo no perfil de solo, onde é definida como o excedente desse balanço.

Lerner et al. (1990) ressaltam, ao explicar que, em detrimento de apresentar como um método fácil, devido à simplicidade do seu conceito, a precisão de seus resultados é muito baixa, devido aos inúmeros erros existentes na estimativa de fluxos em tempestades e em fortes chuvas tropicais, na avaliação da evapotranspiração e no estabelecimento do escoamento superficial.

A aplicação do método de balanço hídrico não é indicada quando a recarga tem baixa representatividade no balanço hídrico, há elevada incerteza nos dados utilizados e diferentes destinos para a água (SCANLON et al., 2002).

A equação $P = ESC + ETR + \Delta ARM + R$ define o balanço hídrico de Thornthwaite e Mather (1955), na qual P é precipitação (mm), ESC são fluxos superficiais para fora da área de estudo (mm), ETR é evapotranspiração real (mm), ΔARM é variação no armazenamento de água na zona não-saturada (mm) e R é recarga (mm).

O escoamento superficial (ESC) pode ser estimado aplicando-se o coeficiente de escoamento superficial (C') aos dados de precipitação mensal, a partir da equação $ESC = C' \cdot P$, com $C' = \alpha \cdot C$, na qual C representa o coeficiente que determina a quantidade de precipitação que escoará em superfície, em função do solo; e α é determinado em função da declividade e da estação do ano, seca ou úmida.

Maldaner (2010), para o cálculo da evapotranspiração real aplicou o método de Thornthwaite (1948), devido seu ao desempenho favorável no Estado de São Paulo. A equação empírica $ETP = 16 b (10T/I)^a$, para $0 < T < 26,5^\circ C$; e $ETP = -415,85 + 32,24T - 0,43T^2$, para $T \geq 26,5^\circ C$; na qual ETP é a evapotranspiração (mm), T é a temperatura média mensal ($^\circ C$), I é o índice de calor disponível para a região, o expoente a é a função cúbica de I calculado a partir da soma dos índices de calor dos 12 meses e b é um fator de correção referente ao período de insolação durante o dia que varia em função da latitude em que se localiza a estação meteorológica. No cálculo de I é utilizada a equação $I = \sum i$, na qual $i = (T/5)^{1,514}$; o termo a corresponde a uma função cúbica de I , $a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,7 \times 10^{-5} I^2 + 0,018 I + 0,49$; e para o cálculo do termo b , tem-se $b = (ND/30) \cdot (N/12)$, na qual ND corresponde ao número de dias no mês e N o fotoperíodo em horas.

Ainda, segundo Maldaner (2010), a variação de armazenamento de água na zona não saturada dependerá da quantidade de água armazenada (ARM), cujos limites máximo (capacidade de campo) e mínimo (ponto de murchamento) variam em função do tipo de solo e sua espessura. O autor explica que a água efetivamente disponível para a recarga dependerá da espessura da camada de solo e da profundidade das raízes. Multiplica-se a água disponível pela espessura para a obtenção da água disponível no solo. A equação $R = P - ESC - ETR - ARM$ define, assim, a recarga.

4.4.1.2 *Variação da profundidade do nível de água do aquífero*

Este método, conhecido também como “Water Table Flutuation (WTF)” baseia-se na premissa de que a elevação do nível de água em um aquífero livre, ou não confinado, é motivado pela sua recarga (HALL e RISSER, 1993; HEALY e COOK, 2002). Dessa forma, a recarga (R) pode ser estimada pela equação:

$R = S_y \cdot dh/dt$, na qual S_y é a vazão específica; h é o nível de água e t é o tempo.

O método é mais bem aplicado em aquíferos livres cuja resposta à recarga é rápida e o nível de água próximo à superfície. Scanlon et al. (2002) e Healy e Cook (2002), destacam que a dificuldade associada a esse método está na determinação da vazão específica (S_y). Viviani-Lima (2007), complementa, explicando a relevância de se separar a contribuição da variação do nível aquífero por meio da recarga de outras origens, como evapotranspiração, flutuações em função da pressão atmosférica, presença de trapeamento de ar pela frente de molhamento ou pela interferência de poços em bombeamento. Portanto, na estimativa da recarga pelo método WTF a identificação e correção dos fatores que podem alterar os resultados devem ser considerados (MALDANER, 2010).

Maldaner (2010), destaca que este método é muito utilizado por gerar bons resultados e ser de fácil aplicação, inclusive em qualquer tipo de poço. Salienta que no cálculo do valor de S_y , para a obtenção de um valor médio representativo do meio, métodos diferentes e diferentes amostras devem ser empregados.

Segundo Healy e Cook (2002) em monitoramentos de longo prazo, como o que foi realizado nesta pesquisa, é possível relacionar a variação do nível de água a possíveis influências de diferentes comportamentos do clima.

Segundo Lerner (2002), a aplicação do método em áreas urbanas deve ser vista com reservas, pois essa técnica não apresenta a sensibilidade necessária para identificar recargas contínuas como aquelas provocadas pela fuga da rede de água e esgoto. Ademais, não havendo variação ou rebaixamento do nível de água, os cálculos para a estimativa da recarga pelo método de variação do nível de água não apresentarão os resultados esperados (MALDANER, 2010).

Porém, combinado a outros métodos, como em Viviani-Lima (2007), o método de variação do nível de água poderá apresentar melhores resultados.

4.4.1.3 *Estimativa darcyniana ou pela aplicação da Lei de Darcy*

Nesse método, aplicando-se a Lei de Darcy, calcula-se o fluxo de água subterrânea que atravessa uma seção determinada do aquífero, definindo-se, assim, que a recarga é proporcional ao fluxo (VIVIANI-LIMA, 2007; MARTINS, 2008).

A incerteza do método está na imprecisão do cálculo da condutividade hidráulica, que apresenta elevada variabilidade (SCANLON et al., 2002).

4.4.2 Método baseado em técnica isotópica

Nesta pesquisa serão aplicados os isótopos estáveis O e H e os radioativos de estrôncio, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Os isótopos podem ser separados em estáveis, que não sofrem desintegração, e os radiogênicos, ou instáveis, os quais, por meio de processos como desintegração espontânea ou radiação eletromagnética, passam de isótopos radioativos a isótopos radiogênicos.

Segundo Charalampides e Monoliades (2002), a utilização de técnicas isotópicas em estudos ambientais para a identificação da fonte de poluentes e sua dispersão tem aumentado na última década. Mas completa que, no Brasil, tais estudos são escassos ou inexistentes, principalmente aqueles referentes à água subterrânea.

Viviani-Lima (2007) e Martins (2008) recomendam a aplicação de diversos traçadores de forma combinada, para aumentar a confiabilidade dos resultados.

4.4.2.1 Isótopos estáveis

Segundo Martins (2008), a utilização de isótopos estáveis é possível devido à diferença de massa e ao fracionamento que permite a identificação de diferentes isótopos de um mesmo elemento.

Os isótopos dos elementos leves são facilmente fracionados na natureza e sua utilização baseia-se no fato de que os processos responsáveis por essa separação ocorrem mais devido a sua massa atômica do que a suas propriedades químicas. Esse fracionamento isotópico pode ocorrer por meio de reações de troca isotópica, processos cinéticos ou processos físico-químicos (FRITZ e FONTES, 1980).

Os isótopos dos elementos hidrogênio, carbono, nitrogênio, oxigênio e enxofre, são considerados os principais isótopos ambientais pela sua abundância e por serem os principais componentes do ciclo hidrológico, geológico e biológico (CLARK e FRITZ, 1997).

Viviani-Lima (2007) e Maldaner (2010) citam que, como a composição isotópica da água no ciclo hidrológico é modificada por processos meteóricos, é possível correlacioná-la a uma determinada fonte de recarga. Definindo-se assim a assinatura isotópica da água, essa poderá ser utilizada como um traçador natural para identificar a origem da água em um aquífero.

Conforme Lerner et al. (1990) e Lerner (1990) os isótopos estáveis têm desempenhado papel importante na distinção da contribuição de diferentes fontes na recarga dos aquíferos em áreas urbanizadas, identificando, por meio das diferentes composições isotópicas, a proporção da participação de águas provenientes de vazamentos de redes de abastecimento, esgoto e de chuvas.

Nesta pesquisa foram aplicados os isótopos estáveis de O e H, os quais, segundo Viviani-Lima (2007) são bons traçadores para distinguir águas de diferentes origens, pois 1) O e H são

os constituintes da molécula de água; 2) os isótopos ^2H e ^{18}O são os principais isótopos de hidrogênio (^1H) e oxigênio (^{16}O) respectivamente; e 3) são conservativos em reações de mistura.

Maldaner (2010) explica que, como o cálculo da razão isotópica não é simples, havendo diferenças significativas ao se comparar resultados entre diferentes laboratórios, deve ser utilizado um padrão de referência, com o objetivo de se determinarem desvios das razões da amostra analisada em relação a padrões com reconhecimento e aceitação mundial. No caso dos isótopos estáveis de O e H o padrão adotado é o VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), distribuído pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA), na qual a concentração isotópica (δ) é dada pela fórmula:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{amostra}} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{amostra}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{padrão}}} - 1 \right] \cdot 1000 \text{ (‰ VSMOW)}$$

Rozanski et al. (1993) reuniu as razões isotópicas de oxigênio e hidrogênio mundiais para definir a reta meteórica global verdadeira, a partir de dados de 219 estações da rede GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*), da Agência Internacional de Energia Atômica, sendo, portanto, mais precisa do que a reta meteórica global de CRAIG (1961). A equação que expressa a reta meteórica de Rozanski et al. (1993) é, $\delta^2\text{H} = 8,13 \delta^{18}\text{O} + 10,8 \text{ (‰ VSMOW)}$.

Clark e Fritz (1997) explicam que nos estudos locais de razões isotópicas de oxigênio e hidrogênio em águas superficiais e subterrâneas é necessária a comparação com a reta meteórica local. No presente estudo, as águas de diversas fontes analisadas foram comparadas com a reta meteórica local, elaborada a partir dos resultados de amostras de água de chuva, coletadas ao longo de um período de 12 meses.

A aplicação de isótopos estáveis de O e H, para definir a composição da mistura de diferentes fontes na recarga de um aquífero, requer como premissa que exista uma significativa diferença entre a composição isotópica dessas possíveis fontes. Dessa forma, a composição isotópica de cada fonte considerada poderá ser utilizada como membro final da mistura. A reta traçada entre dois membros finais define a composição da mistura, também chamada de linha de mistura ou *mixing line* (CLARK e FRITZ, 1997).

Utilizando-se esse método, os resultados obtidos com a análise de misturas de águas subterrâneas, provenientes de poços, são plotados no gráfico com a linha de mistura e, conforme a sua posição nessa linha, será determinada a proporção de cada membro final, ou de cada fonte, nessa mistura (CLARK e FRITZ, 1997).

No Brasil, destacam-se os estudos com isótopos estáveis de oxigênio e hidrogênio, relacionados à recarga na Bacia do Alto Tietê (BAT), de Dias (2005), Viviani-Lima (2007) e Martins (2008); e o de Maldaner (2010) sobre a quantificação e definição da origem da recarga do aquífero freático na zona urbana do município de Urânia (SP).

Viviani-Lima (2007) aplicando técnicas isotópicas em estudo de recarga de áreas urbanas, identificou, por meio de isótopos estáveis, a contribuição de fontes distintas na recarga dos aquíferos, representada pelas assinaturas isotópicas da água da chuva e do sistema de abastecimento público.

Martins (2008) ao utilizar isótopos estáveis de oxigênio e deutério para a identificação de fontes de recarga, concluiu em seu estudo que esses isótopos não apresentaram diferenças significativas entre as assinaturas de água da rede pública de abastecimento (SABESP) e as amostras mais contaminadas por esgoto, não se apresentando bons traçadores para diferenciar as duas fontes.

Maldaner (2010) ao estudar a origem da recarga do aquífero freático na zona urbana do município de Urânia (SP), por meio da aplicação de isótopos, concluiu em seu trabalho que a aplicação de isótopos estáveis de oxigênio e deutério foi possível definir que a recarga da água subterrânea tem origem, predominantemente, na água da chuva, mas com alguma contribuição das redes públicas de abastecimento de água e de esgoto.

Em estudo realizado na cidade de Barcelona, Espanha, Palau et al. (2014) demonstraram que a abordagem de análises isotópicas (C e Cl) na caracterização da contaminação de aquíferos fraturados com presença de etenos clorados é aplicável, sobretudo em áreas complexas, permitindo a identificação de diferentes fontes e plumas de contaminação, assim como de processos de mistura e de biodegradação.

Battle-Aguilar et al. (2017) realizaram estudos com traçadores ambientais ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{14}\text{C}$, ^4He , ^{20}Ne , ^{40}Ar , N_2) com foco no entendimento dos processos de recarga, das velocidades do fluxo de águas subterrâneas e do tempo de residência em aquíferos semi-confinados, multicamadas e fraturados. Os autores concluíram que os isótopos de ^{14}C apresentam vantagens sobre o ^4He na medição de velocidades das águas subterrâneas, dado que as idades aparentes do ^4He são mais afetadas por pequenas contribuições de águas muito antigas. Contudo, essa particularidade torna o ^4He mais sensível ao movimento ascendente de águas antigas ao longo de fraturas. Foi identificado que as fraturas desempenharam um papel fundamental na mistura de águas mais antigas, ricas em sais e ^4He , embora, devido à baixa densidade de pontos de amostragem, não foi possível demonstrar o papel das fraturas na mudança das velocidades do fluxo.

4.4.2.2 Isótopos radiogênicos

O isótopo radiogênico que será utilizado no presente trabalho será o de estrôncio, representado pelo ^{87}Sr . Segundo Martins (2008), a razão isotópica, adotada por convenção, expressa em relação ao isótopo estável que, no caso do estrôncio, é o ^{86}Sr e, por conseguinte, a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Segundo Maldaner (2010) a diferença de massa entre o isótopo ^{86}Sr e o ^{87}Sr é de 1%, quando comparada com os isótopos mais leves como oxigênio e deutério.

Banner (2004) explica que os isótopos radiogênicos são úteis como traçadores de fontes e transporte de elementos dissolvidos e detríticos no ciclo sedimentar, hidrológico e biogeoquímico, na reconstrução das variações químicas no oceano ao longo do tempo e na datação de rochas e minerais. Esse autor explica que a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, por apresentar grande distribuição nos diferentes materiais do compartimento terrestre, assim como variação temporal, representa uma ferramenta útil em avaliações que envolvem o ciclo hidrológico.

Conforme Bullen e Kendal (1998) são necessárias as seguintes características a um isótopo de soluto para que represente um traçador eficiente das reações de intemperismo e de caminhos de fluxo: 1) deverá haver diferença significativa das composições isotópicas entre os minerais da área de estudo e as soluções de intemperismo; e 2) as soluções intempéricas devem ser capazes de carregar os núclídeos traçadores para longe dos locais de intemperismo.

Segundo Banner (2004) como as principais fontes de Sr na natureza são as rochas, o intemperismo é o principal mecanismo que transfere o Sr desse meio para o ciclo hidrológico, sob a forma de íons bivalentes. As reações de intemperismo variam em função do tipo de rocha, clima, tipo e espessura do solo, tipo de vegetação, relações de porosidade e permeabilidade, além de influência antrópicas.

Esse autor explica que como o estrôncio é um elemento não volátil, durante a evaporação ele tende a permanecer dissolvido na água; com isso a sua concentração em águas de chuva, portanto, é baixa. Já em relação às águas superficiais, como a composição isotópica de Sr é, inicialmente, dada pelas rochas pelas quais essas águas percorrem, assim como pela composição química e idade, as rochas mais antigas fornecerão razões isotópicas de Sr mais radiogênicas nas águas, e rochas mais jovens razões isotópicas menores. Comportamento semelhante ocorre nas águas subterrâneas, porém de forma mais evidente, uma vez que a temperatura, pressão e forças iônicas são maiores em profundidade, e a área de contato com a rocha e o tempo serão também maiores.

Frost et al. (2002) observou que a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na água subterrânea aumenta com a maior distância da área de recarga e, assim, maior interação rocha-água no percurso do fluxo.

Martins (2008), ao estudar caso de recarga em área urbana, aplicando técnicas isotópicas, observou que a recarga calculada pela razão isotópica de Sr não foi correlacionável com os cálculos realizados com os isótopos estáveis. O autor destaca que nas áreas urbanas estudadas, apresentando alta contaminação e pouca interação com a rocha, os isótopos de Sr não foram bons indicadores da recarga.

Maldaner (2010), em seu trabalho em Urânia (SP), mostra que as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ são controladas pela profundidade dos poços analisados, concluindo que, quanto maior a profundidade do poço, menos radiogênica é a água, e maior é a concentração de estrôncio.

Através dos isótopos de Sr, foi possível distinguir três grupos de águas: rasas, intermediárias e profundas; cada grupo sofrendo influência de recarga de água de fontes distintas.

4.4.3 Método baseado em traçador químico (ambiental)

Martins (2008) explica que esse método é definido pela utilização de determinados elementos no cálculo da recarga de uma determinada fonte, por meio do balanço de massa. Lerner (2002), destaca que a utilização de traçadores químicos na identificação das várias fontes de recarga urbana tem grande potencial, pois, considerando a conservação de massa de cada soluto (traçador), a sua concentração na água subterrânea será proporcional à somatória de sua concentração em cada fonte.

Lerner (2002) apresenta alguns potenciais traçadores ambientais, inorgânicos e orgânicos, para a identificação de fontes na água subterrânea:

- Inorgânicos: cátions maiores (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ e NH_4^+); ânions (HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-), metais (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} e metais traços), e outros íons menores (B^{3+} , PO_4^{3-} , Sr^{2+} , F^- , Br^- , e CN^-);

- Orgânicos: com destaque para os clorofluorcarbonos (CFCs), trihalometanos (THMs), componentes fecais (coprostanol e 1-aminopropanona), compostos relacionados a detergentes e compostos químicos industriais (incluindo solventes clorados e hidrocarbonetos).

Moeck et al. (2017) demonstraram que traçadores de calor e corantes são úteis na estimativa do tempo de residência das águas subterrâneas. Outros traçadores identificados como adequados para estimar a origem e mistura de águas subterrâneas incluem íons maiores e micropoluentes orgânicos, como os hidrocarbonetos clorados, sendo também associados à distribuição de contaminantes, condições redox e modelagem de transporte.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Seleção dos poços para monitoramento

No total, foram selecionados 12 poços para monitorar o aquífero de porosidade intergranular (sedimentar e do manto de intemperismo), sendo 8 rasos, 3 intermediários e 1 profundo, e 4 poços tubulares profundos para monitoramento do aquífero fraturado, de acordo com características individuais, localização na área de estudo, assim como o grau de impermeabilização do terreno no seu entorno.

As Figuras 5.1.1 a 5.1.5 apresentam, em detalhe, a localização dos poços de monitoramento e tubulares, assim como dos tensiômetros monitorados, em cada uma das 5 áreas avaliadas.

Figura 5.1.1 - Localização dos poços e tensiômetros monitorados na Área 1 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).

Figura 5.1.2 - Localização dos poços monitorados na Área 2 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).

Figura 5.1.3 - Localização dos poços monitorados na Área 3 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).

Figura 5.1.4 - Localização do poço monitorado na Área 4 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).

Figura 5.1.5 - Localização dos poços monitorados na Área 5 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).

Ressalta-se que todos os poços tubulares profundos utilizados neste trabalho se encontram desativados e sem a presença de tubulação e bomba em seu interior. Os perfis construtivos dos poços de monitoramento e tubulares profundos estão apresentados no Anexo A.

Em etapa subsequente, com o objetivo de agregar novos e relevantes dados à pesquisa, foram incluídos os resultados analíticos e hidráulicos dos poços de monitoramento rasos e intermediários, e dos sistemas de poços multiníveis CMT (*Continuous Multichannel Tubing*) e *West Bay*, localizados na Área 5. Os sistemas multiníveis permitiram, no total, o estudo e amostragem de água subterrânea de 22 profundidades distintas, sendo 06 monitoradas pelo CMT, e 16 pelo *Westbay*. Além dos sistemas de poços multiníveis, foram incluídos 3 trios de poços de monitoramento multiníveis da Área 5, PMs 10, 10B, 11, 11A, 11B, 18, 18A, 18B.

No Anexo B são apresentadas, juntamente aos resultados analíticos das águas, as informações referentes aos poços selecionados, como localização, identificação, profundidade, características do terreno e tipo de aquífero monitorado.

5.2 Levantamento e cadastro das redes de água e esgoto nas localidades selecionadas para monitoramento e em seu entorno

O levantamento e cadastro das redes de água e esgoto nas localidades selecionadas para monitoramento e em seu entorno foi realizado por meio dos seguintes métodos e fontes:

- Áreas 1 a 5: 1) consulta autorizada às plantas “*as built*” fornecidas pelos responsáveis de cada localidade selecionada; 2) compilação e desenho das informações levantadas para a imagem de satélite utilizada no cadastro;

- Entorno, incluindo ruas e avenidas principais na área de influência da pesquisa: 1) consulta autorizada ao cadastro da SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), por meio do Departamento de Desenvolvimento e Gestão Metropolitana - MPD; 2) compilação e representação das informações levantadas para a imagem de satélite utilizada para ilustração do cadastro (Figura 5.2.1).

Esses dados foram utilizados para a identificação dos locais com potencial de contribuição dessas fontes na recarga dos aquíferos da área estudada.

Figura 5.2.1 - Rede de distribuição da SABESP (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).

5.3 Levantamento de perdas das redes de água do abastecimento público na área de influência da pesquisa e em seu entorno

O levantamento de perdas das redes de água de abastecimento público na área de influência da pesquisa e em seu entorno imediato foi realizado por meio de consulta autorizada ao cadastro da SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), no Departamento de Desenvolvimento e Gestão da Metropolitana - MPD (Figura 5.3.1).

Figura 5.3.1 - Localização dos vazamentos na rede da SABESP no período de maio/2013 a abril/2015 (Fonte: modificado de EMPLASA, 1996).

Esses dados foram utilizados para a identificação dos locais com potencial de contribuição dessas fontes na recarga dos aquíferos da área estudada, porém, dentre os dados obtidos não há registros sobre quantitativos de perdas das redes de água.

5.4 Instalação e monitoramento de tensiômetros

O tensiômetro, equipamento constituído por uma cápsula porosa de cerâmica colocada na extremidade inferior de um tubo de PVC preenchido com água e dotado de vacuômetro, permite a obtenção da pressão de fluido, ou potencial matricial, do solo não saturado. Esse parâmetro, transformado em carga de pressão e somado à carga de elevação, resultará na determinação da carga hidráulica do ponto monitorado.

A Área 1 foi o local selecionado para a instalação dos tensiômetros, tendo em vista a melhor facilidade de acessos e disponibilidade de áreas.

Foram instalados 4 conjuntos de tensiômetros, divididos em 2 conjuntos para cada uma das 2 áreas de interesse à avaliação da participação da água na zona não saturada na recarga dos aquíferos da região do Canal do Jurubatuba, selecionadas em função do grau de impermeabilização de sua superfície. Uma das áreas foi selecionada por não apresentar

impermeabilização, somente cobertura formada por gramado, e a outra por apresentar piso de concreto.

Cada conjunto, ou “ninho”, foi constituído por 2 tensiômetros, instalados em 2 profundidades distintas, a 0,35 m e 0,75 m, na zona não saturada, tendo em vista a profundidade relativamente rasa do aquífero, entre 0,80 m e 1,0 m, em períodos de maior pluviosidade.

O tensiômetro selecionado para o estudo compreendeu o tipo que utiliza um vacuômetro digital para a obtenção das medidas de pressão. As medidas de tensão de seu interior são realizadas por meio do acoplamento do transmissor eletrônico, ou vacuômetro digital, que é dotado de uma agulha, à tampa de borracha do tensiômetro. A agulha recebe a tensão interna do tensiômetro e transmite a leitura ao medidor, que pode ser conferida em seu *display* digital. Com o uso de um único vacuômetro digital é possível realizar a leitura em vários tensiômetros.

A preparação do tensiômetro, antes de sua instalação, envolveu a imersão da cápsula porosa em água mineral e fervida para sua completa saturação pelo período de uma semana; e em seguida a aplicação de vácuo com o auxílio de uma bomba manual, constituída por uma seringa plástica conectada à extremidade superior do tensiômetro por meio de uma fina mangueira que atravessa uma rolha de borracha, para a extração de bolhas de ar.

Os tensiômetros foram instalados entre os dias 07 e 11/04/2014, em perfurações de 1 polegada de diâmetro, executadas no solo com o auxílio de trado helicoidal e furadeira elétrica. O diâmetro adotado para o furo é praticamente o mesmo do tubo, de modo a proporcionar o contato exato da cápsula porosa com o solo, evitando-se ao máximo a presença de ar e de água no contato de ambos. Após a perfuração alcançar a profundidade de interesse, o furo foi umedecido, e o tensiômetro recebeu em toda a sua extensão uma camada pastosa de solo, para facilitar a sua colocação e adesão.

Após a colocação do tensiômetro na perfuração, a porção superior do furo recebeu uma camada de bentonita, para selar o contato do tubo com o solo e, assim, evitar a entrada de águas pluviais e/ou de outras origens. Posteriormente, à instalação do conjunto, representado pelo par de 0,35 m e de 0,75 m de profundidade, os tensiômetros foram preenchidos com água mineral fervida e mantidos por um período de 48 h em repouso, para a cápsula de cerâmica entrar em equilíbrio com o solo e, assim, fornecer a correta medida pressão de fluido do solo não saturado. Por fim, foi construída uma caixa de proteção para sua fixação e conservação.

As medições diárias dos 4 conjuntos foram realizadas no período compreendido entre abril/2014 e março/2015. Porém, devido à baixa pluviosidade registrada, entre abril e novembro/2014, aproximadamente, os resultados das medições dos tensiômetros registraram frequentemente a ocorrência de solo seco, ou com pouca umidade, nas duas profundidades monitoradas. Assim, visto a ausência de chuvas, a frequência das medições nesse período

passou de diária a semanal, intensificando-se, porém, nas ocorrências de eventos de chuvas. Estes dados são apresentados no Anexo C.

Durante o período em que foi registrada a ocorrência frequente de solo seco, foi observada uma expressiva redução da água que preenche os tensiômetros, alterando o seu correto funcionamento. Este fato motivou, por inúmeras vezes, a necessidade de manutenção dos tensiômetros, com a remoção da tampa de borracha, para completá-los com água mineral fervida.

No caso dos tensiômetros instalados em área impermeabilizada, possivelmente, o revestimento de concreto do piso também contribuiu para a redução de água observada no interior dos mesmos.

5.5 Monitoramento dos níveis d'água subterrânea

O monitoramento dos níveis de água dos poços de monitoramento e tubulares profundos, sem a interferência de eventuais bombeamentos em poços existentes no entorno, foi realizado por meio de transdutores de pressão, com contínuas medições dos níveis de água.

Em cada poço de monitoramento e de produção, selecionados para a realização do monitoramento dos níveis estáticos de água, foi instalado um transdutor de pressão, fabricado pela empresa canadense *Heron Instruments*®, com nome comercial de “*Dipperlog*”. Previamente à colocação dos transdutores de pressão nos poços, eles foram programados e identificados com um código, ou nome de projeto, para registro de medidas constantes e ininterruptas da variação dos níveis de água subterrânea a cada uma hora, totalizando 24 medidas diárias.

Na programação dos “*Dipperlog*” foi adotada como referência, ou “*datum*”, a extremidade superior do revestimento do poço de monitoramento ou tubular profundo, denominada de “boca do poço” ou “*top of case (TOC)*”. Tendo em vista que a instalação dos transdutores de pressão requereu a autorização dos responsáveis pela administração dos empreendimentos onde os poços selecionados estão localizados, o monitoramento não foi iniciado simultaneamente. Além deste fato, alguns transdutores apresentaram problemas em seu funcionamento e, em consequência, tiveram sua operação interrompida. O Quadro 5.5.1. apresenta a data de instalação e o período monitorado em cada poço.

Os resultados do monitoramento do nível d'água, apresentados no Anexo D, foram utilizados para o cálculo da recarga dos aquíferos através do método de variação do nível de água, além de fornecer dados para a elaboração do modelo conceitual hidrogeológico da área estudada.

Quadro 5.5.1 – Data de instalação e período monitorado em cada poço.

Localização	Poço	Data de Instalação	Período de Operação
Área 1	PM-21	dez/12	dez/12 - fev/16
	PM-23	dez/12	dez/12 - nov/15
	PP-02	dez/12	dez/12 - nov/15
	PPS-01	dez/12	dez/12 - nov/15 ⁽¹⁾
Área 2	PM-19	mar/13	mar/13 - set/15
	PM-19A	mar/13	mar/13 - dez/14
	PM-39	mar/13	mar/13 - set/15
	PM-39A	mar/13	mar/13 - set/15
Área 3	PMN-2A	fev/13	fev/13 - set/15
	PMN-4A	fev/13	fev/13 - nov/15
	PMN-4B	fev/13	fev/13 - nov/15
	P-255	fev/13	fev/13 - nov/15 ⁽³⁾
	P-1024	fev/13	fev/13 - nov/15
Área 4	P-1346	dez/12	dez/12 - nov/15 ⁽²⁾

(1) Operação paralisada entre nov - dez/15; (2) operação paralisada entre abr - mai/15; (3) operação paralisada entre mar - dez/14

Tendo em vista que a Área 5 foi adicionada à pesquisa posteriormente, no segundo semestre de 2016, não foram instalados transdutores de pressão nesta área.

5.6 Acompanhamento de dados meteorológicos

Os dados meteorológicos diários como pluviometria, umidade relativa do ar e temperaturas máximas e mínimas, para utilização no balanço hídrico para a quantificação da recarga, foram fornecidos, mediante solicitação e autorização, pelo Centro de Gerenciamento de Emergência, da Secretaria de Infraestrutura Urbana e Obras, da Prefeitura de São Paulo (CGE-SIURB), que mantém uma rede de estações meteorológicas distribuídas na Região Metropolitana de São Paulo.

Dentre as estações meteorológicas, foi selecionada a estação localizada no bairro M'Boi Mirim, denominada MB, pela sua maior proximidade da área de estudo, resultando na utilização de dados mais representativos. No Anexo E são apresentados os dados meteorológicos obtidos junto ao CGE, referentes ao período compreendido entre outubro/2012 e abril/2016.

Tendo em vista a proximidade da Estação Meteorológica - M'Boi Mirim com a Represa Guarapiranga, os dados meteorológicos obtidos foram comparados aos dados da Estação

Meteorológica – Santo Amaro, que se localiza mais distante da área de estudo, para avaliar possíveis interferências da represa nos registros meteorológicos. Os resultados dessa comparação não indicaram diferenças significativas que apontassem para a necessidade de mudança de estação meteorológica.

5.7 Coleta e análises químicas e isotópicas de amostras de água

No total, foram coletadas 51 amostras no período compreendido entre abril/2013 e outubro/2014, 30 amostras entre agosto e setembro/2016 e 09 amostras entre junho e julho/2017.

Além da amostragem de água dos poços de monitoramento (rasos, intermediários e profundos) e poços tubulares profundos (produção), foram coletadas amostras de águas de abastecimento da SABESP, de esgoto e de água de chuva, para caracterização química e isotópica (estáveis e radiogênicos) de cada tipo de água.

O Quadro 5.7.1 apresenta as informações gerais das amostragens realizadas, destacando o ponto de coleta e sua localização na área estudada, o tipo da amostra (água subterrânea, água de chuva, água de abastecimento e esgoto), as datas das amostragens, os parâmetros analíticos e os quantitativos.

Todas as amostras coletadas foram acondicionadas em diferentes frascos, conforme os parâmetros a serem analisados. Para os parâmetros cátions, ânions e alcalinidade foram utilizados frascos de polipropileno de boca estreita de 100 ml; para as amostras de isótopos estáveis de O e H foram utilizados frascos de vidro âmbar de 10 ou 20 mL, dotado de batoque; no acondicionamento das amostras para análises isotópicas de Sr foram utilizados frascos de polipropileno de boca estreita de 200 ml ou 250 mL.

Na preservação das amostras para análises de cátions e isotópicas de Sr foi utilizado ácido nítrico (HNO_3), destilado por 3 vezes, produzido pelo CPGeo. As amostras de cátions e ânions foram previamente filtradas com filtros da marca Waterra[®], com área de filtração de 300 cm^3 e membrana de 0,45 μm .

Durante a preparação da amostra, uma alíquota da água foi separada e nela foram realizadas medidas “*in situ*” dos parâmetros físico-químicos: pH, temperatura, condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD) e potencial de oxirredução (ORP), utilizando-se uma sonda multiparamétrica marca YSI Pro Plus.

Durante o manuseio dos frascos destinados ao acondicionamento das amostras, dos equipamentos e materiais de amostragem, foram utilizadas luvas descartáveis, trocadas a cada ponto amostrado. As tampas dos frascos, assim com as mangueiras e demais matérias de coleta, foram sempre colocadas em local apropriado, sem contato direto com o piso local para se evitar quaisquer contaminações da amostra.

As amostras coletadas foram analisadas nos seguintes laboratórios:

- Laboratório de Hidrogeoquímica do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da USP (CEPAS – IGc-USP), para análises de cátions, ânions e alcalinidade;
- Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS), do Instituto de Geociências (IGc) da USP, para análises de O e H;
- Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo), do Instituto de Geociências (IGc) da USP, para análises de ^{87}Sr / ^{86}Sr .
- Laboratório Analytical Technology (Anatech), sediado em São Paulo (SP), para análises de Sr Total, cátions, ânions e metais.

As técnicas e metodologias utilizadas na coleta e análise das amostras de diferentes fontes de água serão descritas nos itens a seguir.

Os resultados das análises químicas e isotópicas, obtidos em todas as campanhas de amostragem de águas, são apresentados no Anexo B.

Quadro 5.7.1 – Informações gerais das amostragens realizadas.

Ponto / Profundidade	Localização	Tipo	Campanhas Amostradas	Parâmetros Analisados	Quantidades Coletadas
PM-21, PM-23, PM-D,PP-02	Área 1	água subterrânea	1a (abr-jul/13); 2ª (set-out/13); 3ª (abr/14); 4ª (out/14)	ânions, alcalinidade, cátions (4 campanhas), Sr/Sr (1ª campanha); Sr total (1ª campanha), isótopos estáveis ¹⁸ O e ² H	44 amostras, sendo 04 amostras de cada poço
PMN-2A, PMN-4A,PMN-4B	Área 3				
PM-19, PM-19A, PM-39, PM-39A	Área 2				
1204 (53,0 m / 250,0 m)	Área 3		05 a 07/07/13	isótopos estáveis ¹⁸ O e ² H	02 amostras
ESGOTO	Área 1	esgoto	12/04/2013	ânions, alcalinidade, cátions, Sr/Sr; Sr total, isótopos estáveis ¹⁸ O e ² H	01 amostra
Cavalete - Área 1		água abastecimento da SABESP	12/04/2013; 20/02/2014 e 10/03/2014	ânions, alcalinidade, cátions, Sr/Sr; Sr total, isótopos estáveis ¹⁸ O e ² H (todos nas 3 campanhas, exceto Sr/ Sr - realizado somente na 1ª campanha)	03 amostras
Chuva		água de chuva	26/04/13, 02/07/13 e coletas mensais entre 08/15 e 07/16	ânions, alcalinidade, cátions, isótopos estáveis ¹⁸ O e ² H (nas duas campanhas), exceto Sr/ Sr - realizado na 1ª campanha)	14 amostras
Poço CMT (CMT 02, 03, 04, 05, 06, 07)	Área 5	água subterrânea	25/08/16 a 16/09/16	isótopos estáveis ¹⁸ O e ² H	06 amostras em 06 profundidades diferentes
Poço Westbay (WB 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16)	Área 5			metais totais (ferro e manganês), metais dissolvidos (ferro dissolvido e manganês dissolvido), sulfeto, cátions (cálcio, magnésio, sódio, potássio e amônio), ânions (fluoreto, cloreto, nitrito, nitrato, fosfato e sulfato), alcalinidade e isótopos estáveis ¹⁸ O e ² H (exceto para os poços PM-10, PM-10B, PM-11, PM-11A, PM-11B, PM-18, PM-18A, PM-18B)	16 amostras em 16 profundidades diferentes
PM-10, PM-10B, PM-11, PM-1A, PM-11B, PM-18, PM-18A, PM-18B					08 amostras, sendo uma amostra de cada poço
204 (115,0-117,0 m / 120,65-123,0 m / >126,5 m / 180,0 - 182,5 m / 184,0-186,5 m / 243,0-256,0 m)	Área 3		13 a 30/06/17	K, Mg, Mn, Ca, Fe, ânions, nitrato, nitrito, sulfato total, fluoreto total, cloreto total, sulfeto e isótopos estáveis ¹⁸ O e ² H	06 amostras em 06 profundidades diferentes
255 (25,80-28,10 m / 59,70-62,0 m / >135,0 m)			18 a 24/07/2017	K, Mg, Mn, Ca, Fe, ânions, nitrato, nitrito, sulfato total, fluoreto total, cloreto total e sulfeto	03 amostras em 03 profundidades diferentes

5.7.1 Coleta de amostras de água de chuva

A água de chuva foi coletada utilizando um coletor especificamente montado para essa finalidade, conforme as orientações do *Global Network of Isotopes in Precipitation* (GNIP) (IAEA/WMO, 2014), largamente utilizado e citado em inúmeros trabalhos (DIAS, 2005; VIVIANI-LIMA, 2007; MARTINS, 2008; MALDANER, 2010). O coletor, montado em uma caixa de isopor, possui um funil, que recebe a água da chuva e a transfere até um galão plástico, posicionado no interior da caixa. Na montagem, toma-se o cuidado de colocar a porção inferior do funil em contato com a base interna do galão, evitando-se que, com o aumento da temperatura, a água coletada seja perdida por evaporação e altere a qualidade da amostra. Adicionalmente, também como medida de segurança e garantia de qualidade, uma mangueira, também plástica, com,

aproximadamente 6,0 m de comprimento, foi conectada ao galão, para minimizar as trocas de ar interna e externa. Porém, devido ao comprimento, o vapor não é perdido para o meio externo e à medida que a temperatura do ambiente é reduzida, o vapor é condensado e retorna ao galão.

O coletor foi colocado na Área 1, em local elevado e livre de interferências aéreas, como árvores, calhas e outras estruturas que pudessem interceptar as águas da chuva antes de serem coletadas.

A amostragem de água de chuva foi realizada, em uma primeira etapa, em dois períodos, compreendidos entre março/abril 2013 e junho/julho 2013, totalizando 2 amostras. Posteriormente, entre agosto/2015 e julho/2016, foram coletadas amostras mensais de chuva, totalizando 12 amostras, correspondendo a uma amostra por mês, para análises de isótopos estáveis de O e H, com o objetivo de elaborar a reta meteórica local, representativa da área de estudo.

Ao final de cada período de amostragem, o coletor foi retirado de seu ponto de coleta e levado ao Laboratório de Hidrogeoquímica do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da USP (CEPAS – IGc-USP). A transferência da água de chuva para os frascos, previamente higienizados conforme método descrito por Martins (2008), foi realizada em ambiente limpo, com o uso de luvas descartáveis.

5.7.2 Coleta de amostras da rede pública de distribuição (SABESP) e de esgoto

A coleta das amostras de água da rede pública de distribuição (SABESP) e de esgoto foi realizado com o auxílio de coletores plásticos descartáveis, em pontos de acesso direto a essas amostras.

Tendo em vista a melhor facilidade de acesso, as amostras de água da SABESP e de esgoto foram coletadas na Área 1. As amostras de água foram sempre coletadas no cavalete, situado junto à Av. Eusébio Stevaux, e as amostras de esgoto no coletor-tronco.

No total, foram coletadas 3 amostras de água da SABESP, nos dias 12/04/2013, 20/02/2014 e 10/03/2014, e 01 amostra de esgoto no dia 12/04/2013.

5.7.3 Coleta de amostras de água subterrânea

O método utilizado para amostragem dos poços de monitoramento rasos foi o de baixa vazão (ABNT, 2010).

A realização da amostragem pelo método de baixa vazão tem como característica principal o mínimo rebaixamento do aquífero, mínima geração de turbidez e a baixa geração de

efluente bombeado. Essa técnica leva em consideração as características físico-químicas da água bombeada, para definir a finalização da purga e, assim, o momento ideal para a realização da coleta da amostra.

Para realização da purga foi utilizada bomba do tipo peristáltica, para regulação de fluxo de amostragem sob baixa vazão. A operação mecânica peristáltica usa rolos rotativos para despressurizar as mangueiras utilizadas para captação da amostra de água, normalmente de silicone ou polietileno, desenvolvendo um vácuo que promove o deslocamento da água.

A vazão bombeada durante a purga foi regulada entre 0,05 L/min (50 mL/min) a 1,0 L/min (1.000mL/min), considerando o rebaixamento máximo do nível de água de 0,25 m. Caso o poço de monitoramento apresente o nível de água (NA) acima do topo do filtro, ou seja, esteja “afogado”, a estabilização deve ser 25 cm acima do topo do filtro. O monitoramento do nível de água foi realizado com o uso de um medidor eletrônico marca Solinst, modelo 101.

Durante o bombeamento do poço, após a estabilização do NA, foram monitorados, com o auxílio de célula de fluxo, os parâmetros físico-químicos: pH, temperatura, condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD) e potencial de oxirredução (ORP), utilizando-se uma sonda multiparamétrica marca YSI Pro Plus. Os parâmetros foram medidos a cada três a cinco minutos, até que se estabilizassem dentro de uma faixa de oscilação pré-determinada. Conforme a norma ABNT NBR 15.847:2010 (ABNT, 2010), a purga foi considerada completa, quando medidas consecutivas obtidas ficassem nas seguintes faixas:

- pH $\pm 0,2$ unidade;
- Temperatura $\pm 0,5$ °C;
- CE $\pm 5,0$ % das leituras;
- ORP ± 20 mV; e
- OD ± 10 % ou $\pm 0,2$ mg/L, aquele que se apresentar maior;

Após a estabilização, previamente à coleta da amostra, cada um dos frascos foi enxaguado 3 vezes com água filtrada, proveniente do poço a ser amostrado, visando à limpeza dos mesmos.

Os resultados dos parâmetros físico-químicos medidos *in situ*, obtidos em todas as campanhas de amostragem de águas, são apresentados no Anexo B.

A captação da água foi realizada, sempre que possível, na profundidade correspondente ao ponto médio do tubo-filtro, considerando a distância mínima de 0,5 m do fundo do poço e/ou do nível de sedimentos para se evitar a geração de turbidez.

Durante o manuseio dos frascos destinados ao acondicionamento das amostras, dos equipamentos e materiais de amostragem, foram utilizadas luvas descartáveis, trocadas a cada poço amostrado. As tampas dos frascos, assim com as mangueiras e demais matérias de

coleta, foram sempre colocadas em local apropriado, sem contato direto com o piso local para se evitar quaisquer contaminações da amostra.

Os poços tubulares profundos (255 e 1204), localizados na Área 3, também foram amostrados utilizando-se a técnica de baixa vazão. Porém, as amostras foram coletadas em diferentes profundidades utilizando-se de obturadores para o isolamento do nível a ser amostrado e, desta forma, permitir a coleta de amostras representativas das fraturas selecionadas. As coletas das amostras desses poços foram realizadas por Barbosa (2017).

Os sistemas de monitoramento multinível (*Multilevel monitoring systems – MLSs*) CMT e *West Bay*, localizados na Área 5, também foram amostrados utilizando-se a técnica de baixa vazão. As coletas das amostras desses poços foram realizadas por Lojkasek-Lima (2016).

5.8 Análises isotópicas

As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas (CEPAS), do Instituto de Geociências (IGc) da USP, para análises isotópicas de O e H; e no Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo), do Instituto de Geociências (IGc) da USP, para análises isotópicas de Sr ($^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$).

No preparo das amostras de água para análise de isótopos estáveis, essas foram coletadas em frascos de vidro âmbar, para reduzir a penetração de luz, de 10 ou 20 mL, preenchidos completamente e fechados com batoque, para se evitar a formação de bolhas, e, assim, não ocorrer o fracionamento isotópico das amostras. Até o momento de serem analisadas, as amostras permaneceram refrigeradas.

As análises foram executadas no equipamento Picarro L2130i e processadas por meio do *software* LIMS para Lasers, de acordo com IAEA/WMO. (2013). Todas as amostras foram corrigidas segundo padrões internacionais da IAEA, e/ou padrões internos do laboratório calibrados pela IAEA.

As amostras de água para análises isotópicas de Sr foram coletadas utilizando-se frascos de material inerte (polietileno de baixa densidade – PEBD), de 200 ou 250 mL, previamente descontaminados, de acordo com o procedimento de Martins et al. (2008).

Após a coleta, as amostras foram filtradas com filtros de 300 cm² de área e membrana de 0,45 µm. Antes de receber a amostra filtrada, o frasco de coleta foi lavado com água filtrada proveniente do poço amostrado, antes de receber o volume total de amostra. Por fim, as amostras foram preservadas com HNO₃, rebaixando-se o pH até aproximadamente 2, a fim de evitar a precipitação de Sr, e mantidas refrigeradas a < 4°C, evitando reações químicas.

Conforme procedimento descrito em Martins (2008), previamente às análises isotópicas de Sr, as amostras são preparadas. Colocam-se aproximadamente 80 mL de amostra em béquer de teflon Savillex® de 90 mL que é levado a uma chapa elétrica à baixa temperatura, ou

cerca de 80°C, para serem evaporados. Em etapa posterior, o resíduo dessa evaporação passa por dissolução com 3 mL de HF (concentrado) e 1 mL de HNO₃ (concentrado) e aquecimento durante 48 h a 100°C. Novamente a solução é evaporada e o resíduo, desta vez, sofre dissolução com 5 mL de HCl 6N, para então ser mais uma vez aquecida durante 24 h. Após este período de aquecimento, a solução é transferida para um Savillex® de 7 mL, descontaminado e pesado, e assim a alíquota que será utilizada para a diluição isotópica (DI) é separada. O traçador de Sr (⁸⁴Sr) é então adicionado à solução DI (20 µL) e as soluções DI e natural passam por nova etapa de evaporação.

No procedimento de preparação das amostras para análises de Sr, descrito por Martins (2008), estas são colocadas em HNO₃ 2M, e levadas para purificação em coluna de teflon retrátil com 80 mg de resina não iônica de éster-polímero de 100-150 mesh, Sr spec (Eichrom®). Por fim, realiza-se a coleta de Sr utilizando-se 3 mL de HNO₃ 0,05M, sendo adicionados 5 µL de H₃PO₄ à solução da amostra antes de sua evaporação. A etapa de deposição é realizada em filamento de tântalo.

As análises isotópicas de Sr foram executadas no Espectrômetro de Massas de Termoionização (TIMS) - Thermo Triton. As razões isotópicas ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr foram normalizadas para o valor de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0,1194. O branco de Sr durante a análise foi de 134 pg. O valor médio para a razão ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr do padrão NBS-987 de novembro/2013 a outubro/2014 foi 0.710236 ± 0.000020. Os resultados das análises isotópicas estão apresentados no Anexo B.

5.9 Tratamento de dados hidroquímicos e isotópicos

Os dados hidroquímicos e isotópicos das amostras de água foram tratados no software Aquachem 5.1.33 (SCHLUMBERGER, 2006). Esse software executa os cálculos para avaliação de controle de qualidade (balanço iônico e relação entre condutividade elétrica e soma dos cátions), bem como os cálculos para a elaboração dos diagramas de piper e demais gráficos aplicados na interpretação dos resultados analíticos.

5.10 Controle de qualidade dos resultados

Os resultados dos procedimentos de garantia e controle de qualidade para análises dos laboratórios utilizados (análises em brancos, padrões de concentrações conhecidas e em duplicatas) indicaram que os resultados analíticos apresentaram precisão satisfatória.

Os resultados das análises hidroquímicas foram submetidos aos seguintes controles de qualidade: cálculo de balanço iônico e relação entre condutividade elétrica e soma dos cátions. Esses procedimentos tiveram como objetivo identificar possíveis desvios na execução das análises e selecionar as amostras a serem utilizadas para os estudos hidroquímicos.

O cálculo do balanço iônico (E) foi determinado por meio da equação $E = 100 \times (\Sigma \text{ cátions} - \Sigma \text{ ânions}) / (\Sigma \text{ cátions} + \Sigma \text{ ânions})$.

Nessa equação, considera-se as concentrações de cátions e ânions expressas em meq/L. Os resultados do cálculo do balanço iônico estão apresentados no Anexo B. Todas as amostras que apresentaram erro relativo maior que 15% foram descartadas, à exceção da amostra de esgoto, a qual apresentou desvio de -34%. Infere-se que esse desvio ocorreu devido à ausência da análise de NH_4^+ na amostra. Caso as análises indicassem uma condição de eletroneutralidade, os teores de NH_4^+ seriam de aproximadamente 80 mg/L, valor compatível com esgoto in natura. Assim, a amostra de esgoto foi considerada devido à sua importância para os estudos hidroquímicos. A média do erro relativo das amostras consideradas, incluindo a amostra de esgoto, é de -1,91% e o desvio padrão de 5,94%. Apenas 4 amostras (5% do total com resultados hidroquímicos considerados) apresentaram desvios entre 10 e 15% (Chuva-abr13, SP1204-180-182, SP1204-243-256 e SP255-59-62).

O quociente entre condutividade elétrica (expressa em $\mu\text{S}/\text{cm}$) e soma dos cátions (expressa em meq/L), deve estar entre 90 e 110 (HOUNSLOW, 1995). Para as análises efetuadas, conforme mostram os resultados apresentados no Anexo B, foi verificado que esse quociente variou entre 60 e 427, com somente 25 amostras (35% do total daquelas que possuem resultados de condutividade elétrica) com quociente dentro da faixa considerada satisfatória. Assim, considerando que foram obtidos resultados satisfatórios de balanço iônico, que indicaram confiabilidade dos resultados de cátions e ânions, foram desconsiderados os resultados de condutividade elétrica na interpretação dos resultados.

6 RESULTADOS

6.1 Aspectos geológicos e hidrogeológicos

Os dados utilizados para a elaboração do modelo geológico e hidrogeológico conceitual da área estudada foram obtidos, principalmente, a partir da avaliação e interpretação de perfis litológicos compilados de estudos realizados por empresas de consultoria nas áreas 1 a 5 e disponibilizados para consulta pela CETESB (Anexo A), além das informações obtidas, principalmente, junto aos trabalhos de L'Apicciarella (2009), Barbosa (2015) e Lojkasek-Lima (2016). O conjunto dos dados selecionados e interpretados permitiu a elaboração de seções hidrogeológicas para ilustrar o modelo proposto.

Segundo Fiume (2013), foram observados três padrões diferentes de terreno na área de estudo, correspondendo à unidades geológicas existentes: 1) porção oeste, apresentando terreno mais acidentado e afloramento do embasamento; 2) porção leste mais elevada, apresentando depósitos sedimentares terciários da BSP, e 3) porção leste mais plana, apresentando depósitos quaternários (aluvionares). Segundo a autora, neste último, que abrange a área com menor cota topográfica dentre os três padrões de terreno, estão localizados o Canal do Jurubatuba e todos os poços tubulares profundos utilizados no estudo, assim como a Represa Guarapiranga. Porém, salienta, que a Represa Guarapiranga apresenta cota superior à dos poços.

6.1.1 Modelo geológico conceitual

Os seguintes compartimentos geológicos foram identificados na área de estudo:

6.1.1.1 *Depósitos tecnogênicos*

Abrange extensa área sendo constituídos na maior parte por aterros de granulometria variada, apresentando desde materiais argilo-arenosos a areno-argilosos de cor marrom a marrom-avermelhados, contendo por vezes brita, cascalho e entulho. A espessura média observada é de 1,0 m, mas ocorrem em espessuras maiores, entre 2,5 e 4,0 m.

6.1.1.2 *Depósitos aluvionares*

Os aluviões estão distribuídos por toda a área, ocorrendo abaixo da camada de Depósitos Tecnogênicos. Nesse pacote aluvionar, o topo é marcado pela presença de uma camada de argila com matéria orgânica, de coloração preta, plástica, espessura média de 1,0 m, distribuindo-se de forma abrangente pela área de estudo.

Abaixo das argilas orgânicas ocorrem sedimentos arenosos, também com distribuição abrangente e espessura média de 3,0 m. Nesse pacote mais arenoso estão presentes areias

finas no topo, que gradam para areias médias, areias grossas e cascalho em direção à base do pacote, indicando granodecrescência ascendente dos sedimentos. São observadas e descritas a presença de lentes argilosas de tamanho variado intercaladas aos sedimentos arenosos, submétricas a métricas de argila e argila arenosas são observadas ocasionalmente intercaladas a esses sedimentos.

6.1.1.3 Sedimentos paleógenos da Bacia de São Paulo

Os sedimentos da Bacia de São Paulo (BSP) foram identificados na maior parte das áreas, apresentando maior espessura a noroeste, na Área 1, chegando a quase 50 m. Nessa porção da área o saprolito, ou manto de alteração, está a maiores profundidades, enquanto que na porção sul-sudeste da área, junto às áreas 2 e 3, o saprolito se encontra a 6,0 m de profundidade, sotoposto aos depósitos aluvionares.

O pacote de sedimentos da BSP, identificado na área de estudo, é muito heterogêneo. No topo, no contato com os depósitos aluvionares, é observada de forma abrangente uma camada de argila a argila arenosa, compacta, de espessura métrica, que apresenta variações laterais, gradando a sedimentos arenosos finos. Abaixo das argilas, ocorrem areias mal selecionadas, por vezes contendo seixos arredondados e intercalações de argila-arenosa de espessura entre 1,0 e 5,0 m.

6.1.1.4 Manto de alteração

A ocorrência do saprolito, ou manto de alteração, foi observada em profundidades mais rasas nas porções sul, oeste e a leste da área estudada, respectivamente, nas áreas 2, 3 e 5. Nessas localidades, o saprolito está em contato direto com os depósitos aluvionares.

O saprolito é composto por minerais de alteração resultantes do intemperismo dos gnaisses, xistos, migmatitos e granitoides que compõem o embasamento cristalino. Quanto aos aspectos texturais, nas porções mais superiores há predominância de argila, além de silte e areia em menor expressão. Nas porções mais inferiores do saprolito a sua textura argilosa grada à arenosa, apresentando grânulos de quartzo e fragmentos de rocha, além de tornar mais evidente as foliações xistosa/gnáissica reliquiares da rocha de origem. Em relação à espessura do saprolito, observa-se uma variação de 5,0 m, na Área 5, a mais de 50 m, aproximadamente, na Área 1. Na porção sul (áreas 2 e 3), a espessura alcança até 15 m.

6.1.1.5 Rocha alterada a rocha sã

Lojkasek-Lima (2016), em trabalhos realizados na porção leste da área, na Área 5, durante a perfuração do poço MP-01, descreveu em detalhe o perfil litológico e mineralógico desse poço, cujos resultados estão sendo utilizados no presente estudo.

A rocha alterada mole, sotoposta ao saprolito, apresentou espessura aproximada de 7,4 m, sendo composta por camadas métricas de areia fina a média, pouco siltosas, com estruturas

reliquiaries e outros elementos associados à alteração da rocha gnáissica fina (cristais de feldspato alterados, quartzo, óxidos e muscovita).

Na classificação que Lojkasek-Lima (2016) utilizou, definiu que o limite entre a rocha alterada dura e rocha sã seria determinado pela resistência do material perfurado à técnica de perfuração empregada, ou seja, definida pelo limite de perfuração do trado oco helicoidal (*Hollow Stem Auger*) e início da perfuração usando sonda rotativa com coroa diamantada. Assim, constatou que a espessura de rocha alterada dura apresenta 45,2 m, marcando o topo da rocha sã a 60,0 m de profundidade, sendo caracterizada por três litotipos principais: pegmatito, gnaiss bandado e gnaiss fino, os quais se intercalam em intervalos de centímetros a metros ao longo do perfil. A Figura 6.1.1.1 apresenta a localização das seções geológicas A-A' (Figura 6.1.1.2) e B-B' (Figura 6.1.1.3), elaboradas para ilustrar os compartimentos geológicos foram identificados na área de estudo.

Figura 6.1.1.1 – Localização das seções geológicas e hidrogeológicas A-A' e B-B'.

Figura 6.1.1.2 – Seção geológica A-A'.

Figura 6.1.1.3 – Seção geológica B-B'.

6.1.2 Modelo hidrogeológico conceitual

Considerando os compartimentos geológicos identificados, na elaboração do modelo hidrogeológico conceitual foram individualizadas 2 unidades aquíferas na área estudada, definidos como aquífero de porosidade intergranular (sedimentar e do manto de intemperismo) e fraturado, conforme descrito a seguir.

6.1.2.1 *Aquífero de porosidade intergranular*

Nesse aquífero estão presentes as seguintes unidades:

1) Constituída pelos depósitos tecnogênicos e sedimentos aluvionares, apresenta porosidade primária e possui caráter livre. Os resultados dos ensaios hidráulicos executados em poços de monitoramento posicionados nessa unidade forneceram a condutividade hidráulica na ordem de 10^{-3} cm/s, representativa de sedimentos mais arenosos, característicos das porções basais dos aluviões existentes na área (BARBOSA, 2015);

2) Constituída pelos sedimentos da BSP, em geral arenosos e espessos, apresenta porosidade primária e possui caráter de semi-confinamento, devido à presença de camada de sedimentos compactos argilosos a argilo-arenosos localizados na sua porção superior. Os resultados dos ensaios hidráulicos executados em poços de monitoramento posicionados nessa unidade forneceram a condutividade hidráulica na ordem de 10^{-4} cm/s (BARBOSA, 2015; e.

3) Constituída pela porção intemperizada (manto de intemperismo) do aquífero fraturado, apresenta constituição heterogênea devido às diferentes litologias que compõem o embasamento cristalino e seu grau de intemperismo, e porosidades primária a secundária, segundo o grau de preservação das estruturas reliquias da rocha de origem. Os resultados dos ensaios hidráulicos executados em poços de monitoramento posicionados nessa unidade forneceram a condutividade hidráulica na ordem de 10^{-6} a 10^{-7} cm/s (BARBOSA, 2015).

6.1.2.2 *Aquífero fraturado*

Representado pelas rochas do embasamento, constituídas por micaxistos e biotita gnaisses migmatíticos, que na área estudada ocorrem de forma intercalada e alongada na direção NE e concordante com a foliação das rochas do Complexo Embu (FIUME, 2013). Nesse aquífero, a água circula através dos lineamentos estruturais como falhamentos, juntas associadas e fraturas abertas da rocha sã, caracterizando o aquífero como livre a semi-livre, heterogêneo e anisotrópico (DAEE, 1975).

A profundidade do topo do embasamento apresenta variações nas proximidades do Canal do Jurubatuba, mas que não é compatível com uma escarpa de falha e deve corresponder simplesmente a paleo-relevo devido à baixa declividade observada (FIUME, 2013).

6.1.2.3 Potenciometria e fluxos subterrâneos

Em todas as unidades aquíferas avaliadas, o sentido principal do fluxo é de leste para oeste, concordante com a topografia do terreno, em direção ao Canal do Jurubatuba, apresentando baixo gradiente horizontal. A Figura 6.1.2.1 apresenta o mapa potenciométrico da área estudada.

Também foram identificados fluxos verticais ascendentes e descendentes na área estudada. Nos poços da Área 1, localizada a norte da área de estudo, as cargas hidráulicas indicam, predominantemente, fluxos verticais ascendentes, enquanto que nas áreas 2 e 3, as cargas hidráulicas indicam fluxos verticais descendentes em poços mais distantes do Canal do Jurubatuba e, portanto, mais próximos da Av. das Nações Unidas, e ascendentes nos conjuntos de poços multiníveis que estão mais próximos do Canal do Jurubatuba, na zona de descarga dos aquíferos de porosidade intergranular.

A Figura 6.1.2.2 apresenta a variação do nível d'água dos poços da Área 1 durante o período monitorado (dez/12 a out/15), mostrando que o poço PP-02, durante todo o período apresentou os níveis d'água mais rasos em relação aos poços PM-21 e PM-23. Considerando que a topografia da Área 1 é praticamente plana, o *datum* utilizado para a comparação entre os níveis d'água ou, nesse caso, as cargas hidráulicas, foi o nível do terreno.

Visto que o PP-02 está posicionado para monitorar o aquífero de porosidade intergranular (manto de intemperismo) a 65,0 m de profundidade e os poços PM-21 e PM-23 monitoram o aquífero de porosidade intergranular raso (sedimentar), respectivamente, a 5,2 m e 3,8 m de profundidade, os resultados do monitoramento do nível d'água desses poços são indicativos da presença de fluxo vertical ascendente.

Figura 6.1.2.1 – Mapa potenciométrico.

Figura 6.1.2.2 – Variação do nível d'água dos poços da Área 1, durante o período monitorado (dez/12 out/15).

A ilustração das unidades aquíferas na área estudada está apresentada nas seções hidrogeológicas A-A' (Figura 6.1.2.3) e B-B' (Figura 6.1.2.4), cujas localizações estão na Figura 6.1.1.1.

Figura 6.1.2.3 – Seção hidrogeológica A-A'.

Figura 6.1.2.4 – Seção hidrogeológica B-B'.

6.2 Monitoramento dos dados meteorológicos

Os dados meteorológicos diários como pluviometria, umidade relativa do ar e temperaturas máximas e mínimas, a serem utilizados no balanço hídrico para a quantificação da recarga, foram fornecidos pelo CGE-SIURB. Dentre as estações meteorológicas, foi selecionada a estação localizada no bairro M'Boi Mirim, denominada MB, pela sua maior proximidade da área de estudo. No Anexo E são apresentados todos os dados meteorológicos, referentes ao período compreendido entre outubro/2012 e abril/2016, compreendendo 3 anos hidrológicos.

No Município de São Paulo existem duas épocas climáticas bem definidas, uma chuvosa, que abrange os meses de outubro a março, e outra seca, de abril a setembro. Os estudos de recarga, neste trabalho, avaliaram 3 anos hidrológicos, compreendidos entre os períodos de janeiro a dezembro/2013, janeiro a dezembro/2014 e janeiro a dezembro/2015.

As quantidades acumuladas de chuvas nos períodos considerados, ou seja, janeiro a dezembro/2013, janeiro a dezembro/2014 e janeiro a dezembro/2015, foram, respectivamente, de 993,7 mm, 1.147,8 mm e 1.341,1 mm.

A distribuição da precipitação e da temperatura média mensal ao longo dos meses, no período total avaliado, está apresentada na Figura 6.2.1.

Figura 6.2.1 – Gráfico de distribuição da precipitação pluviométrica e da temperatura média mensal no período avaliado.

6.3 Monitoramento do nível d'água dos poços

Os resultados do monitoramento dos níveis de água dos poços de monitoramento e tubulares profundos, apresentados no Anexo D, foram utilizados para o cálculo da recarga dos aquíferos através do método de variação do nível de água, além de fornecer dados para a elaboração do modelo conceitual hidrogeológico da área estudada.

No Anexo F são apresentados os gráficos de variação do nível da água dos poços ao longo dos períodos monitorados, juntamente com a quantidade acumulada de chuvas diária e mensal.

Considerando a necessidade de ser avaliada a resposta da variação do nível d'água dos poços em relação aos eventos de chuva registrados, marcada pela sua subida e descida ao longo do tempo, os dados foram tratados para análises diárias e mensais dessas variações. A influência do tipo de cobertura e, por consequência, do grau de impermeabilização da área de estudo, na recarga dos aquíferos estudados, também foi incluída na análise, comparando-se as variações do nível d'água, entre poços localizados em terrenos com diferentes graus de impermeabilização.

Assim, conforme os critérios adotados para a classificação, segundo o grau de impermeabilização, na área estudada, há poços instalados em: a) locais sem impermeabilização, com ou sem cobertura de grama; b) locais parcialmente impermeabilizados, com piso de bloquete; e c) locais totalmente impermeabilizados, com piso revestido por concreto ou asfalto.

Adotou-se como *datum*, ou ponto zero (0), para as medições de variação do nível d'água, a boca do tubo de cada poço monitorado.

6.3.1 Acumulado de chuvas mensal

Avaliando-se o acumulado de chuvas mensal e a variação do nível d'água no respectivo mês é notável que, apesar de serem registradas precipitações durante os meses mais secos do ano, o declínio do nível d'água é mais evidente e contínuo nesses meses, indicando que a recarga do aquífero não está sendo efetiva, ou seja, a quantidade de chuva registrado é insuficiente para resultar em recarga. Os resultados do monitoramento dos tensiômetros, apresentados no próximo item, mostraram as maiores pressões, que são indicativas de menor umidade no solo, entre os meses de maio e outubro/14, período em que a pluviometria média mensal indicou baixas quantidades, entre 12,2 mm e 59,2 mm. Assim, durante os meses mais secos, possivelmente, as águas da chuva não foram suficientes para atingir o aquífero, concordando com os resultados do monitoramento da variação do nível d'água conforme discutido.

A discussão considerando os períodos mais chuvosos é análoga, o impacto da maior quantidade de chuvas, registrado entre novembro/14 e março/15, na umidade da zona não saturada pode ser observada pelos menores valores de pressão registrados pelos tensiômetros. Nesse período, a pluviometria média mensal ficou sempre acima de 100 mm e, possivelmente, as águas de chuva sempre atingiram o aquífero, resultando em recarga.

Os principais resultados da avaliação mensal do monitoramento do nível d'água dos poços monitorados, referente aos 3 anos hidrológicos, considerando o início (níveis d'água mais baixos) e pico (níveis d'água mais elevados) dos eventos de recarga, compreenderam os períodos descritos a seguir:

- 1º Período (maio/13 a abril/14): período de registros regulares, com início da recarga entre maio e agosto/13 e pico em março/14;

- 2º Período (maio/14 a abril/15): período de registros irregulares, marcado por possíveis consequências de um período mais longo de estiagem registrado entre os anos de 2013 e 2014. O início mais frequente da recarga observado foi em novembro/14, seguido de outubro/14 e setembro/14, e o pico mais frequente em março/15;

- 3º Período (maio/15 a abril/16): período de registros regulares, com início da recarga em agosto/15 e pico em novembro/15. Esse período deve ser avaliado com ressalvas, pois apesar dos registros pluviométricos indicarem os maiores índices, em mm, entre os meses de novembro e março/16, os transdutores de pressão tiveram a sua operação paralisada, na maioria dos poços monitorados, entre setembro e dezembro/15, principalmente, devido a problemas técnicos.

As Figuras 6.3.1.1 a 6.3.1.4, a seguir, apresentam de forma agrupada, os poços de monitoramento com comportamentos similares quanto às respostas na variação do nível d'água ao longo dos períodos monitorados. No Anexo F são apresentados todos os gráficos de variação do nível da água dos poços monitorados, individualmente, ao longo dos 3 períodos monitorados, juntamente com o acumulado de chuvas mensal.

Figura 6.3.1.1 – Gráfico de variação do nível d'água x precipitação mensal acumulada, PMs 19 e 21, período de março/13 a setembro/15.

Figura 6.3.1.2 – Gráfico de variação do nível d'água x precipitação mensal acumulada, PMs 19A e 39A, período de março/13 a setembro/15.

Figura 6.3.1.3 – Gráfico de variação do nível d'água x precipitação mensal acumulada, PMNs 4A e 4B, e PM-23, período de março/13 a novembro/15.

Figura 6.3.1.4 – Gráfico de variação do nível d'água x precipitação mensal acumulada, PP-02, P-255, P-1204, P-1401 e P-1346, período de março/13 a agosto/15.

6.3.2 Avaliação diária

Selecionou-se para a avaliação diária os meses de março/2013 e de março/2014, dentro do período chuvoso. Os resultados são apresentados a seguir.

6.3.2.1 Poços de monitoramento dos aquíferos de porosidade intergranular

Os resultados da comparação não indicaram diferenças significativas entre os poços de monitoramento dos aquíferos de porosidade intergranular, à exceção do PP-02 analisado em conjunto com os poços do aquífero fraturado, em relação ao tipo de cobertura e grau de impermeabilização, quando avaliados pelo acumulado de chuvas mensal. Dessa forma, foi realizada uma análise mais detalhada com a avaliação de eventos de chuvas diárias e a resposta à recarga.

Os poços PM-21 e PM-19, localizados em terrenos sem impermeabilização a parcialmente impermeabilizado apresentaram o mesmo comportamento. O nível d'água iniciou a subida imediatamente a eventos de chuva acima de 15 mm, aproximadamente, atingindo o pico, antes de iniciar a descida, em até 24 horas, sob um acumulado de chuvas, aproximado, de 25 mm a 35 mm (Figura 6.3.2.1). Comportamento similar foi observado nos poços PMN-2A e PM-39, localizados em área totalmente impermeabilizada, com piso revestido por concreto, também apresentaram esse comportamento. A profundidade dos poços, que variou entre 3,5 m e 6,8 m não influenciou na resposta da precipitação à subida do nível d'água.

Figura 6.3.2.1 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, PMs 19 e 21, períodos março/13 e março/14.

Os poços PM-23, PMN-4A, PMN-4B, localizados em área totalmente impermeabilizada, apresentaram comportamento semelhante em relação à resposta de subida imediata a eventos de chuva acima de 15 mm, porém, atingiram o pico, antes de iniciar a descida, em até 48 horas, sob um acumulado de chuvas, aproximado, de 25 mm a 35 mm (Figuras 6.3.2.2 6.3.2.3). A profundidade dos poços, que variou entre 3,8 m e 14,2 m não influenciou na resposta da subida do nível d'água.

Figura 6.3.2.2 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, PMNs 4A e 4B, e PM-23, períodos março/13 e março/14.

Figura 6.3.2.3 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, detalhe para o PM-23, períodos março/13 e março/14.

Os poços PM-19A e PM-39A, localizados em terreno sem impermeabilização e em área totalmente impermeabilizada, respectivamente, apresentaram comportamento similar a todos os demais descritos em relação à resposta de subida imediata a eventos de chuva, acima de 15 mm, aproximadamente, sob um acumulado de chuvas, aproximado, de 25 mm a 35 mm (Figuras 6.3.2.4 a 6.3.2.6), porém, atingiram o pico, antes de iniciar a descida, em até 72 horas. A profundidade dos poços, que variou entre 19,6 m e 14,7 m, nesses casos, pode ter influenciado na resposta mais lenta da subida do nível d'água durante eventos de precipitação.

Figura 6.3.2.4 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, PMs 19A e 39A, períodos março/13 e março/14.

Figura 6.3.2.5 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, detalhe para os PMs 19A e 39A, período março/2013.

Figura 6.3.2.6 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, detalhe para os PMs 19A e 39A, período março/2014.

6.3.2.2 Poços do aquífero fraturado

Os poços utilizados para a avaliação compreendem o poço PP-02, que apesar de monitorar o nível intemperizado do aquífero fraturado, e assim classificado neste trabalho como pertencente ao aquífero de porosidade intergranular, devido ao seu comportamento quanto à variação do nível d'água foi analisado em conjunto com os poços tubulares profundos P-255, P-1204, P-1401 e P-1346, posicionados para captação de águas profundas, no aquífero fraturado.

O comportamento desses poços, à exceção do P-1346, apresenta algumas similaridades. A resposta do nível d'água desses poços é mais efetiva em eventos de chuva acima de 30 mm, aproximadamente. Porém, o tempo para ser atingido o pico, antes de iniciar a descida, foi de 48 h para o PP-02 e 72 h para os demais poços, sob um acumulado de chuvas, aproximado, de 25 mm a 35 mm (Figura 6.3.2.7). Nesses casos, não há como avaliar, comparativamente, possíveis interferências da cobertura do terreno na infiltração da água de chuva, uma vez que todos estão em local com piso impermeável.

O comportamento diferenciado, observado no P-1346 pode ser explicado: 1) pelo maior tempo necessário para que o nível d'água responda aos eventos de chuva, ou seja, de 5 dias; 2) pela necessidade de haver um acumulado de precipitação maior, superior ao observado nos demais poços profundos avaliados, e 3) apesar das restrições de uso das águas subterrâneas na região de estudo, não se pode descartar a possibilidade de estar havendo bombeamento dessas águas em propriedades vizinhas.

Figura 6.3.2.7 – Gráficos de variação do nível d'água x precipitação diária acumulada, PP-02, P-255, P-1204, P-1401 e P-1346, períodos março/13 e março/14.

6.4 Monitoramento dos tensiômetros

O monitoramento dos tensiômetros teve por objetivo a obtenção da pressão de fluido, ou potencial matricial, do solo não saturado.

As medições diárias dos 4 conjuntos foram realizadas no período compreendido entre abril/2014 e março/2015. Porém, devido à baixa pluviosidade registrada, entre abril e novembro/2014, aproximadamente, os resultados das medições dos tensiômetros registraram,

frequentemente, a ocorrência de solo seco, ou com pouca umidade, nas duas profundidades monitoradas. Assim, visto a ausência de chuvas, a frequência das medições nesse período passou de diária a semanal, intensificam-se, porém, nas ocorrências de eventos de chuvas. Esses dados são sendo apresentados no Anexo C.

Durante o período em foi registrada a ocorrência frequente de solo seco, foi observada uma expressiva redução da água que preenche os tensiômetros, alterando o seu correto funcionamento. Este fato motivou, por inúmeras vezes, a necessidade de manutenção dos tensiômetros, com a remoção da tampa de borracha, para completá-los com água mineral fervida.

No caso dos tensiômetros instalados em área impermeabilizada, possivelmente, o revestimento de concreto do piso também contribuiu para a redução de água observada no interior dos mesmos.

O valor da tensão de água no solo depende da profundidade da cápsula porosa do tensiômetro na zona não saturada do solo e foi calculado a partir da leitura do valor indicado pelo tensiômetro. Na avaliação dos dados das medições, os resultados do obtidos em kPa foram inicialmente convertidos para mH_2O e corrigidos segundo a profundidade da cápsula porosa na zona não saturada do solo, assumindo-se como *datum* o nível do terreno (Tabela 6.4.1).

As maiores pressões observadas, que são indicativas de menor umidade no solo, ocorreram entre os meses de maio e outubro/14. Nesses meses, a pluviometria média mensal indicou baixas quantidades, entre 12,2 mm e 59,2 mm. Conforme a discussão apresentada no item anterior, o monitoramento do nível d'água dos poços dos aquíferos de porosidade intergranular evidenciou que somente em eventos de chuva diários com quantidades acima de 15 mm, aproximadamente, são observadas variações positivas do nível d'água. Dessa forma, durante os meses mais secos, possivelmente, as águas da chuva não foram suficientes para atingir o aquífero (Figura 6.4.1).

O impacto da maior quantidade de chuvas, registrado entre novembro/14 e março/15, na umidade da zona não saturada pode ser observada pelos menores valores de pressão registrados pelos tensiômetros. Nesse período, a pluviometria média mensal ficou sempre acima de 100 mm e, possivelmente, as águas de chuva atingiram o aquífero.

O comportamento das pressões entre as profundidades monitoradas, em cada conjunto de tensiômetros, apresentou-se similar, sem diferenças significativas. Nos conjuntos instalados em área sem impermeabilização do terreno, às profundidades de 0,35 m e 0,70 m, observa-se que na segunda profundidade a umidade sempre se mantém ligeiramente mais elevada, demonstrada pelas menores pressões registradas. Já nos conjuntos instalados em local com impermeabilização, as diferenças de pressão entre as profundidades monitoradas são mínimas e nem sempre menores.

Quando são comparadas as pressões registradas nos conjuntos instalados em área sem impermeabilização do terreno com aqueles instalados em local com impermeabilização, observam-se os mesmos padrões, porém, naqueles em área com cobertura de concreto as pressões são ligeiramente menores ao longo de todo o período monitorado. Uma possível explicação pode estar relacionada com a cobertura, que retém um pouco mais a umidade da zona não saturada durante os períodos mais secos e mais chuvosos.

Tabela 6.4.1 - Resultados do monitoramento dos tensiômetros

Mês/Ano	T-01/02 A média (35 cm)		T-01/02 B média (70 cm)		T-03/04 A média (35 cm)		T-03/04 B média (80 cm)		Pluviometria média mensal (mm)
	unidade		unidade		unidade		unidade		
	Kpa	mH ₂ O	Kpa	mH ₂ O	Kpa	mH ₂ O	Kpa	mH ₂ O	
abril/14	24	2,44	28	2,85	17	1,73	16	1,63	33,6
maio/14	37	3,77	34	3,46	30	3,06	31	3,16	25,5
junho/14	38	3,87	36	3,47	32	3,26	32	3,26	18,9
julho/14	36	3,67	37	3,77	31	3,16	32	3,26	17
agosto/14	39	3,97	38	3,87	33	3,36	32	3,26	32,7
setembro/14	40	4,08	39	3,97	33	3,36	32	3,26	59,2
outubro/14	42	4,28	40	4,08	32	3,26	32	3,26	12,2
novembro/14	28	3,97	28	4,18	25	3,36	25	3,36	128,4
dezembro/14	13	1,42	17	1,73	12	1,22	14	1,42	240,2
janeiro/15	8	0,81	6	0,61	5	0,51	4	0,41	107
fevereiro/15	5	0,51	5	0,51	4	0,41	4	0,41	212,9
março/15	6	0,61	6	0,61	4,5	0,46	4,5	0,46	170,1
abril/15	33	3,36	32	3,26	30	3,06	31	3,16	17,5

Figura 6.4.1 – Gráfico de variação da pressão dos tensiômetros durante o período monitorado.

6.5 Hidroquímica

Considerando que as águas subterrâneas, na área estudada, são efetivamente compostas pela mistura de diferentes fontes de recarga, representadas por fontes naturais (infiltração da precipitação e perdas da rede coletora de águas pluviais) e fontes antrópicas, decorrentes de perdas dos sistemas de abastecimento público de água e de esgoto, a análise dos resultados integrou e correlacionou os dados hidroquímicos obtidos, para avaliar a atuação dos processos naturais, das possíveis influências antrópica e da dinâmica das águas subterrâneas na sua composição.

A caracterização hidroquímica envolveu a análise química e tratamento de dados de amostras das potenciais fontes de recarga natural e antrópica, assim como de uma seleção de poços de monitoramento distribuídos na área estudada. Os dados foram tratados no software Aquachem 5.1.33 (SCHLUMBERGER, 2006), que executou os cálculos para a elaboração dos diagramas de Piper e demais gráficos aplicados na interpretação dos resultados analíticos, assim como os cálculos para avaliação de controle de qualidade (balanço iônico e relação entre condutividade elétrica e soma dos cátions).

A seleção dos parâmetros analíticos, cátions e ânions, incluiu aqueles que são considerados principais indicadores das fontes de recarga antrópica, como o esgoto e a água da SABESP, além daqueles indispensáveis para a caracterização e classificação hidroquímica das águas subterrâneas dos aquíferos avaliados.

Conforme já apresentado e discutido no item 5.10, os resultados dos procedimentos de garantia e controle de qualidade analítica apresentaram precisão e exatidão satisfatórias. Os resultados do cálculo de balanço iônico e relação entre condutividade elétrica e soma dos cátions (Anexo B) apresentaram os seguintes resultados principais:

- 1) Todas as amostras que apresentaram erro relativo maior que 15% foram descartadas, à exceção da amostra de esgoto (-34%), mantida devido à sua importância para os estudos hidroquímicos.
- 2) A média do erro relativo das amostras consideradas, incluindo a amostra de esgoto, é de -1,91% e o desvio padrão de 5,94%.
- 3) O quociente entre condutividade elétrica e soma dos cátions, indicou resultados dentro da faixa considerada satisfatória em somente 25 amostras (35% do total daquelas que possuem resultados de condutividade elétrica). Porém, considerando que foram obtidos resultados satisfatórios de balanço iônico, os quais indicam confiabilidade dos resultados de cátions e ânions, foram desconsiderados os resultados de condutividade elétrica.

Dentre os indicadores das potenciais fontes de recarga antrópica utilizados neste estudo foram selecionados, inicialmente, por serem os mais comuns, os íons Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ e SO_4^{2-} .

para identificação de contribuição de esgoto na recarga, e F^- para identificação de contribuição de água da rede de abastecimento (SABESP).

A presença de fluoreto na água da rede de abastecimento está relacionada ao processo de fluoretização durante o seu tratamento. Assim, poderia ser um indicador da presença dessas águas na recarga dos aquíferos, em função de perdas da rede. Porém, tendo em vista a sua intensa participação em reações de adsorção com argilominerais, o fluoreto tende a desaparecer imediatamente após a infiltração das águas. Ademais, uma vez que a água do esgoto é proveniente da rede de abastecimento, a aplicação somente desse indicador, para identificar as diferentes fontes, não é eficaz.

Apesar de serem importantes indicadores de contribuição de esgoto na recarga dos aquíferos, a presença, principalmente, dos íons Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , além do SO_4^{2-} , em menor importância, dissolvidos na água subterrânea pode ter como origem outras fontes naturais e também antrópicas.

Dentre os indicadores da presença de esgoto na água subterrânea, os compostos nitrogenados, amônio e nitrato, estão relacionados e suas concentrações na água subterrânea podem estar controladas por processos físico-químicos e biológicos. O amônio passa a nitrito e nitrato, no processo de nitrificação, por oxidação química em meio aeróbio, inibindo a sua presença nessas condições. Já o nitrato e o nitrito, podem sofrer desnitrificação em condições redutoras, na presença de matéria orgânica, transformando-se em gás nitrogênio.

Os resultados das análises hidroquímicas das amostras coletadas entre os anos de 2013 e 2017 estão apresentados no Anexo B. Para a análise e interpretação desses resultados, essas amostras foram agrupadas da seguinte forma:

- 1) Chuva: amostras Chuva-abr13 e Chuva-jul13,
- 2) Esgoto: amostra Esgoto-abr13,
- 3) Abastecimento público (SABESP): amostras Sabesp-abr13, Sabesp-fev14 e Sabesp-mar14,
- 4) Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo descendente (Raso Desc): amostras de poços da Área 5 (PM-10, PM-11 e PM-18), da Área 2 (PM-19); e da Área 3 (PMN-4A). Os poços da Área 5 foram separados em um subgrupo por se apresentarem distintos dos demais;
- 5) Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo ascendente (Raso Asc): amostras de poços da Área 1 (PM-21, PM-23 e PM-D), da Área 2 (PM-39); e da Área 3 (PMN-2A);
- 6) Aquífero de porosidade intergranular intermediário (Interm): amostras de poços da Área 1 (PP-02) da Área 2 (PM-19A e PM-39A); e da Área 3 (PMN-4B); e Área 5 (PM-10B, PM-11A, PM-11B, PM-18A e PM-18B). Os poços da Área 5 foram separados em um subgrupo por se apresentarem distintos dos demais;
- 7) Aquífero fraturado (RS): amostras de poços da Área 3 (P-1204 e P-255) e da Área 5 (MP-01WB). Para o poço da Área 5 as amostras foram divididas em duas classes devido a

diferentes características químicas encontradas: RS Erg raso (até 38,0 m) e RS Erg prof (mais de 38,0 m de profundidade).

O agrupamento “Aquífero de porosidade intergranular raso” reuniu as águas que permeiam o aquífero em profundidade de até 7,0 m. Todos os poços reunidos nesse agrupamento captam águas dos sedimentos Aluvionares e dos sedimentos da Formação Resende, exceto o PM-19, que capta águas do solo residual.

O agrupamento “Aquífero intergranular intermediário” reuniu as águas que permeiam o aquífero em profundidades entre 7,0 e 65,0 m. Todos os poços reunidos nesse agrupamento captam águas do solo residual, exceto o PMN-4B, que capta água de sedimentos da Formação Resende.

Os agrupamentos tiveram como objetivo principal verificar se há diferentes características químicas na água subterrânea em função das diferentes situações de fluxos verticais, profundidade e características litológicas do aquífero e proximidades de áreas fontes de contaminação antrópica. Assim, a caracterização hidroquímica buscou contribuir para o entendimento da origem das fontes de recarga das águas subterrâneas na área de estudo, identificando-se as águas subterrâneas com maior similaridade hidroquímica com as águas de esgoto, chuva ou abastecimento público (SABESP).

Para atingir aos objetivos propostos foram elaborados gráficos de barras apresentando os resultados de todas as amostras analisadas para os parâmetros selecionados (Anexo B). Nas Figuras 6.5.1 e 6.5.2 são apresentados gráficos do tipo *boxplot* para os parâmetros selecionados.

Figura 6.5.1 - Diagramas *boxplot* para soma de íons, pH, OD, HCO₃, Cl e Na. Ra Asc = Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo ascendente; Ra Desc = Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo descendente; Interm = Aquífero de porosidade intergranular intermediário; RS = Aquífero fraturado (Ras = raso; Prof = Profundo).

Figura 6.5.2- Diagramas *boxplot* para N-NO₃, NH₄, SO₄, F, Fe e Mn. Ra Asc = Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo ascendente; Ra Desc = Aquífero de porosidade intergranular raso com fluxo descendente; Interm = Aquífero de porosidade intergranular intermediário; RS = Aquífero fraturado (Ras = raso; Prof = Profundo).

6.5.1 Chuva, esgoto e água da rede de abastecimento

A Figura 6.5.1.1 apresenta o Diagrama de Piper para os grupos Chuva, Esgoto e água da rede de abastecimento (SABESP), destacando as diferenças hidroquímicas que as águas desse agrupamento possuem entre si: as águas de chuva são bicarbonatadas cálcicas; a amostra de esgoto é bicarbonatada sódica; e as águas da SABESP são cálcica mistas.

A soma dos íons destacada em *boxplot* (Figura 6.5.2), indica para esse agrupamento: baixas concentrações de espécies químicas dissolvidas nas águas de chuva (as mais baixas de todas as amostras analisadas); e a elevada concentração de espécies químicas dissolvidas na amostra de esgoto (a mais elevada de todas as amostras). As águas de abastecimento (SABESP) também apresentam baixa concentração de espécies dissolvidas, estando a média de suas concentrações próximas ao quartil inferior de toda a coleção de amostras analisadas.

O nitrato (nitrogênio-nitrato) na água da SABESP variou ao longo das campanhas de amostragem, mas ainda assim apresentou a concentração mais alta do que as demais amostras, embora não tenha atingido o padrão de potabilidade (10 mg/L) da Portaria 2914 do Ministério da Saúde (2011). Já no esgoto, a concentração de nitrato é baixa. Isso ocorre pois, provavelmente, o nitrogênio está na forma de amônio, parâmetro não analisado na amostra, mas cuja presença é sugerida, pelo cálculo do balanço iônico, em concentrações bastante elevadas.

A média das concentrações de fluoreto nas águas da SABESP, devido à adição de flúor durante o seu tratamento, são mais elevadas do que as médias das concentrações dos demais grupos de amostras. A amostra de esgoto que apresenta em sua mistura água da SABESP, segue o mesmo padrão e apresenta concentração de fluoreto elevada. Nas águas da SABESP foi também verificada uma variação composicional em curto intervalo de tempo, como mostra o diagrama de Piper e os gráficos de variação temporal para nitrato e sulfato (Figura 6.5.1.2).

referem apenas aos dados relativos aos poços analisados e que ocorrências pontuais de contaminação encontradas no interior da área dos mapas não estão, obviamente, consideradas.

Na análise dos parâmetros apresentados na Figura 6.5.2.1 (NH_4^+ , NO_3^- e soma de íons) e Figura 6.5.2.2 (Cl^- e OD), as amostras do aquífero de porosidade intergranular raso consideradas como representativas foram: PM10-set16, PM11-set16, PM18-set16, PM19-jul13, PM23-set13, PM39-out13, PMD-set13, PMN2A-mar13, PMN4A-out14. Já as amostras do aquífero intermediário consideradas foram as seguintes: PM10B-set16, PM11B-set16, PM18B-set16, PM39A-abr14, PMN4B-out14, PP02-set13, PM19A-out13.

Figura 6.5.2.1 - Isoconcentrações de parâmetros selecionados em amostras representativas dos aquíferos raso e intermediário. Asc = fluxo vertical ascendente; Des = fluxo vertical descendente.

Figura 6.5.2.2 - Isoconcentrações de parâmetros selecionados em amostras representativas dos aquíferos raso e intermediário. Asc = fluxo vertical ascendente; Des = fluxo vertical descendente.

6.5.2.1 Aquífero de porosidade intergranular raso

Em relação à soma de íons, observa-se, como mostram o mapa de isoconcentrações (Figura 6.5.2.1) e o diagrama em *boxplot* (Figura 6.5.1), que os poços da Área 5 apresentam no aquífero de porosidade intergranular a maior concentração de solutos dissolvidos nas águas subterrâneas dentre todas as demais áreas avaliadas. Essa concentração apenas é superada, como esperado, pela amostra de esgoto.

A condição de maior concentração de espécies químicas no aquífero de porosidade intergranular raso da Área 5 também é observada para os íons cloreto, sódio, bicarbonato, amônio e ferro. Entretanto, nos poços rasos dessa área são encontrados baixos teores de

oxigênio dissolvido, indicando a presença de ambiente anaeróbico, que impede a transformação de amônio em nitrato. No aquífero de porosidade intergranular intermediário da Área 5 as concentrações são inferiores ao seu nível mais raso, porém ainda se mantêm elevadas em relação a outros poços amostrados que monitoram o mesmo aquífero nas demais áreas estudadas.

Os resultados apresentados nos diagramas em *boxplot* e mapas de isoconcentrações são indicadores de que as águas subterrâneas, no aquífero de porosidade intergranular da Área 5, foram significativamente alteradas em decorrência da presença de carga orgânica em suas proximidades, decorrentes, principalmente, de contribuição de fontes antrópicas na recarga desse aquífero. Possivelmente, além da contribuição de fontes antrópicas, a interação entre a carga orgânica, a água subterrânea e o meio geológico, contribuíram também para a alteração observada, devido a alterações das condições de óxido-redução em decorrência da presença dessa carga orgânica.

Figura 6.5.2.3 – Diagrama de piper apresentando a distribuição de amostras do aquífero raso com maiores concentrações de amônio. Destaque para as amostras com maior similaridade química com a amostra de esgoto.

Figura 6.5.2.4 - Histórico das concentrações das amostras do aquífero raso com maiores concentrações de amônio.

A destacada presença de carga orgânica na água subterrânea, evidenciada pelas elevadas concentrações de amônio (NH_4^+), acima do padrão de potabilidade (amônia = 1,5 mg/L) da Portaria 2914 do Ministério da Saúde (2011), na Área 5 (PM-11 e PM-10), Área 1 (PM-D) e Área 3 (PMN-2A e PMN-4A) está sendo apresentada na Figura 6.5.2.3. A Figura 6.5.2.4 ilustra a variação das concentrações de amônio nesses poços ao longo do tempo.

Os poços com maiores concentrações de amônio estão localizados em áreas que apresentam menor concentração de oxigênio dissolvido (OD), como mostra o mapa de isoconcentração. O poço PM-D, não apresentou mesmo comportamento, indicando resultados com maior concentração de OD, além de elevadas concentrações de nitrato.

Em detrimento das elevadas concentrações de NH_4^+ elevado apresentadas, o PM-D indicou em seus resultados uma soma de íons baixa. Ademais, a água subterrânea nesse ponto mostrou uma assinatura hidroquímica muito distinta do esgoto, sendo classificada como Bicarbonatada Cálcica, enquanto que a esgoto foi classificada como Bicarbonatada Sódica. Uma provável explicação pode estar relacionada à diversificada composição química que a amostra de esgoto pode apresentar em diferentes períodos de tempo. No presente estudo, está sendo utilizada para comparação somente uma amostra de esgoto coletada na Área 1, em abril/13.

O poço PMN-2A está localizado nas proximidades de rede de esgoto da Área 3, indicando importante contribuição dessa fonte antrópica na recarga do aquífero. As águas desse poço, em determinado período, apresentam a mesma classificação das águas de esgoto (bicarbonatadas sódicas), porém, apresentaram-se mais cálcicas em outros períodos. Observa-se que as águas do poço PMN-2A, para alguns parâmetros, como cálcio, condutividade elétrica, amônio e sódio variam ao longo do tempo similarmente às águas do poço PM-D, localizado na Área 1.

As amostras dos poços PM-11 e PM-10 (principalmente a do poço PM-11), são aquelas com maior similaridade química com a amostra de esgoto, conforme mostra o diagrama de Piper. No poço PMN-4A, embora as águas possuam elevado teor em amônio, elas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas.

A distribuição dos resultados dos demais poços pertencentes ao aquífero de porosidade intergranular e que, aparentemente, possuem pouca influência de carga orgânica é apresentada na Figura 6.5.2.5. Como representado no diagrama de Piper, as águas nesses pontos são bicarbonatadas cálcicas ou sódicas e mistas. Pode-se também observar que, para esse grupo de amostras, aquelas que recebem águas de fluxo vertical ascendente são levemente mais sulfatadas do que aquelas com fluxo descendente.

No diagrama de *boxplot* apresentado na Figura 6.5.2.6 nota-se também que as amostras representativas do aquífero raso pouco impactado por interferência antrópica, com fluxo ascendente (amostras PM-23 e PM-39), apresentam mais íons dissolvidos do que aquelas com

fluxo descendente. Essa mesma tendência, que apenas não se aplica ao PM-21, é observada quando considerado todo o universo de amostras coletadas no aquífero raso (diagramas *boxplot* apresentados nas Figuras 6.5.1. e 6.5.2).

Figura 6.5.2.5 - Diagrama de Piper representativo do aquífero de porosidade intergranular raso com pouca influência de alteração antrópica.

Figura 6.5.2.6 - Diagrama *boxplot* representativo da soma de íons em amostras do aquífero de porosidade intergranular raso com pouca influência de alteração antrópica.

6.5.2.2 Aquífero de porosidade intergranular intermediário

Assim como no aquífero de porosidade intergranular raso, no aquífero intermediário, as águas subterrâneas que sofreram maior alteração por interferência antrópica, indicada pelos parâmetros amônio, cloreto, sódio e soma de íons, por exemplo, estão localizadas nos poços da Área 5. Entretanto, nota-se nessa área que, no aquífero intermediário, as concentrações são, de maneira geral, menores do que no aquífero raso. O Diagrama de Piper, destacando as amostras representativas desse aquífero, é apresentado na Figura 6.5.2.7.

Figura 6.5.2.7 - Diagrama de piper representativo de amostras do aquífero de porosidade intergranular intermediário.

A análise do Diagrama de Piper indica que as águas do aquífero intermediário da Área 5 são bicarbonatadas sódicas, tal como as do esgoto. Entre essas, aquela que mais se diferencia é a do poço PM-11A, por ser mais sódica e mais cloretada que as demais. As águas subterrâneas da Área 2 (poços PM-19A e PM-39A) são bicarbonatadas mistas, diferenciando-se entre si por serem um pouco mais sulfatadas e magnesianas do que as águas do poço PM-39A, localizado próximo a zona de descarga do aquífero e sob influência de fluxo ascendente.

O poço PP-02 apresentou a maior variação hidroquímica durante o período de amostragem. No período avaliado, as águas foram se tornando mais cálcicas e sulfatadas à medida em que as concentrações de amônio e nitrato também aumentavam (Figura 6.5.2.8). O aumento de amônio, no período avaliado, também foi observado no poço raso (3,5 m) PM-D, localizado próximo ao poço profundo PP-02 (65,0 m). Porém, no PP-02, as águas são mais

oxigenadas do que no PM-D, fato que, potencialmente, pode estar contribuindo para a transformação de amônio em nitrato (Figura 6.5.2.9).

Figura 6.5.2.8 – Histórico das concentrações dos principais íons no poço PP-02.

Figura 6.5.2.9 – Histórico das concentrações de oxigênio dissolvido nos poços PM-D e PP-02.

6.5.3 Aquífero fraturado

As águas do aquífero fraturado foram amostradas em poços da Área 3 (P-255 e P-1204) e da Área 5 (Westbay WB-01). Nas águas amostradas no poço WB-01 foi notada uma distinção entre aquelas amostradas até a porta 36,6 m de profundidade (águas agrupadas como RS-Erg-Ras) e aquelas amostradas entre a porta 36,6 m e 55,5 m (águas agrupadas como RS-Erg-Prof). Essa distinção pode ser observada no Diagrama de Piper do aquífero fraturado (Figura 6.5.3.1) e nos gráficos de variação das concentrações com a profundidade, elaborados para os resultados das águas desse agrupamento (Figura 6.5.3.2).

Figura 6.5.3.1 - Diagrama de Piper representativo de amostras do aquífero fraturado.

Como mostra o Diagrama de Piper, as águas do aquífero fraturado são bicarbonatadas cálcicas e sódicas e mistas.

Nesse diagrama, observa-se que as águas mais profundas do poço WB-01 são mais sulfatadas do que as mais rasas. O aumento de sulfato em profundidade também pode ser observado no gráfico de variação das concentrações com a profundidade nos poços P-255 e P-1204, ambos localizados na Área 3. Nos aquíferos de porosidade intergranular, observa-se que as águas dos poços dos seus níveis intermediário e raso com influência de fluxo ascendente são mais sulfatadas do que as águas do aquífero raso não tão afetadas pela contaminação (como a observada na Área 5), como mostram os gráficos de *boxplot* (Figuras 6.5.1 e 6.5.2). Este fato, pode estar relacionado à contribuição das águas mais profundas na recarga dos aquíferos mais rasos, devido à presença de fluxos ascendentes.

Entretanto, as concentrações de sulfato observadas na porção inferior do poço WB-01 são mais elevadas do que as observadas no poço P-1204, coletadas neste último a maiores profundidades. O mesmo comportamento é verificado com as concentrações de ferro, sendo mais inferiores nos poços P-255 e P-1204, coletadas a maiores profundidades, em relação ao WB-01, mais rasas.

Comparando-se as amostras do poço P-255 (mais rasas) com as amostras do poço P-1204 (mais profundas), também se observa que neste último as águas são mais cloretadas e possuem soma de íons aumentando com a profundidade.

Figura 6.5.3.2 - Gráficos de variação das concentrações com a profundidade nos poços WB-01, P-255 e P-1204.

6.6 Análises isotópicas

6.6.1 Análises isotópicas de O e H

Os conjuntos de dados obtidos para a caracterização isotópica, por meio dos isótopos estáveis de O e H, envolve resultados de amostras coletadas nos poços de monitoramento, rasos e profundos, e poços tubulares profundos, além de resultados das potenciais fontes de recarga, natural e antrópica, dos aquíferos da área de estudo. As fontes de recarga natural estão representadas pela infiltração direta das águas de chuva e pela rede coletora de águas pluviais, e as potenciais fontes de recarga antrópicas pelas águas de abastecimento público (SABESP) e de esgoto.

A caracterização isotópica das amostras visou à: 1) determinação das assinaturas isotópicas das águas subterrâneas, assim como de cada potencial fonte de recarga; 2) à avaliação da participação de fontes de origem antrópica na recarga dos aquíferos da área de estudo; e 3) à elaboração da reta meteórica local, representativa da área de estudo.

Os resultados isotópicos de O e H, obtidos a partir das análises de todas as amostras coletadas, são apresentados no Anexo B.

6.6.1.1 Águas de chuva

A análise dos resultados evidencia que, de modo geral, há uma relação entre a quantidade de precipitação mensal e a variação no enriquecimento de isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ nas águas de chuva. Nos meses com maior quantidade de chuvas há um menor enriquecimento, observando-se o inverso durante os meses com menor quantidade de chuvas.

No período entre agosto/2015 e julho/2016, quando foram coletadas as amostras de água de chuva, a distribuição pluviométrica indicou um total de chuvas de 1.511 mm, dos quais 1.013,10 mm, ou 67%, ocorreram no período chuvoso, entre novembro/15 e março/16. Os demais 33% se concentraram nos meses de setembro/15, maio e junho/16, considerados dentro do período seco.

A representação dos resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as 12 amostras de águas de chuva, referente ao período de agosto/2015 a julho/2016, considerando a variação na composição isotópica com a quantidade de chuvas e sua origem, está sendo expressa pela média ponderada, considerando no cálculo a quantidade mensal de chuvas e a composição de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ do mês avaliado. A média ponderada calculada para $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ é de -3,27‰ e de -17,21‰, respectivamente.

Separando-se as médias ponderadas dos períodos considerados úmidos e secos, encontram-se os seguintes valores: 1) úmido $\delta^{18}\text{O}$ -3,54‰ e $\delta^2\text{H}$ -20,99‰; e seco $\delta^{18}\text{O}$ -2,57‰

e $\delta^2\text{H}$ -6,44‰. Esses valores refletem, em parte, a discussão sobre o efeito da quantidade de chuvas no empobrecimento ou enriquecimento de isótopos pesados.

Os resultados das amostras coletadas nos meses de abril e julho/2013 apresentaram, em relação ao período de 2015/2016 um maior empobrecimento isotópico. Porém, a média ponderada pela quantidade de chuvas, calculada entre o período das 2 amostragens de 2013, indicou valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, respectivamente, de -3,1‰ e de -17,4‰, muito semelhantes ao período de agosto/2015 a julho/2016 e, portanto, de composição isotópica mais enriquecida.

As Figuras 6.6.1.1 e 6.6.1.2 apresentam, respectivamente, a reta meteórica local e as retas meteóricas segundo os períodos seco e úmido. Essas retas foram elaboradas com os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das amostras de chuva, coletadas ao longo de 12 meses e a relação $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ das amostras de água analisadas, incluindo a comparação desses resultados com as retas meteóricas global (ROZANSKI et al., 1993) e local (LMWL).

6.6.1.2 Águas da rede de abastecimento da SABESP

A coleta das amostras de água da rede de abastecimento da SABESP foi realizada com o auxílio de coletores plásticos descartáveis, no cavalete situado na Área 1, junto à Av. Eusébio Stevaux. No total, foram coletadas 3 amostras de água da SABESP, nos dias 12/04/2013, 20/02/2014 e 10/03/2014.

Os resultados das 2 análises referentes às coletas realizadas em fevereiro e março/2014 indicaram os mesmos valores, considerando o erro analítico de + 0.2 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e + 1.0 ‰ para $\delta^2\text{H}$ (CLARK e FRITZ, 1997), apresentando um valor médio de -3,3‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e -19,3‰ para $\delta^2\text{H}$. Já a amostra coletada em abril/2013 apresentou valores mais negativos, indicando um empobrecimento de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, com -4,59‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e -27,3‰ para $\delta^2\text{H}$.

Figura 6.6.1.1 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, reta meteórica local (LMWL), reta meteórica local (LMWL), reta meteórica global (GMWL, ROZANSKI et al., 1993) e médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm).

Figura 6.6.1.2 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, retas meteóricas local (LMWL), correspondentes aos períodos seco e úmido, reta meteórica global (GMWL, (ROZANSKI et al., 1993) e médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm).

6.6.1.3 Esgoto

A amostragem de esgoto foi realizada com o auxílio de coletores plásticos descartáveis, diretamente no coletor-tronco situado na Área 1. Coletou-se, no total, somente 01 amostra de esgoto, no dia 12/04/2013.

O resultado apresentou -4,79‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e -27,2‰ para $\delta^2\text{H}$. Esses valores coincidem com aqueles obtidos com a amostra de água de abastecimento da SABESP coletada no mesmo período (abril/2013), considerando o erro analítico de + 0.2 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e + 1.0 ‰ para $\delta^2\text{H}$ (CLARK e FRITZ, 1997).

6.6.1.4 Água dos poços de monitoramento e tubulares profundos

Considerando que as águas subterrâneas, na área estudada, são efetivamente compostas pela mistura de diferentes fontes de recarga, representadas por fontes naturais (infiltração da precipitação e perdas da rede coletora de águas pluviais) e fontes antrópicas, decorrentes de perdas dos sistemas de abastecimento público de água e de esgoto, a análise dos resultados integrou e correlacionou todos os dados isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ obtidos, para avaliar as possíveis origens e contribuição das fontes de recarga dos aquíferos.

Poços de monitoramento dos aquíferos de porosidade intergranular

Os poços de monitoramento dos aquíferos de porosidade intergranular, localizados nas áreas 1, 2 e 3, foram amostrados em 4 campanhas semestrais, permitindo que a análise dos resultados também pudesse ser realizada em relação à variação da composição isotópica ao longo das 4 campanhas. Assim forma, a variação entre os resultados foi calculada, para cada amostra, pela diferença entre o maior e o menor valor observado em cada campanha de amostragem.

Observando-se os resultados de todas as amostras, das 4 campanhas, é evidente que os menores valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, ou mais empobrecidos, referem-se às amostras das campanhas do ano de 2013. Comparando-se esses resultados com as amostras de água da SABESP, a amostra coletada em abril/2013, também apresenta os menores valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ dentre as 3 amostras, confirmando um maior empobrecimento desses isótopos na composição das águas naquele ano.

Os poços PMN-4A e PMN-4B, instalados na Área 3, entre profundidades de 6,2 m e 14,2 m, respectivamente, apresentaram as maiores variações nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ observadas. O PMN-4A apresentou 2,61 para o $\delta^{18}\text{O}$ e 20,3 para o $\delta^2\text{H}$; já o PMN-4B apresentou 2,71 para o $\delta^{18}\text{O}$ e 22,1 para o $\delta^2\text{H}$. Esses poços estão localizados em área impermeabilizada (asfalto), nas proximidades da Av. das Nações Unidas e junto a galerias coletoras de águas pluviais e de rede de distribuição de águas de abastecimento. Considerando que o enriquecimento isotópico ocorreu nas 2 campanhas de 2014, tal como se observa na assinatura isotópica das águas da

SABESP do mesmo período, pode-se afirmar que a mistura das águas desses poços apresenta significativa contribuição dessa fonte de recarga antrópica. Na localidade onde estão esses poços, que representam um conjunto multinível, as medidas de carga hidráulica indicaram a existência de fluxo vertical descendente, que também pode estar contribuindo para o aporte de fontes antrópicas (água de abastecimento e esgoto) dos arredores.

Quanto às menores variações, essas foram observadas nos poços PM-19A e PM-39A, instalados na Área 2, entre profundidades de 19,6 m e 14,0 m, respectivamente; e no PM-21, instalado na Área 1 a 5,2 m. Os PM-19A e PM-39A, apresentaram 0,19 e 0,33 para o $\delta^{18}\text{O}$, e 1,0 e 1,9 para o $\delta^2\text{H}$, respectivamente; já o PM-21 apresentou 0,16 para o $\delta^{18}\text{O}$ e 0,9 para o $\delta^2\text{H}$, correspondendo à menor variação de todas as amostras analisadas. O PM-21, além da menor variação na composição isotópica, também apresentou o maior empobrecimento médio nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ dentre todas as amostras analisadas.

Complementando a discussão anterior, analisando-se os valores médios de todas as amostras coletadas da Área 1, referentes às campanhas de 2013 e 2014, observa-se que, nessa localidade, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são semelhantes, ou seja, entre -5,3 e -6,0 para $\delta^{18}\text{O}$ e entre -30,5 e -37,4 para $\delta^2\text{H}$, representando os valores mais empobrecidos entre todos os poços monitorados na área estudada. Dentre os 4 poços amostrados, 3 são rasos e estão entre 3,5 m e 5,2 m de profundidade. Porém, o poço PP-02, também no aquífero de porosidade intergranular, está posicionado para monitorar o nível de 65,0 m de profundidade (porção intemperizada do aquífero fraturado).

Analisando-se os valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ de todos os poços foi possível segregá-los em 3 grupos: grupo 1) 4 poços com valores entre -4,1 e -4,4 para $\delta^{18}\text{O}$; entre -21,9 e -24,9 para $\delta^2\text{H}$; grupo 2) 4 poços com valores entre -4,9 e -5,3 para $\delta^{18}\text{O}$; entre -27,7 e -30,8 para $\delta^2\text{H}$; e grupo 3) 3 poços com valores entre -5,7 e -6,0 para $\delta^{18}\text{O}$; entre -33,2 e -37,4 para $\delta^2\text{H}$. Dentre esses grupos, não é possível verificar um padrão, relacionando um maior ou menor enriquecimento isotópico com a profundidade, ou mesmo com o substrato geológico. As diferentes composições isotópicas indicam que as águas subterrâneas são compostas por misturas de diferentes fontes de recarga, natural e antrópica, em maiores e menores proporções. O grupo 1 apresenta as maiores médias de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, refletindo uma composição isotópica mais enriquecida, estando mais próximas das médias ponderadas das águas da chuva (12 meses) e da SABESP (média das amostras de 2014). Já os grupos 2 e 3, com as menores médias, representam uma composição isotópica mais empobrecida e estão mais próximas dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das amostras de águas da SABESP e esgoto coletadas em abril/2013.

O poço de monitoramento da Área 1, PP-02, já discutido anteriormente, está posicionado para monitorar o nível de 65,0 m de profundidade (porção intemperizada do aquífero fraturado).

A composição isotópica do poço de monitoramento PP-02, ao longo das 4 campanhas monitoradas, apresentou valores entre -4,9 e -6,0 para $\delta^{18}\text{O}$ e entre -37,4 e -36,6 para $\delta^2\text{H}$, indicando empobrecimento desses isótopos quando comparada com a média ponderada das águas de chuva. Este fato pode ser explicado pela origem mais antiga dessas águas, com diferente composição na mistura dos isótopos $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$.

Poços de monitoramento do aquífero fraturado

As amostragens das águas do aquífero fraturado incluiu poços localizados em profundidades distintas, para monitorar diferentes níveis. Esses poços estão localizados nas áreas 3 e 5.

O poço tubular profundo 1204, localizado Área 3, foi amostrado em 2 campanhas. Na primeira campanha, a amostragem foi realizada sem a utilização de obturadores para isolar o nível a ser amostrado, potencializando a mistura de águas de profundidades próximas. A composição isotópica das 2 amostras coletadas, a 53,0 m e 250,0 m de profundidade, apresentou valores iguais, considerando o erro analítico de + 0.2 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e + 1.0 ‰ para $\delta^2\text{H}$ (CLARK e FRITZ, 1997), com -6,0 para $\delta^{18}\text{O}$ e -36,7 para $\delta^2\text{H}$.

Na segunda campanha de amostragem, foram utilizados obturadores para isolar os níveis a serem amostrados, definidos a partir da execução prévia de ensaios hidráulicos e perfilações geofísicas para identificar as fraturas mais transmissivas e, assim, passíveis de serem amostradas. Todos esses trabalhos foram realizados por Barbosa (2017). No total, foram isoladas 6 profundidades diferentes ao longo do poço tubular profundo 1204, entre 115,0 m e 256,0 m. Os resultados indicaram composições isotópicas iguais para todas as águas, considerando o erro analítico, com valores entre -5,9 e -6,1 para $\delta^{18}\text{O}$ e entre -36,0 e -37,3 para $\delta^2\text{H}$.

Os resultados das 2 campanhas do poço tubular profundo 1204 apresentaram composições isotópicas iguais para todas as águas, considerando o erro analítico, indicando empobrecimento desses isótopos, quando comparada com a média ponderada das águas de chuva. Tal fato pode ser explicado pela origem mais antiga dessas águas, com diferente composição na mistura dos isótopos $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$. Na primeira campanha os valores mais empobrecidos observados estão mais próximos das assinaturas isotópicas da água de abastecimento da SABESP e do esgoto, referentes aos mesmo período de amostragem, indicando contribuição de fontes antrópicas. Não foram coletadas amostras de água de abastecimento da SABESP e de esgoto no período referente à segunda campanha.

Os sistemas de poços multiníveis CMT e *Westbay*, localizados na Área 5, em área predominantemente cobertura impermeável (concreto), foram amostrados em uma única campanha. No sistema multinível CMT há 7 portas de monitoramento, nas profundidades de

2,3 m, 3,7 m, 6,2 m, 8,8 m, 10,2 m, 12,2 m e 14,5 m, distribuídas em diferentes litologias ao longo do perfil geológico (LOJKASEK-LIMA, 2016). Já no sistema *Westbay* foram definidas 16 portas de monitoramento nas profundidades de 15,3 m, 16,8 m, 19,3 m, 22,6 m, 24,1 m, 27,2 m, 30,5 m, 35,1 m, 36,6 m, 39,9 m, 41,5 m, 44,9 m, 46,4 m, 50,9 m, 53,9 m e 55,5 m, com base em dados estruturais obtidos por meio de perfilagens geofísicas, na análise de testemunhos de sondagem e por ensaios de transmissividade com o uso de obturadores de pressão (PINO, 2017), com o objetivo de identificar as fraturas mais transmissivas.

As amostragens desses sistemas multiníveis foram realizadas por Lojkasek-Lima (2016). Os resultados das amostras do sistema CMT indicaram composições isotópicas variando de -4,89 a -6,36 para $\delta^{18}\text{O}$ e de -29,0 a -35,2 para $\delta^2\text{H}$, apresentando valores mais empobrecidos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ com o aumento da profundidade, refletindo uma composição isotópica mais enriquecida nos níveis mais superficiais do aquífero. Considerando a média ponderada calculada para as águas de chuva de -3,27‰ para $\delta^{18}\text{O}$ e de -17,21‰ $\delta^2\text{H}$, as águas mais enriquecidas em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ do poço CMT, apesar da maior proximidade, potencialmente, apresentam em sua composição contribuição de fontes de recarga de origem antrópica, como águas de abastecimento da SABESP, esgoto ou efluentes industriais. Porém, essas fontes não foram amostradas e analisadas no mesmo período da amostragem do sistema CMT, impossibilitando a comparação. Resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ dessas fontes, referentes ao do período de amostragem de 2013, indicaram concentrações próximas à das águas mais superficiais do sistema CMT.

As análises de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ nas amostras do sistema *Westbay*, similarmente ao CMT, indicaram, de modo geral, um empobrecimento desses isótopos com a profundidade. Entre 41,5 m e 55,5 m (porção mais inferior do poço) a composição isotópica é muito similar e apresenta pouca variação, com valores de -5,42 a -5,71 para $\delta^{18}\text{O}$ e de -30,8 a -33,1 para $\delta^2\text{H}$. O valor mais negativo foi observado a 15,3 m de profundidade, no contato entre a rocha alterada dura e a rocha alterada mole, que apresentou -6,36 para $\delta^{18}\text{O}$ e -35,2 para $\delta^2\text{H}$, indicando, nessa profundidade, uma mistura com maior contribuição de fontes antrópicas na recarga devido ao empobrecimento desses isótopos em relação à média ponderada das águas de chuva. Dentre os resultados, a amostra referente à profundidade de 22,6 m apresentou os valores menos empobrecidos e muito mais próximos à média ponderada das águas de chuva, com -3,92 para $\delta^{18}\text{O}$ e -28,5 para $\delta^2\text{H}$, indicando aporte de águas superficiais de origem natural, possivelmente por conexão hidráulica entre fraturas, uma vez que nessa profundidade a unidade geológica descrita é formada por rocha alterada dura.

As Figuras 6.6.1.3 a 6.6.1.5 apresentam, respectivamente, os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na água subterrânea referentes aos poços das Áreas 1 a 3 (média das campanhas de amostragem de 2013 e abril/14), aos poços dos sistemas multinível CMT e *Westbay* da Área 5,

e aos poços das Áreas 1 a 3 (campanha de amostragem de outubro/14), além de resultados de água da chuva, da SABESP e esgoto, junto à reta meteórica local (LMWL).

Figura 6.6.1.3 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, reta meteórica local (LMWL), médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm), e resultados médios para os poços avaliados (2013 e abril/14).

Figura 6.6.1.4 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, reta meteórica local (LMWL), médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm), e resultados médios para os poços avaliados (CMT e *Westbay*).

Os resultados isotópicos da campanha de amostragem de outubro/14 foram plotados separadamente para uma melhor avaliação desse período, que foi marcado por um período mais prolongado de seca, principalmente, entre os meses de abril e outubro/14.

As análises de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ desse período indicaram um ligeiro enriquecimento isotópico, possivelmente, relacionado ao regime climático diferenciado que foi registrado. Não está sendo observada a atuação de processos secundários, como a evaporação, visto que os resultados se encontram junto, ou muito próximos, à reta meteórica local (LMWL).

Figura 6.6.1.5 - $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mensal na água da chuva, reta meteórica local (LMWL), médias ponderadas das chuvas (12 meses, períodos seco e úmido e > 100 mm), e resultados médios para todos os poços avaliados (outubro/14).

6.6.2 Análises isotópicas de Sr

Os conjuntos de dados obtidos para a caracterização do isótopo radiogênico de Sr, envolve resultados de amostras coletadas nos poços de monitoramento, rasos e profundos, e poços tubulares profundos, além de resultados das potenciais fontes de recarga, natural e antrópica, dos aquíferos da área de estudo. Como já discutido anteriormente, a fonte de recarga natural está representada pelas águas de chuva e as potenciais fontes de recarga antrópicas pelas águas de abastecimento (SABESP) e de esgoto.

Além da caracterização isotópica, também foram determinadas as concentrações de Sr total das amostras coletadas.

A caracterização isotópica das amostras para Sr visou à: 1) determinação das assinaturas isotópicas das águas subterrâneas, assim como de cada potencial fonte de recarga; e 2) à avaliação da participação de fontes de origem antrópica na recarga dos aquíferos da área de estudo.

Os resultados isotópicos de Sr, obtidos a partir das análises das amostras coletadas, são apresentados no Anexo B.

6.6.2.1 Águas de chuva

A amostragem de águas de chuva foi realizada em uma única campanha, em abril/2013, sendo coletada uma única amostra. O coletor foi colocado na Área 1, em local elevado e livre de interferências aéreas, como árvores, calhas e outras estruturas que pudessem interceptar as águas da chuva antes de serem coletadas.

O resultado apresentou a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,708378. Não foi analisado Sr Total na amostra de água de chuva.

6.6.2.2 Águas da rede de abastecimento da SABESP

A coleta das amostras de água de abastecimento da SABESP foi realizada com o auxílio de coletores plásticos descartáveis, no cavalete situado na Área 1. Coletou-se uma única amostra em abril/2013. Os resultados apresentaram a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,711000 e concentração de Sr Total de 0,130 mg/L.

6.6.2.3 Esgoto

A amostragem de esgoto foi realizada com o auxílio de coletores plásticos descartáveis, diretamente no coletor-tronco situado na Área 1. Coletou-se, no total, somente 01 amostra de esgoto, no dia 12/04/2013. Os resultados apresentaram a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,711099 e concentração de Sr Total de 0,120 mg/L, semelhantes à da amostra de água de abastecimento da SABESP.

6.6.2.4 *Água dos poços de monitoramento e tubulares profundos*

Considerando que as águas subterrâneas, na área estudada, são efetivamente compostas pela mistura de diferentes fontes de recarga, representada pelas águas da chuva e antrópicas, decorrentes de perdas dos sistemas de abastecimento público de água e de esgoto, a análise dos resultados integrou e correlacionou todos os dados isotópicos de Sr obtidos, para avaliar as possíveis origens e contribuição das fontes de recarga dos aquíferos.

Os resultados indicaram uma variação na razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,71265572 e 0,74904666 e na concentração de Sr total de 0,013 a 0,636. Dentre as 5 amostras com as maiores razões, ou mais radiogênicas, 2 estão a profundidades entre 14,0 m (PM-19A) e 19,6 m (PM-39A), localizadas na Área 2, à jusante da área estudada, em aquífero de porosidade intergranular. O PM-39A está situado próximo a zona de descarga do aquífero, em área caracterizada pela presença de fluxo vertical ascendente e maior impermeabilização do terreno. A amostra coletada no poço tubular 1204, localizado na Área 3, a 250 m de profundidade, no aquífero fraturado se apresentou como uma das mais radiogênicas dentre todas, com a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de 0,742984 e com maior concentração de Sr total, com 0,636.

Visto que as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das amostras de água de abastecimento da SABESP e de esgoto são semelhantes, com 0,711000 e 0,711099, respectivamente, não foi possível distinguir de qual dessas fontes se origina as águas na mistura dos poços avaliados. As amostras coletadas nos poços mais rasos, entre 3,5 m e 5,8 m, apresentaram as menores razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, com valores entre 0,712656 e 0,71760232, mais próximas das razões da água de abastecimento e de esgoto, ficando evidente a contribuição dessas fontes antrópicas na recarga do aquífero raso.

6.7 Recarga das águas subterrâneas

6.7.1 Balanço hídrico

O cálculo da recarga pelo método do balanço hídrico se baseou nos trabalhos de Thornthwaite e Mather (1955), nos quais a recarga é o excedente da precipitação. Devido a processos como escoamento superficial, evapotranspiração e armazenamento da água na zona insaturada do solo, parte da água proveniente das chuvas se torna indisponível à recarga do aquífero. A simplificação de alguns cálculos seguiu a abordagem matemática proposta por Pereira (2005).

No Município de São Paulo existem duas épocas climáticas bem definidas, uma chuvosa, que abrange os meses de outubro a março, e outra seca, de abril a setembro. O estudo de recarga pelo método do balanço hídrico, neste trabalho, avaliou 3 anos hidrológicos,

compreendidos entre os períodos de janeiro a dezembro/2013, janeiro a dezembro/2014 e janeiro a dezembro/2015. A distribuição da precipitação e da temperatura média mensal no período avaliado foi apresentada na Figura 6.2.1.

A Tabela 6.5.1.1 apresenta os parâmetros e cálculos aplicados para a determinação da evapotranspiração potencial pelo método de Thornthwaite e Mather (1955).

Os resultados indicam que nos três anos hidrológicos avaliados a evapotranspiração potencial é mais elevada entre os meses de outubro e março, e menos entre os meses de abril e setembro.

No cálculo do escoamento superficial (ESC), considerou-se a baixa declividade do terreno, próxima a 2,0 % e o tipo de solo arenoso, apesar da heterogeneidade observada na área estudada. Os valores de C e α , considerando o método utilizado para esses cálculos são: $C = 0,30$ e $\alpha = 0,17$ para a estação seca, e $0,34$ para a estação úmida. Na Tabela 6.5.1.2 estão sendo apresentados os parâmetros e cálculos aplicados para a determinação do escoamento superficial.

Os valores de escoamento superficial são diretamente proporcionais à quantidade de precipitação, sendo praticamente nulos no período mais seco de cada ano considerado.

A quantidade de água armazenada no solo (ARM) é determinada em função dos parâmetros escoamento superficial, evapotranspiração potencial, capacidade de água disponível (CAD) conforme o tipo de solo considerado, bem como da quantidade de precipitação. Na Tabela 6.5.1.3 estão sendo apresentados os parâmetros e cálculos aplicados para a determinação da quantidade de água armazenado no solo (ARM).

Quanto à definição da capacidade de água disponível (CAD), considerando as heterogeneidades encontradas na área estudada, com frequente ocorrência de materiais areno-argilosos, que incluem aterros, sedimentos aluvionares e sedimentos da BSP, adotou-se o valor de 200 mm, relacionado a solo siltoso, por se tratar de um valor médio entre materiais arenosos (150 mm) e argilosos (250 mm).

Nos cálculos de recarga, segundo Thornthwaite e Mather (1955), devem ser assumidos que havendo variação do volume de água armazenado no solo (ΔARM), dada pela expressão $\Delta ARM = ARM_n - ARM_{n-1}$ (na qual n corresponde ao mês atual, e $n-1$ ao mês anterior), negativa, ou seja, $\Delta ARM < 0$, não haverá recarga (R). Caso contrário, com $\Delta ARM \geq 0$ haverá recarga, segundo a expressão $R = P - ESC - ETR - \Delta ARM$.

Na Tabela 6.5.1.4 estão sendo apresentados os parâmetros e cálculos aplicados para a determinação da recarga (REC) e a Figura 6.5.1.1. como estão distribuídas essas variáveis ao longo dos anos hidrológicos avaliados.

Tabela 6.7.1.1 - Cálculo da evapotranspiração potencial (ETP) mensal.

Ano / Mês	N (dias)	P	ETP	Temp. Média (°C)	I	a	b	N (horas)
2013 / Janeiro	31	139,2	87,26	21,60	9,16	2,31	1,05	12,74
Fevereiro	28	121,4	92,30	23,65	10,51	2,30	0,90	12,21
Março	31	130,8	82,14	21,90	9,36	2,29	0,94	11,52
Abril	30	68,1	60,37	19,60	7,91	2,26	0,87	10,90
Maio	31	27,9	53,41	18,35	7,16	2,26	0,89	10,42
Junho	30	108,9	52,28	18,10	7,01	2,24	0,89	10,32
Julho	31	50,7	44,51	16,15	5,90	2,23	0,97	10,63
Agosto	31	2,8	56,42	17,30	6,55	2,21	1,02	11,22
Setembro	30	53,6	69,43	18,65	7,34	2,19	1,05	11,89
Outubro	31	84,4	83,66	19,25	7,70	2,15	1,12	12,54
Novembro	30	108,2	97,77	20,90	8,72	2,15	1,09	12,99
Dezembro	31	97,7	121,37	22,60	9,81	2,12	1,10	13,08
2014 / Janeiro	31	217,3	133,48	24,95	11,40	2,17	1,05	12,74
Fevereiro	28	128,2	113,17	25,15	11,54	2,20	0,90	12,21
Março	31	234,6	97,00	23,20	10,21	2,22	0,94	11,52
Abril	30	33,6	68,72	20,75	8,62	2,23	0,87	10,90
Maio	31	25,5	55,69	18,75	7,40	2,24	0,89	10,42
Junho	30	18,9	66,68	20,65	8,56	2,28	0,89	10,32
Julho	31	17	47,88	17,25	6,52	2,29	0,97	10,63
Agosto	31	32,7	56,60	18,20	7,07	2,30	1,02	11,22
Setembro	30	59,2	71,59	20,20	8,28	2,33	1,05	11,89
Outubro	31	12,2	82,50	21,10	8,85	2,35	1,12	12,54
Novembro	30	128,4	78,31	20,85	8,69	2,35	1,09	12,99
Dezembro	31	240,2	99,81	23,25	10,25	2,36	1,10	13,08
2015 / Janeiro	31	179	130,66	25,50	11,78	2,37	1,05	12,74
Fevereiro	28	213	98,09	24,00	10,75	2,35	0,90	12,21
Março	31	170,1	90,25	22,65	9,85	2,34	0,94	11,52
Abril	30	17,5	74,15	21,20	8,91	2,35	0,91	10,90
Maio	31	45,4	53,82	18,90	7,49	2,35	0,87	10,42
Junho	30	25,2	51,57	18,40	7,19	2,32	0,86	10,32
Julho	31	84,5	51,89	18,05	6,98	2,33	0,92	10,63
Agosto	31	20	69,33	20,15	8,25	2,36	0,97	11,22
Setembro	30	177,4	76,43	20,85	8,69	2,37	0,99	11,89
Outubro	31	60	91,70	21,80	9,29	2,38	1,08	12,54
Novembro	30	218	96,39	22,45	9,72	2,41	1,08	12,99
Dezembro	31	131	117,76	24,15	10,85	2,42	1,13	13,08

N (dias), número de dias do mês; T(°C), temperatura média mensal; N (horas), fotoperíodo em horas; I e a, índice de calor disponível para a região; b, fator de correção referente ao fotoperíodo; ETP, evapotranspiração potencial (mm); P, precipitação (mm).

Tabela 6.7.1.2 - Cálculo do escoamento superficial, parâmetros e valores.

Ano / Mês	P	C'	ESC	α	C
2013 / Janeiro	139,2	0,10	14,20	0,34	0,30
Fevereiro	121,4	0,10	12,38	0,34	0,30
Março	130,8	0,10	13,34	0,34	0,30
Abril	68,1	0,05	3,47	0,17	0,30
Maio	27,9	0,05	1,42	0,17	0,30
Junho	108,9	0,10	11,11	0,17	0,30
Julho	50,7	0,05	2,59	0,17	0,30
Agosto	2,8	0,05	0,14	0,17	0,30
Setembro	53,6	0,05	2,73	0,17	0,30
Outubro	84,4	0,05	4,30	0,17	0,30
Novembro	108,2	0,10	11,04	0,34	0,30
Dezembro	97,7	0,10	9,97	0,34	0,30
2014 / Janeiro	217,3	0,10	22,16	0,34	0,30
Fevereiro	128,2	0,10	13,08	0,34	0,30
Março	234,6	0,10	23,93	0,34	0,30
Abril	33,6	0,05	1,71	0,17	0,30
Maio	25,5	0,05	1,30	0,17	0,30
Junho	18,9	0,05	0,96	0,17	0,30
Julho	17	0,05	0,87	0,17	0,30
Agosto	32,7	0,05	1,67	0,17	0,30
Setembro	59,2	0,05	3,02	0,17	0,30
Outubro	12,2	0,05	0,62	0,17	0,30
Novembro	128,4	0,10	13,10	0,34	0,30
Dezembro	240,2	0,10	24,50	0,34	0,30
2015 / Janeiro	179	0,10	18,26	0,34	0,30
Fevereiro	213	0,10	21,73	0,34	0,30
Março	170,1	0,10	17,35	0,34	0,30
Abril	17,5	0,05	0,89	0,17	0,30
Maio	45,4	0,05	2,32	0,17	0,30
Junho	25,2	0,05	1,29	0,17	0,30
Julho	84,5	0,05	4,31	0,17	0,30
Agosto	20	0,05	1,02	0,17	0,30
Setembro	177,4	0,05	9,05	0,17	0,30
Outubro	60	0,05	3,06	0,17	0,30
Novembro	218	0,10	22,24	0,34	0,30
Dezembro	131	0,10	13,36	0,34	0,30

α , coeficiente em função da declividade do terreno e estação do ano; C, valor representativo da quantidade de precipitação que escorrerá em superfície, em função do solo; C', coeficiente de escoamento superficial; ESC, escoamento superficial (mm); P, precipitação (mm).

Tabela 6.7.1.3 - Cálculo da quantidade de água armazenada no solo (ARM).

Ano / Mês	P	ETP	ESC	CAD	ARM
2013 / Janeiro	139,2	87,26	14,20	200	200
Fevereiro	121,4	92,30	12,38	200	200
Março	130,8	82,14	13,34	200	200
Abril	68,1	60,37	3,47	200	200
Maio	27,9	53,41	1,42	200	200
Junho	108,9	52,28	11,11	200	200
Julho	50,7	44,51	2,59	200	200
Agosto	2,8	56,42	0,14	200	200
Setembro	53,6	69,43	2,73	200	181,60
Outubro	84,4	83,66	4,30	200	182,34
Novembro	108,2	97,77	11,04	200	192,76
Dezembro	97,7	121,37	9,97	200	200
2014 / Janeiro	217,3	133,48	22,16	200	200
Fevereiro	128,2	113,17	13,08	200	200
Março	234,6	97,00	23,93	200	200
Abril	33,6	68,72	1,71	200	164,88
Maio	25,5	55,69	1,30	200	138,33
Junho	18,9	66,68	0,96	200	118,95
Julho	17	47,88	0,87	200	93,67
Agosto	32,7	56,60	1,67	200	80,27
Setembro	59,2	71,59	3,02	200	71,23
Outubro	12,2	82,50	0,62	200	66,95
Novembro	128,4	78,31	13,10	200	117,04
Dezembro	240,2	99,81	24,50	200	200
2015 / Janeiro	179	130,66	18,26	200	200
Fevereiro	213	98,09	21,73	200	200
Março	170,1	90,25	17,35	200	200
Abril	17,5	74,15	0,89	200	200
Maio	45,4	53,82	2,32	200	192
Junho	25,2	51,57	1,29	200	183,68
Julho	84,5	51,89	4,31	200	216,28
Agosto	20	69,33	1,02	200	166,95
Setembro	177,4	76,43	9,05	200	200
Outubro	60	91,70	3,06	200	200
Novembro	218	96,39	22,24	200	200
Dezembro	131	117,76	13,36	200	200

ESC, escoamento superficial (mm); ETP, evapotranspiração potencial (mm); CAD, capacidade de água disponível (mm); ARM, volume de água armazenado no solo (mm); P, precipitação (mm).

Tabela 6.7.1.4 - Cálculos das recargas nos períodos avaliados.

Ano / Mês	P	ETP	P-ETP	C'	ESC	INF	INF-ETP	ARM	ΔARM	ETR	DEF	REC
2013 / Janeiro	139,2	87,26	51,94	0,10	14,20	125,00	37,74	200	0,00	87,26	0,00	37,74
Fevereiro	121,4	92,30	29,10	0,10	12,38	109,02	16,72	200	0,00	92,30	0,00	16,72
Março	130,8	82,14	48,66	0,10	13,34	117,46	35,32	200	0,00	82,14	0,00	35,32
Abril	68,1	60,37	7,73	0,05	3,47	64,63	4,26	200	0,00	60,37	0,00	4,26
Maio	27,9	53,41	-25,51	0,05	1,42	26,48	-26,94	200	0,00	26,48	-26,94	0,00
Junho	108,9	52,28	56,62	0,10	11,11	97,79	45,51	200	0,00	52,28	0,00	45,51
Julho	50,7	44,51	6,19	0,05	2,59	48,11	3,60	200	0,00	44,51	0,00	3,60
Agosto	2,8	56,42	-53,62	0,05	0,14	2,66	-53,76	200	0,00	2,66	-53,76	0,00
Setembro	53,6	69,43	-15,83	0,05	2,73	50,87	-18,57	181,60	-18,40	69,27	-0,17	0,00
Outubro	84,4	83,66	0,74	0,05	4,30	80,10	-3,57	182,34	0,74	79,36	-4,30	0,00
Novembro	108,2	97,77	10,43	0,10	11,04	97,16	-0,61	192,76	10,43	86,74	-11,04	0,00
Dezembro	97,7	121,37	-23,67	0,10	9,97	87,73	-33,64	200	7,24	80,50	-40,87	0,00
2014 / Janeiro	217,3	133,48	83,82	0,10	22,16	195,14	61,65	200	0,00	133,48	0,00	61,65
Fevereiro	128,2	113,17	15,03	0,10	13,08	115,12	1,95	200	0,00	113,17	0,00	1,95
Março	234,6	97,00	137,60	0,10	23,93	210,67	113,67	200	0,00	97,00	0,00	113,67
Abril	33,6	68,72	-35,12	0,05	1,71	31,89	-36,83	164,88	-35,12	67,00	-1,71	0,00
Maio	25,5	55,69	-30,19	0,05	1,30	24,20	-31,49	138,33	-26,55	50,75	-4,94	0,00
Junho	18,9	66,68	-47,78	0,05	0,96	17,94	-48,75	118,95	-19,38	37,32	-29,37	0,00
Julho	17	47,88	-30,88	0,05	0,87	16,13	-31,74	93,67	-25,28	41,41	-6,46	0,00
Agosto	32,7	56,60	-23,90	0,05	1,67	31,03	-25,57	80,27	-13,40	44,43	-12,17	0,00
Setembro	59,2	71,59	-12,39	0,05	3,02	56,18	-15,40	71,23	-9,04	65,22	-6,36	0,00
Outubro	12,2	82,50	-70,30	0,05	0,62	11,58	-70,92	66,95	-4,28	15,86	-66,64	0,00
Novembro	128,4	78,31	50,09	0,10	13,10	115,30	36,99	117,04	50,09	65,22	-13,10	0,00
Dezembro	240,2	99,81	140,39	0,10	24,50	215,70	115,89	200	82,96	99,81	0,00	32,93
2015 / Janeiro	179	130,66	48,34	0,10	18,26	160,74	30,08	200	0,00	130,66	0,00	30,08
Fevereiro	213	98,09	114,91	0,10	21,73	191,27	93,19	200	0,00	98,09	0,00	93,19
Março	170,1	90,25	79,85	0,10	17,35	152,75	62,50	200	0,00	90,25	0,00	62,50
Abril	17,5	74,15	-56,65	0,05	0,89	16,61	-57,54	200	0,00	16,61	-57,54	0,00
Maio	45,4	53,82	-8,42	0,05	2,32	43,08	-10,74	192	-8,42	51,51	-2,32	0,00
Junho	25,2	51,57	-26,37	0,05	1,29	23,91	-27,66	183,68	-7,90	31,81	-19,76	0,00
Julho	84,5	51,89	32,61	0,05	4,31	80,19	28,30	216,28	32,61	51,89	0,00	0,00
Agosto	20	69,33	-49,33	0,05	1,02	18,98	-50,35	166,95	-49,33	68,31	-1,02	0,00
Setembro	177,4	76,43	100,97	0,05	9,05	168,35	91,92	200	33,05	76,43	0,00	54,53
Outubro	60	91,70	-31,70	0,05	3,06	56,94	-34,76	200	0,00	56,94	-34,76	0,00
Novembro	218	96,39	121,61	0,10	22,24	195,76	99,38	200	0,00	96,39	0,00	99,38
Dezembro	131	117,76	13,24	0,10	13,36	117,64	-0,12	200	0,00	117,64	-0,12	0,00

P, precipitação mensal (mm); ETP, evapotranspiração potencial; C', coeficiente de escoamento; ESC, escoamento superficial (mm); INF, infiltração; ARM, armazenamento; ETR, evapotranspiração real (mm); DEF, déficit de umidade (mm); R, recarga (mm).

Figura 6.7.1.1 – Gráfico de distribuição das variáveis utilizadas no cálculo do balanço hídrico. ESC, escoamento superficial (mm); ETR, evapotranspiração real (mm); REC, recarga (mm); P, precipitação (mm).

A Tabela 6.7.1.5 apresenta os resultados obtidos para o balanço hídrico da área estudada em cada um dos três períodos avaliados, o balanço hídrico considerando os três períodos, além da média anual, calculada com base nos três períodos. A Figura 6.7.1.2 apresenta como está distribuída a recarga ao longo dos anos hidrológicos avaliados.

Os períodos de janeiro-dezembro/2013 e janeiro-dezembro/2014 apresentaram as menores recargas potenciais dos três períodos estudados, respectivamente, com 13,47% e 17,34% do total de precipitação (mm). Este fato, possivelmente, está relacionado à menor quantidade de chuvas registradas nesses períodos, em média de 25,9% menor do que no período de janeiro-dezembro/2015.

Tabela 6.7.1.5 - Balanço hídrico.

Período Avaliado	Parâmetros	Quantidade (mm)	% da Precipitação
Jan-Dez/2013	Precipitação	993,7	100
	Evapotranspiração Real	761,46	76,63
	Escoamento Superficial	86,69	8,72
	Armazenamento	11,66	1,17
	Recarga	133,88	13,47
Jan-Dez/2014	Precipitação	1147,8	100
	Evapotranspiração Real	814,80	70,99
	Escoamento Superficial	106,92	9,32
	Armazenamento	27,09	2,36
	Recarga	210,21	18,31
Jan-Dez/2015	Precipitação	1341,1	100
	Evapotranspiração Real	881,28	65,71
	Escoamento Superficial	114,86	8,56
	Armazenamento	10,53	0,79
	Recarga	344,96	25,72
Jan/2013 a Dez/2015	Precipitação	3482,6	100
	Evapotranspiração Real	2457,55	70,57
	Escoamento Superficial	308,48	8,86
	Armazenamento	38,75	1,11
	Recarga Total do Período Avaliado	677,83	19,46
Recarga Anual Média		225,94	18,84

A recarga potencial para o período de janeiro-dezembro/2015 indicou um valor de 25,72% do total de precipitação (mm); a recarga potencial total dos 3 períodos considerados foi de 19,46% e a média anual foi de 18,84% da quantidade total da precipitação. A recarga, nesses períodos, ocorreu, de modo geral, nos meses com maior quantidade de chuvas, e em 87% dos eventos de recarga registrados, relacionados a meses com precipitação total superior a 100 mm.

Figura 6.7.1.2 – Gráfico de distribuição da recarga (mm) ao longo dos períodos avaliados; DEF, déficit de umidade (mm); R, recarga (mm).

Comparando-se esses valores com estudos de recarga potencial em áreas urbanizadas realizadas por outros autores, utilizando o método do balanço hídrico, observam-se valores próximos e condizentes.

No município de São Paulo, Lima (2002), calculou a recarga potencial de uma área industrial em 9,2 mm, e Viviani-Lima (2007), ao estudar uma área densamente ocupada e, predominantemente, impermeabilizada calculou uma recarga potencial de 24,62%.

Maziero e Wendland (2008) calcularam uma recarga de 16,5% para uma área urbana do município de São Carlos (SP), porém, os autores apresentaram esse valor como uma média, obtida entre outros métodos de quantificação da recarga, como a variação do nível d'água e aproximações darcynianas.

Maldaner (2010), em seu trabalho sobre recarga em área urbana, desenvolvido em Urânia (SP), calculou, pelo método do balanço hídrico, para todo o período considerado, um valor de 21% de recarga potencial.

Tendo em vista que o método do balanço hídrico não considera o tipo de cobertura do terreno avaliado e o seu grau de impermeabilização, que potencializa o escoamento superficial em áreas como a do presente estudo, o cálculo da recarga pode se apresentar subestimado, requerendo a comparação dos resultados com outros métodos de quantificação.

6.7.2 Variação do nível d'água do aquífero

O estudo de recarga pelo método da variação do nível d'água do aquífero, ou, do inglês *Water Table Fluctuation* (WTF), baseia-se na premissa de que a elevação do nível de água em um aquífero livre, ou não confinado, é motivado pela sua recarga (HALL e RISSER, 1993; HEALY e COOK, 2002). Neste trabalho, foram avaliados 3 anos hidrológicos, compreendidos entre os períodos de maio/2013 a abril/2014, maio/2014 a abril/2015 e maio/2015 a abril/2016.

As estimativas de recarga calculadas para os 4 poços tubulares profundos monitorados, posicionados para captação de água subterrânea do aquífero fraturado, devido a alguns fatores, como registros de anomalias nas variações de nível d'água, possivelmente, relacionados a eventos de bombeamento existentes nas proximidades vizinhas ao poço, e maior inferência no valor do coeficiente de vazão específica (*specific yield*), utilizado no cálculo da recarga, não foram incluídas na avaliação quantitativa da recarga na área estudada. Assim, a estimativa geral da recarga considerou somente os dados obtidos dos poços de monitoramento dos aquíferos de porosidade intergranular.

A distribuição da precipitação e da temperatura média mensal no período avaliado foi apresentada na Figura 6.2.1, no item 6.2.

A definição dos períodos selecionados para o estudo de recarga pelo método de variação do nível d'água, considerou os períodos de início e pico da recarga, quando esses níveis apresentam, respectivamente, os mínimos e máximos valores. De modo geral, nos 3 períodos avaliados é possível observar variações entre o início e pico da recarga:

- 1º período (maio/13 a abril/14): período de registros regulares, com início em setembro/13 e pico em março/14;
- 2º período (maio/14 a abril/15): período de registros irregulares, marcado por possíveis consequências de um período mais longo de estiagem registrado entre os anos de 2013 e 2014. O início mais frequente da recarga observado foi em novembro/14, seguido de outubro/14 e setembro/14, e o pico mais frequente em março/15;
- 3º período (maio/15 a abril/16): período de registros regulares, com início em agosto/15 e pico em novembro/15. Este período deve ser avaliado com ressalvas, pois apesar do registros pluviométricos indicarem os maiores índices, em mm, entre os meses de novembro e março/16, os transdutores de pressão tiveram a sua operação paralisada, na maioria dos poços monitorados, entre setembro e dezembro/15, principalmente, devido a problemas técnicos. Possivelmente, os picos de recarga nesse período poderiam ser verificados após novembro/15, refletindo em um maior incremento na quantificação da estimativa da recarga.

A recarga (R) pode ser estimada pela equação $R = Sy \cdot \Delta h / \Delta t$, na qual R é a recarga; Sy (*specific yield*) é a vazão específica; Δh corresponde à variação do nível de água e Δt ao intervalo de tempo considerado no estudo.

Considerando os diferentes materiais geológicos encontrados na zona saturada dos aquíferos de porosidade intergranular avaliados, optou-se por adotar, dentre os valores médios de vazão específica, segundo Johnson (1967, apud FETTER, 2001), o valor médio de 18%, relacionado a silte, e de 21% a areia fina a areia siltosa.

No caso do aquífero fraturado, representado pelos poços tubulares profundos, inferiu-se um valor de 0,1, ou 10%, para o S_y , considerando uma potencial condutividade hidráulica baixa para esse tipo de aquífero.

A variação dos níveis d'água (Δh) corresponde à diferença entre os níveis inicial, ou mínimo de recarga, e o pico, ou máximo de recarga. Porém, no cálculo, o nível mínimo (h_0), é determinado pelo prolongamento da reta que une os registros de queda do nível d'água no período avaliado até encontrar a reta que é traçada perpendicularmente passando pelo pico da recarga (h_1), ou nível máximo observado. A Figura 6.7.2.1 apresenta um exemplo de como os valores de Δh foram calculados.

Figura 6.7.2.1 - Exemplo de cálculo do Δh para aplicação no método WTF.

A Tabela 6.7.2.1 apresenta os resultados de recarga pelo método de variação do nível d'água, obtidos para cada poço de monitoramento e tubular profundo avaliados, em cada um dos três períodos avaliados, em mm e em % da precipitação acumulada no período avaliado. Os cálculos consideram, para cada poço, os valores de vazão específica adotados, bem como os valores de Δh . Os valores da recarga anual média para cada período avaliado, bem como os valores da recarga média para o período total avaliado, entre mai/13 e abr/16, em mm e em % da precipitação, são apresentados na Tabela 6.7.2.2.

Tabela 6.7.2.1 - Cálculos das recargas nos períodos avaliados.

Localização	Poço	Prof. Total (m)	Sy	Δh (mm)			Recarga (mm/ano)			Recarga (% da precipitação)		
				Período Avaliado			Período Avaliado (Precipitação Acumulada - mm)			Período Avaliado		
				1º	2º	3º	1º (1147,0)	2º (1113,7)	3º (1426,6)	1º	2º	3º
Área 1	PM-21	5,2	0,21	257,25	134,40	99,33	257,25	134,40	99,33	22,41	12,07	6,96
	PM-23	3,8	0,21	309,54	122,64	163,38	309,54	122,64	163,38	26,97	11,01	11,45
	PP-02	65,0	0,21	273,0	189,0	315,0	273,0	189,0	315,0	23,8	17,0	22,08
	P-01	142,0	0,1	130,0	100,0	150,0	130,0	100,0	150,0	11,3	9,0	10,5
Área 4	P-1346	184,0	0,1	667,0	-	140,0	66,7	-	140,0	5,8	-	9,8
Área 2	PM-19	3,5	0,21	147,00	194,25	157,50	147,00	194,25	157,50	12,81	17,44	11,04
	PM-19A	19,6	0,18	147,27	181,36	-	147,27	181,36	-	12,83	16,28	-
	PM-39	5,8	0,21	228,9	186,2	200,4	228,9	186,2	200,4	19,9	16,7	14,05
	PM-39A	14,0	0,18	261,0	198,0	189,0	261,0	198,0	189,0	22,7	17,8	13,25
Área 3	PMN-2A	6,2	0,18	216,0	175,5	169,2	216,0	175,5	169,2	18,8	15,8	11,86
	PMN-4A	6,2	0,18	224,0	240,0	208,0	224,0	240,0	208,0	19,5	21,5	14,58
	PMN-4B	14,2	0,18	204,1	228,1	192,1	204,1	228,1	192,1	17,8	20,5	13,46
	P-255	300,0	0,1	166,7	166,7	138,9	166,7	166,7	138,9	14,5	15,0	9,7
	P-1024	260,0	0,1	53,4	100,0	133,4	53,4	100,0	133,4	4,7	9,0	9,4

1º período, maio/13 a abril/14; 2º período, maio/14 a abril/15; 3º período, maio/15 a abril/16.

Tabela 6.7.2.2 - Valores da recarga anual média para cada período avaliado, bem como os valores da recarga média para o período total avaliado.

Recarga Anual Média (mm/ano)			Recarga Média Anual (% precipitação)		
1º	2º	3º	1º	2º	3º
226,81	184,94	188,21	19,77	16,61	13,19
Recarga Média (mm)			Recarga Média (% precipitação)		
Período Total Avaliado (mai/13 - abr/16)			Período Total Avaliado (mai/13 - abr/16)		
599,96			16,27		

1º período, maio/13 a abril/14; 2º período, maio/14 a abril/15; 3º período, maio/15 a abril/16.

O maior valor de recarga anual média foi verificado no 1º período, com 226, 81 mm, ou 19,77% do total de precipitação (mm). Os 2º e 3º períodos apresentaram as menores recargas anuais médias dos três períodos estudados, respectivamente, com 16,61% e 13,19% do total de precipitação (mm). Em relação ao 2º período, este fato, possivelmente, está relacionado à menor quantidade de chuvas registrada no período; quanto ao 3º período, como já discutido, a avaliação deve ser feita com ressalvas, pois apesar do registros pluviométricos indicarem os maiores índices entre os meses de novembro e março/16, os transdutores de pressão tiveram a sua operação paralisada, na maioria dos poços monitorados, entre setembro e dezembro/15, principalmente, devido a problemas técnicos. Possivelmente, os picos de recarga nesse

período poderiam ser verificados após novembro/15, refletindo em um maior incremento na quantificação da estimativa da recarga.

Comparando-se o valor de recarga média para o período total avaliado, entre maio/2013 e abril/2016, de 16,27% do total de precipitação (mm), aos valores de estudos de recarga em áreas urbanizadas realizadas por outros autores, utilizando o método de variação do nível d'água, observamos valores próximos e condizentes com os resultados encontrados neste estudo.

No município de São Paulo, na BAT, Lima (2002), calculou a recarga de uma área industrial em 16% do total de precipitação (mm).

Viviani-Lima (2007), ao estudar 2 áreas distintas no município de São Paulo, na Bacia do Alto Tietê, a primeira mais densamente ocupada e mais impermeabilizada do que a segunda, calculou, respectivamente, uma recarga de 14,5% e 17,5% do total de precipitação do período.

As ressalvas quanto à utilização desse método são explicadas por Lerner (2002). Esse autor cita que a aplicação do método em áreas urbanas deve ser vista com reservas, pois essa técnica não apresenta a sensibilidade necessária para identificar recargas contínuas como aquelas provocadas pela fuga da rede de água e esgoto. Porém, combinado a outros métodos, como em Viviani-Lima (2007), o método de variação do nível de água poderá apresentar melhores resultados.

6.7.3 Isótopos estáveis O e H

A aplicação de isótopos estáveis de O e H, para definir a composição da mistura de diferentes fontes na recarga de um aquífero, requer como premissa que exista uma significativa diferença entre a composição isotópica dessas possíveis fontes. Dessa forma, a composição isotópica de cada fonte considerada poderá ser utilizada como membro final da mistura. A reta traçada entre dois membros finais define a composição da mistura, também chamada de linha de mistura ou *mixing line* (CLARK e FRITZ, 1997).

Utilizando-se esse método, os resultados obtidos com a análise de misturas de águas subterrâneas, provenientes de poços, são plotados no gráfico com a linha de mistura e, conforme a sua posição nessa linha, será determinada a proporção de cada membro final, ou de cada fonte, nessa mistura (CLARK e FRITZ, 1997).

Foram consideradas as seguintes principais fontes de recarga: 1) naturais, representadas pelas águas de chuva, que atingem os aquíferos pela infiltração direta, ou a partir de perdas de sistemas de drenagem pluvial, e pelas águas subterrâneas profundas, que circulam no SAC e se misturam às águas mais rasas dos aquíferos de porosidade intergranular segundo fluxos verticais ascendentes; e 2) antrópicas, representadas pelas águas dos sistemas de

abastecimento público (SABESP) e esgoto, também decorrentes de perdas dos respectivos sistemas.

Os resultados das análises isotópicas, apresentados no Anexo B, indicaram que há diferenças significativas entre a média ponderada das chuvas mensais e a média da água de abastecimento (SABESP) ou esgoto, que se apresentaram similares na campanha de amostragem de 2013, viabilizando a aplicação desses valores como membros finais (*“end-members”*) da mistura. Porém, por representarem melhor a recarga natural, optou-se por utilizar como membro final a composição isotópica referente à média ponderada das chuvas mensais com quantidades entre 108,2 mm e 322,0 mm, excluindo-se assim os meses com menores quantidades de chuva (entre 11,2 mm e 60 mm). Os resultados obtidos com os cálculos de recarga pelos métodos do balanço hídrico e variações dos níveis d’água confirmam a efetividade dessas chuvas mais intensas na recarga dos aquíferos avaliados.

Considerando-se os resultados mais negativos, ou mais empobrecidos em isótopos pesados, verificados, principalmente, nos poços localizados na Área 1, e no poço tubular profundo P-1204, localizado na Área 3, ficou constatada a necessidade de se definir um terceiro membro final, para avaliar numericamente a composição da mistura. Assim, uma vez que esses resultados mais empobrecidos também apresentam diferenças significativas entre as duas outras potenciais fontes de recarga, já definidas como membros finais, assumiu-se como o terceiro membro final, representando uma outra fonte de recarga natural, a média isotópica dos resultados do poço tubular profundo P-1204.

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das águas dos poços profundos PP-02 e P-1204, que também foram amostrados no período avaliado, mostraram um maior empobrecimento desses isótopos, quando comparados com a média ponderada das águas de chuva. Conforme já discutido anteriormente, este fato pode ser explicado pela origem mais antiga dessas águas, refletindo uma composição dos isótopos $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ de águas profundas e mais antigas, indicando períodos climáticos de épocas passadas e diferentes do clima atual.

A mistura a ser caracterizada segundo as proporções das possíveis fontes de recarga é a água subterrânea. Assim, foram plotadas junto à linha de mistura as médias das composições isotópicas de cada poço, referentes às campanhas de amostragem do ano de 2013 e de abril/2014. A campanha de outubro/2014 foi excluída do cálculo da média, visto que, devido ao longo período de estiagem registrado entre os meses de abril e outubro/2014, refletiu em significativa variação na composição isotópica da água de alguns poços avaliados, principalmente, no poço PP-02, localizado na Área 1, e nos poços PMN-4A e PMN-4B, localizados na Área 3.

Os resultados da avaliação da proporção de cada fonte na recarga nos aquíferos da área de estudo está sendo apresentado por poço na Tabela 6.7.3.1. Os cálculos envolveram a

determinação da proporção da composição isotópica de cada valor médio em relação à linha de mistura (Figura 6.7.3.1). Porém, para uma melhor avaliação, também foram plotados nos gráficos os resultados isotópicos de cada poço por campanha de amostragem (Anexo G), permitindo corrigir, nessas situações, a proporção mínima das fontes, naturais ou antrópicas, observada. Os resultados isotópicos de cada fonte de recarga são apresentados no Anexo B.

Os resultados da campanha de amostragem de outubro/14 foram avaliados, isoladamente, buscando-se avaliar a composição da mistura nesse período mais prolongado de chuvas escassas (Tabela 6.7.3.2 e Figura 6.7.3.2).

Em 36% dos poços avaliados (4 poços), a proporção calculada indicou predominância de contribuição natural, sem haver distinção entre profundidade, unidade geológica ou tipo de cobertura do terreno. Porém, deste total de poços, 3 deles estão localizados na Área 1. Nessa discussão, caberia a ressalva de que a composição isotópica dos poços pode, ainda, estar sob influência de fluxos verticais, ascendentes e descendentes, existentes nos aquíferos avaliados, que contribuem para o aporte de fontes de recarga de maiores distâncias e profundidades, refletindo em uma maior diversidade na composição da mistura da água subterrânea. Na Área 1, a existência de fluxo vertical ascendente, pode estar colaborando com os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ mais empobrecidos observados na água subterrânea, mais próximos da composição isotópica da média dos valores da água subterrânea do poço P-1204, definido como membro final para a avaliação numérica.

Dentre os 11 poços avaliados, em 5 deles, ou 45%, a contribuição antrópica foi predominante, sem haver distinção entre profundidade, unidade geológica ou tipo de cobertura do terreno. Os poços PM-19A e 39A são mais profundos (entre 14,0 m e 19,6 m) e os poços PM-D, PM-19 e PMN 4A são rasos (entre 3,5 m e 6,2 m). A contribuição antrópica, observada nos níveis mais profundos, poderia ser explicada pela presença de fluxo vertical descendente (PM-19A) e proximidades da zona de descarga no aquífero, no caso do poço PM-39A.

Em 2 poços rasos, com profundidades entre 5,8 m e 6,2 m (PMN-2A e PM-39), as contribuições natural e antrópica foram equilibradas, com 50% de cada fonte na proporção final da mistura.

Tabela 6.7.3.1 - Resultados do cálculo de contribuição antrópica e natural na recarga dos aquíferos avaliados.

Localização	Poço	Prof. Total (m)	Recarga					
			Contribuição Antrópica (%)			Contribuição Natural (%)		
			Mín.	Médio	Máx.	Mín.	Médio	Máx.
Área 1	PM-21	5,2	0,0	0,0	0,0	100,0	100,0	100,0
	PM-23	3,8	17,5	38,1	68,3	31,7	61,9	82,5
	PP-02	65,0	0,0	4,6	12,3	87,7	95,4	100,0
	PM-D	3,5	24,6	76,9	63,0	37,0	23,1	75,4
	Médias da Área 1			29,9			70,1	
Área 2	PM-19	3,5	60,4	81,1	96,2	3,8	18,9	39,6
	PM-19A	19,6	53,9	60,0	64,7	35,3	40,0	46,1
	PM-39	5,8	16,4	50,0	77,6	22,4	50,0	83,6
	PM-39A	14,0	70,2	76,6	85,1	14,9	23,4	29,8
	Médias da Área 2			66,9			33,1	
Área 3	PMN-2A	6,2	0,0	50,0	85,5	22,6	50,0	100,0
	PMN-4A	6,2	76,2	84,0	85,7	8,0	16,0	23,8
	PMN-4B	14,2	29,5	41,0	59,0	41,0	59,0	70,5
	Médias da Área 3			58,3			41,7	
Média das Áreas 2 e 3				62,6		37,4		
Média das Áreas 1, 2 e 3				51,7		48,3		

Avaliando-se por área, os resultados indicaram que, dentre as 3 áreas avaliadas, em 2 delas a contribuição antrópica, representada pela água de abastecimento, é maior (Áreas 2 e 3), com média de 62,3%. A Área 1 que apresentou maior influência da composição isotópica de águas profundas, devido à presença de fluxos verticais ascendentes, relacionadas a contribuição de fonte natural, apresentou, em média, uma contribuição antrópica de 29,9%. A média geral, calculada para as 3 áreas avaliadas, determinou uma contribuição antrópica de 51,7% na mistura das águas subterrâneas.

Figura 6.7.3.1 - Resultados dos valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na água subterrânea dos poços avaliados plotados na linha de mistura.

6.7.3.1 Campanha de amostragem de outubro/14

Considerando os resultados isotópicos da campanha de amostragem de outubro/14, que devido ao longo período de estiagem registrado entre os meses de abril e outubro/2014, refletiram em significativo enriquecimento na composição isotópica da água de alguns poços avaliados, principalmente, no poço PP-02, localizado na Área 1, e nos poços PMN-4A e PMN-4B, localizados na Área 3 foi necessária a definição de novos membros finais para a avaliação numérica da linha de mistura.

Os resultados das análises isotópicas indicaram que há diferenças significativas entre a média ponderada das chuvas mensais do período seco (meses de agosto a outubro/15 e abril a julho/16) e a média da água de abastecimento (SABESP) da campanha de 2014, viabilizando a aplicação desses valores como membros finais (*“end- members”*) da mistura. A definição do novo membro final como sendo a média da água da chuva referente aos meses do período seco, além de ser mais condizente com o período avaliado, mostrou-se também ser mais coerente para explicar a composição da mistura das águas dos poços PMN-4A e PMN-4B, cujos resultados indicaram os valores isotópicos mais enriquecidos dentre todos os poços avaliados, similarmente à nova média dos valores de chuva.

O terceiro membro final, representando uma outra fonte de recarga natural, a média isotópica dos resultados do poço tubular profundo P-1204, já definido anteriormente, permanece na linha de mistura da campanha de outubro/14.

A mistura a ser caracterizada segundo as proporções das possíveis fontes de recarga é a água subterrânea. Assim, foram plotadas junto à linha de mistura os resultados das composições isotópicas de cada poço, referentes à campanha de amostragem de outubro/14.

Os resultados da avaliação da proporção de cada fonte na recarga nos aquíferos da área de estudo está sendo apresentado por poço na Tabela 6.7.3.2. Os cálculos envolveram a determinação da proporção da composição isotópica de cada valor em relação à linha de mistura (Figura 6.7.3.2). Os resultados isotópicos de cada fonte de recarga são apresentados no Anexo B.

Avaliando-se por área, os resultados da campanha de amostragem de outubro/14 quando comparados com a avaliação da média obtida com os resultados das campanhas de amostragem de 2013 e abril/14, indicaram:

- A Área 1, na campanha de outubro/14, continua a apresentar maior contribuição de fonte natural, com uma proporção ligeiramente maior. O poço PP-02 sofreu significativo enriquecimento em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, passando a apresentar em sua mistura um incremento de recarga antrópica, que passou de 4,6% para 43,7%.

- O comportamento observado nos poços da Área 2 indicou um ligeiro aumento na média de contribuição de fonte antrópica na recarga, que passou de 66,9% para 70,3%. Avaliando-se os resultados dos poços, nos poços rasos PM-19 e PM-39, foi observado um aumento mais expressivo no PM-39, que passou de 50% para 87,5% de contribuição antrópica; já no PM-19 a contribuição antrópica passou de 81,1% para 86,9%.

- A Área 3, dentre as 3 áreas avaliadas, apresentou a mais significativa redução na média de contribuição de fonte antrópica na recarga, que passou de 58,3% para 33,2%, devido principalmente aos resultados observados no PMN-4A e PMN-4B. Os resultados isotópicos desses poços indicaram os valores mais enriquecidos em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ de todos os demais poços avaliados e, portanto, mais próximos do membro final representado pela média da água da chuva referente aos meses do período seco.

Apesar de ser esperada uma maior contribuição antrópica na campanha de outubro/14, devido ao período mais prolongado de seca registrado, os resultados não apontaram nessa direção. A média geral dessa campanha foi de 41,5%, aproximadamente 10% a menos do que a média obtida no cenário anterior (51,7%), para as 3 áreas, utilizando no cálculo a média das campanhas de 2013 e de abril/14.

Tabela 6.7.3.2 - Resultados do cálculo de contribuição antrópica e natural na recarga dos aquíferos avaliados para a campanha de amostragem de outubro/14.

Localização	Poço	Prof. Total (m)	Recarga	
			Contribuição Antrópica (%)	Contribuição Natural (%)
Área 1	PM-21	5,2	2,5	97,5
	PM-23	3,8	27,5	72,5
	PP-02	65,0	43,7	56,3
	PM-D	3,5	10,0	90,0
	Médias da Área 1		20,9	79,1
Área 2	PM-19	3,5	86,2	13,8
	PM-19A	19,6	35,0	65,0
	PM-39	5,8	87,5	12,5
	PM-39A	14,0	72,5	27,5
	Médias da Área 2		70,3	29,7
Área 3	PMN-2A	6,2	50,0	50,0
	PMN-4A	6,2	11,4	88,6
	PMN-4B	14,2	38,3	61,7
	Médias da Área 3		33,2	66,8
Média Geral			41,5	58,5

Figura 6.7.3.2 - Resultados dos valores médios de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na água subterrânea dos poços avaliados, referente à campanha de amostragem de outubro/14, plotados na linha de mistura.

7 DISCUSSÕES FINAIS

Os resultados dos estudos realizados, considerando os objetivos propostos, permitiram:

- 1) estimar a recarga dos aquíferos, utilizando-se os métodos de balanço hídrico, da variação do nível d'água do aquífero e o método isotópico;
- 2) Identificar as fontes por meio da caracterização hidroquímica e isotópica (isótopos estáveis de O e H, e radiogênico de Sr) das águas dos aquíferos da região do Canal Jurubatuba, como também das potenciais fontes de recarga, considerando aquelas de contribuição natural, representadas pela infiltração da água da chuva e do sistema coletor de águas pluviais, e antrópicas, decorrentes de perdas dos sistemas de abastecimento público de água e de coleta de esgoto; e
- 3) Avaliar a atuação dos processos naturais e das possíveis influências antrópicas na composição das águas subterrâneas com a integração dos resultados obtidos nos estudos de recarga, hidroquímicos e isotópicos.

A seguir são apresentados os principais resultados obtidos junto a discussões relevantes assim com a sua integração quando pertinente.

Avaliação da precipitação e da variação dos níveis d'água

Avaliando-se o acumulado de chuvas mensal e a variação do nível d'água no respectivo mês é notável que, apesar de serem registradas precipitações durante os meses mais secos do ano, o declínio do nível d'água é mais evidente e contínuo nesses meses, indicando que a recarga do aquífero não está sendo efetiva, ou seja, a quantidade de chuva registrado é insuficiente para resultar em recarga. Os resultados do monitoramento dos tensiômetros, corroboram os resultados do monitoramento da variação do nível d'água, uma vez que apresentaram as maiores pressões, indicativas de menor umidade no solo, entre os meses em que a pluviometria média mensal indicou baixas quantidades, entre 12,2 mm e 59,2 mm.

A discussão considerando os períodos mais chuvosos é análoga, o impacto da maior quantidade de chuvas, registrado entre novembro/14 e março/15, na umidade da zona não saturada pode ser observada pelos menores valores de pressão registrados pelos tensiômetros. Nesse período, a pluviometria média mensal ficou sempre acima de 100 mm e, possivelmente, as águas de chuva sempre atingiram o aquífero, resultando em recarga.

Caracterização hidroquímica, isotópica e integração dos resultados

Os resultados principais para os grupos Chuva, Esgoto e água da rede de abastecimento indicaram que: 1) as águas de chuva são bicarbonatadas cálcicas e apresentam as mais baixas concentrações de espécies químicas dissolvidas dentre todas as amostras analisadas; 2) a amostra de esgoto é bicarbonatada sódica e apresenta as mais elevadas concentrações de espécies químicas dissolvidas dentre todas as amostras analisadas; e 3) as águas da SABESP

são cálcica mistas e a média de suas concentrações de espécies químicas dissolvidas estão próximas ao quartil inferior de toda a coleção de amostras analisadas. O nitrato na água da SABESP apresentou a concentração mais alta do que as demais amostras. Já no esgoto, a concentração de nitrato é baixa, pois o nitrogênio está na forma de amônio, parâmetro não analisado na amostra. A média das concentrações de fluoreto nas águas da SABESP, devido à adição de flúor durante o seu tratamento, é mais elevada do que as médias das concentrações dos demais grupos de amostras.

Entre os parâmetros analisados destaca-se, inicialmente, como indicador da presença de contaminação por esgoto, o amônio e o nitrato. Neste contexto, considerou-se, segundo Vesilind e Morgan (2013), que o amônio pode ser considerado um indicador de poluição recente; e por outro lado, as águas com alto teor de nitrato e baixo teor de amônio, são sugestivas de que a poluição aconteceu há mais tempo.

Os poços da Área 5, em relação à soma de íons, apresentaram no aquífero de porosidade intergranular a maior concentração de solutos dissolvidos nas águas subterrâneas, assim como os íons cloreto, sódio, bicarbonato, amônio e ferro, dentre todas as demais áreas avaliadas, superadas somente pela amostra de esgoto, indicando contribuição de fontes antrópicas na recarga desse aquífero. Entretanto, a fonte da carga orgânica observada nos poços da Área 5 não deve estar representada somente pela fonte antrópica esgoto. Conforme observado em dados de relatórios de avaliação ambiental disponibilizados pela CETESB, assim como em resultados analíticos apresentados em Miyata (2016) e Lojkasek-Lima (2016), as águas subterrâneas locais apresentam compostos organoclorados dissolvidos, provenientes de fontes antrópicas, relacionadas a atividades industriais, extensamente desenvolvidas, desde tempos pretéritos até os atuais, na região do Canal do Jurubatuba. Essa área, na porção intermediária do aquífero, também foi verificada a maior alteração por interferência antrópica mas em concentrações menos elevadas do que na sua porção mais rasa. Este quadro, em um cenário de fluxo descendente, predominante na área, segundo os estudos de Lokjasek-Lima (2016), é indicativo de uma contaminação proveniente de níveis mais superficiais para níveis mais profundos do aquífero, sob influência de processos de atenuação e de diluição das concentrações ao longo do fluxo.

O cloreto, no aquífero de porosidade intergranular das Áreas 1, 2 e 3, foi encontrado em concentrações sempre inferiores àsquelas encontradas na água da rede de abastecimento, e mais inferiores ainda do que as concentrações da amostra de esgoto. Já na Área 5, onde há presença de compostos organoclorados, as concentrações de cloreto se mostraram mais significativas, ainda que não tenham excedido o padrão de potabilidade.

A destacada presença de carga orgânica na água subterrânea foi evidenciada pelas elevadas concentrações de amônio (NH_4^+), acima do padrão de potabilidade (amônia = 1,5 mg/L), nas Áreas 1, 3 e 5, de modo geral em poços com menor concentração de oxigênio

dissolvido (OD). Exceção se faz ao PM-D, que apresentou maior concentração de OD, além de elevadas concentrações de nitrato, indicando que o amônio está, possivelmente, sendo convertido em nitrato devido à atuação de processos de nitrificação.

Destaca-se que as águas do poço PMN-2A, para alguns parâmetros, como cálcio, condutividade elétrica, amônio e sódio variaram ao longo do tempo similarmente às águas do poço PM-D, localizado na Área 1. Ambos os poços apresentam contribuição de águas mais profundas, provenientes de fluxos ascendentes. As concentrações de amônio em ambos os poços aumentaram durante o período de seca mais prolongado registrado entre 2013 e 2014, assim como, nesse período, também apresentaram tendência de redução do pH e do oxigênio dissolvido nas águas subterrâneas.

O flúor, presente na água da SABESP e no esgoto, apresentou concentrações no aquífero de porosidade intergranular bem inferiores que aquelas observadas nessas fontes, destacando a sua presença no poço PMN-2A, assim como em outros poços com influência de fluxo ascendente ou que monitoram o aquífero intermediário. Esse parâmetro, no aquífero fraturado, atingiu maiores concentrações do que nos aquíferos de porosidade intergranular.

O poço PP-02 apresentou a maior variação hidroquímica durante o período de amostragem, suas águas foram se tornando mais cálcicas e sulfatadas e as concentrações de amônio e nitrato aumentaram. Tal fato pode estar relacionado ao período seco mais prolongado, principalmente entre abril e outubro de 2014, que provocou uma redução no volume das águas dos aquíferos e, possivelmente, aumento da carga orgânica.

O aumento de sulfato em profundidade foi observado nos poços do aquífero fraturado P-255 e P-1204, na Área 3, e no poço WB-01, na Área 5, apresentando também as maiores concentrações médias em relação aos aquíferos de porosidade intergranular. Nestes, as maiores concentrações de sulfato foram verificadas nos poços com fluxo ascendente e nos poços que monitoram o seu nível intermediário.

A análise isotópica dos resultados das amostras de águas de chuva evidenciou que, de modo geral, há uma relação entre a precipitação mensal e a variação no enriquecimento de isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$. Essa influência, imposta pela quantidade de chuvas, é explicada por Vuille et al (2003, apud MARTINS, 2008) para regiões tropicais, porém, algumas exceções observadas nesse comportamento, quando não há correlação entre a quantidade de chuvas e o maior ou menor enriquecimento de isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, pode estar relacionada à diversidade das fontes das massas de ar (Martins, 2008).

Dias (2005) concluiu em seus estudos que nas águas de chuva é evidente o "efeito de quantidade" (DANSGAARD, 1964, apud DIAS, 2005), no qual se observa um empobrecimento de valores de O e H com o aumento da precipitação.

A média ponderada pela quantidade de chuvas, calculada entre o período das 2 amostragens de 2013, indicou valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, muito semelhantes ao período de agosto/2015 a julho/2016, indicando composição isotópica mais enriquecida. Segundo Dias (2005), em estudos realizados na cidade de São Paulo, nas Zonas Norte, Sul, Leste e Oeste, foram registradas poucas diferenças entre os resultados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ em amostras de água de chuva referente ao período compreendido entre novembro/2003 e outubro/2004. O autor salienta que durante os meses de maior pluviosidade, entre janeiro fevereiro/2004, a diferença observada foi maior, principalmente, nas Zonas Norte e Leste.

A reta meteórica local, elaborada para a região do Canal do Jurubatuba, quando comparada à reta meteórica global (ROZANSKY et al., 1993) apresentou similaridade e boa correlação, dada pela equivalência verificada em suas inclinações.

Os resultados das 2 amostras de água da rede de abastecimento, coletadas em fevereiro e março/2014, indicaram os mesmos valores, distinguindo-se da amostra coletada em abril/2013, cujo valor é igual à amostra de esgoto, coletada no mesmo período. Considerando que o reservatório que abastece a região (Represa Guarapiranga) é o mesmo nos dois períodos de amostragem, a diferença observada, possivelmente, está relacionada à mudança de comportamento do clima registrada entre os períodos de amostragens, representada por uma estação seca mais prolongada registrada entre 2013 e 2014. As análises de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ desse período indicaram um ligeiro enriquecimento isotópico, possivelmente, relacionado ao regime climático diferenciado que foi registrado. Não está sendo observada a atuação de processos secundários, como a evaporação, visto que os resultados se encontram junto, ou muito próximos, à reta meteórica local (LMWL). O mesmo comportamento foi observando nos resultados das amostras dos poços de monitoramento dos aquíferos de porosidade intergranular das 4 campanhas.

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ observados nos poços PMN-4A e PMN-4B, localizados junto à rede de esgoto e de rede de águas de abastecimento indicaram significativa contribuição de fontes de recarga antrópica na recarga. Este fato é corroborado pelos resultados hidroquímicos desses poços, principalmente, para o PM-4A que apresentou evidências de contribuição de esgoto na recarga do aquífero, devido à presença de alto teor de amônio em suas águas.

O PM-21, na Área 1, apresentou o maior empobrecimento médio nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ dentre todas as amostras analisadas, que se manteve estável nas campanhas de 2014, sob maior influência de diferentes comportamentos do clima. A estabilidade na composição isotópica observada nesse poço pode estar mais relacionada à contribuição de águas mais profundas, mais antigas e mais empobrecidas em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, que se misturam às mais rasas devido à existência de fluxos verticais ascendentes existentes nessa área.

O poço de monitoramento da Área 1, PP-02, posicionado para monitorar o nível de 65,0 m de profundidade, no aquífero de porosidade intergranular intermediário (porção intemperizada do aquífero fraturado), e o poço tubular profundo 1204, localizado na Área 3, com captação de água do aquífero fraturado, apresentaram composição isotópica similar e empobrecida em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ quando comparada com a média ponderada das águas de chuva, indicando, possivelmente, como já discutido, uma origem mais antiga dessas águas, com diferente composição isotópica. A semelhança na composição isotópica desses poços com poços rasos localizados nas áreas 1 e 3 reforça a possibilidade da influência de fluxos verticais ascendentes, misturando águas mais antigas, mais empobrecidas em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, com águas mais superficiais mais enriquecidas. A presença de amônio e nitrato nos resultados hidroquímicos de poços dessas áreas, incluindo o PP-02, indicando relevante contribuição antrópica na recarga dos aquíferos, aumenta as semelhanças observadas na composição dessas águas.

Os resultados isotópicos de todas as amostras do poço tubular profundo P-1204, realizadas entre 53,0 m e 256,0 m, apresentaram composições isotópicas iguais, indicando empobrecimento desses isótopos, quando comparada com a média ponderada das águas de chuva. Os resultados das análises hidroquímicas indicaram a presença de sulfato e cloreto nas águas desse poço, cujas concentrações aumentam com a profundidade.

Os resultados das amostras do sistema CMT, na Área 5, (entre 2,3 m e 14,5 m), indicaram valores mais empobrecidos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ com o aumento da profundidade, refletindo uma composição isotópica mais enriquecida e mais próxima da composição isotópica de fontes de recarga de origem antrópica (águas da SABESP e esgoto), principalmente, nos níveis mais superficiais do aquífero. Esses resultados são confirmados pela hidroquímica que indicou elevadas concentrações de amônio no aquífero de porosidade intergranular da Área 5, indicativo da presença de contribuição de esgoto na sua recarga. Entretanto, como já discutido, a fonte da carga orgânica observada nos poços da Área 5 não deve estar representada somente pela fonte antrópica esgoto, mas também pela presença de compostos organoclorados dissolvidos.

As análises de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ nas amostras do sistema *Westbay* (entre 15,3 m e 55,5 m), no aquífero fraturado, similarmente ao CMT, indicaram, de modo geral, um empobrecimento desses isótopos com a profundidade. O valor mais negativo foi observado a 15,3 m de profundidade, no contato entre a rocha alterada dura e a rocha alterada dura, indicando, nessa profundidade, uma mistura com maior contribuição de fontes antrópicas na recarga devido ao empobrecimento desses isótopos em relação à média ponderada das águas de chuva. Dentre os resultados, a amostra da profundidade de 22,6 m apresentou os valores menos empobrecidos e muito mais próximos à média ponderada das águas de chuva, indicando uma

maior mistura dessas águas, possivelmente, por conexão hidráulica entre fraturas e predominância de fluxos descendentes (PINO, 2017; LOJKASEK-LIMA, 2016), pode explicar a composição isotópica mais enriquecida em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ encontrada à profundidade de 22,6 m. Os resultados hidroquímicos indicaram que as águas mais profundas do poço *Westbay* WB-01 são mais sulfatadas do que as mais rasas, e o mesmo comportamento é observado para soma de íons nesse poço.

As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das amostras de água da SABESP e de esgoto mostraram resultados semelhantes não sendo possível distinguir de qual dessas fontes se origina as águas na mistura dos poços avaliados. As amostras coletadas nos poços mais rasos, entre 3,5 m e 5,8 m, apresentaram as razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ mais próximas das razões da água de abastecimento da SABESP e de esgoto, ficando evidente a contribuição dessas fontes antrópicas na recarga do aquífero raso. Os resultados hidroquímicos, principalmente, para os poços PM-D, PMN-4A e PM-19, confirmam a presença de influência antrópica na recarga, devido à presença de concentrações de amônio nas suas águas.

Considerando que as amostras mais radiogênicas foram observadas a maiores profundidades, assim como também na porção mais à jusante da área estudada, com ocorrência de fluxo vertical ascendente, Frost et al. (2002, apud MARTINS, 2008) explicam que a razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ na água subterrânea aumenta com o aumento da distância da área de recarga e, assim, maior interação rocha-água no percurso do fluxo. A integração desses resultados com a hidroquímica indicou que os poços PMN-2A e PM-39A, apresentaram a mesma assinatura isotópica do poço profundo P-1204, reforçando a evidência da atuação de fluxos ascendentes na recarga dos aquíferos de porosidade intergranular rasos e intermediários. Já na Área 1, que apresenta fluxos ascendentes, essa evidência não foi confirmada.

A discussão a seguir, complementa a explicação sobre o comportamento das razões isotópicas de Sr que foram observadas, apesar de não terem sido coletadas e analisadas amostras de rocha da área estudada.

Banner (2004) cita que, como a composição isotópica de Sr é, inicialmente, dada pelas rochas pelas quais as águas percorrem, assim como pela composição química e idade, as rochas mais antigas fornecerão razões isotópicas de Sr mais radiogênicas nas águas, e rochas mais jovens razões isotópicas menores. Nas águas subterrâneas, esse comportamento ocorre de forma mais evidente, uma vez que a pressão e as forças iônicas são maiores em profundidade, e a área de contato com a rocha e o tempo serão também maiores.

Estimativa de recarga

O estudo de recarga pelo método do balanço hídrico avaliou 3 anos hidrológicos, (janeiro a dezembro/2013, janeiro a dezembro/2014 e janeiro a dezembro/2015). A recarga potencial total dos 3 períodos considerados foi de 19,46% da precipitação total do período com média anual de 18,84% do total da precipitação. A recarga, nesses períodos, ocorreu, de modo geral, nos meses com maior quantidade de chuvas, e em 87% dos eventos de recarga registrados, relacionados a meses com quantidade de precipitação total superior a 100 mm. Comparando-se esses valores com estudos de recarga potencial em áreas urbanizadas realizadas por outros autores (LIMA, 2002; VIVIANI-LIMA, 2007; MAZIERO e WENDLAND, 2008; MALDANER, 2010), utilizando o método do balanço hídrico, observam-se valores próximos e condizentes.

O estudo de recarga pelo método da variação do nível d'água do aquífero avaliou 3 anos hidrológicos (maio/2013 a abril/2014, maio/2014 a abril/2015 e maio/2015 a abril/2016). O maior valor de recarga anual média foi verificado no 1º período, com 226, 81 mm, ou 19,77% do total de precipitação (mm). Comparando-se o valor de recarga média para o período total avaliado, de 16,27% do total de precipitação (mm), aos valores de estudos de recarga em áreas urbanizadas realizadas por outros autores (LIMA, 2002; VIVIANI-LIMA, 2007), utilizando o método de variação do nível d'água, observam-se valores próximos e condizentes com os resultados encontrados neste estudo. Segundo Lerner (2002), a aplicação desse método em áreas urbanas deve ser vista com reservas, pois não apresenta a sensibilidade necessária para identificar recargas contínuas relacionadas às perdas das redes de água e esgoto.

Comparando-se os resultados dos métodos físicos utilizados para o cálculo de recarga, considerando-se as limitações de cada método, os valores encontrados são muito próximos. Pelo método do balanço hídrico, a recarga potencial média anual foi de 18,84%, enquanto que pelo método da variação do nível d'água a recarga média indicou 16,27% do total de precipitação para os períodos avaliados.

Os resultados do método isotópico indicou uma média geral de contribuição antrópica, para as 3 áreas avaliadas, de 51,7% na mistura das águas subterrâneas. A avaliação da campanha de amostragem de outubro/14, quando comparada com a avaliação da média obtida com os resultados das campanhas de amostragem de 2013 e abril/14, apesar de ser esperada uma maior contribuição antrópica na campanha de outubro/14, não apontaram nessa direção. A média geral dessa campanha foi de 41,5%, aproximadamente 10% a menos do que a média obtida no cenário anterior (51,7%), para as 3 áreas avaliadas, utilizando no cálculo a média das campanhas de 2013 e de abril/14. Pontualmente, vale registrar que o poço PP-02 sofreu significativo enriquecimento em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, passando a apresentar em sua mistura um incremento de recarga antrópica, que passou de 4,6% para 43,7% em outubro/14. Considerando a maior influência da composição isotópica de águas profundas do PP-02, devido

à presença de fluxos verticais ascendentes, os demais poços rasos da Área 1 poderiam apresentar também uma maior contribuição antrópica na composição da mistura, fato que não está sendo verificado nos resultados (média) dos poços PM-D e PM-23. Uma possível explicação seria a maior mistura das águas profundas com as águas de níveis superiores dos aquíferos, assim como efeitos de diluição ao longo do fluxo.

A influência de fluxos verticais ascendentes, identificada pelas diferenças nas cargas hidráulicas dos poços monitorados, assim como pela maior proximidade entre valores mais empobrecidos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das águas dos poços do aquífero de porosidade intergranular intermediário PP-02 e do poço tubular profundo P-1204, e de poços do aquífero de porosidade intergranular raso, principalmente nas Áreas 1 e 3, indica contribuição na mistura das águas subterrâneas dos aquíferos de porosidade intergranular rasos. Não foi identificado que a contribuição antrópica esteja ocorrendo, em maior ou menor expressão, segundo as diferentes profundidades dos aquíferos avaliados.

Os valores calculados para a determinação da contribuição antrópica na recarga dos aquíferos avaliados, segundo o método isotópico aplicado, considerando a média geral das campanhas de 2013 e de abril/14 obtida para as Áreas 2 e 3 (62,6%) e para as 3 áreas (51,7%), são similares aos encontrados por Viviani-Lima (2007), ao estudar duas áreas, com maiores (médias entre 79% e 58%, e média geral de 67%) e menores (médias entre 79% e 14%, e média geral de 46,5%) ocupação urbana e impermeabilização da cobertura do terreno, ambas localizadas na Bacia do Alto Tietê. Martins (2008), ao quantificar a recarga das mesmas áreas estudadas por Viviani-Lima (2007), utilizando o mesmo método, calculou em 41% (média dos valores entre 32% e 51%) a contribuição antrópica observada na área com maior ocupação urbana, resultado mais condizente com a média geral das campanhas de 2013 e de abril/14, obtida para as 3 áreas (51,7%), assim como para a média geral dos resultados obtidos campanha de outubro/14 (41,5%), calculadas no presente estudo.

8 CONCLUSÕES

Considerando todos os resultados obtidos, nesta seção são apresentadas as principais conclusões desta pesquisa.

As quantidades acumuladas de chuvas nos períodos avaliados, de janeiro/2013 a dezembro/2013, de janeiro a dezembro/2014 e de janeiro/2015 a dezembro/2015, correspondentes a 3 anos hidrológicos foram, respectivamente, de 993,7 mm, 1.147,8 mm e 1.341,1 mm.

O monitoramento do nível d'água dos poços, indicou os seguintes eventos de recarga, por período avaliado: 1º período, início da recarga entre maio e agosto/13 e pico em março/14; 2º período, início mais frequente da recarga em novembro/14, seguido de outubro/14 e setembro/14, e o pico mais frequente em março/15; e 3º período, início da recarga em agosto/15 e pico em novembro/15.

De modo geral, para os poços dos aquíferos de porosidade intergranular, observou-se que o nível d'água inicia a subida imediatamente a eventos de chuva acima de 15 mm, sob um acumulado de chuvas, aproximado, de 25 mm a 35 mm. A cobertura do terreno, quando impermeabilizada, ou uma maior profundidade dos poços avaliados, causou uma resposta mais lenta na variação do nível d'água. Quanto aos poços do aquífero fraturado, todos situados em local com piso impermeável, observou-se que a subida do nível d'água é mais efetiva em eventos de chuva acima de 30 mm, aproximadamente, sob um acumulado de chuvas, aproximado, de 25 mm a 35 mm.

Avaliando-se o acumulado de chuvas mensal e a variação do nível d'água no respectivo mês é notável que a recarga dos aquíferos está sendo efetiva nos períodos mais chuvosos, quando a pluviometria média mensal ficou sempre acima de 100 mm, fato confirmado pelo monitoramento da zona não saturada, por meio de tensiômetros. Nos meses mais secos, possivelmente, as águas da chuva não são suficientes para atingir o aquífero e promover a sua recarga.

A análise isotópica das águas de chuva evidencia que, de modo geral, há uma relação entre a quantidade de precipitação mensal e a variação no enriquecimento de isótopos estáveis. Nos meses com maior quantidade de chuvas há um menor enriquecimento, observando-se o inverso durante nos meses com menor quantidade.

A média ponderada pela quantidade de chuvas, calculada entre o período das 2 amostragens de 2013, indicou valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ muito semelhantes ao período de agosto/2015 a julho/2016 e, portanto, de composição isotópica mais enriquecida. A reta meteórica local, elaborada para a região do Canal do Jurubatuba, quando comparada à reta

meteórica global (ROZANSKY et al., 1993) apresenta similaridade e boa correlação, dada pela equivalência verificada em suas inclinações.

Os resultados isotópicos das amostras de água da rede de abastecimento, de esgoto e de todas as amostras dos poços de monitoramento dos aquíferos de porosidade intergranular, indicaram um maior empobrecimento isotópico nas amostras de 2013. Considerando que o reservatório que abastece a região (Represa Guarapiranga) é o mesmo nos dois períodos de amostragem (2013 e 2014), a diferença observada, possivelmente, está relacionada à mudança de comportamento do clima registrada, representada por uma estação seca mais prolongada. Não foi observada a atuação de processos secundários, como a evaporação, pois, de modo geral, os resultados isotópicos se encontram junto, ou muito próximos, à reta meteórica local (LMWL).

A contribuição antrópica na recarga, identificada pelos isótopos estáveis e de Sr, a partir de caracterização de fontes, foi corroborada pela hidroquímica em vários poços analisados, confirmando a sua acentuada relevância na composição da mistura das águas subterrâneas. Porém utilizando-se os isótopos de Sr, não foi possível a distinção entre as fontes água da rede de abastecimento e de esgoto devido por apresentarem a mesma assinatura isotópica.

O enriquecimento isotópico que, de modo geral, foi observado durante o período prolongado de seca observado entre 2013/2014, apresentou correspondência com poços que apresentaram maior contribuição de fonte antrópica (esgoto), naquele período, indicando a importante influência de diferentes comportamentos do clima na composição hidroquímica das fontes de recarga e, assim das águas dos aquíferos. Em alguns poços foi notável o aumento da carga orgânica, indicada principalmente pelo aumento progressivo das concentrações de amônio e de nitrato.

Os resultados das 2 campanhas de amostragem do poço tubular profundo 1204, realizadas em 7 profundidades distintas, entre 53,0 m e 256,0 m, apresentaram composições isotópicas iguais e empobrecidas em isótopos pesados, quando comparada com a média ponderada das águas de chuva. Este fato pode ser explicado pela origem mais antiga dessas águas, refletindo diferentes períodos climáticos com diferente composição isotópica.

Os resultados das análises isotópicas dos sistemas multiníveis CMT e *Westbay*, na Área 5, de modo geral, indicaram composições isotópicas mais enriquecidas nos níveis mais superficiais do aquífero. A hidroquímica mostrou que os poços que monitoram o aquífero de porosidade intergranular dessa área são os que apresentam maior alteração na qualidade das águas subterrâneas dentre todas as demais estudadas, diminuindo com a profundidade segundo fluxos descendentes. Salienta-se que essa alteração, pode também estar relacionada com a presença de compostos organoclorados, identificada por estudos já realizados no local, assim como pela presença de concentrações de cloreto mais significativas, dificultando uma

avaliação hidroquímica mais precisa e coerente, para determinar a contribuição de outras fontes antrópicas, como o esgoto, na recarga dos aquíferos.

A caracterização hidroquímica mostrou que todos os aquíferos avaliados, de porosidade intergranular e fraturado, apresentam alteração na qualidade natural de suas águas, em maior ou menor grau, em decorrência de contribuição de fontes antrópicas na sua recarga. Esses resultados, aliados às estimativas de recarga de origem antrópica pelo método isotópico, refletem a acentuada e relevante importância dessa fonte na composição da mistura das águas dos aquíferos.

O amônio se mostrou o indicador mais eficaz na determinação de contribuição antrópica na recarga por esgoto, sendo identificado com destacada relevância em poços do aquífero de porosidade intergranular raso das Áreas 1 e 3. Além do amônio, a presença de nitrato reflete a potencial atuação de processos de nitrificação nas águas subterrâneas.

As concentrações significativas de cloreto e sulfato nas águas profundas do aquífero fraturado, indicadas pelos poços P-1204 e MP-01, são indicadoras de alterações antrópicas em sua qualidade. Apesar de se considerar que a relação de causa e efeito, para explicar essas elevadas concentrações, não está completamente definida, ela deve ser analisada sob o contexto de uma região na qual os aquíferos sofreram, desde tempos pretéritos até os atuais, em diferentes intensidades, alterações na qualidade de suas águas em decorrência de intensas atividades industriais, como comprovam os inúmeros estudos realizados na região estudada, disponibilizados para consulta pela CETESB.

Comparando-se os resultados dos métodos físicos utilizados para o cálculo de recarga, considerando-se as limitações de cada método, os valores encontrados são muito próximos. A recarga potencial total dos 3 anos hidrológicos considerados, calculada pelo método do balanço hídrico, entre janeiro/2013 e dezembro/2015, foi de 19,46% da precipitação total do período, com média anual de 18,84% da quantidade total da precipitação. Em 87% dos eventos de recarga registrados, a precipitação total foi superior a 100 mm. Já a estimativa de recarga média, calculada pelo método da variação do nível d'água do aquífero, para o período total avaliado, entre maio/2013 e abril/2016, foi de 16,27% do total de precipitação (mm).

Os resultados do método isotópico, nos estudos de recarga, indicaram que na média das campanhas de amostragem do ano de 2013 e de abril/2014, sem haver distinção entre profundidade, unidade geológica ou tipo de cobertura do terreno, em 2 das 3 áreas avaliadas a contribuição antrópica é maior, com média de 62,3%. A média geral, calculada para as 3 áreas avaliadas, determinou uma contribuição antrópica de 51,7% na mistura das águas subterrâneas. Os resultados da campanha de amostragem de outubro/14, avaliados isoladamente devido ao período climático diferenciado, marcado por um período prolongado de seca (abril a outubro/14), não indicaram uma maior contribuição antrópica na recarga. A média

geral dessa campanha foi de 41,5%. Porém, pontualmente, observa-se que o poço PP-02 sofreu significativo enriquecimento isotópico e incremento de recarga antrópica.

A influência de fluxos ascendentes, identificada pelas diferenças nas cargas hidráulicas dos poços monitorados, pela semelhança hidroquímica e pela assinatura isotópica entre as águas do poço do aquífero de porosidade intergranular intermediário PP-02 e do poço tubular profundo P-1204, e de poços do aquífero de porosidade intergranular raso, está contribuindo para a mistura das águas subterrâneas dos níveis mais rasos desses aquíferos. Não foi identificado que a contribuição antrópica esteja ocorrendo, em maior ou menor expressão, segundo as diferentes profundidades dos aquíferos avaliados, mas foram identificados, possivelmente, efeitos de atenuação e/ou diluição ao longo do fluxo.

A execução, bem como os resultados desta pesquisa indicaram a necessidade de serem apresentadas algumas recomendações para futuros trabalhos a serem realizados na área do Canal do Jurubatuba, mas também, para a toda a BAT, envolvendo o aprimoramento dos materiais e métodos e complementações dos estudos realizados. Assim, recomendam-se:

- a realização de amostragens das potenciais fontes de recarga antrópicas, como a água de abastecimento público e o esgoto, em todas as campanhas de amostragens de poço previstas;
- a manutenção dos parâmetros analíticos indicadores em todas as amostras e campanhas;
- a viabilização de amostragens das águas de poços do aquífero fraturado com mais frequência, possibilitada pelo maior conhecimento que está sendo obtido com os demais estudos em andamento dentro do Projeto GESOL;
- a utilização e integração dos demais estudos em andamento dentro do Projeto GESOL, em futuros trabalhos;
- a elaboração de novos estudos incluindo modelos hidrogeológicos com uma maior densidade de informações e análises químicas do substrato rochoso, para incrementar o conhecimento de novas relações de causa e efeito e, assim, ampliar a compreensão sobre a hidroquímica das águas dos aquíferos estudados;
- devido à carência de estudos relacionados ao tema desta pesquisa, o desenvolvimento de novos estudos, dentro e além dos limites da área do Canal do Jurubatuba, visando ao refinamento das estimativas obtidas, no caso dos estudos de recarga, assim como ao incremento do banco de dados hidrogeológicos, hidroquímicos e isotópicos.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostragem de água subterrânea em poços de monitoramento e métodos de purga (2010). NBR 15.847. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 15 p.
- ALMEIDA, F.F.M DE, AMARAL, G., CORDANI, U.G., KAWASHITA, K. (1973). The pre-cambrian of the South American cratonic margin South of the Amazon River. *In*: NAIRN, E.M. & STEHLI, F.G. (Eds.) *The ocean basins and margins*. Plenum, p.: 411-446.
- ALMEIDA, F. F. M.; RICCOMINI, C.; DEHIRA, L. K.; CAMPANHA, G.A.C. (1984). Tectônica da Formação Itaquaquecetuba na Grande São Paulo. 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro. v.4, p. 1794-1808.
- APPLEYARD S. J. (1995). The impact of urban development on recharge and groundwater quality in a coastal aquifer near Perth, Western Australia: *Hydrogeol J* 3(2):65-75.
- BAERTSCHI, P. (1976). Absolute ^{18}O content of Standard Mean Ocean Water. *Earth and Planetary Science Letters*, 31:341-344.
- BALEK, J. (1987). Groundwater recharge concepts. *In*: Simmers, I. (Ed.) *Estimation of Natural Groundwater Recharge*. NATO ASI Series. Series C: Mathematical and Physical Sciences, Vol. 222. pp. 3-9.
- BANNER, J. (2004). Radiogenic isotopes: systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy. *Earth-Science Reviews*. (65) 141-194.
- BARBOSA, M. (2015). Sistema de informações geográficas aplicado ao gerenciamento da contaminação da antiga ZUPI 131, Jurubatuba, São Paulo. 121 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BARBOSA, M. (2017). Desenvolvimento de técnicas e métodos de campo para a caracterização de aquíferos fraturados: estudo de caso da antiga ZUPI 131, região do Jurubatuba, São Paulo – SP: Exame de Qualificação de doutorado. IGc-USP.
- BATLLE-AGUILAR, J., BANKS, E.B., BATELAAN, O., KIPFER, R., BRENNWALD, M.S., PETER, G.C. (2017). Groundwater residence time and aquifer recharge in multilayered, semi-confined and faulted aquifer systems using environmental tracers. *Journal of Hydrology*. 150-165.
- BERTOLO, R. A. (1996). Relações entre rios e o Aquífero Sedimentar da Bacia de São Paulo em áreas de exploração intensiva de água subterrânea. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 108 f.
- BOCKGÅRD, N. (2004). Groundwater Recharge in Crystalline Bedrock: Process, Estimation, and Modelling. *Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology*. 48 p.

- BRASIL (2011). Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011.
- BULLEN, T.D. e KENDALL, C. (1998). Tracing of weathering reactions and water flowpaths: A multi-isotope approach. In: Kendall, C & McDonnell, J.J. (Eds) Isotope tracers in catchment hydrology, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 839 p.
- CHARALAMPIDES, G e MANOLIADIS, O. (2002). Sr and Pb isotopes as environmental indicators in environmental studies. *Environmental International*, 28:147-151.
- CLARK, I. e FRITZ, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. Lewis Publishers. Boca Raton. pp. 328.
- CONICELLI, B. P. (2014). *Gestão das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (SP)*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 163 p.
- CRAIG, H. (1961). Isotopic variation in meteoric waters. *Science*, 133, p.1702.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R., (1981). *Hidrogeología subterránea*. 2a ed. Barcelona, Ediciones Omega, v.1, 1157p.
- DAEE–DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. (1975). *Estudo de águas subterrâneas. Região Administrativa 1, Grande São Paulo*. São Paulo: DAEE, 3v.
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. (2005). Portaria nº 1594, de 05 de outubro de 2005.
- DAEE; IG-SMA; IPT; CPRM. (2005). *Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo*. Org.: Rocha, G. São Paulo, 119p.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA E IG – INSTITUTO GEOLÓGICO. (2009). *Projeto Jurubatuba: restrição e controle do uso de água subterrânea*. Secretaria de Estado do Meio Ambiente; Secretaria de Estado de Saneamento e Energia, São Paulo, 109 pp.
- DE VRIES, J.J. e SIMMERS, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* 10:5-17.
- DIAS, J.P.R.V. (2005). *Composição isotópica de oxigênio e hidrogênio da precipitação e sua relação com as águas subterrâneas na cidade de São Paulo*. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 98 p.
- EMPRESA METROPOLITANA DE PLANEJAMENTO DA GRANDE SÃO PAULO (SÃO PAULO, SP). (1996). *EMPLASA: folha topográfica Vila Veleiros*. São Paulo, 1996. 1 folha topográfica. Escala 1:10.000. cód. 3333.
- FERNANDES, A. J. (1991). *O complexo Embu no leste do estado de São Paulo: contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica*. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 120 p.
- FERNANDES, A.J., MALDANER, C., ROULEAU, A. (2011). *Análise das fraturas nos basaltos de Ribeirão Preto, SP: aplicação à elaboração de modelo hidrogeológico conceitual*. *Geol. USP, Sér. cient.*, Dez/11, vol.11, no.3, p.43-64.

- FETTER, C.W. (2001). Applied Hydrogeology. Fourth Edition. Prentice Hall. 598 p.
- FIUME, B. (2013). Geologia estrutural de detalhe para elaboração de modelo conceitual de circulação de água subterrânea: estudo de caso em Jurubatuba, SP. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 165 p.
- FOSTER, S., MORRIS, B.; CHILTON, J. (1999). Groundwater in urban development – a review of linkages and concerns. in: Ellis J.B. (ed) impacts of urban growth on surface water and groundwater quality. IAHS Publ. 259: 3-12.
- FRITZ P, FONTES J.-CH (eds.). (1980). Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Vol. 2, The Terrestrial Environment., B. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 557 p.
- FROST, C.D.; PEARSON, B.N.; OGLE, K.M.; HEFFERN, E.L.; LYMAN, R.M. (2002). Sr isotope tracing of aquifer interactions in an area of accelerating coal-bed methane production, Powder River Basin, Wyoming. *Geology*, 30(10):923-926.
- FUSP – FUNDAÇÃO DE APOIO À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. (2002). Plano de Bacia Hidrográfica do Alto Tietê. Caderno Técnico Institucional. São Paulo. Universidade de São Paulo.
- GLEESON, T., NOVAKOWSKI, K., KYSER, K., T. (2009). Extremely Rapid and Localized Recharge to a Fractured Rock Aquifer. *Journal of Hydrology*. 496-509.
- HAGENMAN, R.; NIEF, G.; ROTH, E. (1970). Absolute isotopic scale for deuterium analysis of natural waters. Absolute D/H ratio for SMOW. *Tellus* 22:712-715.
- HALL, D.W. & RISSER, D.W. (1993). Effects of agricultural nutrient management on nitrogen fate and transport in Lancaster county, Pennsylvania. *Water Resour Bull* 29:55-76.
- HASUI, Y.; CREMONINI, O. A.; BORN, H. (1984). Considerações sobre o Grupo Açungui em São Paulo e porção adjacente do Paraná. In: 33º Congresso Brasileiro de Geologia, 1984, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: SBG, v. 7.
- HASUI, Y., SADOWSKI, G. R. (1976). Evolução geológica do pré-cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. *R. Bras. Geoc.*, 6(3): 180-200.
- Healey, R.W, Cook, P.G. 2002. Using ground-water levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*. 10(1): 91-109.
- HEALY, R.W.; COOK, P.G. (2002). Using ground-water levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*. 10(1): 91-109.
- HIRATA, R. e FERREIRA, L. M. R. (2001). Os aquíferos da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade a poluição. *Revista Brasileira de Geociências*. 31(1): 43-50.
- HIRATA, R.; FERRARI, L.; PEDE, M. (2002). La explotación de las aguas subterráneas en la Cuenca Hidrográfica del ALTO TIETÊ (SÃO PAULO, BRASIL): crónica de una crisis anunciada. *Boletín Geológico Minero*. Vol. 113 (3): 273-282.
- HOUNSLOW, AW (1995). Water Quality Data: Analysis and Interpretation. Lewis Publishers, 397p.

- IAEA/WMO. (2014). Global Network of Isotopes in Precipitation. IAEA/GNIP precipitation sampling guide (V2.02 September 2014). Accessible at:
http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/gnip_manual_v2.02_en_hq.pdf
- IAEA/WMO. (2013). A Laboratory Information Management System for Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Water Samples by Laser Absorption Spectroscopy User Manual & Tutorial (Revision 1.5 2013/09/23). Accessible at:
<http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIMS/LIMS%20for%20Lasers%20Manual%201.5.pdf>
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2000). Resultado dos Dados Preliminares do Censo – 2000. Disponível em:
<https://ibge.gov.br/cidadesat/xtras/home.php>. Acesso em 12 dez. 2013.
- JIMÉNEZ-MARTÍNEZ, J., LONGUEVERGNE, L., LE BORGNE, T., DAVY, P., RUSSIAN, A., BOUR, O. (2013). Temporal and Spatial Scaling of Hydraulic Response to Recharge in Fractured Aquifers: Insights From a Frequency Domain Analysis. *Water Resources Research*, Vol 49. 3007-3023.
- JULIANI, C. (1992). O embasamento pré-cambriano da Bacia de São Paulo. Seminário: Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). ABAS/ ABGE/ SBG/ SP, p. 3-20.
- KENDALL, C. & DOCTOR, D. H. (2003). Stable isotope applications in hydrologic studies. *In*: Drever, J. I (ed.) *Surface and groundwater, weathering and soils*. Holland, H. D. & Turekian, K. K. (org.) *Treatise on Geochemistry*, Volume 5, p. 319-364.
- L'APICCIRELLA, E. S. P. (2009). Contaminação e áreas de restrição de uso de água subterrânea no entorno do Canal Jurubatuba em São Paulo – SP. Dissertação (Mestrado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 136 f.
- LAWRENCE, A.R. et al. (1994). Impact of urbanization on groundwater: Hat Yai, Thailand. Tech Rep WC/94/43, British Geological Survey, Keyworth (UK).
- LERNER, D.; ISSAR, A.; SIMMERS, I., (1990). Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural recharge. International Association of Hydrogeologists. Vol. 8. Heise. Hannover, 345p.
- LERNER, D.N. (1997). Groundwater recharge. *In*: Saether, O.M.; de Carit, P. (eds.). *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*. A. A. Bulkma, Rotterdam. p. 109-150.
- LERNER, D.N. (2002). Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeology Journal* 10:143-152.
- LIMA P.L. (2002). Hidrogeologia urbana: um estudo da recarga em um aquífero livre e raso. (Monografia de Trabalho de Formatura), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 53 p.

- LOJKASEK-LIMA, P.; HIRATA, R.C.; BERTOLO, R.A.; VIVIANI, J.B. e VALLE, P. DE T. A. (2004). A interferência antrópica nos padrões naturais de fluxo de água subterrânea: um estudo de caso na bacia de São Paulo, São Paulo, Brasil. *Boletín Geológico y Minero*, 115, Núm. Especial, pp. 391-398.
- LOJKASEK-LIMA, P. (2016). Caracterização de detalhe do perfil vertical de contaminação em aquífero cristalino alterado – aplicação da metodologia “Discrete Fracture Network” (DFN) – Jurubatuba – São Paulo, São Paulo: Exame de qualificação de doutorado. IGc-USP.
- MALDANER, C.H. (2010). Recarga de aquífero em área urbana: estudo de caso de Urânia (SP). 95 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MARTINS, V.T.S. (2008). Aplicação de isótopos de Pb, Sr, H e O como traçadores da recarga e da contaminação de aquíferos metropolitanos: um exemplo da Bacia do Alto Tietê : um exemplo da Bacia do Alto Tietê. 220 p. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- MARTINS, V. T. S.; BABINSKI, M.; RUIZ, I. R.; SATO, K.; SOUZA, S. L.; HIRATA, R. (2008). Establishing the analytical procedures for determination of Pb and Sr isotopic composition on water samples by ID-TIMS. *Química nova*.
- MAZIERO, T.A.; WENDLAND, E. (2008). Variabilidade especial da recarga em área urbana. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, p. 35-46.
- MELO, M. S.; RICCOMINI, C.; HASUI, Y.; ALMEIDA, F. F. M. DE; COIMBRA, A. A. M. (1985). Geologia e evolução do sistema de bacias tafrogênicas continentais do Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 15, p. 193-201.
- MEYER, R.M.P.; GROSTEIN, M.D.; BIDERMAN, C. (2004). São Paulo Metrópole. Editora da Universidade de São Paulo – EDUSP e Imprensa Oficial, São Paulo. 296 p.
- MIYATA, C. (2016). Avaliação hidrogeoquímica de detalhe de um perfil vertical de contaminação amostrado através dos sistemas CMT e Westbay na região do Canal do Jurubatuba - São Paulo, SP. 51 p. Monografia de Trabalho de Formatura (TF-2016/09) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- MOECK C., RADNY D., POPP A., BRENNWALD M., STOLL S., AUCKENTHALER A., BERG M., SCHIRMER M. (2017). Characterization of a Managed Aquifer Recharge System Using Multiple Tracers. *Science of the Total Environment* 609. 701–714.
- PALAU J., MARCHESI M., CHAMBON J.C.C., ARAVENA R., CANALS À., BINNING P.J., BJERG P.L., OTERO N., SOLER A. (2014). Multi-isotope (Carbon and Chlorine) Analysis for Fingerprinting and Site Characterization at a Fractured Bedrock Aquifer Contaminated by Chlorinated Ethenes. *Science of the Total Environment* 475. 61-70.
- PEREIRA, A.R. (2005). Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. *Bragantia*, 64(2):311-313.

- PINO, D. (2017). Caracterização hidráulica de superdetalhe do aquífero cristalino fraturado do Jurubatuba, São Paulo, SP. São Paulo: Exame de qualificação de doutorado. IGc-USP.
- RATHAY, S.Y., ALLEN, D.M., KIRSTE, D. (2017). Response of a Fractured Bedrock Aquifer to Recharge From Heavy Rainfall Events. *Journal of Hydrology*. Article in press.
- RICCOMINI, C. (1989). O Rift Continental do sudeste do Brasil. Tese (Doutorado), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 256 f.
- RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M.; TAKIYA, H. (1992). Tectônica e sedimentação na Bacia de São Paulo. Seminário: Problemas Geológicos e Geotécnicos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). ABAS/ ABGE/ SBG/ SP, p. 21-45.
- RICCOMINI, C; SANT'ANNA, L.G.; FERRARI, A.L. (2004). Evolução geológica do rift continental do Sudeste do Brasil. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito-Neves, B. B. (Ed.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo: Beca. p. 383-405.
- ROCHA, G.; GONÇALVES, V. G.; REBOUÇAS, A. C.; BARRETO, L. M. B. (1989). Hidrogeologia da Bacia de São Paulo. Workshop de Geologia da Bacia de São Paulo. IG-USP, SBG/SP. São Paulo. p. 44-59.
- RODRIGUEZ, S.K. e TAKIYA, H. (2004). Evolução Geológica de São Paulo. In: Atlas Ambiental do Município de São Paulo – O Verde, o Território, o Ser Humano: diagnóstico e bases para a definição de políticas públicas para as áreas verdes no Município de São Paulo.
- ROZANSKY, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation, In: Swart, P. K.; Lohmann, K. C.; McKenzie, J.; Savin, S (ed) *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophysical Monograph Series, 78, pp. 1-36, AGU, Washington, DC.
- SABESP e CEPAS/IGC-USP. (1994). Diagnóstico hidrogeológico da região de São Paulo. Diagnóstico Final. Convênio SABESP/CEPAS-IG/USP. São Paulo. 115 p.
- SÃO PAULO (1991). Lei nº 7.663, de 30 de dezembro de 1991.
- SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10: 18-39.
- SEILER e ALVARADO-RIVAS, J. (1999). Recharge and discharge of Caracas aquifer, Venezuela. In: Chilton j (ed) *Groundwater in the urban environment – selected city profiles*. AA Balkema. Rotterdam, pp 233 – 238.
- SCHLUMBERGER (2006). Aquachem 5.1.33. Waterloo Hydrogeologic, Inc. a Schlumberger Company.
- THORNTHWAITTE, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate: *Geograph. Rev.* 38: 55-94.

- THORNTON, C.W.; MATHER, J.R. (1955). The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1).
- TUBAU, I., VAZQUEZ-SUÑÉ, E., CARRERA, J., VALHONDO, C., CRIOLLO, R. (2017). Quantification of Groundwater Recharge in Urban Environments. *Science of the Total Environment* 592, 391–402.
- VÁZQUEZ-SUÑE E., SÁNCHEZ-VILA A. X, CARRERA J. (2005). Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona, Spain. *Hydrogeology Journal*, 13: 522-533.
- VAZQUEZ-SUÑÉ, E., CARRERA, J., TUBAU, I., SÁNCHEZ-VILA, X., SOLER, A. (2010). An Approach to Identify Urban Groundwater Recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*. 14, 2085–2097.
- VIVIANI-LIMA, J.B. (2007). Estimativa de recarga em áreas urbanizadas: estudo de caso na Bacia do Alto Tietê. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 219 p.
- VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. (2013). Introdução à engenharia ambiental. São Paulo: Cengage Learning.
- WAHNFRIED, I., HIRATA, R. (2005). Comparação de métodos de estimativa de recarga de aquíferos em uma planície aluvionar na Bacia hidrográfica do Alto Tietê (São Paulo). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 2, p. 15-25.
- WAHNFRIED I. (2010). Modelo conceitual de fluxo do aquífero de Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani na região de Ribeirão Preto-SP. Tese de doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 135p.
- YANG Y., LERNER D.N., BARRETT M.H., TELLAM, J.M. (1999). Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK. *Environ Geol* 38(3):183-198.
- ZALÁN, P.; OLIVEIRA, J. (2005). Origem e evolução estrutural do Sistema de Rifts Cenozóicos do Sudeste do Brasil. *Boletim de Geociências Petrobrás*, 13(2), 269-300.

Anexo A – Perfis litológicos e construtivos dos poços de monitoramento e tubulares profundos

LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO

LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS DE MONITORAMENTO E DE PRODUÇÃO

ÁREA 4
P-1346

LOCALIZAÇÃO DO POÇO DE PRODUÇÃO

- 1 - Concreto/bloquete/brita
- 2 - Silte argiloso avermelhado, friável com porções pretas, amarelas e brancas com fragmentos de materiais de construção
- 3 - Argila pouco arenosa, preta, rica em matéria orgânica, com restos vegetais, por vezes com intercalações camadas de argila cinza esverdeada
- 4 - Areia média argilosa, branca, com mica e por vezes fragmentos de quartzo e turmalina de coloração preta (alteração de pegmatito)
- 5 - Argila arenosa cinza escura e esverdeada, rica em mica, com intercalações de coloração alaranjada, vermelha, cinza clara e branca, tornando-se mais avermelhada com o aumento da profundidade (alteração de micaxisto)
- 6 - Rocha sã (gnaisse)

CENOZÓICO

Qt - Depósitos Tecnogênicos

Qa - Depósitos Aluvionares

Qa1 - Aluvião argiloso

NEOPROTEROZÓICO

NPe - Complexo Embu

NPe1 - Solo residual

NPe2 - Rocha Sã

**Anexo B - Resultados analíticos das amostras de água -
Parâmetros químicos inorgânicos, isótopos estáveis O e H, razão
isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e parâmetros físico-químicos medidos durante
a amostragem**

Local	Estação	Data	Nível D' água (m)	Prof. da amostra (m)	Unidade geológica.	Unidade hidrogeológica / Fluxo vartil.	Cobertura do solo
Área 1	Cavalete	12/04/2013					
Área 1	Cavalete	20/02/2014					
Área 1	Cavalete	10/03/2014					
Área 1	Chuva	26/04/2013					
Área 1	Chuva	02/07/2013					
Área 1	Esgoto	12/04/2013					
Área 1	PM21	25/09/2013	1,64	5,2	Qa	Raso Ascendente	Gramado/ Bloquete
Área 1	PM21	03/04/2014	1,54	5,2	Qa	Raso Ascendente	Gramado/ Bloquete
Área 1	PM21	30/10/2014	1,8	5,2	Qa	Raso Ascendente	Gramado/ Bloquete
Área 1	PM23	12/04/2013	1,13	3,8	Qa	Raso Ascendente	Concreto
Área 1	PM23	25/09/2013	1,4	3,8	Qa	Raso Ascendente	Concreto
Área 1	PM23	03/04/2014	1,15	3,8	Qa	Raso Ascendente	Concreto
Área 1	PM23	30/10/2014	1,51	3,8	Qa	Raso Ascendente	Concreto
Área 1	PMD	12/04/2013	0,98	3,5	Qa	Raso Ascendente	Gramado
Área 1	PMD	25/09/2013	2,11	3,5	Qa	Raso Ascendente	Gramado
Área 1	PMD	03/04/2014	1,07	3,5	Qa	Raso Ascendente	Gramado
Área 1	PMD	30/10/2014	1,33	3,5	Qa	Raso Ascendente	Gramado
Área 1	PP02	12/04/2013	2,09	65	NPe1(SAR)	Intermediário Ascendente	Asfalto
Área 1	PP02	25/09/2013	2,13	65	NPe1 (SAR)	Intermediário Ascendente	Asfalto
Área 1	PP02	03/04/2014	1,65	65	NPe1 (SAR)	Intermediário Ascendente	Asfalto
Área 1	PP02	30/10/2014	2,94	65	NPe1 (SAR)	Intermediário Ascendente	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-01	08/09/2016		55,5	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-02	08/09/2016		53,9	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-03	09/09/2016		50,9	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-04	09/09/2016		46,4	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-05	09/09/2016		44,9	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-06	09/09/2016		41,5	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-07	12/09/2016		39,9	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-08	12/09/2016		36,6	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-09	12/09/2016		35,1	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-10	13/09/2016		30,5	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-11	13/09/2016		27,2	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-12	15/09/2016		24,1	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-13	15/09/2016		22,6	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-14	15/09/2016		19,3	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-15	16/09/2016		16,8	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	MP-01 WB-16	16/09/2016		15,3	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 5	PM-10	02/09/2016		4,2	Qa	Raso Descendente	
Área 5	PM-10B	06/09/2016		10,1	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	
Área 5	PM-11	06/09/2016		3,8	Qa/ NPe1 (SAR)	Raso Descendente	
Área 5	PM-11A	06/09/2016		8,81	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	
Área 5	PM-11B	07/09/2016		14,25	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	

Local	Estação	Data	Nível D' água (m)	Prof. da amostra (m)	Unidade geológica.	Unidade hidrogeológica / Fluxo varital.	Cobertura do solo
Área 5	PM-18	05/09/2016		3,58	Qa	Raso Descendente	
Área 5	PM-18A	05/09/2016		7	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	
Área 5	PM-18B	06/09/2016		10,2	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	
Área 2	PM19	02/07/2013	1,64	3,5	Qa	Raso Descendente	Gramado
Área 2	PM19	04/10/2013	1,71	3,5	Qa	Raso Descendente	Gramado
Área 2	PM19	02/04/2014	1,91	3,5	Qa	Raso Descendente	Gramado
Área 2	PM19	29/10/2014	2,12	3,5	Qa	Raso Descendente	Gramado
Área 2	PM19A	02/07/2013	2,63	19,6	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	Gramado
Área 2	PM19A	04/10/2013	2,67	19,6	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	Gramado
Área 2	PM19A	02/04/2014	2,74	19,6	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	Gramado
Área 2	PM19A	29/10/2014	2,83	19,6	NPe1 (SAR)	Intermediário Descendente	Gramado
Área 2	PM39	04/10/2013	4,08	5,8	NPe1 (SAR)	Raso Ascendente	Asfalto
Área 2	PM39	02/04/2014	3,58	5,8	NPe1 (SAR)	Raso Ascendente	Asfalto
Área 2	PM39	29/10/2014	4,41	5,8	NPe1 (SAR)	Raso Ascendente	Asfalto
Área 2	PM39A	02/07/2013	8,18	14	NPe1 (SAR)	Intermediário Ascendente	Asfalto
Área 2	PM39A	04/10/2013	5,48	14	NPe1 (SAR)	Intermediário Ascendente	Asfalto
Área 2	PM39A	02/04/2014	5,36	14	NPe1 (SAR)	Intermediário Ascendente	Asfalto
Área 2	PM39A	29/10/2014	5,42	14	NPe1 (SAR)	Intermediário Ascendente	Asfalto
Área 3	PMN2A	05/03/2013	6,42	6,2	Qa/ Er	Raso Ascendente	Concreto
Área 3	PMN2A	10/10/2013	2,88	6,2	Qa/ Er	Raso Ascendente	Concreto
Área 3	PMN2A	01/04/2014	2,34	6,2	Qa/ Er	Raso Ascendente	Concreto
Área 3	PMN2A	29/10/2014	2,7	6,2	Qa/ Er	Raso Ascendente	Concreto
Área 3	PMN4A	30/10/2014	3,95	6,2	Qa/ Er	Raso Descendente	Asfalto
Área 3	PMN4B	30/10/2014	4,03	14,2	Er	Intermediário Descendente	Asfalto
Área 3	SP1204-<126	22/06/2017	5,235	>126	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; só isolou p baixo; trans. Alta
Área 3	SP1204-115-117	13/06/2017	5,16	115	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; boa ved.
Área 3	SP1204-120-123	21/06/2017	5,31	120	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; boa ved; trans. Media/ Alta
Área 3	SP1204-180-182	28/06/2017	6	180	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; boa ved., trans. baixa
Área 3	SP1204-184-186	30/06/2017	4,73	184	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; vazou acima
Área 3	SP1204-243-256	30/06/2017	5,36	243	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; bom; trans. alta
Área 3	SP1204-250	07/07/2013		250	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 3	SP1204-53	05/07/2013		53	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto
Área 3	SP255->135	24/08/2017		>135	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; bom; trans. Elevada; fluxo descend
Área 3	SP255-25-28	18/07/2017	4,5	25	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; bom; trans. Med-alta; fluxo desc
Área 3	SP255-59-62	24/07/2017	4,6	59	NPe2 (RS)	Cristalino	Asfalto; vazou um pouco acima; fluxo desc

Local	Estação	Data	OD mg/L	Temp °C	Cond us/cm	Eh	pH
Área 1	Cavalete	12/04/2013					
Área 1	Cavalete	20/02/2014					
Área 1	Cavalete	10/03/2014					
Área 1	Chuva	26/04/2013					
Área 1	Chuva	02/07/2013					
Área 1	Esgoto	12/04/2013					
Área 1	Esgoto	12/04/2013					
Área 1	PM21	25/09/2013					
Área 1	PM21	03/04/2014	3,59	-	31,20	457	6,11
Área 1	PM21	30/10/2014	0,82	23	40,10	-212,9	4,92
Área 1	PM23	12/04/2013	0,27	22,2	41,70	346,8	4,56
Área 1	PM23	25/09/2013	2,56	25,3	276,00	185,4	5,19
Área 1	PM23	03/04/2014	4	-	217,10	262	6,52
Área 1	PM23	30/10/2014	0,04	25,6	300,20	-224,3	6,46
Área 1	PMD	12/04/2013	0,27	23,1	229,50	240,8	5,67
Área 1	PMD	25/09/2013	2,89	22,6	184,00	152,4	5,85
Área 1	PMD	03/04/2014	5,28	-	185,70	158	6,44
Área 1	PMD	30/10/2014	0,03	22,4	234,60	-218,4	6,57
Área 1	PP02	12/04/2013	0,34	20,5	130,80	191,8	5,49
Área 1	PP02	25/09/2013	3,44	22,4	125,00	-	3,99
Área 1	PP02	03/04/2014	4,12	19,4	74,40	382	6,34
Área 1	PP02	30/10/2014	1,99	22,2	58,90	-205,1	5,5
Área 5	MP-01 WB-01	08/09/2016	6,38	21,9	99,10	330,2	5,37
Área 5	MP-01 WB-02	08/09/2016	5,88	23,2	668,00	192,8	6,63
Área 5	MP-01 WB-03	09/09/2016	3,01	20,9	791,00	213,6	6,88
Área 5	MP-01 WB-04	09/09/2016	4,8	19,5	546,00	211,5	6,68
Área 5	MP-01 WB-05	09/09/2016	3,33	21	97,40	179,4	6,58
Área 5	MP-01 WB-06	09/09/2016	5,7	21,5	299,50	161,8	7,13
Área 5	MP-01 WB-07	12/09/2016	6,34	19,1	290,10	195,8	6,34
Área 5	MP-01 WB-08	12/09/2016	5,9	23	865,00	203,8	6,03
Área 5	MP-01 WB-09	12/09/2016	6,1	20,4	180,00	187,3	6,72
Área 5	MP-01 WB-10	13/09/2016	3,85	25,3	319,20	192,7	6,22
Área 5	MP-01 WB-11	13/09/2016	4,3	24,4	265,20	187,4	6,73
Área 5	MP-01 WB-12	15/09/2016	6,21	24,6	316,20	202	6,07
Área 5	MP-01 WB-13	15/09/2016	5,16	22,8	325,30	230,5	6,1
Área 5	MP-01 WB-14	15/09/2016	4,75	24,2	677,20	164,6	6,55
Área 5	MP-01 WB-15	16/09/2016	5,09	20,3	702,00	159,5	6,53
Área 5	MP-01 WB-16	16/09/2016	2,53	19,8	707,00	141,8	6,8
Área 5	PM-10	02/09/2016	7,4	17	583,00	174,9	6,87
Área 5	PM-10B	06/09/2016	0,72	22,09	1.025,00		6,25
Área 5	PM-11	06/09/2016	0,04	24,6	980,00		6,14
Área 5	PM-11A	06/09/2016	0,46	20,8	833,00		6,17
Área 5	PM-11B	07/09/2016	93	28,3	120,00		3,05
Área 5	PM-18	05/09/2016	0,07	21,6	511,00		5,77

Local	Estação	Data	OD mg/L	Temp °C	Cond us/cm	Eh	pH
Área 5	PM-18A	05/09/2016	0,17	21,24	522,00		6,45
Área 5	PM-18B	06/09/2016	1,62	21,92	600,00		6,32
Área 2	PM19	02/07/2013	1,03	21,05	351,00		5,99
Área 2	PM19	04/10/2013	2,09	21,7	215,00	-154,9	4,84
Área 2	PM19	02/04/2014	0,89	21,2	197,00	188,6	5,71
Área 2	PM19	29/10/2014	0,02	23,6	214,20	-223,6	6,19
Área 2	PM19A	02/07/2013	0,25	21,9	187,00	260,6	5,51
Área 2	PM19A	04/10/2013	3,17	21,5	219,00	113,8	4,41
Área 2	PM19A	02/04/2014	1,28	22,2	296,00	187,7	7,66
Área 2	PM19A	29/10/2014	0,01	23	292,90	-223,4	6,98
Área 2	PM39	04/10/2013	0,62	22,7	307,00	261,1	6,32
Área 2	PM39	02/04/2014	1,37	22,6	241,00	355,9	6,77
Área 2	PM39	29/10/2014	0,06	25,4	275,70	-224,3	5,91
Área 2	PM39A	02/07/2013	0,76	24	285,40	199,9	5,59
Área 2	PM39A	04/10/2013	1,79	22,1	351,00	62,9	6,03
Área 2	PM39A	02/04/2014	1,71	23,4	374,00	242,4	7,12
Área 2	PM39A	29/10/2014	0,03	24,1	327,70	-223,4	6,31
Área 3	PMN2A	05/03/2013	0,32	24,4	353,60	207,7	5,92
Área 3	PMN2A	10/10/2013	0,73	26,2	161,00	188,8	7,37
Área 3	PMN2A	01/04/2014	0,97	21,5	364,00	217,7	7,33
Área 3	PMN2A	29/10/2014	2,45	23,1	485,00	188,4	6,69
Área 3	PMN4A	30/10/2014	0,27	21,9	381,50	184,6	5,77
Área 3	PMN4B	30/10/2014	0,3	25,7	164,10	76,1	5,81
Área 3	SP1204-<126	22/06/2017	0,29	25,8	126,90	194,9	6,1
Área 3	SP1204-115-117	13/06/2017	0	22,5	708,00	211,3	6,52
Área 3	SP1204-120-123	21/06/2017	0,7	24	755,00	257	6,38
Área 3	SP1204-180-182	28/06/2017	-	22,35	766,00	282,2	6,74
Área 3	SP1204-184-186	30/06/2017	0	24,4	551,00	162	6,66
Área 3	SP1204-243-256	30/06/2017	0	23,4	519,00	238	6,69
Área 3	SP1204-250	07/07/2013	0	23,5	648,00	225,3	6,58
Área 3	SP1204-53	05/07/2013					
Área 3	SP255->135	24/08/2017					
Área 3	SP255-25-28	18/07/2017	0,8	19	255,00	276,2	6,28
Área 3	SP255-59-62	24/07/2017	0	19,8	385,00	207,9	6,60

Local	Estação	Data	18O	2H	18O/2H	87Sr/86Sr	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO2 (mg/L)	Br (mg/L)	NO3 (mg/L)	HPO4 (mg/L)	SO4 (mg/L)	Meas Alk (mg/L CaCO3)	HCO3 (mg/L)	CO3 (mg/L)
V. Ref							1,5	250	1		10		250			
Área 1	Cavalete	12/04/2013	-4,59	-27,3	0,17	0,71100	0,66	21,58	0,018	0,03	3,38	0,019	12,42	27,27	33,27	0,00
Área 1	Cavalete	20/02/2014	-3,17	-18,9	0,17		0,57	22,33	<0.001	<0.001	2,85	0,14	4,72	40,76	49,73	0,00
Área 1	Cavalete	10/03/2014	-3,34	-19,6	0,17		0,58	24,2	<0.001	<0.001	1,01	0,14	19,42	32,97	40,22	0,00
Área 1	Chuva	26/04/2013	-6,4	-38,9	0,16		0,04	0,28	0,04	0,05	1,04	0,005	0,73	2,4	2,93	0,00
Área 1	Chuva	02/07/2013	-4,06	-17,6	0,23		0,05	0,35	0,07	0,06	0,99	0,005	0,99	2,4	2,93	0,00
Área 1	Chuva	31/08/2015	-0,92	10,3	-0,09											
Área 1	Chuva	30/09/2015	-3,57	-13,3	0,27											
Área 1	Chuva	31/10/2015	1,42	26,1	0,05											
Área 1	Chuva	30/11/2015	-2,31	-7,4	0,31											
Área 1	Chuva	31/12/2015	-1,69	-8,2	0,21											
Área 1	Chuva	31/01/2016	-7,5	-54	0,14											
Área 1	Chuva	29/02/2016	-3,23	-20,9	0,15											
Área 1	Chuva	31/03/2016	-3,06	-14,3	0,21											
Área 1	Chuva	30/04/2016	-5,2	-27,5	0,19											
Área 1	Chuva	31/05/2016	-3,08	-13,8	0,22											
Área 1	Chuva	30/06/2016	-3,29	-11,3	0,29											
Área 1	Chuva	31/07/2016	1,52	22,8	0,07											
Área 1	Esgoto	12/04/2013	-4,79	-27,2	0,18	0,711099	0,71	123,58	0,17	0,94	0,28	11,75	35,7	402,01	490,45	0,00
Área 1	PM21	25/09/2013	-6,06	-37,6	0,16		0,04	3,66	0,005	0,03	1,98	0,008	2,99	4,2	5,12	0,00
Área 1	PM21	12/04/2014	-6,03	-37,3	0,16	0,720152	0,03	3,93	0,006	0,02	2,24	0,01	2,94	3,6	4,39	0,00
Área 1	PM21	30/10/2014	-5,97	-36,8	0,16		0,02	3,97	0,001	0,11	2,19	0,016	3,87	3,73	4,55	0,00
Área 1	PM23	12/04/2013	-5,77	-33,9	0,17	0,712656	0,25	6,07	0,005	0,05	0,43	0,008	31,54	88,41	107,86	0,00
Área 1	PM23	25/09/2013	-5,88	-34,9	0,17		0,15	7,6	0,005	0,16	0,37	0,005	37,57	82,12	100,22	0,02
Área 1	PM23	03/04/2014	-5,19	-29,6	0,18		0,28	5,48	0,007	0,09	1,37	0,06	29,55	110,29	134,59	0,02
Área 1	PM23	30/10/2014	-5,78	-34,2	0,17		0,07	7,32	0,003	0,16	0,06	0,004	28,08	41,06	50,10	0,00
Área 1	PMD	12/04/2013	-5,73	-34,5	0,17		0,06	6,29	0,004	0,005	0,56	0,006	3,9	81,82	99,83	0,00
Área 1	PMD	25/09/2013	-5,26	-30,3	0,17		0,04	4,58	0,005	0,03	0,81	0,008	15,99	91,71	111,92	0,02
Área 1	PMD	12/04/2014	-4,24	-22,3	0,19	0,713783	0,04	2,54	0,004	0,06	0,95	0,01	10,39	103,1	125,83	0,02
Área 1	PMD	30/10/2014	-5,8	-35	0,17		0,01	7,43	0,002	0,07	0,12	0,03	0,76	35,19	42,93	0,00
Área 1	PP02	12/04/2013	-5,95	-36,6	0,16	0,732405	0,19	3,71	0,004	0,03	1,16	0,008	3,47	62,64	76,42	0,00
Área 1	PP02	25/09/2013	-5,9	-35,7	0,17		0,12	3,71	0,03	0,02	3,28	0,005	1,5	29,37	35,84	0,00
Área 1	PP02	03/04/2014	-6,04	-37,4	0,16		0,07	2,52	0,003	0,01	4,88	0,1	0,56	18,58	22,67	0,00
Área 1	PP02	30/10/2014	-4,95	-28,9	0,17		0,11	5,5	0,003	0,03	6,3	0,1	5,91	23,99	29,27	0,00
Área 5	MP-01 WB-01	08/09/2016	-5,5	-33,1	0,17		0,3419	32,49	0,0229	2,15	0,0336	0,0282	114,49	203,5	248,16	0,05
Área 5	MP-01 WB-02	08/09/2016	-5,42	-32,4	0,17		0,3921	32,79	0,0337	2,07	0,0932	0,0347	79,75	114,12	139,12	0,05
Área 5	MP-01 WB-03	09/09/2016	-5,44	-32,5	0,17		0,4844	30,02	0,0121	2	0,0535	0,0342	54,29	92,75	113,10	0,03
Área 5	MP-01 WB-04	09/09/2016	-5,71	-30,8	0,19		0,2049	5,86	0,0016	0,24	0,0448	0,0142	4,53	46,66	56,90	0,01
Área 5	MP-01 WB-05	09/09/2016	-5,62	-31,5	0,18		0,4712	15,51	0,0041	0,76	0,0934	0,0351	42,54	105,68	128,76	0,09
Área 5	MP-01 WB-06	09/09/2016	-5,68	-31,5	0,18		0,2467	14,01	0,0024	0,5	0,0495	0,0094	30,99	69,71	85,03	0,01
Área 5	MP-01 WB-07	12/09/2016	-5,22	-30,7	0,17		0,2145	28,78	0,0171	1,92	0,0789	0,0167	82,34	70,83	86,40	0,00

Local	Estação	Data	18O	2H	18O/2H	87Sr/86Sr	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO2 (mg/L)	Br (mg/L)	NO3 (mg/L)	HPO4 (mg/L)	SO4 (mg/L)	Meas Alk (mg/L CaCO3)	HCO3 (mg/L)	CO3 (mg/L)
V. Ref							1,5	250	1		10		250			
Área 5	MP-01 WB-08	12/09/2016	-4,87	-27,8	0,18		0,5542	16,78	0,0179	0,37	0,1274	0,0144	10,8	74,77	91,17	0,02
Área 5	MP-01 WB-09	12/09/2016	-5,8	-33,1	0,18		0,2375	17,65	0,0081	1,16	0,0365	0,033	2,26	87,69	106,96	0,01
Área 5	MP-01 WB-10	13/09/2016	-5,63	-32,1	0,18		0,1764	21	0,017	1,41	0,191	0,016	1,82	95	115,84	0,03
Área 5	MP-01 WB-11	13/09/2016	-5,82	-33,2	0,18		0,2477	20,38	0,0185	1,2	0,0573	0,0153	3,18	80,39	98,06	0,01
Área 5	MP-01 WB-12	15/09/2016	-5,34	-32,3	0,17		0,256	28,12	0,0124	1,66	0,1966	0,0145	2,13	100,52	122,62	0,01
Área 5	MP-01 WB-13	15/09/2016	-3,92	-28,5	0,14		0,5648	58,95	0,009	2,68	0,0778	0,0189	0,27	183,13	223,34	0,04
Área 5	MP-01 WB-14	15/09/2016	-5,33	-31	0,17		0,4419	70,02	0,0175	2,58	0,1879	0,0333	0,76	213,17	259,98	0,04
Área 5	MP-01 WB-15	16/09/2016	-5,34	-31,3	0,17		0,3858	83,8	0,0118	2,95	0,0477	0,0206	0,22	165,8	202,15	0,06
Área 5	MP-01 WB-16	16/09/2016	-6,36	-35,2	0,18		1,17	9,78	0,0056	0,22	0,0444	0,0685	0,1	45,06	54,93	0,02
Área 5	PM-10	02/09/2016					0,0618	51,87	0,01	2,18	0,45	0,07	5,65	340,84	415,82	
Área 5	PM-10B	06/09/2016					0,1958	67,79	0,05	3,21	0,05	0,02	5,25	277,70	338,79	
Área 5	PM-11	06/09/2016					0,0684	62,43	0,03	3,42	0,09	0,12	0,76	155,15	189,28	
Área 5	PM-11A	06/09/2016					0,0154	26,95	0,01	3,25	0,03	0,08	0,14	63,52	77,49	
Área 5	PM-11B	07/09/2016					0,1291	50,776	0,03	3,96	0,06	0,95	0,96	124,80	152,26	
Área 5	PM-18	05/09/2016					0,0681	15,22	0	1,18	0,05	0,02	3,51	194,50	237,29	
Área 5	PM-18A	05/09/2016					0,2585	18,84	0,01	1,8	0,35	0,02	2,63	233,85	285,30	
Área 5	PM-18B	06/09/2016					0,1059	19,9	0,01	1,94	0,11	0,02	2,78	105,12	128,25	
Área 2	PM19	02/07/2013	-4,77	-25,8	0,18	0,715503	0,08	17,32	0,03	0,05	0,24	0,005	11,22	64,14	78,25	0,00
Área 2	PM19	04/10/2013	-4,5	-26	0,17		0,09	16,66	0,009	0,05	0,11	0,04	9,62	56,34	68,74	0,00
Área 2	PM19	02/04/2014	-4,42	-22,3	0,20		0,07	21,31	0,002	0,03	0,83	0,01	16,51	49,75	60,70	0,00
Área 2	PM19	29/10/2014	-3,99	-20,4	0,20		0,06	17,86	2,68	0,02	0,13	0,014	9,98	42,66	52,05	0,00
Área 2	PM19A	02/07/2013	-5,39	-31	0,17	0,742425	0,21	11,55	0,006	0,07	0,24	0,006	8,48	123,48	150,65	0,00
Área 2	PM19A	04/10/2013	-5,22	-31,3	0,17		0,22	12,6	0,012	0,09	0,73	0,05	8,76	126,48	155,01	0,35
Área 2	PM19A	02/04/2014	-5,2	-30,3	0,17		0,19	12,07	0,008	0,11	0,89	0,07	8,52	133,07	162,50	0,08
Área 2	PM19A	29/10/2014	-5,22	-30,4	0,17		0,2	12,41	0,003	0,03	0,23	0,007	8,44	126,37	154,20	0,02
Área 2	PM39	04/10/2013	-4,26	-23,3	0,18		0,15	10,6	0,003	0,06	0,95	0,34	29,47	70,73	86,34	0,03
Área 2	PM39	02/04/2014	-3,73	-19,9	0,19		0,11	12,43	0,008	0,06	1,59	0,55	27,16	88,11	107,50	0,00
Área 2	PM39	29/10/2014	-3,96	-20,4	0,19		0,13	12,47	0,003	0,06	0,22	0,007	29,7	73,05	89,12	0,00
Área 2	PM39A	02/07/2013	-4,62	-25	0,18	0,749047	0,25	21,26	0,005	0,09	0,29	0,006	34,36	124,08	151,39	0,01
Área 2	PM39A	04/10/2013	-4,31	-24,5	0,18		0,19	24,28	0,007	0,06	0,26	0,01	35,9	101,9	124,48	0,08
Área 2	PM39A	02/04/2014	-4,39	-24,3	0,18		0,18	18,41	0,008	0,05	1,04	0,21	36,88	105,5	128,74	0,01
Área 2	PM39A	29/10/2014	-4,29	-23,1	0,19		0,16	19,98	0,003	0,06	0,25	0,007	33,44	88,51	107,99	0,00
Área 3	PMN2A	05/03/2013	-6,36	-38,1	0,17	0,744903	0,33	4,95	0,005	0,05	0,66	0,006	3,46	77,02	94,19	0,11
Área 3	PMN2A	10/10/2013	-5,05	-28,8	0,18		0,15	12,28	0,003	0,1	0,27	0,03	0,11	159,44	194,93	0,20
Área 3	PMN2A	01/04/2014	-4,98	-27,7	0,18		0,13	21,33	0,008	0,2	1,58	0,05	0,24	189,14	230,86	0,06
Área 3	PMN2A	29/10/2014	-4,88	-27,5	0,18		0,1	14,89	0,005	0,16	0,46	0,004	0,12	145,03	176,95	0,01
Área 3	PMN4A	30/10/2014	-2,53	-8,4	0,30	0,724667	0,11	4,24	0,004	0,05	0,1	0,015	4,04	43,19	52,70	0,00
Área 3	PMN4B	30/10/2014	-2,94	-12,1	0,24		0,13	2,88	0,001	0,01	0,2	0,03	6,85	43,19	52,70	0,00
Área 3	SP1204-<126	22/06/2017	-6,16	-37,6	0,16		0,31	19,68	<0.015		1,09		22,67	169,46	206,67	0,03
Área 3	SP1204-115-117	13/06/2017	-6,1	-37,3	0,16		0,32	30,48	<0.015		0,02		20,36	166,00	202,47	0,02

Local	Estação	Data	18O	2H	18O/2H	87Sr/86Sr	F (mg/L)	Cl (mg/L)	NO2 (mg/L)	Br (mg/L)	NO3 (mg/L)	HPO4 (mg/L)	SO4 (mg/L)	Meas Alk (mg/L CaCO3)	HCO3 (mg/L)	CO3 (mg/L)
V. Ref							1,5	250	1		10		250			
Área 3	SP1204-120-123	21/06/2017	-6,16	-37,7	0,16		0,23	24,53	<0.015		1,03		20,99	162,54	198,19	0,05
Área 3	SP1204-180-182	28/06/2017	-6,12	-37,4	0,16		0,28	22,65	<0.015		0,99		24,31	178,68	217,89	0,05
Área 3	SP1204-184-186	30/06/2017	-6,15	-37,4	0,16		0,52	35,45	0,05		0,12		28,46	157,35	191,88	0,05
Área 3	SP1204-243-256	30/06/2017	-5,93	-36	0,16		0,31	59,70	<0.015		0,08		42,21	190,21	231,96	0,04
Área 3	SP1204-250	07/07/2013	-5,99	-36,3	0,17	0,742984										
Área 3	SP1204-53	05/07/2013	-6	-36,7	0,16	0,741114										
Área 3	SP255->135	24/08/2017					0,13	11,98	<15		0,41		11,35	82,42	100,54	0,01
Área 3	SP255-25-28	18/07/2017					0,05	8,56	0,02		0,08		3,66	93,95	114,57	0,02
Área 3	SP255-59-62	24/07/2017					0,03	9,73	0,05		0,25		8,20	81,85	99,83	0,01

Local	Estação	Data	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Sr (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Ni (mg/L)	Mn (mg/L)
V. Ref						0,005	5	2	0,07	0,10
Área 1	Cavalete	12/04/2013	17,58	1,54	0,13	<0.009	<0.008	<0.02	0,04	0,02
Área 1	Cavalete	20/02/2014	14,75	2,15				<0.02		0,26
Área 1	Cavalete	10/03/2014	18,91	1,77				<0.02		0,03
Área 1	Chuva	26/04/2013	1,04	0,06		<0.009	0,02	<0.02	<0.02	n.d
Área 1	Chuva	02/07/2013	1,47	0,07		<0.009	0,015	<0.02	<0.02	n.d
Área 1	Esgoto	12/04/2013	17,6	3,18	0,12	<0.009	0,03	0,03	0,05	0,02
Área 1	PM21	25/09/2013	1,64	0,24		<0.009	0,01	0,02	<0.02	0,02
Área 1	PM21	03/04/2014	1,26	0,23				<0.02		0,05
Área 1	PM21	30/10/2014	1,39	0,25				0,002		0,03
Área 1	PM23	12/04/2013	24,9	2,66	0,232	<0.009	0,01	<0.02	<0.02	0,40
Área 1	PM23	25/09/2013	21,66	3,18		<0.009	0,01	0,02	<0.02	0,85
Área 1	PM23	03/04/2014	29,23	3,76				<0.02		0,24
Área 1	PM23	30/10/2014	12,35	1,8				0,018		0,46
Área 1	PMD	12/04/2013	23,43	2,95	0,102	<0.009	<0.008	<0.02	<0.02	0,50
Área 1	PMD	25/09/2013	24,16	5,24		<0.009	0,02	0,01	<0.02	0,11
Área 1	PMD	03/04/2014	31,63	4,26				<0.02		0,60
Área 1	PMD	30/10/2014	7,03	1,29				0,015		0,46
Área 1	PP02	12/04/2013	3,86	2,08	0,059	<0.009	0,02	<0.02	<0.02	0,49
Área 1	PP02	25/09/2013	2,9	1,44		<0.009	0,07	0,02	<0.02	0,26
Área 1	PP02	03/04/2014	2,89	1,25				<0.02		0,18
Área 1	PP02	30/10/2014	6,47	1,78				0,02		0,23
Área 5	MP-01 WB-01	08/09/2016	78,14	10,75						1,09
Área 5	MP-01 WB-02	08/09/2016	48,89	5,42						0,72
Área 5	MP-01 WB-03	09/09/2016	30,59	4,48						0,82
Área 5	MP-01 WB-04	09/09/2016	7,93	1,14						0,18
Área 5	MP-01 WB-05	09/09/2016	24,06	3,32						0,45
Área 5	MP-01 WB-06	09/09/2016	19,58	3,52						0,50
Área 5	MP-01 WB-07	12/09/2016	33,66	4,43						1,02
Área 5	MP-01 WB-08	12/09/2016	28,79	1,93						0,70
Área 5	MP-01 WB-09	12/09/2016	17,85	2,44						0,78
Área 5	MP-01 WB-10	13/09/2016	19,35	2,31						0,67
Área 5	MP-01 WB-11	13/09/2016	21,36	2,46						0,76
Área 5	MP-01 WB-12	15/09/2016	22,66	3,44						1,36
Área 5	MP-01 WB-13	15/09/2016	58,94	6,55						3,42
Área 5	MP-01 WB-14	15/09/2016	66,45	8,33						4,53
Área 5	MP-01 WB-15	16/09/2016	55,92	7,32						2,67
Área 5	MP-01 WB-16	16/09/2016	17,58	1,34						0,22
Área 5	PM-10	02/09/2016	5,9	1,87						0,05
Área 5	PM-10B	06/09/2016	35,19	16,63						3,03
Área 5	PM-11	06/09/2016	6,57	2,35						0,46
Área 5	PM-11A	06/09/2016	2,14	0,84						0,13
Área 5	PM-11B	07/09/2016	19,01	5,82						0,49
Área 5	PM-18	05/09/2016	69,46	3,15						0,21

Local	Estação	Data	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Sr (mg/L)	Cd (mg/L)	Zn (mg/L)	Cu (mg/L)	Ni (mg/L)	Mn (mg/L)
V. Ref						0,005	5	2	0,07	0,10
Área 5	PM-18A	05/09/2016	19,21	14,41						0,29
Área 5	PM-18B	06/09/2016	12,26	5,24						0,62
Área 2	PM19	02/07/2013	16,43	3,28	0,089	<0.009	<0.008	0,005	<0.02	0,52
Área 2	PM19	04/10/2013	13,65	2,48		<0.009	<0.008	<0.02		0,73
Área 2	PM19	02/04/2014	14,69	3,26				<0.02		0,32
Área 2	PM19	29/10/2014	15,09	2,8				<0.02		0,31
Área 2	PM19A	02/07/2013	15,72	6,48	0,319	<0.009	0,01	0,002	<0.02	1,71
Área 2	PM19A	04/10/2013	18,31	7,99		<0.009	0,01	<0.02		1,86
Área 2	PM19A	02/04/2014	19,33	8,54				<0.02		2,10
Área 2	PM19A	29/10/2014	17,62	7,75				0,007		0,76
Área 2	PM39	04/10/2013	18,56	5,51		<0.009	0,02	<0.02		0,06
Área 2	PM39	02/04/2014	24,57	6,27				<0.02		0,07
Área 2	PM39	29/10/2014	23,41	6,64				0,009		0,14
Área 2	PM39A	02/07/2013	18,59	14,44	0,283	<0.009	0,07	0,005	<0.02	1,17
Área 2	PM39A	04/10/2013	18,33	13,09		<0.009	0,02	<0.02		1,74
Área 2	PM39A	02/04/2014	19,26	14,57				<0.02		0,98
Área 2	PM39A	29/10/2014	18,73	14,35				0,011		0,80
Área 3	PMN2A	05/03/2013	5,9	2,01	0,082	<0.009	0,05	<0.02	<0.02	0,28
Área 3	PMN2A	10/10/2013	13,71	4,64		<0.009	0,02	<0.02		1,37
Área 3	PMN2A	01/04/2014	27,28	5,39				<0.02		0,79
Área 3	PMN2A	29/10/2014	16,66	6,37				0,018		1,05
Área 3	PMN4A	30/10/2014	11,63	1,76				0,019		0,08
Área 3	PMN4B	30/10/2014	17,84	1,3				0,019		0,03
Área 3	SP1204-<126	22/06/2017	41,16	6,33						1,93
Área 3	SP1204-115-117	13/06/2017	62,47	7,89						2,53
Área 3	SP1204-120-123	21/06/2017	38,52	6,76						1,66
Área 3	SP1204-180-182	28/06/2017	43,45	6,14						1,44
Área 3	SP1204-184-186	30/06/2017	33,11	6,45						0,31
Área 3	SP1204-243-256	30/06/2017	52,43	8,89						0,07
Área 3	SP1204-250	07/07/2013			0,636					
Área 3	SP1204-53	05/07/2013			0,203					0,02
Área 3	SP255->135	24/08/2017	15,88	3,65						0,16
Área 3	SP255-25-28	18/07/2017	15,80	2,99						0,15
Área 3	SP255-59-62	24/07/2017	15,80	2,99						0,15

Local	Estação	Data	Fe (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	NH4 (mg/L)	Li (mg/L)	Soma de cátions (S*) meq/L	Eletro- neutralidade	Cond./S*
V. Ref			0,30	200		1,5				
Área 1	Cavalete	12/04/2013	0,02	8,8	3,3			1,47	-0,84	n/a
Área 1	Cavalete	20/02/2014	0,11	11,56	4,15	0,07	0,001	1,54	-2,63	n/a
Área 1	Cavalete	10/03/2014	0,05	13,29	3,55	0,05	<0,001	1,76	-0,85	n/a
Área 1	Chuva	26/04/2013	0,05	<0,001	<0,001	0,22	0,002	0,07	-11,79	n/a
Área 1	Chuva	02/07/2013	0,05	<0,001	<0,001	0,15	0,002	0,09	-4,32	n/a
Área 1	Esgoto	12/04/2013	0,19	89	41			12	-34	n/a
Área 1	PM21	25/09/2013	0,15	2,77	1,18	0,54	0,002	0,29	0,49	109
Área 1	PM21	03/04/2014	<0,05	2,77	1,23	0,38	<0,001	0,26	-4,55	156
Área 1	PM21	30/10/2014	0,01	3,41	1,43	0,52	0,001	0,30	0,01	137
Área 1	PM23	12/04/2013	5,37	14,5	16,5			2,53	-1,6	109
Área 1	PM23	25/09/2013	3,49	14,41	19,65	0,45	0,002	2,52	-2,4	86
Área 1	PM23	03/04/2014	2,14	14,53	17,71	0,41	<0,001	2,89	-2,19	104
Área 1	PM23	30/10/2014	2,46	12,4	13,71	0,41	0,001	1,70	2,28	135
Área 1	PMD	12/04/2013	6,20	4,3	2,3			1,67	-6,35	110
Área 1	PMD	25/09/2013	7,91	5,62	0,87	1,43	0,002	2,00	-7,48	93
Área 1	PMD	03/04/2014	6,65	1,58	2,01	1,82	<0,001	2,17	-4,32	108
Área 1	PMD	30/10/2014	7,30	5,99	1,16	4,1	0,001	0,99	3,11	132
Área 1	PP02	12/04/2013	0,06	21	3,9			1,40	-2,12	89
Área 1	PP02	25/09/2013	0,05	9,73	2,49	0,008	0,007	0,77	-1,06	97
Área 1	PP02	03/04/2014	0,05	4,51	2,76	0,03	0,008	0,53	-1,21	112
Área 1	PP02	30/10/2014	0,07	7,6	3,25	0,17	0,007	0,90	2,09	110
Área 5	MP-01 WB-01	08/09/2016	3,99	57,41	8,38	0,1194	0,175	7,59	1,03	88
Área 5	MP-01 WB-02	08/09/2016	17,20	42,92	7,15	0,2253	0,0724	4,97	0,71	159
Área 5	MP-01 WB-03	09/09/2016	4,40	42,35	5,85	0,2094	0,055	3,93	0,68	139
Área 5	MP-01 WB-04	09/09/2016	1,27	16,23	2,62	0,0376	0,0092	1,26	2,65	77
Área 5	MP-01 WB-05	09/09/2016	3,10	45,95	4,13	0,1511	0,0297	3,61	1,91	83
Área 5	MP-01 WB-06	09/09/2016	3,89	24,63	3,88	0,1247	0,0196	2,46	0,22	118
Área 5	MP-01 WB-07	12/09/2016	12,77	40,91	7,42	0,1787	0,0446	4,06	1,09	213
Área 5	MP-01 WB-08	12/09/2016	3,87	12,37	3,79	0,0147	0,0031	2,25	0,63	80
Área 5	MP-01 WB-09	12/09/2016	4,50	26,85	4,08	0,0444	0,0192	2,40	1,52	133
Área 5	MP-01 WB-10	13/09/2016	2,63	29,94	4,39	0,0348	0,0322	2,60	0,82	102
Área 5	MP-01 WB-11	13/09/2016	3,42	22,79	4,17	0,0264	0,0208	2,40	2,59	132
Área 5	MP-01 WB-12	15/09/2016	6,73	31,79	4,89	0,0174	0,0313	2,98	1,58	109
Área 5	MP-01 WB-13	15/09/2016	20,14	39,74	8,97	0,0444	0,0312	5,55	1,6	122
Área 5	MP-01 WB-14	15/09/2016	25,15	56,19	10,35	0,0321	0,0279	6,88	4,32	102
Área 5	MP-01 WB-15	16/09/2016	81,63	55,79	11,04	0,0196	0,028	6,20	3,88	114
Área 5	MP-01 WB-16	16/09/2016	1,46	5,36	3,37	0,8694	0,0045	1,37	4,6	427
Área 5	PM-10	02/09/2016	2,9	158,96	6,62	8,15	<0,001	8,01	-2,72	128
Área 5	PM-10B	06/09/2016	20,50	90,95	8,24	0,44	0,006	7,42	-1,32	132
Área 5	PM-11	06/09/2016	50,29	64,5	5,99	13,11	<0,001	4,23	-7,67	197
Área 5	PM-11A	06/09/2016	8,7	40,54	1,46	0,05	<0,001	2,00	-2,23	60
Área 5	PM-11B	07/09/2016	45,9	54,58	5,95	0,03	0,0077	3,96	-0,38	129

Local	Estação	Data	Fe (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	NH4 (mg/L)	Li (mg/L)	Soma de cátions (S*) meq/L	Eletro- neutralidade	Cond./S*
Área 5	PM-18	05/09/2016	4,33	16,0	6,15	1,19	<0,001	4,66	2,67	112
Área 5	PM-18A	05/09/2016	0,13	71,61	5,01	0,19	0,002	5,41	0,98	111
Área 5	PM-18B	06/09/2016	2,22	37,99	4,25	0,02	0,005	2,83	1,36	124
Área 2	PM19	02/07/2013	3,07	18,27	2,39	0,89	0,002	2,01	0,1	107
Área 2	PM19	04/10/2013	4,01	13,5	2,38	0,65	<0,001	1,60	-6,08	123
Área 2	PM19	02/04/2014	2,37	17,43	3,64	0,99	<0,001	1,91	-0,96	112
Área 2	PM19	29/10/2014	2,82	13,55	3,01	0,67	0	1,70	3,94	110
Área 2	PM19A	02/07/2013	1,14	28,17	2,61	0,012	0,005	2,67	-5,49	82
Área 2	PM19A	04/10/2013	1,80	29,84	3,93	0,03	0,003	3,05	-1,2	97
Área 2	PM19A	02/04/2014	2,40	29,02	4,05	0,04	0,004	3,12	-1,52	94
Área 2	PM19A	29/10/2014	0,49	34,83	3,79	0,005	0,004	3,16	1,44	97
Área 2	PM39	04/10/2013	0,09	14,66	7,56	0,04	0,002	2,21	-2,98	109
Área 2	PM39	02/04/2014	0,07	18,88	9,77	0,03	0,001	2,81	1,95	98
Área 2	PM39	29/10/2014	0,55	16,97	8,1	0,011	0,001	2,67	4,38	107
Área 2	PM39A	02/07/2013	3,35	29,17	8,63	0,42	0,016	3,69	-1,81	95
Área 2	PM39A	04/10/2013	7,74	20,26	9,23	0,2	0,012	3,20	-4,55	117
Área 2	PM39A	02/04/2014	4,84	20,81	10,39	0,19	0,016	3,38	-0,65	97
Área 2	PM39A	29/10/2014	5,45	20,63	9,67	0,05	0,014	3,30	3,97	107
Área 3	PMN2A	05/03/2013	3,33	24,3	8,1			1,73	-1,37	93
Área 3	PMN2A	10/10/2013	17,22	28,91	10,15	7,02	0,003	3,03	-8,18	120
Área 3	PMN2A	01/04/2014	14,59	30,12	14,1	8,75	0,002	3,98	-5,18	122
Área 3	PMN2A	29/10/2014	19,76	24,8	14,12	9,3	0,002	3,35	0,2	114
Área 3	PMN4A	30/10/2014	7,44	4,31	3,87	2,09	0,001	1,13	2,53	145
Área 3	PMN4B	30/10/2014	0,15	2,28	1,95	0,02	0,001	1,15	2,29	110
Área 3	SP1204-<126	22/06/2017	0,22	32,71	3,15			4,14	-3,5	171
Área 3	SP1204-115-117	13/06/2017	0,13	37,03	3,70			5,55	9,27	136
Área 3	SP1204-120-123	21/06/2017	0,13	29,34	3,35			3,91	-6,1	196
Área 3	SP1204-180-182	28/06/2017	0,14	31,93	3,02			4,21	-6,23	131
Área 3	SP1204-184-186	30/06/2017	0,20	29,48	3,07			3,55	-14,58	146
Área 3	SP1204-243-256	30/06/2017	0,37	29,28	4,08			4,73	-14,9	137
Área 3	SP1204-250	07/07/2013								
Área 3	SP1204-53	05/07/2013								
Área 3	SP255->135	24/08/2017	0,16	17,91	4,36			1,83	-11,41	139
Área 3	SP255-25-28	18/07/2017	<0,04	11,52	4,64			3,01	-5,84	128
Área 3	SP255-59-62	24/07/2017	<0,03	11,52	4,64			0,99	-14	232

Anexo C - Resultados do monitoramento dos tensiômetros

abr/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
dia	Leituras (Kpa)								
14	15	19	16	23	8	14	9	16	0
15	20	18	19	28	16	16	11	18	14,7
16	22	18	10	27	17	16	14	16	0
17	24	23	25	30	20	14	21	18	0
18	27	26	28	31	19	18	20	18	0
23	28	29	25	30	17	13	20	16	0
24	22	29	24	29	18	16	19	15	0,8
25	26	32	28	30	17	14	19	15	0
28	30	34	30	32	19	15	21	17	0
29	32	35	29	30	19	17	19	19	0
Média mensal	25	26	23	29	17	15	17	17	
Pluviometria total mensal									33,6
mai/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
dia	Leituras (Kpa)								
5	36	33	37	32	27	29	28	30	0
7	36	34	37	35	29	30	29	31	0
9	38	36	38	36	29	31	32	31	0
13	38	34	36	32	29	32	30	32	0
15	39	35	37	33	29	32	31	33	0
21	38	34	39	35	30	32	31	32	0
29	37	35	38	33	30	31	32	33	0
Média mensal	37	34	37	34	29	31	30	32	
Pluviometria total mensal									25,5
jun/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
dia	Leituras (Kpa)								
3	39	34	38	36	32	33	32	32	0
10	38	36	37	36	31	33	33	32	0,2
18	39	36	36	37	30	32	33	32	0,1
26	40	36	38	38	30	31	34	32	0
Média mensal	39	36	37	37	31	32	33	32	
Pluviometria total mensal									18,9
jul/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
dia	Leituras (Kpa)								
2	40	37	38	37	33	34	32	31	0
9	31	36	30	37	32	34	31	30	0,5
16	36	36	34	37	31	33	30	31	0
22	39	37	36	36	30	33	32	33	0
29	38	37	36	37	31	32	32	30	0
Média mensal	37	37	35	37	31	33	31	31	
Pluviometria total mensal									17

ago/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
dia	Leituras (Kpa)								
5	40	38	38	37	32	31	33	32	0
12	35	38	34	38	32	32	34	33	0
20	41	38	39	38	33	34	34	32	0
27	41	37	40	38	33	33	34	31	0
Média mensal	39	38	38	38	33	33	34	32	
Pluviometria total mensal									32,7
set/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
	Leituras (Kpa)								
2	40	38	39	39	32	33	34	30	14
10	41	40	39	41	33	33	34	31	0
17	43	40	40	39	33	32	33	31	0
24	40	39	39	37	31	32	31	30	0,4
Média mensal	41	39	39	39	32	33	33	31	
Pluviometria total mensal									59,2
out/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
	Leituras (Kpa)								
1	42	39	40	40	33	32	31	31	0
8	43	40	41	41	33	31	32	33	0
16	42	40	40	41	34	31	31	33	0
22	43	41	40	40	33	31	32	33	0
29	44	41	41	40	33	32	32	31	0
Média mensal	43	40	40	40	33	31	32	32	
Pluviometria total mensal									12,2
nov/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
	Leituras (Kpa)								
4	39	40	40	41	32	32	33	31	9,5
12	40	41	42	41	32	33	34	32	0
20	34	32	31	30	33	33	31	33	0
25	24	27	25	29	25	28	25	27	49,8
26	11	9	12	8	8	7	7	6	37
28	19	21	18	22	18	19	18	20	0
Média mensal	28	28	28	29	25	25	25	25	
Pluviometria total mensal									128,4

dez/14	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
	Leituras (Kpa)								
3	38	40	36	39	34	32	32	33	0
5	30	41	32	40	33	33	31	32	0
8	27	39	29	37	23	29	26	30	0
9	22	32	19	30	17	24	19	26	7
10	17	21	18	22	10	16	11	18	7,2
11	9	14	10	17	10	12	10	18	23,5
12	6	11	7	11	8	9	9	12	30,6
15	7	13	7	14	7	9	9	8	0
16	10	11	9	10	7	8	7	7	0
17	11	9	12	8	8	7	7	6	0
18	11	10	10	8	8	8	7	7	0
19	7	10	7	9	7	7	6	7	26,6
22	6	7	7	8	6	6	7	6	71,6
23	5	7	6	7	5	6	7	6	21,6
27	6	7	7	7	5	6	6	6	0
28	7	8	7	7	5	6	7	6	0
29	7	9	8	9	6	7	6	6	5
Média mensal	13	17	14	17	12	13	12	14	
Pluviometria total mensal									240,2
jan/15	T-01 A (35 cm)	T-01 B (70 cm)	T-02 A (35 cm)	T-02 B (70 cm)	T-03 A (35 cm)	T-03 B (80 cm)	T-04 A (35 cm)	T-04 B (80 cm)	Pluviometria diária (mm)
	Leituras (Kpa)								
1	7	6	8	7	6	5	5	4	2,5
2	8	6	7	7	5	4	5	4	0
5	7	5	8	6	4	4	4	5	8,8
6	5	5	7	6	4	4	4	5	20,8
7	5	5	6	7	5	5	4	4	10,8
8	6	6	6	6	5	5	5	4	0
9	8	6	7	6	6	5	5	4	0
12	4	4	5	4	3	4	4	5	32
13	4	4	5	3	4	3	4	5	0,1
14	5	3	5	1	5	3	5	4	0
15	7	6	8	6	5	4	5	4	0
16	9	8	10	8	5	4	6	5	3
19	13	11	12	8	7	5	7	7	0
20	17	11	14	9	7	5	7	6	0
21	12	11	16	9	7	6	6	6	1
22	18	12	10	10	4	4	4	3	8,4
23	16	12	9	10	4	3	5	5	0,3
26	3	2	3	3	2	3	1	3	0
27	5	4	5	5	4	4	2	5	0
28	3	3	3	2	4	4	2	4	0
29	5	5	4	4	3	3	2	4	0
30	6	5	6	5	4	4	3	4	0
Média mensal	8	6	7	6	5	4	4	5	
Pluviometria total mensal									107

Anexo D - Resultados do monitoramento do nível d'água dos poços – Dados obtidos por meio dos transdutores de pressão

Mês	PP-02 ^(*)	P-255 ^(*)	P-1346 ^(*)	PMN-4A ^(*)	PMN-4B ^(*)
	Profundidade média mensal do nível d'água (m)				
dezembro-12	0,53	5,26	4,64	-	-
janeiro-13	0,48	4,70	4,49	-	-
fevereiro-13	0,41	4,98	4,43	1,97	2,47
março-13	0,49	5,08	4,48	2,18	2,60
abril-13	0,53	-	4,51	2,28	2,65
maio-13	0,74	-	4,71	2,69	2,95
junho-13	0,46	5,89	4,78	2,71	3,03
julho-13	0,39	5,76	4,62	2,48	2,87
agosto-13	1,19	5,85	4,91	2,77	3,09
setembro-13	1,21	5,92	5,16	2,86	3,22
outubro-13	0,53	5,83	5,03	2,55	3,00
novembro-13	0,59	5,91	4,95	2,60	2,94
dezembro-13	0,67	5,86	4,91	2,74	3,01
janeiro-14	0,57	5,66	4,75	2,55	2,86
fevereiro-14	1,03	5,80	4,97	2,62	2,91
março-14	0,57	5,63	-	2,27	2,69
abril-14	0,48	5,81	-	2,51	2,83
maio-14	0,64	5,95	-	2,77	3,05
junho-14	0,50	5,96	-	2,88	3,14
julho-14	0,55	6,28	-	3,00	3,27
agosto-14	0,66	6,86	-	3,07	3,34
setembro-14	0,73	7,22	-	2,96	3,33
outubro-14	0,96	7,34	-	3,12	3,40
novembro-14	0,89	7,19	-	2,97	3,36
dezembro-14	0,52	6,84	-	2,46	2,91
janeiro-15	0,51	6,24	9,24	2,32	2,74
fevereiro-15	0,54	6,25	8,94	2,17	2,59
março-15	0,62	6,36	9,46	2,08	2,51
abril-15	0,53	6,36	9,08	2,58	2,93
maio-15	0,46	6,55	9,27	2,73	3,10
junho-15	0,41	6,57	8,92	2,88	3,23
julho-15	0,26	6,34	8,94	2,78	3,13
agosto-15	0,63	6,68	9,10	3,05	3,33
setembro-15	0,39	6,31	8,79	2,67	3,05
outubro-15	0,39	-	8,50	2,73	3,06
novembro-15	0,17	-	8,64	2,22	2,69
dezembro-15	-	-	9,28	-	-

(*) poços monitorados; (-) sem medições

Mês	PMN-2A(*)	PM-19(*)	PM-19A(*)	PM-39(*)	PM-39A(*)
	Profundidade média mensal do nível d'água (m)				
dezembro-12	-	-	-	-	-
janeiro-13	-	-	-	-	-
fevereiro-13	2,44	-	-	-	-
março-13	2,48	1,77	2,43	2,96	3,78
abril-13	2,55	1,87	2,47	3,10	3,85
maio-13	2,77	1,92	2,61	3,50	4,11
junho-13	2,82	1,80	2,54	3,59	4,19
julho-13	2,74	1,79	2,47	3,34	4,14
agosto-13	2,86	1,93	2,56	3,36	4,00
setembro-13	2,95	1,96	2,63	3,66	4,22
outubro-13	2,72	1,83	2,53	3,45	4,16
novembro-13	2,54	1,79	2,56	3,35	4,02
dezembro-13	2,42	1,89	2,55	3,31	3,95
janeiro-14	2,32	1,78	2,40	3,24	3,91
fevereiro-14	2,33	1,96	2,51	3,24	3,85
março-14	2,20	1,78	2,43	3,03	3,69
abril-14	2,34	1,93	2,63	3,05	3,82
maio-14	2,46	2,03	2,78	3,39	4,02
junho-14	2,50	1,98	2,60	3,45	4,05
julho-14	2,55	2,00	2,63	3,70	4,18
agosto-14	2,59	1,95	2,70	3,88	4,31
setembro-14	2,54	1,90	2,65	3,89	4,35
outubro-14	2,57	1,98	2,68	3,86	4,33
novembro-14	2,61	2,02	-	3,93	4,40
dezembro-14	2,35	1,76	2,65	3,40	4,08
janeiro-15	2,31	1,84	-	3,09	3,82
fevereiro-15	2,26	1,81	-	2,97	3,68
março-15	2,22	1,80	-	2,88	3,56
abril-15	2,44	2,05	-	3,20	3,81
maio-15	2,60	2,07	-	3,41	4,00
junho-15	2,79	2,11	-	3,55	4,10
julho-15	2,76	2,00	-	3,40	3,99
agosto-15	2,88	2,15	-	3,52	4,02
setembro-15	2,70	1,93	-	3,35	3,93
outubro-15	-	-	-	-	-
novembro-15	-	-	-	-	-
dezembro-15	-	-	-	-	-

(*) poços monitorados; (-) sem medições

Mês	P-1204 ^(*)	PM-21 ^(*)	PM-23 ^(*)	P-1401 ^(*)
	Profundidade média mensal do nível d'água (m)			
dezembro-12	6,27	1,41	0,89	0,90
janeiro-13	5,54	1,38	0,82	0,31
fevereiro-13	5,82	1,40	0,83	0,27
março-13	6,00	1,45	0,88	0,57
abril-13	5,87	1,47	0,92	0,55
maio-13	6,01	1,63	1,10	0,90
junho-13	6,21	1,55	1,05	0,45
julho-13	6,26	1,46	0,92	0,37
agosto-13	6,40	1,62	1,11	1,06
setembro-13	6,44	1,62	1,16	1,04
outubro-13	6,31	1,47	0,97	0,52
novembro-13	6,38	1,43	0,93	0,55
dezembro-13	6,32	1,60	1,02	0,71
janeiro-14	6,07	1,50	0,91	0,50
fevereiro-14	6,26	1,63	1,09	1,28
março-14	6,12	1,44	0,90	0,48
abril-14	6,32	1,50	0,94	0,41
maio-14	6,45	1,59	1,03	0,65
junho-14	6,48	1,53	1,01	0,40
julho-14	6,92	1,58	1,08	0,58
agosto-14	7,66	1,65	1,14	0,77
setembro-14	8,10	1,61	1,15	0,86
outubro-14	8,24	1,70	1,18	-
novembro-14	8,06	1,73	1,20	-
dezembro-14	7,64	1,49	0,95	-
janeiro-15	6,83	1,54	0,96	0,40
fevereiro-15	6,86	1,53	0,96	0,32
março-15	6,99	1,51	0,91	0,18
abril-15	6,97	1,68	1,11	0,46
maio-15	7,19	1,69	1,14	0,40
junho-15	7,17	1,69	1,16	0,35
julho-15	6,89	1,61	1,09	0,20
agosto-15	7,33	1,68	1,20	0,57
setembro-15	6,77	1,56	1,04	0,34
outubro-15	-	1,58	1,06	0,34
novembro-15	-	1,45	0,89	0,13
dezembro-15	-	1,52	-	-

(*) poços monitorados; (-) sem medições

**Anexo E - Dados meteorológicos do período de
outubro/2012 a abril/2016**

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (° C - T MIN - temperatura mínima/ T MAX - temperatura máxima) E UMIDADE RELATIVA (UR %)																											
Ano	2012									2013																	
Mês	Outubro			Novembro			Dezembro			Janeiro			Fevereiro			Março			Abril			Maio			Junho		
	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%
	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
1	13,4	33,1	28,1	17,5	21,8	83,3	18,4	29,3	56	20,1	31	51,2	20	26,9	73,7	18,2	26,5	60,8	17,6	26,5	68,3	17	23,1	774,5	14,5	25,8	55,9
2	15,4	33,5	31,4	16,4	19,5	86,5	18,5	30,4	48,4	17,5	22,9	86,6	19,5	30,8	52,4	18,4	27,9	57,1	19,5	23,4	80,3	16,8	25,3	66,4	15,3	19,2	83,5
3	17,1	34,5	32,6	16,3	21,5	78,1	18,9	25,7	71,6	17,5	19,7	91,2	20,8	24,4	69,4	19,1	30	51,4	18,9	26,1	65,7	17,9	28,3	44,4	12,1	17,1	91,4
4	17,8	30,5	49,2	17,8	22	81,5	18,8	31,1	46,2	18,5	23	85,2	17,8	22,6	80,5	20,4	31,4	43,1	19,3	27,8	63,2	18,5	28,2	47,9	11,5	20	72,3
5	17,4	27,8	55,5	17,6	23,2	68,7	20,4	31,3	49,8	20,1	31,4	48	17	21,6	77,1	20,8	31	44,3	19,9	23,7	79,4	18,8	24	71,5	13,5	23,8	43,3
6	18,5	31,7	37,2	17,2	24	63,6	20,3	33	45	20,4	29,6	55,2	20,5	29,6	55,2	20,3	29,9	59	17,8	26,9	56,3	11,9	19,5	66	12,7	24,8	49,7
7	17	31,9	39,4	18,3	24,4	68	21,8	33,7	41,6	20,1	30,6	46,2	18,1	20,9	85,7	21,5	26,9	77,5	18,6	23,5	83,2	10,8	21,5	43,2	13,1	24,8	46,9
8	17,4	29	49,8	18,6	27,3	57,8	23,8	29,1	59,4	21,7	30,8	51,3	18	25,8	64,9	20	29,8	60,2	19,5	22,8	79,8	11,1	18,1	59,5	15	21,7	68,5
9	16	33,1	29,2	19,4	22,6	84,3	18,8	22,7	85,6	20,6	26	74,3	17,6	24,3	77,4	19,4	31,4	52,4	18,1	21,9	80,7	10,1	22,2	37,3	15,2	23,9	54,1
10	19,6	33,6	29,2	18,3	28,7	54,3	19	31,2	50	17,6	22	88,5	19,4	27,1	69,9	19,6	28,3	64,9	16,9	23,6	69,9	11,1	21,8	63,1	14,6	24,8	48,5
11	16,2	21,5	77,9	19,4	30,8	46,1	23	31,1	57,5	16,2	20,1	76,4	19	30,7	46,1	20,4	27	66,6	18,1	26,4	65,1	13,3	24,3	55,5	19,2	22,5	67,6
12	14,4	20	74,4	19,2	23,9	77,5	20,8	28,9	59,2	16,2	20,3	79,7	20,5	31,7	44,9	20,4	29,8	57,7	18,7	28	64,4	13,9	25,2	47,7	16,3	24,5	64,3
13	14,8	17,8	83,4	14,6	19,9	90,4	20,9	31,6	44,3	16,9	24,1	69	20	29,1	59	19,1	27	67,2	17,3	21,7	91,1	14,6	26,1	40,4	15,4	21,3	82,9
14	14	17,8	77,3	14,6	17,9	78,6	20	23,9	85,8	17,4	25,1	66,9	17,5	31,8	42,6	18,8	20,4	91,4	14,5	17,4	90,2	14,7	26,6	42,1	13,3	22,7	54
15	13	20,7	62,7	13,7	19,4	76	19,9	21,9	91,5	17,5	23,7	78	18,8	30,7	53,5	18,8	27	57,6	13,1	23,5	40	16,8	27,8	50,5	13,5	17,8	77,2
16	13,7	27,1	48,8	14,1	20,4	72	20,1	25,8	69,7	18,3	23,7	76,3	20	32	44,4	19,8	24,9	80,4	13,5	24,2	51,3	17,3	23,3	67,5	14,6	21,4	76,6
17	16,8	23,8	61,9	14	19,5	67,8	19,5	23,2	81	18,7	26,4	58,1	21,4	29,2	47,1	16,6	21,1	93	14,9	19,7	70,2	14,2	17,3	90,4	15,2	19,3	78,4
18	17,2	28,2	43,1	14,5	21,7	67,4	19,4	27,4	61,1	17,8	27,2	55,5	21	32,8	41	15,9	17,3	88,9	13,5	21,1	66,2	15,2	19,6	82	13,2	22,2	58,7
19	15,5	20,4	78,9	16	26,7	56,3	19,5	29,2	58,1	19,3	24,8	74,3	19,4	28,8	66,1	15,9	20,1	81,2	15,9	20,9	73	16,7	20,8	78,8	13,9	25,3	47,2
20	16,2	23,9	55,5	18,1	29	47,8	19,9	32,2	45,2	18,3	21,9	73,3	18,8	31,4	40,8	16,2	22,7	67,3	14	20,6	66,4	16,6	25,2	67,5	15,7	19,7	87,6
21	16,4	30,3	45,8	16,1	24,4	66	22,1	34,8	52,8	17,4	20,5	82,3	20,7	31,6	37,8	18,2	23,7	71,2	13,5	20,2	70,2	17,3	21,8	76,6	16,6	24,1	58
22	18,7	31,9	40,7	16,7	25,3	56,9	21,3	23	89,8	16,6	21,7	75,9	20,1	27,7	60,2	18,8	26,7	65,8	14,8	19,9	69,1	15,7	20,9	78,2	14	22,6	29,9
23	18,7	26,5	59,1	15,2	33	18,5	20,2	23,8	84,8	18,1	24,8	65	18,5	21,9	87,2	17,9	21,9	83,9	13,8	21,3	68,6	14,5	17,1	92,1	12,9	16,5	75,4
24	16,5	23,7	73,2	20,4	27,3	49,7	20,4	31,1	54,2	19,1	28,9	57,3	19	29,9	52,2	17,4	22,7	75,2	14,7	21,8	64,2	14,3	16,5	90,6	14,4	17,5	85
25	16,5	26	71,5	16,6	21,3	78,6	20,9	32,9	45,5	21,3	29,9	58,9	21,3	29,9	58,9	17,9	22,5	85,6	14,1	23	57,1	12,2	19,6	71,6	15,6	17	96,4
26	17,9	22,7	86,8	15,4	18,7	88,4	23,7	31	54,5	18,7	22,6	87	19,2	29,3	53,9	17,7	23	85,1	14,3	23,3	62,4	13,3	21,7	51,5	15,6	18,3	93,1
27	18,7	33,4	43,2	15,9	27,1	59,1	21,9	25,7	73,7	18,8	21,2	87	18,9	24,4	78,5	17,1	22,8	77,9	14,1	22,8	61,1	13,9	18,7	83,5	15,7	19,3	85,9
28	20	31,5	50,2	17,4	28,7	51,8	19,6	29,8	47,7	18,1	20,3	83,5	18,4	25	71,4	15,4	21,8	62,4	14,1	22,7	62,9	13,5	17,2	86,2	16	24,3	65,2
29	18,9	28,7	63,7	17,5	27,2	55,9	22,3	30	47,2	17,5	21,2	84,7	-	-	-	17,2	20,9	80,7	15,2	24,9	61,7	14,3	19,5	81,3	15,9	26,3	58,3
30	20,5	34,6	36,1	18,1	24,6	63,7	19,6	27	69,3	18,4	23,4	82,5	-	-	-	16,4	24,6	61,5	16,2	26	61,7	14,1	20	81,8	15	18,6	92,8
31	20	34,7	31,6	-	-	-	19,6	29,1	52,4	19,2	28,3	64,1	-	-	-	17,5	25,5	68	-	-	-	13,5	20,2	74,2	-	-	-

Fonte: PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; SIURB - Secretaria de Infra-Estrutura Urbana e Obras; CGE - Centro de Gerenciamento de Emergências

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (° C - T MIN - temperatura mínima/ T MAX - temperatura máxima) E UMIDADE RELATIVA (UR %)																											
2013																			2014								
Mês	Julho			Agosto			Setembro			Outubro			Novembro			Dezembro			Janeiro			Fevereiro			Março		
	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%
	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
1	12,3	15,8	98,6	10,8	26,8	32,6	14,4	28,7	27,2	15,5	25,4	58,6	16,1	20,4	78,6	19,4	22,2	88	21,4	31,2	52,1	19,5	32,4	25,6	18,3	28,6	55,9
2	12,7	14,9	94	11,9	26,7	29,4	14,4	29,6	26,7	15,7	20,5	85,8	17,1	27,9	-	19,4	29,7	55,4	20,8	31,7	49,7	21,8	33,3	33,3	19,7	24,9	74,6
3	13,7	21,2	69,2	13,2	28,1	34	16,1	21,4	63,9	16,2	20	90,8	16,4	31	-	20,9	30,7	33,8	23,7	34	34,1	22,9	33	37,9	19,3	25,2	69,5
4	13,4	22,6	55,8	12,6	27,7	31,9	12,6	16,1	89,4	16,8	22,5	73,4	15,4	21,6	89,2	20	32,98	32,5	19,5	26,8	74,6	24,4	32,5	37,2	19,3	29,1	58,5
5	13,5	25,2	50,2	13,4	17,9	79,8	12,7	15,2	92,9	12,6	18,4	88,8	14,3	17,8	77,7	17,8	32,9	39,8	19,6	26,3	77,5	22,3	32,5	37,8	20,1	23,4	81,9
6	13,5	26,1	36,2	12,4	25	57,4	13,3	22,5	59,2	10,6	17,8	69,4	14,1	15,6	92,5	17,9	23,6	72,1	20,1	27,7	52,6	22	31,7	40,9	19,4	28,4	61,9
7	13,3	25,9	44	12,6	25,8	40,4	14,1	27,1	54,8	12,4	14,5	88,9	15,1	18,1	90,4	18	27	63,8	19	29,7	42	22,1	33,7	32,9	17,6	26,9	67,3
8	14	17,2	90	14,7	27,6	33,9	13,7	26,3	43,6	12	16,8	75,9	16,2	22,3	71,5	19,2	27,7	64,4	19,1	32,3	36,7	22,8	33,7	27,7	17,7	25,1	68,8
9	14,1	15,5	93,4	14,7	28,1	37,2	13,7	24,7	43	11,9	21,7	55	16,6	28,1	42,6	20,3	32,7	43,9	20,6	30,9	40,4	20,7	34,5	29	17,9	29,8	42,7
10	14,1	20,3	69,3	14,4	27,1	38,2	13,3	24,9	47,4	13,7	22,8	52,1	14	28,7	50,2	20,1	26	70,3	20,4	31,5	40	22,5	32,3	37,6	19,4	31,3	43,5
11	13,1	20,5	63,4	9	15,5	49,2	14,2	24	63,4	14,4	23,5	50	19,7	34,1	36,4	17,3	20,9	88,3	20,7	30,9	49,6	20,3	31,7	39,6	18,9	29,6	51,9
12	11,8	23,2	42,7	7,9	24,9	37,7	15,3	29,2	28,7	15,5	23,8	46	21,1	29,5	54,1	17,2	20,2	83,3	18,2	28,2	47,9	21,1	32,8	34,3	19,2	25,4	73,6
13	13,1	24,6	51,7	12,9	26,2	42,4	15,7	27,3	34,9	15,7	27,6	42,5	16,3	21,2	54,8	17	21,6	72,5	20,7	28,3	63,8	19,4	32,4	39,2	19,5	29,8	53,6
14	13,8	25,8	45,1	7,9	14,8	93,7	15,4	29,5	25,4	19	29,8	40,8	15	20,6	58,9	17,3	25,6	53,1	19,4	31,5	44,4	18,8	29,2	48,9	19,2	31,3	47,2
15	14	23,5	54,9	7,3	12,4	87,6	16,1	30,4	24,1	16,9	21,6	83,8	15,1	30,3	37,2	17,9	26,7	55,6	18,4	28,9	49,9	19,3	21,7	88,4	20,4	31,6	44,6
16	12,5	20,4	69	9	18,8	50,7	17,2	27	38,4	16,6	18,1	97,3	18	29,8	39,1	16,9	22,8	69,9	19,1	27,3	60,5	19,4	22,9	83,7	22	31,7	43,7
17	12,3	24,2	42,3	12,1	15,1	91,7	15,9	20,3	79,2	15,7	20	86,1	15,4	19,1	89,2	17	22,4	57,9	18,5	27,3	62,2	18,7	23	80,3	21	30,9	42,7
18	12,7	25,8	40,7	12,2	15	80,6	12,9	15,6	91,9	15,7	25,1	65,5	16,4	24,3	61,6	16,9	24,1	68,5	19	25,5	67,9	18,5	23,8	71,6	21,6	30,6	49,1
19	14,8	18,4	77,3	11,8	20,8	64,4	14,5	18,4	90,8	14,8	22,5	71,9	17,5	30,2	45,4	17,6	23,3	72	18,2	26,1	63,8	17,1	24,2	60,7	20,2	31,3	43,6
20	14,8	26,1	59,5	12,7	22,5	43,8	16,6	29,2	53,1	15,6	29,9	31,8	19,1	32	38,8	18,5	23,8	72,8	18,8	27,6	66,3	17,9	29,2	50,5	20	30,2	49,4
21	16,2	25,9	62	12,5	25,4	35,5	17,6	32	37,8	17,1	32,4	39,4	19,3	31,3	42,2	17,5	23	77,2	20,8	31,9	40,2	19,8	30,5	45,9	19	28,3	61,9
22	12,1	22,2	80,3	15	26,1	36,5	15,2	22,6	83,8	18,1	24,1	71,4	18,2	20,5	82,7	18,5	24,3	68,7	19,9	31	49,2	19,8	30,5	41,8	18,7	26,7	70,2
23	5	12,5	96,8	14,7	28,7	31,5	14,6	24,5	67,4	17,5	30,6	50,2	17,6	19,4	93,2	18,4	22	83,7	19,2	30,9	52,9	20,2	30,6	48,9	17,1	19,1	87,3
24	5,6	8,5	92,7	13,9	22,7	76,7	14,1	18,9	83,2	20,1	31,4	44,5	17,6	20,7	88,1	18,5	24,9	71,5	20,2	31	50,8	20,4	29,9	59	16,8	20,9	79,7
25	6,9	10,7	90	13,8	29,3	31,9	9,2	14,4	80,7	18	20,7	89,8	18	21,1	86,5	18,8	28,3	62,4	19,2	31,4	47,2	17,6	29,3	55,4	16,5	22,5	72,3
26	8,9	13,3	91,6	13,8	19,9	77,7	10,7	15,3	67	18,2	30,6	45,6	17,6	22,2	80,8	19,6	30,4	52	20,9	28,6	62,7	18,4	31,6	42,1	17,2	22,8	78,2
27	10,2	16,7	71,4	10,3	15	71,6	9,4	16,4	66,5	16,4	27,8	61,1	18	26,6	62,4	20,3	31,2	44,5	21	30,6	54,4	21,5	32,2	40,7	17,7	25,7	61,6
28	7,9	21,6	39,9	10,3	15	71,6	12,2	25,8	52,1	14,3	18,2	71,7	18,3	30	49	18,7	31,4	53,9	21,2	32,4	37,3	18,1	27,7	57,5	17,7	26,6	60,3
29	8,6	18,6	47,9	9,4	22	40,8	14,1	21	77,7	13,3	16,9	75,6	18,9	29,9	53,1	19,3	29,1	58,9	22,5	32,3	29,5	-	-	-	19	26,7	62,1
30	7,8	21,4	25,9	10,8	25,5	29,6	14,8	19	92	14,2	19,4	77,3	19,4	21,4	90,8	21,7	30,6	53,3	21	31,6	35,7	-	-	-	19,3	28,8	55,8
31	10,6	26	27,2	12,4	26,9	30,3	-	-	-	15,7	18,8	84,2	-	-	-	22,6	29,5	52,7	21,4	32,4	33,8	-	-	-	19,5	27,4	63,7

Fonte: PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; SIURB - Secretaria de Infra-Estrutura Urbana e Obras; CGE - Centro de Gerenciamento de Emergências

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (° C - T MIN - temperatura mínima/ T MAX - temperatura máxima) E UMIDADE RELATIVA (UR %)																											
Mês	2014																										
	Abril			Maio			Junho			Julho			Agosto			Setembro			Outubro			Novembro			Dezembro		
	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%
	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
1	19,7	27,7	65,7	14,7	22,4	54,5	14,8	21,7	67,1	10,3	23	19,7	11,8	26,9	36,8	15	27,9	48,3	17,1	30,1	47,5	20,1	31,2	45,1	19,5	30,9	45,5
2	18,9	25,4	77,4	15	26,7	47,5	12,3	18,3	81,7	11,6	26,8	38,4	14,5	27,2	33,6	14,5	24,9	64,1	13,85	17,1	85,9	19,4	26,9	67,1	19,2	29,6	44,9
3	18,6	24,3	78,9	16,8	26,4	47,5	8,9	17,7	58,2	16,2	29,6	30,7	14	29,1	24,3	14,6	26	59,5	12,5	17,1	70,8	18,9	29	55,5	21	30	44,7
4	18,4	23,3	73,7	15,5	27,5	41,4	9	23,5	36,5	15,1	29,1	36,8	14,2	29,3	26,8	13,4	16	85,1	11,8	16,8	61,5	-	-	-	16,2	22,1	83,3
5	16,1	27,8	44,8	15,6	27,1	45,4	11,8	26,1	46,5	15,2	27,8	33,9	10,7	25,7	53,7	12,2	17,8	73,1	11,7	18,4	53,3	17,3	22	86,5	15,9	20,2	79,6
6	17,3	29,3	44,5	16,4	27,6	41,1	17,1	21,8	63,6	15,9	25	32,3	9	23,6	23,8	11,7	24,7	39,5	11,4	22,2	40,1	17,5	24,7	74,7	15,6	24,7	67,5
7	17,6	28,5	53	17,3	28,2	38,5	16,7	27,7	46	14,6	22,2	50,1	9,6	26,8	25,4	13,7	27,7	34,2	13	25,2	40,8	17,9	30,6	47,1	16,9	29,2	48,9
8	18,2	27,4	58,7	16,3	28,1	41,8	15,5	28	40,2	14,5	17,7	87,1	14,1	16,3	87,3	16,2	28,8	38	14,1	26,2	33	18,6	25,2	67,3	18,6	31,5	41,2
9	20,1	29,7	54,8	14,7	19,8	78,7	15,7	21,1	72,3	14	19,3	76,3	14,5	16,6	89,7	15,1	30,8	17,7	14,7	31,7	23,2	17,9	23,6	65,6	-	-	-
10	19,4	24,7	77,4	13,4	19,6	68,6	14,8	17,1	92	13,8	17,8	92,8	13,4	25,6	39,5	18,9	30,8	20	17	33,5	19,2	17,3	24,6	58,5	20,4	24,1	71,1
11	17,5	29,7	53	13,9	18,5	72,8	15	19,4	89,3	13,3	17,8	81,6	13,4	27,7	23,9	16	30,8	27,8	17,9	30,8	30,1	14,8	25,6	51,8	-	-	-
12	19,5	30,4	53,1	12,9	24,5	45,3	14	25,9	54,4	12,9	17,6	81,4	13,6	29,7	26	16,1	24,3	64,8	15	35,1	18,2	16,4	24,9	64,5	19,2	27,4	64,7
13	18,1	24,2	78,2	14,2	25,9	40,5	14,5	26,7	46,5	11,9	21,9	55,9	9,1	17,5	72,1	14,1	26,7	37,6	19,1	35,5	19,6	17,8	-	-	19,2	21,9	84,5
14	16,1	18,5	91	14,6	23,8	57,68	15,5	26,1	50,1	12,1	21,4	51,68	9,5	12,6	86,75	14,7	31,1	28,1	18,4	28,4	56,5	14,6	18,5	78,9	17,1	24,8	74,61
15	16	19,7	86,6	14	26,3	41,8	17	20,2	78,5	12,3	21,8	49,3	11,9	19,6	68,6	17,2	32,6	25,1	17,8	20,7	83,8	14,6	19,6	72,7	16,3	22,4	57,6
16	17,3	21,7	85,7	14,7	25	53,6	16,8	25,7	56,6	11,7	24,7	42,2	14,5	20,8	68,4	14,9	21,2	62,2	17,6	31,7	49,5	14,7	21,4	60,1	15,2	23,7	63,9
17	18,2	24,9	72,5	15,3	20,9	78,2	15,2	25	60,6	13,1	26,9	38,1	14,3	23,9	58	14,4	17,7	83,3	17,9	35,5	25,8	12,3	19,7	67,3	15,2	30,2	44,1
18	16,9	29,2	43,1	15,4	23,9	65,9	14,8	25	59	13,3	22,2	56,7	14,8	20	84	14,8	21,6	74,6	18,1	26,3	59,1	14	24,4	57,8	17,3	31,6	36,7
19	17,3	29,8	37,2	15,5	23,2	67,9	12,1	14,8	89,9	11,5	18,3	49,1	12,1	18,8	74,1	16,2	20,6	72,6	17,8	35,8	26,1	14,8	31	30,1	18,4	28,5	58,9
20	17,5	23,5	78,3	14,5	24,5	44,3	12	14,3	92,6	9,6	17,8	47,4	12,1	21,1	61,8	17,6	22,1	70,8	15,3	21,4	81,8	18	25	62,4	20,1	30,7	49,8
21	17,6	25,8	60,6	14,4	26,6	41,1	13,4	17	85,5	10	20,3	57	13,8	28,9	32,8	14,4	20,8	80,4	14,9	18	63,9	17,7	32,4	35,4	22,5	30,1	53,1
22	17,2	23	67,5	18,2	27	46,2	145	21,6	68	11,3	26,9	41,5	13,6	28,1	33,8	12,7	17,8	70	14,5	17,4	84,3	20,8	26,6	61,7	20	29,5	58,1
23	16,3	22,4	75	15,2	21,1	83,9	14	24,6	50,4	13	26,6	31,4	13,6	27,8	31,6	12,3	28	32,8	15,2	24,6	61,9	18	26,9	61,5	16,6	20,8	93,7
24	15,7	21,2	80,6	13,9	15,5	95	13,1	26,2	41,1	15,6	21,2	50,9	14,6	30,7	17,7	15,1	31,7	28,5	15,8	27,3	54	17,8	23,4	82,3	16,4	21	84,2
25	15,3	21,8	67,5	13,5	13,5	94,8	14	26,5	37,8	12,4	16,8	65,3	14,2	31,2	19,2	16,9	25,9	58,8	16,1	26,2	59,1	19,5	31	45,9	18,1	30,2	55,4
26	13,8	19,9	72,1	14,1	21,3	67,9	14,4	26,9	42,2	11,9	14,2	90,4	16,7	23,2	48,5	17,4	26,9	62,2	17,5	23,1	82,2	19,6	27,1	67,8	19,9	32,1	45,5
27	13	20,5	63,1	11,1	16,9	81,6	14,6	28,1	40	12,6	14,6	94,5	11,5	20,5	55	17,3	19,5	90	15,8	22,4	65,1	17,9	22,6	83,8	18,8	34,5	27,8
28	13,1	19,4	71,6	12,6	17,5	81,3	14,9	27,3	40,8	13	14,6	92,3	10,8	17	68,5	17,3	21,4	84,7	14,9	23,5	55,4	-	-	-	21,8	34,1	31,3
29	11,4	24,1	42,1	12,5	16,3	81,8	15,1	21,6	67,6	12,8	18,3	68,6	12	15,1	83,3	17,5	29,1	51	14,9	30,8	25,9	17,8	22,1	77,3	18,9	32,7	38,6
30	11,6	24,5	42	10,9	21,9	54,3	11,3	21,5	41,6	12,1	21,5	58,6	13,1	21,7	63	18,6	30,7	41,6	17	33,7	29,9	17,3	27,2	57,9	20,7	30,9	49
31	-	-	-	12	24,4	47,1	-	-	-	11,5	25	33,9	13	30,2	29,9	-	-	-	22	32,9	36,4	-	-	-	21,4	31,8	42,3

Fonte: PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; SIURB - Secretaria de Infra-Estrutura Urbana e Obras; CGE - Centro de Gerenciamento de Emergências

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (° C - T MIN - temperatura mínima/ T MAX - temperatura máxima) E UMIDADE RELATIVA (UR %)																											
2015																											
Mês	Janeiro			Fevereiro			Março			Abril			Maio			Junho			Julho			Agosto			Setembro		
	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%
	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
1	21,4	31,2	52,1	20	27,2	65,4	18	23,6	72,5	18,5	25,9	64,2	13,2	21,8	64,5	14,7	17	90,8	15,2	20,9	69,5	14	26,6	36,1	14,9	29,5	32,3
2	22,5	33,1	42,6	19,9	25,8	74,9	17,1	27,4	50,9	17,8	26	52,4	13,5	27,1	50,9	15	16,2	94,6	14,9	20	79,1	13,2	27,6	37,6	13,3	16,2	100
3	20,6	26,6	76,7	18,5	28,5	54,1	19,2	28,2	56,9	16,3	24,5	66,6	16,4	25,9	58,4	15,1	21,8	73,5	14,9	18,4	90,5	13,8	27,2	34,2	14,5	21,8	69,5
4	20,4	28	59,6	20,1	25,8	63,9	18,4	28,1	63,2	18,4	29,5	48,9	17,3	22,4	62,7	15,2	25,6	62,7	10,9	20	84,6	14,7	27,8	38,1	14,3	17,6	80,4
5	20,4	28,2	60,8	16,9	22	86,5	19,6	32	43	19,2	27,2	61	16,5	19,3	88,3	14,1	25,6	43,4	11,2	14	87,5	14,2	27,9	34,5	14,2	16,3	81,2
6	19,5	31,5	43,1	17,9	26,1	65,5	19	28,7	56,6	17	27,5	53,7	15,9	20,1	78,6	13,7	26,1	46,6	12	22,6	63,9	16,6	28,2	31,3	13,4	20,4	74,5
7	18,8	32,9	36,8	16,2	27	57,1	19,4	25,3	76,6	15,6	18,8	76	15,1	19,9	69,2	15,5	26,5	52,4	14,5	19,3	87,5	14,8	28,8	31,3	15,6	23,4	76,7
8	19	32,6	36,6	18	27,3	64,2	19,4	25	77	14,4	22,4	63,2	13,8	17,5	76,2	14,9	26,8	44,4	15,6	18,5	83,3	15,4	27,2	34,1	15,9	18,3	90,1
9	20,7	33,7	33,7	19	29,6	53,2	19,8	25	71,5	15,9	24,5	64,6	13,1	24,2	57,4	14,6	26,7	42,5	13,8	20,9	63,7	15,3	26,9	44,9	15,7	23,2	61
10	23,2	33,8	36,7	20,6	29,8	60,4	19,4	26,5	67	16,4	25,3	62,2	14,2	20,3	78	14,9	27	38,9	12,3	25,6	51,9	15,6	28,4	35,5	15,1	25,2	59,9
11	21,7	34,8	38,7	19,6	31,1	55	19,7	28,6	60,2	16,5	27,1	50,9	15,6	19,5	80,2	15,6	27,2	43,1	14,7	18	83,9	15,5	27,8	33,9	13,7	21,8	78,4
12	19,3	34,8	36,5	22,7	33,5	45,3	18,8	28,3	59,8	16,5	23,6	74,2	13,5	20,6	70,8	15,4	20,7	68,3	13,4	27,3	48,3	13,6	27,3	36,3	12,2	15,2	91,4
13	20,1	34,1	39,2	22,2	32,5	47,3	18,9	26,8	63,6	17,6	22,8	78	13,5	18,4	80,7	15,4	27,2	42,9	14,6	28,5	38,9	13,5	28,2	35	12,5	15,1	90,5
14	21,1	34	37	20,3	32,6	46,2	19,6	27,8	61,9	17,4	26,1	68,7	14,7	19,4	78,2	16,6	27,3	48,3	17,1	28,8	38,2	14,2	28,8	38,2	13,2	18,9	74
15	21,9	30,6	57,3	18,8	26,5	65,4	19,8	27	70,6	17,6	27	60,6	13,5	22,6	55,3	11,7	21,7	70,2	15,1	27,3	43,5	14,4	26,6	38,5	15,2	30,3	47,9
16	21,6	32,2	48,7	18,8	26,5	65,4	18,7	27,9	61,8	18,2	25,9	74,5	12,9	23,6	54,2	12,2	16,3	82	16,1	23,5	68,1	15,7	26,2	39,5	16,9	32,9	33,9
17	20,9	34,4	34,2	19,5	27,7	63,3	18,2	25,4	69,4	17,4	26,3	63,9	15,4	24,6	56,2	15,3	25,7	60,7	15,3	23,9	54,9	14,6	28,6	30,1	18,8	33,7	32,7
18	22	33,5	33,7	19,3	25,4	73,3	19,3	25,7	57,9	18,9	28,9	56,4	16,1	24,3	67,3	15,3	27,4	58	14,9	23,2	62,9	16,1	26,1	38,6	18,7	34,8	28,9
19	22,2	35,3	22,5	20,8	27,6	62,6	18,2	24,1	77,6	20	24,1	82,9	16,2	21,2	81,3	12,8	15,5	95,5	14,5	25,6	41,4	15,5	28,1	42	18,3	35,8	19,6
20	21,3	34,7	28,4	21,1	29	57,8	18,3	27,3	55,3	19,7	30,9	53,6	15,4	23,3	67,2	12,5	20,2	64,4	14,6	25,1	44,8	13,6	18,4	69,3	17,1	28	63,2
21	20,1	28,6	54,5	21,5	28,7	64,6	18,5	24,7	72,8	19,2	28,6	65,7	16,4	25,7	55,9	12,9	24,9	50,8	12,4	21,9	60	13,3	19,8	66,7	16,8	31,9	37,7
22	18,5	24,1	68,5	20,4	29,6	42,9	17,9	22,7	80,3	18	22	87,1	16,7	26,8	48,5	13,3	25,8	36,1	12,5	14,8	87,6	13,5	22,6	64,3	17	32	27,8
23	18,3	24,6	73,8	20,8	30,6	49,3	17,3	22	75,9	18,5	25,1	71,2	16	24,8	56,7	14,6	26,3	47,6	13,8	21,2	71,8	13,2	29,7	25,4	16	33,4	22,3
24	18,4	29,3	47,6	17,1	31,5	44,1	17,1	23,5	74,7	18,9	28,4	55,2	16,4	26,8	56,4	12,5	15,8	91,1	14,4	25,6	48,4	13,9	18,2	80,5	19	35,2	19,1
25	19,1	31,6	39,9	18,5	30,4	54,4	16,9	26,9	53,1	16,6	21,2	73,6	16,9	28,1	51,6	12	16,4	78,4	13,9	15,9	97,6	14	19,6	81,9	18	26,8	46,3
26	18,3	29,6	51,2	19	30,5	47,3	17,9	29,7	44,1	16,6	22,1	70,6	18,5	22,1	86,4	12,6	19,3	63,3	12,6	24,2	45,7	14,2	25,3	55,8	18,2	23,4	78,9
27	19,3	28,9	54,9	19,8	31,6	44	18,9	28,1	51,9	16	24,9	54,7	19	27,7	52,4	10,4	21,5	47,2	10,6	24	28,8	13,9	17,7	87,4	18,7	31,3	44,5
28	20,4	29,1	52,6	19,1	24,2	78,1	18,9	26,1	51,2	16,9	26,3	49,7	16,3	20,8	76,5	11,2	21,7	42,5	11,4	22	58	12,4	20,1	63,2	17	24,3	72,7
29	21,6	28,2	58,3	-	-	-	18,7	25,2	79,7	16,9	19,9	75,5	14,5	22,6	58	10,8	24,1	43,9	10,7	23,4	47,1	11,9	26,3	44,8	16,6	26,6	59,4
30	19	23,7	82,1	-	-	-	19	26,7	68,4	14,2	17,5	85,2	12,1	22,4	41,9	13,1	24,3	43,1	10,4	25,3	44,3	14	32,7	24,1	17,9	27,7	56,3
31	17,5	23	84,7	-	-	-	19,6	30,4	44,5	-	-	-	13,3	18,3	84,7	-	-	-	13,6	27,1	39	15,7	32,5	28,1	-	-	-

Fonte: PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; SIURB - Secretaria de Infra-Estrutura Urbana e Obras; CGE - Centro de Gerenciamento de Emergências

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA (º C - T MIN - temperatura mínima/ T MAX - temperatura máxima) E UMIDADE RELATIVA (UR %)																					
2015										2016											
Mês	Outubro			Novembro			Dezembro			Janeiro			Fevereiro			Março			Abril		
	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%	T Min.	T Max.	UR%
	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB	MB
1	18	22,3	85,2	18,7	21,4	90,4	16,4	21,9	82,8	20,9	30,2	59,5	20,7	34,8	28,5	17,4	19,2	92,9	20,2	29	62,8
2	18,7	32,2	42,4	18,2	27,1	70	18,2	25,8	79,7	20	25,8	80,6	20,5	29,8	63,5	18,4	25,4	77,2	18,7	28,2	60,9
3	17,7	24,4	64,7	18,9	26,4	70,7	18,2	25	78,2	19,5	22,9	89	20,8	29,8	63,8	19,7	24,4	76,9	19,6	30,8	56,2
4	16,4	20,3	84,1	18,1	27,4	68,4	18,2	27,1	70,8	17,6	25,1	65,6	20,8	28,2	63,5	19,5	29,3	55,5	19,6	28,3	64,8
5	14,5	19	80,9	17,9	25,9	74	19,6	31	52,5	17,6	28,1	53,9	21,6	33,5	42,5	20	30,2	46,8	18,8	29,1	50,5
6	14,7	20	97,7	17,2	21,5	88,1	19,3	26,2	71,5	18	29,4	53,1	21,2	29,2	68,6	20	31,6	49,8	18,3	28,7	59,7
7	16,1	32	36,8	16,7	19,5	91	17,6	23,8	76,3	18,8	32,3	44,3	20,6	28,6	68,6	19,7	29,9	63,2	19,4	31,2	42,1
8	19,6	33,7	28,3	17,4	23,1	84,5	17,9	25,2	71,4	21,3	32	48,1	20,6	33,7	40,8	19,5	27,5	71	19,9	29,7	66,6
9	18,4	29,5	45,2	18,7	29	60,8	19,5	28,5	65,1	20,7	31,8	56,4	21,2	33	45,4	20,6	31,3	50,6	20,3	31,1	53,6
10	18,9	26,9	56,8	19,7	31,1	48,7	22,3	28,2	57,5	20,3	28,5	63,9	22,7	33,4	46,5	19,3	24,1	77,2	20,4	30,3	57,7
11	18,4	26,4	66	19,3	32,9	46,7	20,4	30	51,4	20,1	23	87,8	19,1	26,3	75,4	19,3	27,1	73,6	20,3	28,8	63,3
12	17,6	26,9	60,9	19,5	27,5	75,3	20,5	30	58,7	20,9	25,6	81,5	17,8	26,3	63,2	18,4	25,4	71,4	19,5	32	48,5
13	17	27,2	56,2	18,9	28,9	66,6	20,4	31	52,4	21,6	29,8	66,7	18,5	29,1	57,4	18,1	23	78,5	19,3	32	48,1
14	18,2	23,4	77,1	19	30,4	55,8	20,3	33	45,5	20,6	24,7	87,3	19,6	33,9	40,2	18,5	26,4	71,4	19,5	32,8	39,5
15	19,3	35,7	21,4	19,1	28,5	59,3	20,3	33,2	45,7	18,8	22,1	93,3	20	31,2	57,8	19,2	27,7	62,4	19,7	33	33,7
16	20,2	35,2	27	18,3	22	87,6	19,2	22,8	90,8	18,3	23,9	73,9				19,5	25,1	73,5	21,3	31,9	42,6
17	16,3	24,5	78,4	18,1	29,5	62,7	18,7	27,8	64,8	16,5	22,7	65,4	20,7	32	49,4	19,4	26,8	67,4	19,4	32,9	35,5
18	15	17,9	87,2	18,2	30,7	54,4	20,3	33,8	38,1	18,2	22,7	73,4	21,3	30,5	60,4	18,8	28,6	59,4	20	32,1	39
19	15,2	23,4	71	23	31,4	49,5	19,3	31,6	52,6	17,6	21,4	78,4	20,2	31,8	53	19,1	30,9	34,6	21,3	32,2	39,5
20	17,4	35,2	35,6	18,3	27,8	56,7	19,7	30	49,5	18	21,4	87,2	19,5	32,1	51,8	18,8	26,7	64,5	21,1	33,1	39,7
21	19	32	42,4	16,5	20,9	79,7	19,7	26,9	72	17,4	23,3	66,4	19,3	26,9	70,7	19,8	31,4	45,3	20,2	32,7	31,8
22	17,2	21,6	89,4	17	26,7	64,4	19,3	33,4	43,7	16,1	22,6	79,1	19,8	25,5	75,1	20,6	30,8	51,9	19,4	31,5	43,7
23	17	25	70,9	18,8	23,1	88,5	21,5	32,3	49,7	17,4	24,8	75,2	20,6	26,8	64,7	18,6	27,4	61	19,5	32,1	39
24	15,7	20,7	80,7	19,4	22,9	80,8	21,3	32,1	49,8	17,7	28,6	61,8	20,2	29,3	60,3	19	25,9	70	20,4	31,7	40
25	15,7	19	89,5	19,3	23,9	81,7	21,1	30,4	60,2	18,7	30,5	54,8	20,3	30,5	49	19,5	29,1	62,5	20,2	31,7	37,8
26	15,9	28,3	60,6	18,4	26,5	68,9	19,6	30,4	57,4	20,8	32,8	44,9	19,3	31,1	55,1	19,2	28,1	63,6	19,6	25,8	58,7
27	18,3	28	63,9	17,5	28,4	54	20,4	30,1	60,1	19,2	27,9	77,4	22,9	26,4	69,8	21,4	30,3	60,2	12,2	20,6	80,7
28	18,3	22,6	81,3	18,8	30,6	56,8	19,5	26,1	71,4	20,2	29,3	61,5	19,8	29,3	63,9	21	31,3	54,5	12,1	18,8	71,2
29	17,9	20,9	88,1	19,5	26,3	75,1	19,9	29,9	60,9	21,2	30,4	56,1	18,1	21	78,1	20,2	29,4	64,5	12,2	15,9	84
30	17,2	28,7	47	16	20,3	95,8	19,9	21,6	86	21,6	31,3	49,6	-	-	-	19,5	30	61,7	12,7	23,7	40,8
31	18,9	29,6	47,1	-	-	-	20,4	29,9	60,9	21,1	33,8	28,6	-	-	-	19,8	30,2	59,2	-	-	-

Fonte: PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; SIURB - Secretaria de Infra-Estrutura Urbana e Obras; CGE - Centro de Gerenciamento de Emergências

BOLETIM PLUVIOMÉTRICO MENSAL															
Ano	2012			2013											
Mês	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Dia															
1	0	0,8	15,5	0	5,8	0	0	0	0	19,5	0	0	0	0	1
2	0	0	0,6	0	0,2	0	0	0	5,5	0	0	0	10	0	0
3	0	0	0	2,2	1,2	0	0	0	0	0	0	1,1	10,1	0	0
4	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	13,2	31,2	0
5	0,4	0	0	0	0	0,2	16,6	0,4	0	0	0	0	0	0	13,4
6	0	0	1,2	1,6	1,1	0,6	0	3	0	0	0	0	0	4,4	0
7	0	0	0	0	1,1	0,7	5,5	0	0	0	0	0	0	3	0
8	0	0	0	4	16,6	28,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	3,8	0	35	0	17,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	2,2	0	0	25	2,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	4,1
11	2,3	0	1,2	0	0	0,3	18	0	0,2	0	0	0	0	0	2,4
12	14,3	18,1	0	9,2	2,2	0	1,4	0	0,2	0	0	0	0	0	0,2
13	0	0,2	20,8	15,1	7,6	4,8	26,4	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0,2	0	18,8	28,1	33,4	0	0,2	0	0	0	1,2	0	0	0	0
15	0	0,2	30,4	0,5	13,9	0	0	0	0	0	0,2	0	10,7	0	0
16	0	0	5	15,3	0	10	0	1,2	0	0	0	3,6	21,3	11	0
17	10,8	0	2,7	0	0	19,1	0	0,2	5,3	0	0,4	0,8	0	21,6	0
18	0	0	0,4	0	0	2,4	0	0	0	0	0	0	13,6	0	0
19	0	5,5	18,9	0	0	0	0	0	0	1,2	0	6	0	5,6	0
20	1,9	0,2	10,2	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0,4	0
21	3	0	0,4	0,5	0	10,3	0	0,2	0	3,4	0	0	0	6	0
22	2	0	2,4	0	2	0	0	13,2	0	0,5	0	6,7	0,2	5,4	0
23	9,2	0	0	0,3	5,5	0	0	0,5	0	7	0	23,8	5	6	0
24	0	0	0	0	0	25	0	0	19,9	3	0	0	0	3,2	0
25	0	3,2	0	1	0	0	0	0	18,3	15,5	0	0	0,3	3,4	16,2
26	0	0	0	1,4	23,4	10,5	0	0	47	0,2	0	0	0	7	1,2
27	0	10,9	0	0	0	0	0	0,4	0	0	1	0	0	0	0
28	26,2	0	0	0	0	0		4,2	0	0	0	0	0	0	51,8
29	0,4	0	1,5	0	-	0,3		4,2	5	0	0	4,8	0	0	7,4
30	0	0	19,4	0	-	0		0,4	7,5	0	0	6,8	0	0	0
31	0	-	0,2	0	-	0		0	-	0	0	0	0	-	0
Total	72,9	42,9	149,6	139,2	121,4	130,8	68,1	27,9	108,9	50,7	2,8	53,6	84,4	108,2	97,7

Fonte: PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; SIURB - Secretaria de Infra-Estrutura Urbana e Obras; CGE - Centro de Gerenciamento de Emergências

BOLETIM PLUVIOMÉTRICO MENSAL														
Ano	2014												2015	
Mês	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV
Dia														
1	15,2	0	16	0	0	0	0	0	0	0	2,2	0	2,5	4
2	0	0	1	0	0	0	0	0	14	0,4	2,8	0	0	2,9
3	0	0	0	0,1	0	0	0	0	6,1	0	0	0	1,5	0
4	0	0	5,4	0	0	0	0	0	0	0	9,5	3,8	0	4,2
5	0	0	14,2	0	0	0	0	0	0	0	3,5	0	8,8	46,2
6	0,6	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	20,8	17
7	0	0	39,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10,8	5,6
8	0	0	1,4	0	0	0	2,6	0	0	0	6	0	0	0
9	33,8	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	1,2	7	0	1,6
10	0	0	0	0	0	0,2	6,8	0	0	0	0	7,2	0	2,9
11	13	0	32,4	2,2	0	0,6	0,4	0	0	0	0	23,5	17,8	2
12	0	0	45,6	14,2	0	0	0	0	0	0	0	30,6	32	0
13	8	7	0	0,4	0	0	0	16,8	0	0	7,2	10	0,1	0
14	2,9	45,8	24,8	0	0	0	0	1	0	0	4	8,6	0	5,2
15	8,6	1,6	0	14,7	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	6,2
16	19,2	14,5	2	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	3	22,5
17	20	15,2	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	8,6
18	9	0	0	0	2,6	0,1	0,2	0	0	0	0	0	0	16,2
19	0	0	0	1,2	0	0	0	0	0	4	0	26,6	0	0
20	0	0	12,4	0	0	0	0	0	1,8	0	0	0,2	0	0,4
21	0	0	5,4	0	0	0	0	0	15	0	0	0	1	0
22	0	9,6	0,8	0	10	0	0	0	0	0	0,2	71,6	8,4	0
23	9,2	0	4	0	1,3	0	0	0	0	0	5	21,6	0,3	0
24	62,8	0,2	0	0,8	2,2	0	2,2	0	0,4	0	0	0,3	0,2	21,8
25	15	11,2	0	0	6,9	0	3	0	0,8	1,2	49,8	24	0,2	21,1
26	0	0	0	0	2,5	0	0,1	2,9	20,9	6,6	37	0	41,6	0
27	0	0,8	0	0	0	0	1,2	0	0	0	0	0	28,4	0
28	0	22,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6	24,5
29	0	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	
30	0	-	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,4	
31	0	-	2,8	-	0	-	0	11,6	-	0	-	0	0,4	
Total	217,3	128,2	234,6	33,6	25,5	18,9	17	32,7	59,2	12,2	128,4	240,2	178,8	212,9

Fonte: PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; SIURB - Secretaria de Infra-Estrutura Urbana e Obras; CGE - Centro de Gerenciamento de Emergências

BOLETIM PLUVIOMÉTRICO MENSAL														
Ano	2015										2016			
Mês	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	JAN	FEV	MAR	ABR
Dia														
1	0	0	0	1	0	0	0	0	23	0	7,2	0	12,1	0
2	0	0	0	0,2	0	0	0	0	47,8	0	37,1	0	1,5	0
3	0	0	0	0	39,2	0	0	8,2	7,2	0	2	0	30,2	0
4	0	0	3,2	0	4,2	0	6,4	0	13,8	0	0	0	0	0
5	0	0	0,6	0	0,2	0	0	0	1	43,1	0	6	0	0
6	38,2	0,2	0	0	0	0	0,4	0	0,2	6	0	2,4	1	0
7	31,7	1	0	0	10,6	0	5,9	0	1	2,2	0	0	19,4	0
8	3,8	0	0	0	6,5	0	67,4	0	0	0	0	7,5	0	0
9	1,5	0	0	0	0	0	0	0	5,3	0	24	0	0,4	0
10	0	0	24,6	0	0	0	15	0,6	0	0	30,4	0	46,8	0
11	0	0	0	0	2,5	0	26,6	0	15	0	7,4	0,8	26,8	0
12	0	0	0,6	1	0	0	0,2	0	0	9,8	5,3	0	0	0
13	20,7	0	0	0	0	0	0,5	5	18,8	0	0	0	0	0
14	5,4	0	0	0	0	0	0	0	2	3	11,2	0	0	0
15	0,6	4,2	0	11,7	0	0	0	0	0	5,4	5,2	42,5	0	0
16	15,6	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0,2	1,2	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	15,4	0	0	25,8	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0
19	30,2	0	0	1	0	0	0	0	6,5	2,8	0	70,2	0	0
20	1,2	0	0	0	0	0	0	0	27	0,2	0	26,4	0	0
21	9	0,6	0	0	0	0	0	5,2	15,6	5	0	44,6	0	0
22	0,2	11,1	0	0	0	0	0	11,8	6,6	2,3	0	0	0	0
23	0	0	0	6	0	0	0	0	0	8	0	1,4	10	0
24	0	0	0	4,3	8,8	2,6	0	0	0	3,5	6,6	22,6	0	0
25	0	0	0	0	12,5	1,2	18,8	0,6	0	0	3	1	13,2	0
26	0	0	0	0	0	0	6	15,2	0	21	0	4	0,2	0
27	0	0	0	0	0	12,2	12,2	1,4	0	0	35,2	0	0,2	1
28	0	0	2,5	0	0	0	17,6	0,6	6,8	13,2	0	54	0	0
29	11,2	0	8,7	0	0	0	0	0,6	2,6	4,4	0,2	12	0	0
30	0,8	0,2	1,8	0	0	0	0,4	0	2,4	0,2	0,2	-	4	0
31	0	-	3,4	-	0	0	-	0	-	0	0	-	0,2	
Total	170,1	17,5	45,4	25,2	84,5	16	177,4	49,2	218	130,9	175,2	322,9	166	1

Fonte: PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO; SIURB - Secretaria de Infra-Estrutura Urbana e Obras; CGE - Centro de Gerenciamento de Emergências

**Anexo F - Gráficos de variação do nível da água dos poços x
quantidade acumulada de chuvas e mensal**

ÁREA 1

Obs.: o transdutor de pressão do P-1401 não registrou dados entre 01/10/14 e 14/01/15

ÁREA 2

Obs.: o PM-19-A ficou sem registros de dados entre 25/10/14 e 26/12/2014, deixando de operar definitivamente em 07/01/2015.

ÁREA 3

Obs.: o transdutor de pressão do P-255 deixou de registrar dados entre 05/03/13 e 21/6/13

Obs.: o transdutor de pressão do P-1204 deixou de registrar dados entre 01 e 08/07/13, e entre 23 e 27/3/14

ÁREA 4

Obs.: o transdutor de pressão do P-1346 deixou de registrar dados entre março e dezembro de 2014, assim a análise foi realizada em 2 períodos.

Anexo G - Gráficos dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na água subterrânea dos poços avaliados plotados na linha de mistura.

80