



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA



MARINA WESTRUPP ALACON RAYIS

***AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO REÚSO DE ÁGUA PARA
RECARGA DE AQUÍFEROS NA REGIÃO METROPOLITANA DE
SÃO PAULO***

SÃO PAULO

2018



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE SAÚDE PÚBLICA



MARINA WESTRUPP ALACON RAYIS

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO REÚSO DE ÁGUA PARA RECARGA DE
AQUÍFEROS NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, da Faculdade de Saúde Pública, da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Dr. Wanderley da Silva Paganini

VERSÃO REVISADA

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.

Catálogo da Publicação

Ficha elaborada pelo Sistema de Geração Automática a partir de dados fornecidos pelo(a) autor(a)
Bibliotecária da FSP/USP: Maria do Carmo Alvarez - CRB-8/4359

Westrupp Alacon Rayis, Marina
Avaliação da viabilidade do reúso de água para recarga de aquíferos na Região Metropolitana de São Paulo / Marina Westrupp Alacon Rayis; orientador Wanderley da Silva Paganini. -- São Paulo, 2018.
101 p.

Dissertação (Mestrado) -- Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Reúso de Água. 2. Águas Subterrâneas. 3. Recarga de Aquíferos. 4. Disponibilidade Hídrica. I. da Silva Paganini, Wanderley, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me ensinaram buscar o conhecimento, agradeço pelo amor e pelas palavras sempre incentivadoras.

Ao meu esposo, por me dar forças quando pensei que seria impossível.

Ao Professor Wanderley Paganini, agradeço a orientação, o conhecimento repassado e os ensinamentos que ficarão para toda a vida.

À Engenheira Miriam, agradeço pela atenção durante toda a jornada de construção deste trabalho.

À Andrea, por suas importantes revisões e conselhos durante todos os meus trabalhos acadêmicos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Na Região Metropolitana de São Paulo, onde a disponibilidade hídrica foi classificada como “Crítica”, durante os anos de 2014 e 2015 ocorreu um período de seca que originou a denominada “crise hídrica”, agravando a situação dos mananciais que abastecem a região. Os estudos sobre mudanças climáticas demonstram não ser um fenômeno isolado e, diante disso, a adoção de tecnologias para reúso de água é essencial para aumentar a disponibilidade hídrica de locais que enfrentam cenários de escassez, como a RMSP. A recarga de aquíferos com efluentes tratados para reúso de água é uma técnica que, se adotada corretamente, pode trazer benefícios como o aumento do volume de água subterrânea disponível para a população. Para estudo da tecnologia, buscou-se como referência as plantas de Shafdan (Israel), Atlantis (África do Sul), Sabadell (Espanha), Adelaide (Austrália), avaliando principalmente os processos de tratamento, métodos de recarga e características qualitativas dos efluentes utilizados para recarga de aquíferos. Foram consultadas as legislações de Estados Unidos e da Espanha sobre o assunto e, com base nestas referências, foram adotados os seguintes requisitos de qualidade do efluente para recarga de aquíferos: sólidos suspensos (35 mg/L), carbono orgânico dissolvido (125,0 mg/L), DBO_{5,20} (25,0 mg/L), nitrato (25,0 mg/L) e *Escherichia coli* (1000 UFC/100 mL). A partir dos estudos de caso e das legislações, foi definido que o requisito mínimo de tratamento para recarga é o tratamento terciário para remoção de nitrogênio. Foi avaliada a replicabilidade desta técnica na Região Metropolitana de São Paulo através de comparativos entre os requisitos definidos e as características do efluente e da água de reúso produzida na RMSP em quatro cenários: legislação aplicável ao lançamento de efluentes tratados, características do efluente tratado a nível secundário de uma das ETEs da RMSP, características da água de reúso produzida na RMSP para usos urbanos e características da água de reúso produzida para uso industrial na planta Aquapolo. Verificou-se que atualmente apenas a água de reúso produzida no Aquapolo é submetida a tratamento terciário e atende aos requisitos qualitativos para recarga adotados neste trabalho. O custo de operação de um sistema de produção de água de reúso e recarga de aquíferos foi estimado em US\$ 1,41/m³, valor superior à tarifa de água potável comercializada para residências na RMSP, atualmente US\$ 0,75/m³. Concluiu-se que há potencial para adoção da tecnologia de recarga de aquíferos com água de reúso na RMSP, visto que há tecnologia disponível para produzir água de reúso na qualidade requerida. Ainda assim, é necessária a avaliação da hidrogeologia local antes de praticar a recarga. Em relação ao custo, o valor da tarifa de água potável vigente é expressivamente menor quando comparado ao valor caso a tecnologia proposta nesse trabalho fosse implantada. Entretanto, deve-se avaliar a importância da adoção de alternativas para disponibilização de água para a população. Ou seja, mesmo que em primeira vista seja mais onerosa, esta técnica é uma oportunidade para obtenção de água para diversos usos em situações de extrema seca, quando o valor da água passa a ser inestimável.

Palavras-chave: Reúso de Água, Águas Subterrâneas, Recarga de Aquíferos, Disponibilidade Hídrica.

ABSTRACT

In the São Paulo metropolitan region, where water availability was classified as "critical", during the years of 2014 and 2015 there was a period of drought that led to the "water crisis", aggravating the situation of the water sources that supply the region. Studies on climate change demonstrate not be an isolated phenomenon and, given this, the adoption of technologies for reuse of water is essential to increase the water availability in areas facing drought situations, like SPMR. The aquifer recharge with treated wastewater to water reuse is a technics that, if properly implemented, can bring benefits as increasing the volume of groundwater available to the population. For the study of the technology, the reference plants were Shafdan (Israel), Atlantis (South Africa), Sabadell (Spain), Adelaide (Australia), survey the treatment processes, recharge methods and qualitative characteristics of effluents to aquifer recharge. The legislation of the United States and Spain was consulted and, based on these references, the following aquifer recharge effluent quality requirements were adopted: suspended solids (35 mg/L), organic solved carbon (125,0 mg/L), BOD_{5,20} (25,0 mg/L), nitrate (25,0 mg/L) e *Escherichia coli* (1000 UFC/100 mL). From the case studies and legislation, it was defined that the minimum treatment requirement for recharge is the tertiary treatment for nitrogen removal. The replicability of this technics in the Metropolitan Region of São Paulo was survey through comparisons between the defined requirements and the characteristics of the effluent and the reuse water produced in the RMSP in four scenarios: applicable legislation to treated effluents discharge, effluent characteristics at secondary level treated, reuse water produced in the SPMR for urban uses and characteristics of the reuse water produced for industrial use in Aquapolo. It was verified that currently only the reuse water produced in Aquapolo is subjected to tertiary treatment and meets the qualitative requirements for recharge adopted in this study. The operating cost of a reuse and aquifer recharge water production system was estimated at US\$ 1,41 / m³, which is higher than the drinking water tariff traded for residences in the RMSP, currently US\$ 0,75 / m³. It was concluded that there is potential for the adoption of recharge water reuse technology in the RMSP, because the technology is available there to produce reuse water in the required quality. Nevertheless, it is necessary to study the local hydrogeology before the recharge. About cost, the value of the current drinking water tariff is significantly lower when compared to the value in case the technology proposed in this work was implemented. However, the importance of adopting alternatives for water availability to the population should be study. That is, even if it is more expensive at first sight, this technique is an opportunity to obtain water for various uses in situations of extreme drought, when the water value becomes inestimable.

Keywords: Water Reuse, Gorund Water, Aquifer Recharge, Water availability.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AESBE	Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento
ANA	Agência Nacional de Águas
CA	Califórnia
CBAT	Comitê da Bacia do Alto Tietê
CE	Condutividade Elétrica
CEPIS	Instituto Sedes Sapientiae
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CF	Coliformes Fecais
CMSP	Câmara Municipal de São Paulo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONFEA	Conselho Federal de Engenheiros e Arquitetos
COPASA	Companhia de Saneamento de Minas Gerais
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos de São Paulo
CT	Coliformes Totais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ECO-92	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente
EEA	<i>European Environment Agency</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
EPA	<i>Australian Environmental Protection Agency</i>
EPAR	Estação Produtora de Água de Reúso
EUA	Estados Unidos da América
FABHAT	Fundação Agência da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAB	Lodo Ativado por Batelada
MBR	<i>Membrane Biorreactor</i>

MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NMP	Número Mais Provável
NTU	<i>Nefelometric Turbidity Unit</i>
OCWD	<i>Orange County Water District</i>
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PCJ	Piracicaba, Capivari e Jundiá
PDE	Plano Diretor de Esgotos
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PEV	Ponto de Entrega Voluntária
PIB	Produto Interno Bruto
RAS	Razão de Adsorção de Sódio
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SANASA	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SES	Secretaria da Saúde do Estado de São Paulo
SMA	Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SP	São Paulo
SPMR	São Paulo Metropolitan Region
SSRH	Secretaria de Saneamento e Recursos Hídricos
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
TSA	Tratamento Solo-Aquífero
TMBR	<i>Tertiary Membrane Biorreactor</i>
UGRHI	Unidade Gerenciadora de Recursos Hídricos
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WHO	<i>World Health Organization</i>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistema Principal de Esgotamento Sanitário da RMSP (SABESP, 2010, p. 39).....	39
Figura 2: Disponibilidade de água doce no planeta (SSRH, 2015)	42
Figura 3: Classificação dos aquíferos de acordo com as características hidráulicas (Fonte: SILVA JR. e CAETANO, 2010)	43
Figura 4: Classificação dos aquíferos conforme a porosidade das rochas (SSRH, 2015).....	44
Figura 5: Fontes potenciais de contaminação de águas subterrâneas (HIRATA apud SSRH, 2015).....	46
Figura 6: Esquema do sistema de água de reúso na planta do Rio Ripoll, Sabadell (adaptado de AYUSO-GABELLA e SALGOT, 2012).	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Histórico dos principais fatos e critérios de qualidade sobre reúso de água no mundo.	26
Tabela 2: Classificações e parâmetros para esgotos sanitários tratados conforme o reúso, segundo a ABNT NBR 13.969/97.	29
Tabela 3: Padrões de Qualidade para Água de Reúso definidos na Resolução Conjunta SES/SMA/SSRH n. 01/2017.	32
Tabela 4: Projeção do crescimento populacional estimado na RMSP	63
Tabela 5: Dados qualitativos dos efluentes tratados para recarga de aquíferos conforme estudos de caso.	75
Tabela 6: Dados qualitativos adotados do efluente tratado para recarga de aquíferos.	77
Tabela 7: Padrões de qualidade do efluente tratado segundo o Decreto n. 8.468/76, Art. 18.	79
Tabela 8: Padrões de qualidade do efluente na saída do tratamento secundário de uma das ETEs da RMSP (GOMES, 2016).	80
Tabela 9: Classificação do efluente na saída do tratamento secundário de uma das ETEs da RMSP frente aos requisitos mínimos adotados para recarga.	81
Tabela 10: Padrões de qualidade da Água de Reúso produzida em nível secundário na RMSP (SABESP, 2010, p. 571)	82
Tabela 11: Classificação da Água de Reúso produzida em nível secundário na RMSP frente aos requisitos para recarga de aquíferos.	83
Tabela 12: Limites da Água de Reúso produzida no Aquapolo (GOMES, 2016).	85
Tabela 13: Classificação da Água de Reúso produzida no Aquapolo frente à possibilidade de recarga de aquíferos.	86
Tabela 14: Comparativo entre os quatro cenários estudados e os requisitos adotados para recarga de aquíferos.	87
Tabela 15: Custo de produção de água de reúso em função das tecnologias de tratamento empregadas e da qualidade final (adaptado de SABESP, 2010).	89

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo Geral	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1. Reúso de água	20
3.1.1. Conceitos relevantes sobre água de reúso	21
3.1.2. Limitações do reúso de água e aspectos de saúde pública.....	23
3.1.3. Legislação pertinente ao reúso de água	24
3.1.4. Reúso de água no Brasil	37
3.1.5. Estrutura do sistema de tratamento de esgotos e produção de água de reúso na RMSP	38
3.2. Águas subterrâneas	41
3.2.1. Principais problemas das águas subterrâneas	44
3.2.2. Águas Subterrâneas e Geologia da RMSP.....	47
3.2.3. Legislação aplicável às águas subterrâneas brasileiras.....	50
3.3. Recarga de aquíferos	52
3.3.1. Métodos de recarga artificial de aquíferos.....	53
3.4. Reúso de água para recarga de aquíferos	58
3.4.1. Principais limitações.....	59
3.4.2. Experiência brasileira: Aeroporto Internacional Governador André Franco Montoro, Guarulhos/SP	61
4. MATERIAIS E MÉTODOS	63
4.1. Caracterização da área de estudo	63
4.1.1. A Região Metropolitana de São Paulo – RMSP	63
4.1.2. A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê – UGRHI 06.....	64
4.2. Etapas da pesquisa	64
4.2.1. Etapa 1: Pesquisa e adoção de requisitos mínimos de qualidade do efluente tratado para recarga em aquíferos	65
4.2.2. Etapa 2: Análise da replicabilidade da tecnologia de recarga de aquíferos com água de reúso.....	67
4.2.3. Etapa 3: Levantamento de custos	68
5. RESULTADOS	70

5.1. Estudos de casos internacionais.....	70
5.1.1. Tel-Aviv (Israel)	70
5.1.2. Atlantis (África do Sul)	71
5.1.3. Sabadell (Espanha)	72
5.1.4. Adelaide (Austrália)	73
5.2. Características qualitativas dos efluentes tratados para recarga artificial de aquíferos a partir dos estudos de caso	74
5.3. Requisitos mínimos de qualidade adotados para recarga de aquíferos com efluente tratado	76
5.4. Parâmetros de qualidade dos efluentes tratados nas ETEs da RMSP.....	78
5.5. Parâmetros de qualidade da água de reúso produzida nas ETEs da RMSP	81
5.6. Estimativa de custos para viabilização da tecnologia de recarga de aquíferos com água de reúso na RMSP	88
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	93
7. REFERÊNCIAS	96

1. INTRODUÇÃO

As civilizações antigas, desde os tempos remotos, através de experiências construíram suas formas de organização em torno das bacias hidrográficas e costas marítimas. A água era um elemento vital para todas as culturas e foi objeto de veneração e temor (PITERMAN e GRECO, 2005).

Tomasoni et. al. (2009) afirmam que a água é componente essencial para a vida humana e para a dinâmica de todos os sistemas ambientais, determinando as características dos ecossistemas, do potencial humano e econômico a ser manejado sob as mais diversas condições ambientais de sua oferta, gerando, portanto, tensões e conflitos de interesses em todo o mundo.

Segundo dados da ANA (Agência Nacional de Águas), aproximadamente 8% da reserva de água doce no mundo se encontra em território brasileiro, sendo que desse percentual, 80% está na região Amazônica e 20% concentra-se em regiões brasileiras onde vivem 95% da população.

A classificação adotada pela Organização das Nações Unidas define quatro níveis para a disponibilidade hídrica:

- 1) Abundante: acima de 20.000 metros cúbicos por habitante por ano;
- 2) Correta: 2.500 a 20.000 metros cúbicos por habitante por ano;
- 3) Pobre: 1.500 a 2.500 metros cúbicos por habitante por ano;
- 4) Crítica: inferior a 1.500 metros cúbicos por habitante por ano.

O Brasil é considerado “Abundante” em relação à classificação de disponibilidade hídrica da ONU, contando com 35.000 m³ de oferta de água por habitante em um ano. Entretanto, para o estado de São Paulo, o índice cai para 2.209 m³/hab/ano, sendo classificado como “Pobre”. Este índice diminui ainda mais quando se considera a Bacia do Alto Tietê, que concentra em torno de 20 milhões de habitantes: são 200 m³ de água por habitante por ano e a bacia hidrográfica é classificada como “Crítica” em relação à disponibilidade hídrica (CMSP, 2011 apud MARTIRANI e PERES, 2016).

Segundo a Agência Nacional de Águas (2005) é observado um cenário crítico de baixa disponibilidade hídrica em algumas regiões do país, onde é obrigatória a busca de fontes externas para abastecimento de água da população e suas atividades. Hespanhol (2002) afirma que a condição de disponibilidade hídrica crítica em uma determinada bacia

hidrográfica leva à busca de recursos hídricos complementares em bacias vizinhas e, por consequência, aumenta o custo da água tratada, além dos problemas legais associados.

A Região Metropolitana de São Paulo possui uma população de 20.935.204 habitantes segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2014), a qual está 99% instalada no território da Bacia do Alto Tietê. O Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (FUSP, 2009) revela que o consumo total de água desta bacia excede, em muito, sua própria produção hídrica. Em 2009, apontou que a produção de água para abastecimento público representava aproximadamente 68 m³/s, dos quais 31 m³/s eram importados da Bacia do Rio Piracicaba e 2 m³/s eram provenientes de outras reversões menores.

Hespanhol (2002) ressalta que a prática da reversão de bacias tende a se tornar cada vez mais restritiva, frente à conscientização popular, presença efetiva de entidades de classe e desenvolvimento de comitês de bacias hidrográficas afetadas pela perda deste recurso valioso.

Mendonça (2004) cita os principais fatores que conduziram diversas regiões do mundo à situação crítica de abastecimento de água: limitação da oferta de água nas cercanias das populações, descuido com os mananciais, assoreamento dos rios devido ao desmatamento, práticas agrícolas inadequadas e crescimento desordenado das populações.

Além disso, durante muito tempo a água foi considerada um bem inesgotável. A extração indiscriminada desse recurso para satisfazer as necessidades de um país em processo de desenvolvimentos econômico, bem como a expansão territorial ocasionando o uso desordenado do solo e a falta de saneamento básico, compõem alguns fatores que intensificaram os problemas ambientais, entre eles os problemas relacionados aos recursos hídricos no Brasil.

A ocupação urbana desordenada em áreas de proteção de mananciais acarreta a poluição destes corpos hídricos por esgoto doméstico, resíduos sólidos e carga difusa de poluição gerada nas áreas urbanizadas, levando ao comprometimento da qualidade da água bruta e à possível inviabilização de uso do manancial, aumentando os custos do tratamento e restringindo seus usos (ANA, 2005; FUSP, 2009).

Alterações relevantes no ciclo hidrológico, na quantidade e na qualidade das águas devido a mudanças climáticas já podem ser sentidas em todo o mundo e interferem de

maneira direta ou indireta na saúde da população humana. Tundisi (2008) afirma que um dos assuntos fundamentais a serem estudados para a promoção de soluções em relação aos recursos hídricos são os extremos hidrológicos.

Eventos extremos afetam populações humanas em razão de desastres (enchentes, deslizamentos, transbordamentos nas várzeas) ou secas intensas (aumento na semiaridez e aridez), e comprometem a saúde humana, a segurança alimentar e aumentam a vulnerabilidade dos ciclos e processos biogeoquímicos (TUNDISI, 2008).

O Portal Brasil (2012), utilizando pesquisas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), afirma que as projeções para as mudanças climáticas apontam para o aumento nos extremos de seca, chuva e temperatura no Sudeste que, com alta evaporação por causa do calor, afetará o balanço hídrico. Percebe-se, portanto, que a grande estiagem ocorrida entre os anos de 2014 e 2015 na Região Metropolitana de São Paulo não representa um fenômeno isolado, havendo a necessidade de adaptação a novas realidades climáticas na região.

Este extenso período de estiagem, marcado pelos baixíssimos níveis de água nos reservatórios que abastecem a RMSP, fragilizou o sistema de abastecimento de água da região como um todo, acarretando a denominada “crise hídrica” e agravando ainda mais a situação da baixa disponibilidade hídrica previamente relatada. Outro destaque deste período foi o aumento da exploração das águas subterrâneas para abastecimento público. Na Bacia do Alto Tietê estão os aquíferos Cristalino e Sedimentar, que contribuem com parcelas significativas para o abastecimento público de água, passaram a representar parcela ainda mais importante durante o período de seca.

Para o enfrentamento da crise hídrica, a concessionária de água e esgoto que presta serviços na RMSP tomou algumas medidas operacionais, como a redução da pressão na rede de abastecimento, o desconto na conta de água para os usuários que reduzissem o consumo e a aplicação de multa aos que o aumentassem. Para aumentar a oferta de água na RMSP foram aceleradas e priorizadas obras que realizarão a transposição de bacias e incentivados alguns programas, como o de redução das perdas de água na rede de abastecimento e o de reúso de água para fins não potáveis. A população também foi engajada e representou uma parcela significativa da economia de água durante o período.

O fato é que planejamento é fundamental em regiões que enfrentam condições climáticas extremas, situação que é recente na RMSP. Hespanhol (2002) afirma que a

escassez de água não é exclusiva de regiões de climas áridos e semiáridos, visto que muitos locais possuem recursos hídricos abundantes, porém insuficientes para satisfazer as elevadas demandas, vivenciando restrições de consumo que afetam o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida da população.

Atualmente percebe-se que a preocupação gira em torno da adoção de estratégias no sentido de reduzir o consumo de água para o melhor aproveitamento deste bem (ALMEIDA, 2011). Em regiões dos Estados Unidos, México, Israel, Cingapura, Emirados Árabes, Argentina, Chile, Austrália e em cidades europeias, o abastecimento de água é feito a partir de tecnologias de dessalinização, reúso de água, exploração de aquíferos, derretimento de geleiras e até mesmo através da captação de gotas de neblina.

Estes métodos são eficazes do ponto de vista da tecnologia, mas ao mesmo tempo podem ser extremamente onerosos. Portanto, o incentivo a estas tecnologias, via de regra, ocorre em locais onde se vive em situações de extrema seca, quando não há outras opções viáveis. No Brasil, com a falsa ideia de abundância de água em todo o território, tecnologias como estas são dificilmente empregadas.

O reúso de água, por exemplo, é amplamente utilizado em todo o mundo, mas no Brasil ainda é pouco empregado e se mostra avançando lentamente, seja pela falta de incentivo, por questões culturais, ou mesmo pela legislação que vem surgindo apenas recentemente. Crook (1993) afirma que o reúso de água reduz a demanda sobre os mananciais de água bruta, devido à substituição da fonte, isto é, pela substituição da água potável por uma água de qualidade inferior quando tal substituição for possível, tendo em vista a qualidade requerida para consumo.

A intenção do reúso da água é aumentar o suprimento de água ou gerenciar nutrientes no efluente tratado, e seus benefícios incluem a melhoria da produção agrícola, redução do consumo de energia associado à produção, tratamento e distribuição de água, e benefícios ambientais significativos, como a redução da carga de nutrientes nas águas receptoras devido à reutilização das águas residuais tratadas (USEPA, 2012).

Complementando este pensamento, Metcalf e Eddy (2014, p. 1867) afirmam que, ao longo do tempo, o esgoto passou a ser encarado como fonte recuperável de recursos. Quevedo (2015), traz o alerta sobre a importância da recuperação do fósforo, por se tratar de um recurso natural, finito e com fontes cada vez mais escassas.

Segundo Okpala (2011), há um enorme potencial para aproveitamento de água de reúso na Região Metropolitana de São Paulo, visto que nela existem mais de 7 milhões de automóveis (incluindo táxis, que são lavados quase diariamente), uma frota de mais de 15 mil ônibus, trens, a maior concentração de indústrias do país e locais como parques, estádios e quadras esportivas irrigadas com água potável. E em razão da grande demanda, muitos destes locais perfuram poços para abastecimento.

Diante do cenário apresentado e dentre as tecnologias de reúso de água, a recarga artificial de aquíferos com efluente tratado se mostra interessante e pode ter seu espaço no Brasil. Segundo a USEPA (1999), a recarga gerenciada de aquíferos com efluentes tratados apresenta diversas vantagens, pois realiza um tratamento natural adicional e possui capacidade de armazenamento para variações sazonais de oferta e demanda. Levando em conta principalmente a questão da sazonalidade, esta técnica pode se encaixar na necessidade existente na RMSP de enfrentamento de eventos climáticos extremos, armazenando água quando há muita oferta e abastecendo a população quando a oferta convencional for baixa.

Hespanhol (2005) complementa afirmando que, quando esta técnica for adequadamente regulamentada e praticada no Brasil, trará benefícios e representará uma nova dimensão para a disposição de efluentes domésticos, pois além de contribuir para o aumento da disponibilidade de água, ainda se mostra eficiente na proteção de aquíferos costeiros contra salinização, controle de subsidência de solos e sustentação de níveis de aquíferos freáticos submetidos a condições inadequadas de demanda.

Mesmo benéfica, a recarga artificial de aquíferos com efluentes tratados possui suas limitações. A USEPA (1999) ressalta que, dentre as principais preocupações do uso desta tecnologia para obtenção de fontes alternativas de água, estão os contaminantes microbianos, contaminantes emergentes, interferentes endócrinos e fármacos.

O desenvolvimento de estudos de alternativas visando o aumento da disponibilidade hídrica na Bacia do Alto Tietê se justifica especialmente pela recente crise hídrica observada na RMSP. A adoção de tecnologias para diminuição da dependência de estações chuvosas para o abastecimento de água proporciona maior segurança aos sistemas de abastecimento, podendo levar ao aumento dos volumes disponíveis de água para o abastecimento público, além de oferecer opções à busca de mananciais em bacias cada vez mais distantes.

O presente trabalho consiste em uma avaliação da viabilidade do reúso de água para recarga de aquíferos na Região Metropolitana de São Paulo, visando oferecer subsídios à implantação dessa prática, considerando a sua importância no sentido de contribuir para aumentar a disponibilidade das águas subterrâneas para abastecimento público.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Esta dissertação tem por objetivo geral avaliar a viabilidade do reúso da água produzida nas Estações de Tratamento de Esgotos da Região Metropolitana de São Paulo para fins de recarga de aquíferos, a partir da adoção de requisitos de qualidade para essa aplicação.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar estudo de casos internacionais em locais onde é utilizada a tecnologia de recarga de aquífero com efluentes tratados, visando avaliar a replicabilidade da tecnologia;
- Adotar requisitos de qualidade do efluente tratado necessários para a recarga do aquífero;
- Fazer uma avaliação de custos gerais da operação de sistemas de recarga de aquífero com efluente tratado na RMSP.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Reúso de água

A disponibilidade hídrica mundial não ocorre de maneira igualitária. Isso ocorre devido a diversos fatores (físicos, geográficos, de gestão, entre outros), e causam problemas de cunho social, econômico e ambiental. Além disso, as diversas atividades humanas, juntamente com o crescimento demográfico, têm determinado o uso cada vez mais intenso dos recursos hídricos.

Nesse sentido, Philippi Jr (2003) questiona como enfrentar a relação demanda/oferta de água. Este mesmo autor descreve que a resposta para essa pergunta deve caminhar aliada ao estabelecimento de políticas adequadas e à implementação de sistemas de gestão efetivos.

Segundo dados da ANA (Agência Nacional de Águas), aproximadamente 80% da reserva de água doce do Brasil situam-se na região Amazônica e 20% concentram-se em regiões brasileiras onde vivem 95% da população.

Outro dado importante que deve ser considerado, diz respeito aos tipos de uso da água. De acordo com dados da ONU (Organização das Nações Unidas) aproximadamente 70% de toda a água potável disponível no mundo é utilizada para irrigação, enquanto as atividades industriais consomem 20% e o uso doméstico 10%.

De acordo com Mancuso e Santos (2003), de todo o volume de água disponível em nosso planeta, cerca de 1% está disponível para as atividades humanas; deste, apenas 10% da água consumida é reservada para fins urbanos, e de toda essa água 35% é descartada, após sua utilização, na forma de esgoto, aumentando os problemas relacionados à poluição dos recursos hídricos.

De acordo com a Resolução CNRH n° 54 de 2005, no artigo 2º, o reúso de água é a utilização de água residuária (esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária tratados ou não).

A reutilização de águas residuárias vem sendo praticada mundialmente há muito tempo e até alguns anos atrás o reúso era considerado uma opção exótica, mas tornou-se uma alternativa que não pode ser ignorada, notando-se distinção cada vez mais sutil entre técnicas de tratamento de água e de tratamento de esgotos.

Santos e Mancuso (2003) afirmam que o termo água de reúso passou a ser utilizado com maior frequência na década de 1980, quando as águas de abastecimento foram se tornando cada vez mais caras, onerando processos industriais.

Crook (1993) ressalta que, em muitos casos, o reúso de água promove a proteção das águas de mananciais, uma vez que são reduzidas ou até eliminadas as descargas de esgotos em águas superficiais.

O reúso de água deve ser considerado como parte de uma atividade mais abrangente que é o uso racional ou eficiente da água, o qual compreende também o controle de perdas e desperdícios, e a minimização da produção de efluentes e do consumo de água. Esta prática vem sendo utilizada em diferentes atividades, seja na indústria, na agricultura, nos municípios e para recarga de aquíferos, objeto desse trabalho, que será detalhada nos capítulos a seguir.

3.1.1. Conceitos relevantes sobre água de reúso

Lavrador Filho (1987) citado por Santos e Mancuso (2003), define que reúso de água é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana, para suprir as necessidades de outros usos benéficos, inclusive o original.

No ano de 1973, a Organização Mundial de Saúde – OMS publicou um documento no qual classifica o reúso de água em diferentes modalidades, de acordo com o uso e finalidade, conforme segue (WHO, 1973).

- **Reúso indireto:** a água já usada uma ou mais vezes para uso doméstico ou industrial é descarregada nas águas superficiais ou subterrâneas e utilizada novamente à jusante, de forma diluída.
- **Reúso direto:** é o uso planejado e deliberado de esgotos tratados para certas finalidades como irrigação, uso industrial, recarga de aquífero e água potável.
- **Reciclagem interna:** é o reúso da água internamente a instalações industriais e/ou domésticas, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

As classificações de reúso direto e indireto ainda podem ser subdivididas em usos potáveis e não potáveis. Com relação aos usos não potáveis, Santos e Mancuso (2003) e Moruzzi (2008), definem as seguintes finalidades:

- **Reúso não potável para fins agrícolas:** utilizado para irrigação de plantações, é classificado de acordo com o tipo de cultura que o utiliza – o primeiro grupo contém as plantas não comestíveis (silvicultura, pastagens, fibras e sementes) e o segundo grupo contém as plantas comestíveis, consumidas cozidas ou cruas.
- **Reúso não potável para fins recreacionais:** abastecimento de corpos d'águas superficiais, como lagos, reservatórios e rios usados para fins recreacionais, além de usos em paisagismo, como irrigação de jardins e parques públicos, chafarizes, lagos ornamentais e também na rega de campos esportivos.
- **Reúso não potável para fins industriais:** abrange os usos relacionados aos processos industriais, como refrigeração, caldeiras e até incorporação ao processo produtivo; e outros usos internos, como limpeza de pátio, lavagem de veículos, etc. Em casos de reúso interno – reutilização do próprio efluente – é classificado como “reciclagem interna”.
- **Reúso não potável para fins domésticos:** são os casos de reúso de água para rega de jardins residenciais, para descargas sanitárias, utilização em grandes edifícios, lavagem de automóveis e pisos e também outros usos urbanos, como lavagem de ruas e reserva de incêndio. Assim como para o reúso industrial, se for o caso de reúso interno, é dito “reciclagem interna”.

Outros usos ainda são mencionados por Santos e Mancuso (2003) e Moruzzi (2008):

- **Manutenção de vazões de cursos d'água:** utiliza-se o efluente tratado para manter uma determinada vazão em um curso hídrico, com a diluição de cargas poluidoras, ou mesmo para manter vazões mínimas em períodos de estiagem.
- **Aquicultura:** produção de peixes e plantas aquáticas utilizando para tanto os nutrientes provenientes de efluentes tratados.
- **Recarga de aquíferos:** os aquíferos subterrâneos podem ser recarregados com efluentes tratados de forma direta através de injeção sob pressão ou

de forma indireta utilizando-se águas superficiais que tenham recebido descargas de efluentes tratados a montante. Pode ter por objetivo o aumento da disponibilidade e armazenamento de água, o controle da salinização de aquíferos costeiros e o controle da subsidência de solos.

Este último uso citado será explorado adiante, visto que é o tema central desta pesquisa.

Metcalf e Eddy (2016, p. 1829), definem com relação aos usos potáveis:

- **Reúso potável direto:** lançamento de efluente tratado diretamente no sistema de distribuição de água potável a jusante da estação de tratamento de água de abastecimento, ou na entrada do sistema de tratamento de água de abastecimento, juntamente com a água bruta.
- **Reúso potável indireto:** incorporação planejada de efluente tratado nos mananciais de água que são utilizados para abastecimento, superficial ou subterrâneo, resultando na mistura, diluição e assimilação de eventuais contaminantes, atuando como um tampão ambiental.

Cutolo e Rocha (2009) conclui que o reúso pode ser planejado ou não planejado. Ou seja, o reúso pode ser resultante de uma ação consciente subsequente ao lançamento do efluente, ou apenas subproduto do lançamento não intencional dessa descarga.

Santos e Mancuso (2003) ressaltam que o reúso planejado está diretamente associado à existência de um sistema de tratamento que atenda às exigências ambientais e aos padrões de qualidade requeridos pelo reúso de água.

O tratamento necessário para produzir uma água de reúso dependerá de fatores como a característica da água residuária a ser tratada e o uso ao qual esta água de reúso será submetida. Deve considerar também a viabilidade técnica e econômica da alternativa de tratamento escolhida.

3.1.2. Limitações do reúso de água e aspectos de saúde pública

A implantação do reúso de água possui diversas limitações, que compreendem: custo alto, complexidade tecnológica e operacional e riscos à saúde pública.

Conforme apontado anteriormente, são necessários tratamentos complexos para obtenção de água de reúso. A complexidade do tratamento costuma ter relação direta com

o custo do mesmo. Tratamentos deste tipo exigem, em sua grande maioria, equipamentos de última geração, portanto, alto investimento inicial em plantas para produção de água de reúso. Além disso, custo e complexidade costumam ser maiores conforme a exigência da qualidade da água de reúso que se deseja obter.

Tratamentos de alta complexidade requerem também pessoal especializado para operá-lo corretamente para garantir o funcionamento correto e a longevidade dos equipamentos, além da segurança operacional. A produção de água de reúso é realizada geralmente em plantas com muitos recursos de automação e uma grande quantidade de equipamentos, acarretando altos consumos de energia, como ocorre nas membranas de osmose reversa, por exemplo.

De acordo com Blum (2003), adotam-se dois princípios gerais para a avaliação do risco sanitário: o reúso não potável é mais seguro que o reúso potável; e o reúso indireto, em que o processo de recuperação da qualidade inclui um estágio controlado de recuperação de qualidade na natureza, é mais seguro que o reúso direto.

A caracterização sanitária da qualidade das águas de reúso é necessária para segurança biológica e química, e de acordo com os vários tipos de aplicações. Assim, os parâmetros mais utilizados no monitoramento da qualidade de água, principalmente nas estações de tratamento de esgotos domésticos, são demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos totais (ST), sólidos suspensos totais (SST), nutrientes (nitrogênio e fósforo), coliformes totais e termotolerantes (CUTOLO, 2002).

A presença dos agentes químicos (substâncias químicas perigosas) e biológicos (organismos patogênicos), na água destinada ao reúso é a preocupação central de seus potenciais usuários. A remoção dos contaminantes dependerá da eficiência dos sistemas de tratamento, cuja tecnologia, por sua vez, dependerá da qualidade desejada para a água, de acordo com os usos previstos.

3.1.3. Legislação pertinente ao reúso de água

3.1.3.1. Marcos internacionais sobre água de reúso

A reutilização, reúso de água ou o uso de águas residuárias não é um conceito novo e tem sido praticado em todo o mundo há muitos anos. Existem relatos de sua prática

na Grécia Antiga, com a disposição de esgotos e sua utilização na irrigação (CETESB, 2017).

Almeida (2011) relata que a preocupação com a crescente demanda por água no período a partir da Revolução Industrial, acompanhada da produção de esgotos em proporções preocupantes originou na Inglaterra, em 1865, a primeira legislação que previa o tratamento do esgoto para evitar a poluição dos rios. O relatório da *Royal Commission on Sewage Disposal in England* também levou em conta o reúso de água, sendo considerada a primeira legislação a abordar oficialmente o assunto.

Para Asano e Levine (1996), a história do reúso de água pode ser dividida em três momentos. O primeiro data de 3000 a. C até 1850, relatado no Relatório Chadwick, no qual descrevia o reaproveitamento de esgoto, cuja descrição relatava “a chuva para os rios e os esgotos para o solo”.

Em 1973, a OMS publicou “*Reuse of Effluents: Methods of Wastewater Treatment and Public Health Safeguards*”, cujas diretrizes enfocavam métodos de tratamento de efluentes, visando à proteção da saúde pública. Mais tarde, em 1989, essas diretrizes foram atualizadas após estudos epidemiológicos, com o título “*Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*” e novos critérios foram propostos para o uso da água de reúso na agricultura e aquicultura.

Almeida (2011) ainda afirma que em 1992, a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) publicou o “*Guidelines for Water Reuse*”, uma norma que tem por objetivo regular e orientar o reúso em locais onde não há regulamentação para tal prática, visando o reúso urbano, industrial e agrícola. Esta norma sofreu revisão em 2004.

A Tabela 1 apresenta um histórico de fatos sobre os critérios de qualidade para água de reúso em todo o mundo.

Tabela 1: Histórico dos principais fatos e critérios de qualidade sobre reúso de água no mundo.

ANO	FATOS E CRITÉRIOS DE QUALIDADE
1918	Departamento de Saúde Pública do Estado da Califórnia estabelece os “Primeiros Regulamentos para utilização de esgotos com propósito de irrigação na Califórnia”
1952	Primeiras regras editadas por Israel
1973	WHO 100 CF/100ml. em 80% das amostras
1978	Critério sobre reúso de águas residuárias do Estado da Califórnia : 2,2 CT/100ml
1978	Israel: 12 CF/100ml em 80% das amostras: 2,2 CT/100ml em 50% das amostras
1983	Relatório do Banco Mundial
1983	Estado da Flórida: nenhuma detecção de <i>E.coli</i> em 100ml
1984	Estado do Arizona: padrões para vírus (1 vírus/40 L) e <i>Giardia</i> (1 cist/40 L)
1985	Relatório de Feachen et al.1983
1985	Relatório de Engelberg (IRCWD,1985)
1989	Recomendações da OMS para reúso de águas residuárias: 1000 CF/100ml, < 1 ovo de nematóide/L
1990	Estado do Texas: 75 CF/100ml.
1991	França: Recomendações sanitárias baseadas nas da OMS
1992	Guia da USEPA para reúso de águas: Nenhuma detecção de CF em 100ml (7 d em média, não mais de 14 CF/100ml em qualquer amostra

Fonte: Adaptado de Salgot & Angelakis, 2001.

Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a ECO 92 (Rio de Janeiro, junho de 1992), estabeleceu dois critérios básicos para a gestão de recursos hídricos no século 21 ao considerar a água como “um recurso finito e vulnerável, essencial para a manutenção da vida, do desenvolvimento e do meio ambiente”; e dar um valor econômico para todos os seus usos.

3.1.32. *Legislação Federal Brasileira*

A primeira lei brasileira que faz referência à água no Brasil foi o Código das Águas, instituído em 1934 como um instrumento para o regramento do recurso no país. Apesar de significativa, esta legislação tinha como foco maior o uso da água para geração de energia elétrica.

Considerando a importância e abundância dos recursos hídricos no Brasil, percebe-se uma grande lacuna entre o Código das Águas e as legislações brasileiras que começam a citar o tema reúso. Algumas consequências da ausência de legislação sobre o assunto são os altos riscos de contaminação do meio ambiente (caso a água não tenha sido tratada corretamente); práticas inadequadas (carência de informação dos usuários); riscos à saúde pública, e dificuldades no licenciamento pelos órgãos ambientais (CUNHA *et al.*, 2011).

Somente em 1988, com a instituição da Constituição Federal é que a escassez hídrica começa a ser encarada como fato concreto e, a partir de então, outras leis, normas e diretrizes são criadas com uma nova visão frente a esta problemática, conforme segue:

- A Lei Nacional n. 9.433/1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria e define a estrutura jurídico-administrativa do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, contém vários dispositivos relativos ao reúso como alternativa importante para a racionalização do uso da água e conservação deste recurso. Estabelece a cobrança pelo uso dos recursos hídricos sujeitos à outorga.
- A Lei Nacional n. 9.984/00 que cria a Agência Nacional de Águas, a ANA.
- A Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, estabelece também as condições e padrões de lançamentos de efluentes e define padrões de qualidade da água a serem observados de acordo com os usos preponderantes dos cursos d'água.
- A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005, que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, remete para regulamentação complementar pelos órgãos competentes as diretrizes, critérios e parâmetros específicos para as modalidades de reúso definidas nesta resolução.
- A Resolução da Agência Nacional de Águas – ANA n. 348, de 20 de agosto de 2007, que aprova o regimento interno da Agência, atribuindo que é dever da Superintendência de Usos Múltiplos e da Gerência de Eventos Críticos propor e apoiar a realização de programas de estímulo à conservação e à racionalização do uso de águas, inclusive mediante reúso.

- A Resolução CONAMA n. 430, de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre os padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA n. 357/2005, menciona o reúso no Artigo 27, o qual estabelece que deverão ser buscadas práticas de gestão de efluentes visando ao uso eficiente da água, à redução da geração de efluentes e à melhoria da qualidade do efluente gerado, além de sempre que possível e adequado, proceder à reutilização.

No tocante às normas técnicas sobre água de reúso em nível nacional, a única que trata sobre o assunto é a ABNT NBR 13.969/97 – “Tanques Sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação”. Esta norma fala sobre o planejamento do sistema de reúso, o qual deve permitir a sua aplicação segura e racional para minimizar o custo de implantação e operação.

Fernandes (2005) elenca os principais conceitos definidos na ABNT NBR 13.969/97:

- Usos previstos para o esgoto tratado: lavagens de pisos, calçadas, irrigação e manutenção de jardins e lagos, descargas de bacias sanitárias, entre outros;
- Volume de esgotos a ser reutilizado: deve ser quantificado de acordo com os usos definidos para todas as áreas estimando o volume para cada tipo de reúso, considerando as variações e especificidades de cada caso;
- Grau de tratamento: via de regra, define-se o grau de tratamento pelo uso mais restritivo, entretanto deve-se também considerar o uso que terá o consumo mais expressivo;
- Sistema de reservação e distribuição;
- Manual de operação e treinamento dos responsáveis.

A ABNT NBR 13.969/97 define as seguintes classificações e parâmetros para esgotos sanitários conforme o reúso (Tabela 2):

Tabela 2: Classificações e parâmetros para esgotos sanitários tratados conforme o reúso, segundo a ABNT NBR 13.969/97.

Classe	Usos	Parâmetros	Observações
1	Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes.	Turbidez inferior a cinco, coliforme fecal inferior a 200 NMP/100 mL; sólidos dissolvidos totais inferiores a 200 mg/L; pH entre 6,0 e 8,0; cloro residual entre 0,5 mg/L e 1,5 mg/L.	Nesse nível, serão geralmente necessários tratamento aeróbio (filtro aeróbio submerso ou LAB) seguido por filtração convencional (areia e carvão ativado) e, finalmente, cloração. Pode-se substituir a filtração convencional por membrana filtrante.
2	Lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes.	Turbidez inferior a cinco, coliforme fecal inferior a 500 NMP/100 mL, cloro residual superior a 0,5 mg/L.	Nesse nível é satisfatório um tratamento biológico aeróbio (filtro aeróbio submerso ou LAB) seguido de filtração de areia e desinfecção. Pode-se também substituir a filtração por membranas filtrantes.
3	Descargas dos vasos sanitários.	Turbidez inferior a 10, coliformes fecais inferiores a 500 NMP/100 mL.	Normalmente, as águas de enxágue das máquinas de lavar roupas satisfazem a este padrão, sendo necessária apenas uma cloração. Para casos gerais, o tratamento aeróbio seguido de filtração e desinfecção satisfaz a este padrão.
4	Pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.	Coliforme fecal inferior a 5.000 NMP/100 mL e oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg/L.	As aplicações devem ser interrompidas pelo menos 10 dias antes da colheita.

Fonte: Adaptado de ABNT – NBR 13.969/97.

3.1.3.3. Legislação do Estado de São Paulo

No Estado de São Paulo, a Lei Estadual n. 7.663/91, que regulamenta o artigo 205 da Constituição do Estado de São Paulo de 1989, instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de domínio do Estado. Este foi o marco inicial da legislação para a gestão das águas no estado.

Em 1º de junho de 2005, o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE publicou a Instrução Técnica DPO Nº 007, a qual tem por objetivo dar as instruções e procedimentos necessários à elaboração e apresentação de estudos e da documentação para obtenção das outorgas de implantação de empreendimentos e direito de uso de recurso hídrico pelo produtor de água de reúso direto, não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário de Sistemas Públicos – ETES.

Segundo a Instrução Técnica citada, a outorga somente será concedida para as seguintes finalidades para água de reúso:

- irrigação paisagística, de caráter esporádico, ou sazonal, de parques, jardins, campos de esporte e de lazer urbanos, ou áreas verdes de qualquer espécie, inclusive nos quais o público tenha ou possa a vir ter contato direto;
- lavagem de logradouros e outros espaços, públicos e privados;
- construção civil, incorporada ao concreto não estrutural, cura de concreto em obras, umectação para compactação em terraplenagens, lamas de perfuração em métodos não destrutivos para escavação de túneis e instalação de dutos, resfriamento de rolos compressores em pavimentação e controle de poeira em obras e aterros;
- desobstrução de galerias de água pluvial e de rede de esgotos;
- lavagem de veículos especiais, a saber, caminhões de resíduos sólidos domésticos, coleta seletiva, construção civil, trens e aviões;
- usos em processos, atividades e operações industriais.

Também no ano de 2005, a CETESB publicou a Instrução Técnica n. 31 que trata das exigências técnicas para irrigação com água de reúso proveniente de esgoto sanitário tratado. Esta regulamentação permite a aplicação de esgoto sanitário tratado em pomares, culturas que não são consumidas cruas, pastagem para produção de feno, áreas de reflorestamento e irrigação paisagística ou esportiva, desde que se observem as concentrações máximas permitidas dos constituintes limitantes dos esgotos tratados para aplicação no solo.

Em 14 de dezembro de 2016 foi sancionada a Lei Estadual n. 16.337, que dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH e dá outras providências correlatas. Na prática, segundo o Departamento de Águas e Energia Elétrica – DAEE (2016), a

proposta representa a revisão da Lei 9.034/94, que aprovou o primeiro Plano Estadual de Recursos Hídricos; e da Lei 7.663/91, que instituiu a Política Estadual de Recursos Hídricos.

O Decreto Estadual n. 47.397/02, que altera o Decreto Estadual n. 8.468/76, define que, para efeitos de obtenção de licenças de instalação e funcionamento, são consideradas fontes poluidoras passíveis de licenciamento sistemas autônomos públicos ou privados de armazenamento, afastamento, tratamento, disposição final e reúso de efluentes líquidos, exceto implantados em residências unifamiliares.

A Lei Estadual n. 16.337/16 estabelece que um dos objetivos e diretrizes que cabe ao PERH promover é o incentivo à recirculação e reúso como medida de promoção do uso eficiente e da conservação da água (SÃO PAULO, 2016).

A Resolução Conjunta SES/SMA/SSRH n. 01, publicada em 28 de junho de 2017 e em vigor desde 27 de setembro de 2017 é a norma mais completa sobre reúso de água já publicada no Brasil até o momento. Ela disciplina o reúso direto não potável de água para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETEs), no Estado de São Paulo, e contempla as ETEs operadas por empresas públicas ou privadas, que tratam esgotos sanitários, excluindo ETEs implantadas por estabelecimentos comerciais e industriais.

Esta Resolução considera as seguintes modalidades de reúso não potável: irrigação paisagística, lavagem de logradouros e outros espaços públicos e privados, construção civil, desobstrução de galerias de água pluvial e rede de esgotos, lavagem de veículos e combate a incêndio.

Em seu Artigo 4º, a Resolução considera duas categorias de água de reúso: Uso com Restrição Moderada (contempla todos os usos citados no parágrafo anterior) e Uso com Restrição Severa (idem Uso com Restrição Moderada, exceto combate a incêndio e lavagem interna de veículos). Para Uso com Restrição Severa deve-se também considerar a tolerância das espécies para irrigação paisagística e instalar barreiras físicas para impedir o trânsito de pessoas durante o uso desta água.

Os padrões de qualidade de acordo com o uso definidos pela Resolução Conjunta SES/SMA/SSRH n. 01/2017 são apresentados na Tabela 3. Deve-se observar que a Legislação estabelece parâmetros mais restritivos para Uso com Restrição Moderada em relação ao Uso com Restrição Severa.

As ETEs que possuem licença ambiental expedida para produção de água de reúso devem se adequar às disposições estabelecidas até 26 de março 2018.

Tabela 3: Padrões de Qualidade para Água de Reúso definidos na Resolução Conjunta SES/SMA/SSRH n. 01/2017.

Padrões de qualidade			Categorias de Reuso	
Parâmetro	Unidade	Observação	Uso com Restrição Moderada	Uso com Restrição Severa
pH	-	-	6 a 9	6 a 9
DBO _{5,20}	mg/L	-	≤ 10	≤ 30
Turbidez	UNT	Turbidez antes da desinfecção. Deve-se basear na média das medições horárias da Turbidez dentro de um período de 24h. Nenhuma medição horária deve exceder 5 UNT. Para sistemas de membrana filtrante, a Turbidez não poderá exceder 0,2 UNT e os Sólidos Suspensos Totais, 0,5 mg/L. Concentrações acima desses valores indicam problemas de integridade do sistema.	≤ 2	-
Sólidos Suspensos Totais	mg/L		-	≤ 30
Coliformes Termotolerantes	UFC/100 mL	Utilizando o parâmetro <i>E. Coli</i> , o limite deve ser 120 UFC/100 mL	ND	≤ 200
Ovos de Helminhos	ovo/L	Poderá ser aceito o parâmetro ovos viáveis de <i>Ascaris sp.</i> , que deverá limitar-se a < 0,1 ovo viável/L para Uso com Restrição Moderada e a 0,1 ovo viável/L para Uso com Restrição Severa.	< 1	1
Cloro residual total (CRT)	mg/L	Outros tratamentos que não utilizem o cloro serão aceitos para desinfecção, desde que tenham eficiência semelhante.	< 1	< 1

Padrões de qualidade			Categorias de Reuso	
Parâmetro	Unidade	Observação	Uso com Restrição Moderada	Uso com Restrição Severa
Razão de Adsorção de Sódio (RAS)	-	Determinado na água de irrigação, indica a quantidade relativa de sódio (mEq/L) que pode ser adsorvido pelo solo. Seu cálculo depende da determinação dos teores de cálcio (mEq/L) e magnésio (mEq/L). Seu cálculo se dá pela fórmula: $RAS = Na+ / [(Ca+++Mg++) / 2]^{1/2}$. Este padrão se aplica para o uso de irrigação. Para os demais usos, aplica-se o padrão do Uso com Restrição Severa.	< 3	3 a 9
Condutividade elétrica (CE)	dS/m	A fim de minimizar problemas de permeabilidade dos solos, o critério da RAS deverá ser interpretado em conjunto com a Condutividade Elétrica da seguinte forma: para RAS entre 0 e 3, $0,2 \leq CE \leq 2,9$; para RAS entre 3 e 6, $0,3 \leq CE \leq 2,9$; e para RAS entre 6 e 12, $0,5 \leq CE \leq 2,9$.	< 0,7	< 3,0
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	-	< 450	< 2000
Cloreto	mg/L	-	< 106	< 350
Boro	mg/L	-	< 0,7	< 2,0

Padrões de qualidade			Categorias de Reuso	
Parâmetro	Unidade	Observação	Uso com Restrição Moderada	Uso com Restrição Severa
Distâncias de precaução	M	Este critério tem como base o Perímetro de Alerta definido em legislação específica para águas subterrâneas (Decreto Estadual n. 32.955/91), que considera tempo de trânsito de 50 dias até a água atingir a zona de captura da água. Para as unidades hidrogeológicas do Estado de São Paulo, o Instituto Geológico (2010) calculou distâncias de 30 a 70 metros, em função da característica do aquífero e da vazão de captação. Este valor poderá ser modificado caso haja dados disponíveis, tecnicamente justificados, que comprovem riscos aos poços de captação de água potável.	70 (para poços de captação de água potável)	
Tipos de tratamento	-	-	Tratamento secundário, desinfecção e filtração. Este tratamento não poderá ter níveis mensuráveis de patógenos (recomenda-se realizar uma caracterização microbiológica completa - bactéria, vírus e protozoário - da água tratada de reúso antes do início de operação da planta).	Tratamento secundário, desinfecção e filtração.

Fonte: Adaptado de SÃO PAULO (2017).

No ano de 2013 o Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo – CRH publicou a Deliberação CRH n. 156/13, a qual estabelecia diretrizes para o reúso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto de sistemas públicos para fins urbanos e determinava que o reúso poderia ser realizado mediante Outorga de Direito de Uso emitida pelo DAEE e licença ambiental emitida pela CETESB.

Esta norma foi revogada pela Deliberação CRH n. 204/17, que é a legislação mais recente sobre o assunto, publicada em 25 de outubro de 2017. Esta norma estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos a serem observados na prática do reúso direto não potável de água para fins de usos urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário (ETEs) de sistemas públicos, no Estado de São Paulo. São contempladas as ETEs operadas por empresas públicas ou privadas, que tratam esgotos sanitários, assim considerados os de origem predominantemente doméstica.

3.1.34. Legislação do Município de São Paulo

No município de São Paulo entrou em vigor em 22 de abril de 2015 a Lei nº 16.174, que estabelece regramento e medidas para fomento ao reúso de água para aplicações não potáveis, oriundas do polimento do efluente final do tratamento de esgoto, de recuperação de água de chuva, da drenagem de recintos subterrâneos e de rebaixamento de lençol freático no âmbito do Município de São Paulo e dá outras providências.

Em seu artigo 1º, esta lei estabelece que a Prefeitura do Município de São Paulo adotará preferencialmente a água de reúso, proveniente do polimento do efluente final das Estações de Tratamento de Esgoto ou da recuperação de água de chuva, para aplicações urbanas, que não requeiram água potável, em obras e serviços executados com mão de obra própria ou contratados, como:

I - lavagem de ruas, calçadas, praças públicas, monumentos, túneis, pátios e estacionamentos de próprios municipais e outros logradouros;

II - lavagem de lagos e fontes ornamentais;

III - desobstrução/limpeza de galerias de águas pluviais, bueiros, bocas de lobo e piscinões;

IV - lavagem de caminhões e carretas de lixo e pátios de transbordo de resíduos sólidos urbanos (RSU) e postos de entrega voluntária (PEVs);

V - umectação de ajuste para umidade ótima na terraplenagem;

VI - cura e água de mistura de concreto não estrutural;

VII - lamas de lubrificação em métodos de construção não destrutivos como perfurações unidirecionais;

VIII - emulsão para lubrificação de rolos compressores em serviços de pavimentação asfáltica;

IX - umidificação de pavimento para aumentar a umidade relativa do ar em logradouros em que sua redução na estiagem se tornou problema para a saúde pública;

X - lavagem de fachadas e jateamento para sua recuperação e envidraçamento, em havendo condições que evitem a dispersão de névoa ou isolamento adequado para o tráfego de transeuntes;

XI - operações de rescaldo após incêndios, realizadas por bombeiros.

O fomento à água de reúso se dará, segundo esta Lei, utilizando em editais de contratações municipais cláusulas relativas ao uso preferencial de água de reúso nas aplicações previstas pela Lei, podendo conceder mecanismos de incentivo financeiro ou maior pontuação na seleção de propostas, desde que o preço da água de reúso seja igual ou inferior ao da água potável e a qualidade físico-química e microbiológica seja compatível com as aplicações previstas e normas aplicáveis.

Esta Lei ainda estabelece que os veículos de transporte e tanques de estocagem de água de reúso deverão ser de uso exclusivo e deverão ter a inscrição “Água de reúso, poupando mananciais”, que também deve figurar nas placas de obras em que se fizer utilização de água de reúso.

A Lei Municipal n. 16.174/2005 define que a rede hidráulica interna para distribuição das águas de reúso deverá ser independente da rede de água potável, impossibilitando a mistura por eventuais manobras e as tubulações, acessórios e tanques de estocagem deverão ser pintados em cor púrpura para prevenir o consumo indevido para dessedentação ou consumo potável.

3.1.4. Reúso de água no Brasil

A discreta aplicação do reúso nos ambientes urbanos deve-se, entre muitos fatores, a falta de uma definição clara dos padrões de reúso não potável, o que tem acarretado a utilização de padrões semelhantes aos usados para as águas potáveis ou a adoção de parâmetros internacionais extremamente restritivos, o que pode tornar em muitos casos, inviável técnica e economicamente a sua aplicação (FERNANDES, 2005).

Entretanto, existem algumas iniciativas e casos de sucesso de reúso de água no Brasil realizados por companhias de saneamento públicas ou privadas.

A Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento – SANASA, empresa que realiza os serviços de água e esgotos no município de Campinas, estado de São Paulo, foi a pioneira dentre as brasileiras a construir e operar uma Estação Produtora de Água de Reúso – EPAR e obteve sucesso na produção de água de reúso.

De acordo com dados disponibilizados no site da empresa, a EPAR Capivari II, é a primeira estação deste porte na América Latina a utilizar a tecnologia de Biorreatores a Membranas – MBR para tratamento de esgoto doméstico. A operação teve início em abril de 2012. A primeira fase desta estação tinha capacidade de tratamento de 180 L/s (vazão média), atendendo a aproximadamente 90 mil pessoas. Em 2015 entrou em operação a segunda fase, dobrando a capacidade de tratamento.

A Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA, segundo dados disponíveis no website da Companhia, implantou e está operando desde 2015 a ETE Ibirité, localizada no município de mesmo nome. Nessa Estação de Tratamento de Esgotos são reaproveitados os subprodutos do tratamento, como o lodo e o efluente final. Parte do efluente tratado na ETE Ibirité será vendida para a indústria, que o utilizará para resfriamento de máquinas, e parte já está sendo reutilizada na própria planta da ETE. Para tanto, o esgoto está sendo tratado a nível terciário, com posterior desinfecção por ultravioleta.

A Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR também se mostra dentre as companhias mais avançadas do Brasil na tentativa de implantar a produção de água de reúso, tendo construído uma estação piloto para estudar tecnologias e processos sobre o assunto (SANEPAR, 2016).

No Estado de São Paulo, ao lado da Estação de Tratamento de Esgotos ABC, a qual pertence à SABESP, encontra-se o Aquapolo Ambiental. Este é o maior

empreendimento para produção de água de reúso industrial da América do Sul e o quinto maior do mundo, resultado de uma parceria da Sabesp com a Foz do Brasil (antigo Grupo Odebrecht, hoje BRK Ambiental), que formaram uma Sociedade de Propósito Específico – SPE com contrato de 41 anos de duração que vigora desde 2012, ano de início da operação do Aquapolo (SABESP; AQUAPOLO, 2016).

O Aquapolo recebe parte do efluente tratado que a ETE ABC destinaria ao Córrego dos Meninos, produzindo água de reúso que é transportada por uma adutora de 17 km de extensão para o Polo Petroquímico da região do ABC Paulista, onde alcança a rede distribuição de 3,6 km e abastece as indústrias que ali operam, as quais utilizam a água para limpeza de torres e resfriamento de caldeiras, principalmente. Ainda no ano de 2015, o Aquapolo passou a distribuir água de reúso por meio de caminhão pipa e, atualmente, possui contrato com duas indústrias situadas fora do Polo Petroquímico, uma produtora de cobre e outra de pneus (SABESP; AQUAPOLO, 2016).

A planta do Aquapolo será estudada em mais detalhes nos próximos capítulos deste trabalho.

3.1.5. Estrutura do sistema de tratamento de esgotos e produção de água de reúso na RMSP

Os serviços de água e esgoto na Região Metropolitana de São Paulo são realizados pela Companhia Estadual de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP. Segundo dados públicos da Companhia, a cobertura da rede coletora de esgotos corresponde a 87% do total das unidades consumidoras.

Das Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs, cinco são as estruturas principais responsáveis pelo tratamento do esgoto produzido na RMSP. São elas: ETE ABC, ETE Barueri, ETE Parque Novo Mundo, ETE Suzano e ETE São Miguel, cujas descrições que constam no Plano Diretor de Esgotos – PDE (2010), localizadas conforme Figura 1 a seguir.

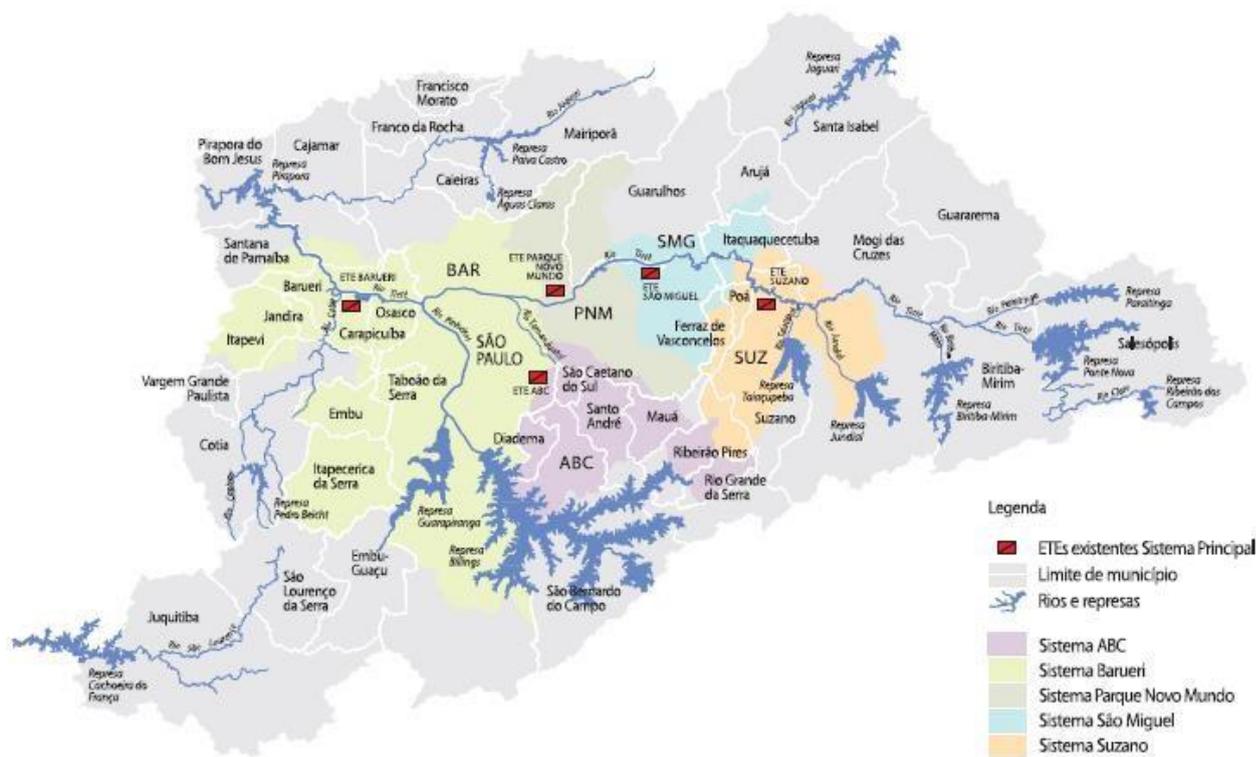


Figura 1: Sistema Principal de Esgotamento Sanitário da RMSP (SABESP, 2010, p. 39).

A água de reúso na RMSP é produzida nas ETEs ABC, Barueri, Parque Novo Mundo, São Miguel e Jesus Neto, esta última apenas produtora de água de reúso. De acordo com a SABESP (2016), são produzidos cerca de 395.000 m³ de água de reúso por mês nestas instalações.

A ETE Barueri, localizada no município de Barueri e em operação desde 1988, foi concebida como sendo de lodo ativado convencional por mistura completa e possui uma capacidade nominal atual de 12,0 m³/s, sendo a maior da América Latina. Conforme as análises conduzidas no âmbito do Plano Diretor de Esgotos da RMSP, a demanda de vazão projetada para tratamento na ETE Barueri é da ordem de 27,5 m³/s para 2030. Segundo o Plano Diretor da própria ETE, a capacidade última deste *site* é de 28,5 m³/s previstos como saturação do mesmo. O PDE indica a área disponível no terreno e imediações como fator limitante da estação, pois resta pouca ou nenhuma área para ampliação, nas quais ainda devem ser alocados elementos como um eventual sistema de recebimento e equalização de chorumes de aterros sanitários, sistema de secagem de lodos e recuperação de energia, dentre outros.

A ETE Parque Novo Mundo, localizada no município de São Paulo e em operação desde 1998, atende basicamente à porção centro-leste deste município e a porção oeste do município de Guarulhos. Foi concebida como sendo lodos ativados convencional com alimentação escalonada e devido à pequena área disponível, optou-se pela utilização de peneiras rotativas em substituição ao tratamento primário e pela estabilização química do lodo secundário, uma vez que não há a geração de lodo primário, dificultando a aplicação de processo de digestão anaeróbia. A capacidade nominal desta ETE é de 2,5 m³/s e, conforme análises conduzidas no Plano Diretor de Esgotos da RMSP, a demanda de vazão projetada para tratamento na ETE Parque Novo Mundo em 2030 é da ordem de 7,1 m³/s.

A ETE ABC, localizada no município de São Paulo e em operação desde 1998, foi concebida como sendo de lodo ativado convencional por mistura completa e possui uma capacidade nominal de 3,0 m³/s, havendo previsão para sua ampliação, na 3ª Etapa do Projeto Tietê, para 4,0 m³/s. A instalação atende as cidades de Santo André, São Bernardo, Diadema, São Caetano, Mauá e uma parte da cidade de São Paulo.

A partir de parte do efluente da ETE ABC, a planta do Aquapolo realiza tratamentos avançados para produção de água de reúso destinada principalmente ao abastecimento de empresas do Polo Petroquímico de Mauá. Segundo dados disponíveis do Aquapolo (2016), a vazão instalada é de 1,0 m³/s, mas a planta opera atualmente com 0,65 m³/s e a economia de água potável gerada apenas por este empreendimento é de 2,58 bilhões de litros por mês.

A ETE São Miguel, localizada nas proximidades de uma companhia química na região leste do município de São Paulo, está em operação desde 1998 e foi concebida como sendo de lodos ativados convencional. Sua capacidade nominal atual é de 1,5 m³/s. Conforme as análises do Plano Diretor de Esgotos da RMSP, a demanda de vazão projetada para tratamento na ETE São Miguel é de 5,6 m³/s em 2030, havendo área suficiente para sua expansão até tal capacidade, bem como para manutenção de área de reserva para outras expansões no futuro.

A ETE Suzano localiza-se no município de Suzano e está em operação desde 1982. Foi concebida como sendo de lodo ativado convencional por mistura completa, sendo a única das cinco ETES do Sistema Principal cujos tanques de aeração são dotados de aeradores superficiais. Sua capacidade nominal é de 1,5 m³/s e, conforme o PDE, a demanda projetada para tratamento na ETE Suzano em 2030 deverá ser da ordem de 2,8

m³/s conforme a concepção atual. O mesmo relatório cita a possibilidade de tal capacidade ser ampliada para vazões de até 3,6 m³/s.

Segundo a SABESP (2016) a ETE Jesus Netto, localizada no Bairro Ipiranga (São Paulo), é a mais antiga da Sabesp, inaugurada em 1935. Foi a primeira a aplicar o processo biológico de tratamento por lodos ativados na América Latina e é pioneira na produção de água de reúso para fins industriais. Até 1980, a estrutura funcionava somente como centro de pesquisas para desenvolvimento de novas tecnologias para tratamento de esgoto. No mesmo ano, passou por uma reformulação e tornou-se, também, uma estação-escola que oferece treinamento e formação profissionalizante em processos de tratamento.

Segundo a mesma fonte, a ETE Jesus Netto tem capacidade de produzir mais de 116 milhões de litros de água de reúso por mês e uma média de fornecimento, em 2016, de mais de 38 milhões de litros mensais por meio de rede e caminhões. Hoje, além de estar totalmente automatizada em seus processos, permitindo o monitoramento remoto pela Internet, a ETE também vem pesquisando e desenvolvendo, com outras unidades da Sabesp, novas e atuais técnicas nos processos de tratamento e produção.

3.2. Águas subterrâneas

Machado (2005) relata que as escavações e perfurações no subsolo para a obtenção de água, betume, minerais e a construção de túneis são feitas desde antes do início das civilizações. É possível que a construção de poços anteceda o *Homo sapiens*, com os seres humanos primitivos escavando para água durante os períodos de estiagem, em leitos secos de rios intermitentes.

Do percentual disponível de água doce no planeta, quase um terço está nas águas subterrâneas, conforme Figura 2.

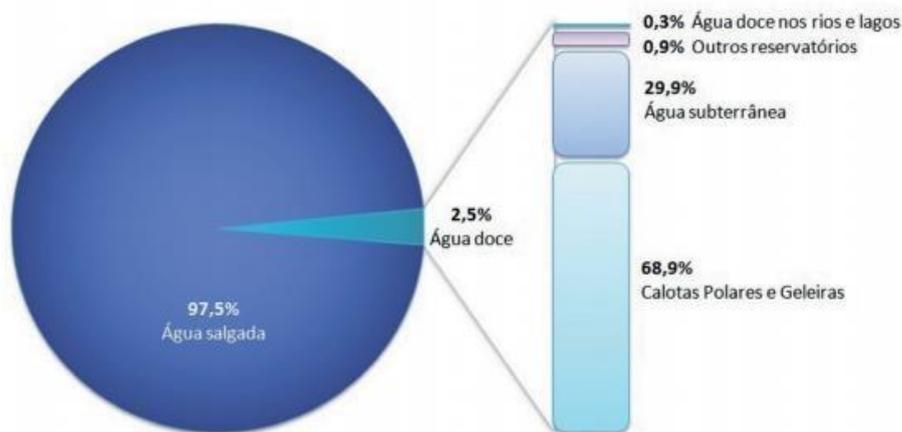


Figura 2: Disponibilidade de água doce no planeta (SSRH, 2015).

O processo de infiltração permite que a água, precipitada nos continentes, ou resultante do degelo da neve, seja transferida para a subsuperfície, atingindo os estratos mais profundos. Ao se infiltrar no solo, a água da chuva passa por uma porção do terreno chamada de zona não saturada ou zona de aeração, onde os poros são preenchidos parcialmente por água e por ar. Parte da água infiltrada no solo é absorvida pelas raízes das plantas e por outros seres vivos ou evapora e volta para a atmosfera. O restante da água, por ação da gravidade, continua em movimento descendente (IRITANI e EZAKI, 2009).

Segundo a Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, água subterrânea é a água que ocorre abaixo da superfície da Terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas, e que sendo submetida a duas forças (de adesão e de gravidade) desempenha um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos. As águas subterrâneas cumprem uma fase do ciclo hidrológico, uma vez que constituem uma parcela da água precipitada.

Os aquíferos são camadas inferiores de terra ou rochas porosas que são saturadas com água subterrânea um reservatório subterrâneo de água, caracterizado por camadas ou formações geológicas suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fonte de abastecimento para diferentes usos. (USEPA, 2005; IRITANI e EZAKI, 2009).

Tendo como referência as características hidráulicas dos aquíferos, existem basicamente dois tipos (SILVA JR. e CAETANO, 2010):

- Aquíferos livres ou freáticos: compostos por formação geológica permeável e parcialmente saturada, com uma base formada por material impermeável (como argila, por exemplo), ou semipermeável. Possui uma superfície livre de água que se encontra sob pressão atmosférica, denominada superfície piezométrica.

- Aquífero confinado: a água está confinada nesse reservatório, tem pressão superior a pressão atmosférica, devido à existência de uma camada confinante impermeável acima do aquífero.

- Aquífero suspenso: aquífero livre formado sobre uma camada impermeável ou semipermeável, que não armazena e nem transmite água.

A Figura 3 apresenta os aquíferos segundo sua classificação, sendo: A – camada impermeável; B – aquífero confinado; C – camada impermeável; D – aquífero livre.

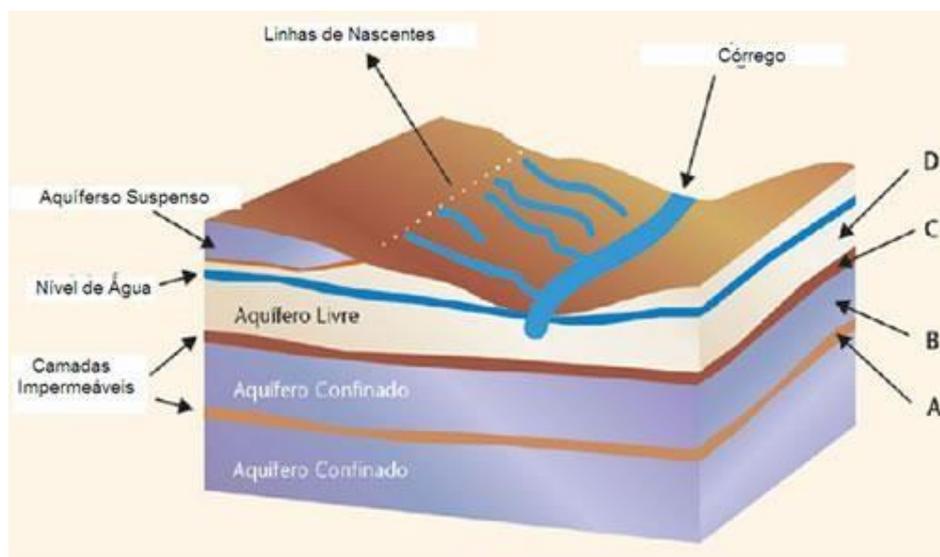


Figura 3: Classificação dos aquíferos de acordo com as características hidráulicas (Fonte: SILVA JR. e CAETANO, 2010).

Os aquíferos podem também ser classificados conforme o tipo de porosidade da rocha armazenadora de água (IRITANI e EZAKI, 2009). A Figura 4 ilustra os três tipos de aquíferos, conforme essa classificação.

- Aquífero granular: as rochas sedimentares (arenitos, siltitos etc.) e os sedimentos não consolidados (areias, cascalhos etc.) são constituídos de grãos minerais. A água percola e permanece, temporariamente,

armazenada nos vazios entre os grãos. A porosidade, neste caso, é do tipo granular e pode ser também denominado sedimentar.

- Aquífero fissural ou fraturado: em rochas maciças e compactas, que não apresentam espaços vazios entre os minerais que as compõem, como os granitos e gnaisses, a porosidade é devido à presença de fraturas conectadas. Estas fendas originam-se da ruptura da rocha, devido a esforços físicos que ocorrem naturalmente na crosta terrestre. Quanto maior a quantidade de fraturas na rocha, interligadas e preenchidas com água, maior será a potencialidade do aquífero em fornecer água.
- Aquífero cárstico: algumas rochas carbonáticas, como os calcários, sofrem um lento processo de dissolução quando em contato com águas ácidas que infiltram por meio das fraturas da rocha. Com a dissolução destes condutos, formam-se cavidades, que podem resultar em galerias com rios subterrâneos e cavernas, por onde a água flui.

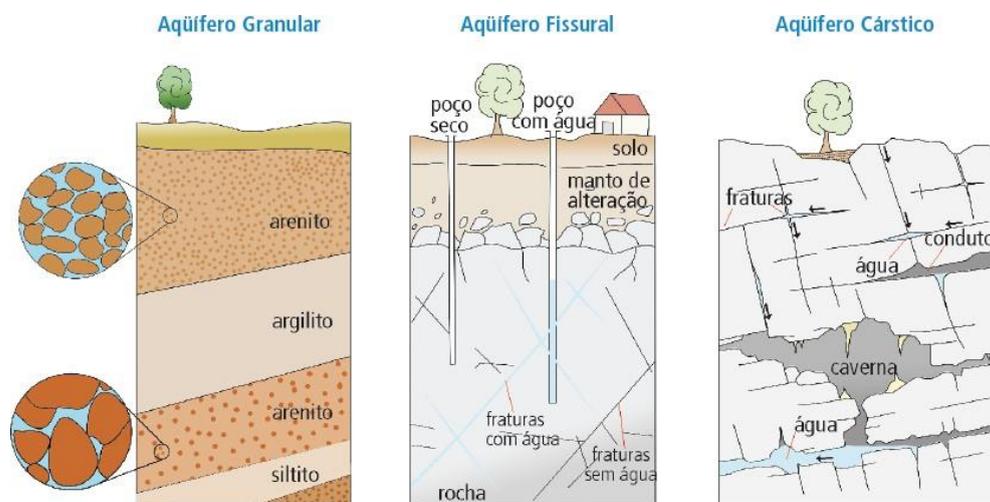


Figura 4: Classificação dos aquíferos conforme a porosidade das rochas (SSRH, 2015).

3.2.1. Principais problemas das águas subterrâneas

O manancial subterrâneo é considerado relativamente mais protegido dos agentes de contaminação que afetam a qualidade das águas dos rios. Contudo, a manutenção dos reservatórios de águas subterrâneas vem sendo ameaçada devido a diferentes fatores, como a poluição das águas, a mudança do regime de chuvas, a impermeabilização do solo

e a extração massiva de água, necessitando cada vez mais da aplicação de mecanismos que contribuam para que não entrem em processo de escassez (MOURA, 2004; REBOUÇAS, 1996).

Quando a exploração de água subterrânea excede a capacidade de recarga natural do aquífero, ocorre um rebaixamento nível desses reservatórios, podendo ocasionar até o esgotamento da água nele armazenada, fato que pode ser acompanhado pela subsidência do solo ou pela penetração da água do mar, em regiões costeiras (MOURA, 2004). Portanto, a água subterrânea pode ser retirada de forma permanente e em volumes constantes, por muitos anos, desde que esteja condicionada a estudos prévios do volume armazenado no subsolo e das condições climáticas e geológicas de reposição (DRM, 2003).

O desenvolvimento de poderosas bombas elétricas e a diesel permitiu a capacidade de extrair água dos aquíferos com maior rapidez do que é substituída pela chuva, sem considerar, ainda, que os aquíferos têm diferentes taxas de recarga, alguns com recuperação mais lenta que outros (CEPIS, 2000).

Segundo a ABAS, em quase todos os continentes, muitos dos principais aquíferos estão sendo exauridos com uma rapidez maior do que sua taxa natural de recarga. A mais severa exaustão de água subterrânea ocorre na Índia, China, Estados Unidos, Norte da África e Oriente Médio, causando um déficit hídrico mundial de cerca de 200 bilhões de metros cúbicos por ano.

Existem diversos exemplos no mundo de esgotamento de aquíferos por superexploração para uso em irrigação. O esgotamento das águas subterrâneas já provocou o afundamento dos solos situados sobre os aquíferos na cidade do México e na Califórnia, Estados Unidos, assim como em outros países (CEPIS, 2000).

A superexploração pode provocar também o avanço da cunha salina definida como o avanço da água do mar em subsuperfície sobre a água doce, salinizando o aquífero, em áreas litorâneas (MELO *et al*, 1996 *apud* CPRM, 2002). A maioria dos aquíferos costeiros é suscetível à intrusão salina, geralmente resultante da sobre-exploração em poços muito próximos do mar.

No Brasil, um dos fatores que está provocando o comprometimento da qualidade e disponibilidade hídrica dos aquíferos reside na ocupação inadequada de suas áreas de recarga (CAVALCANTE e SABADIA, 1992, citado em CPRM, 2002).

3.2.1.1. Contaminação dos aquíferos e suas fontes

Os aquíferos, por sua natureza, são naturalmente mais protegidos quanto à contaminação do que as águas superficiais. Por outro lado, não se pode considerar que a simples “proteção conferida pela natureza a um aquífero” seja suficiente para mantê-lo qualitativamente adequado (SSRH, 2015).

A vulnerabilidade de um aquífero refere-se ao seu grau de proteção natural às possíveis ameaças de contaminação potencial, e depende das características litológicas e hidrogeológicas dos estratos que o separam da fonte de contaminação (geralmente superficial), e dos gradientes hidráulicos que determinam os fluxos e o transporte das substâncias contaminantes através dos sucessivos estratos e dentro do aquífero (CALCAGNO, 2001).

A contaminação ocorre pela ocupação inadequada de uma área que não considera a sua vulnerabilidade, ou seja, a capacidade do solo em degradar as substâncias tóxicas introduzidas no ambiente, principalmente na zona de recarga dos aquíferos. A contaminação pode se dar por fossas sépticas e negras; infiltração de efluentes industriais; fugas da rede de esgoto e galerias de águas pluviais; vazamentos de postos de serviços; por aterros sanitários e lixões; uso indevido de fertilizantes nitrogenados; depósitos de lixo próximos dos poços mal construídos ou abandonados, conforme ilustra a Figura 5.

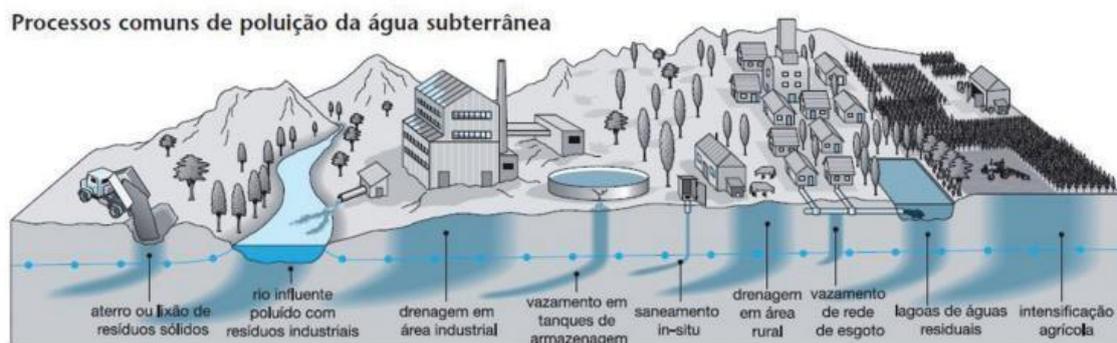


Figura 5: Fontes potenciais de contaminação de águas subterrâneas (HIRATA *apud* SSRH, 2015).

Em decorrência do intenso processo de industrialização e urbanização pelo qual passou, incrementado, sobretudo a partir das primeiras décadas do século XX, que a colocou como principal polo econômico do país, a RMSP é uma das regiões mais

impactadas do Estado e a que possui maior demanda de ações de controle da poluição e de remediação de áreas com solos e águas subterrâneas contaminados (CETESB, 2008).

3.2.2. *Águas Subterrâneas e Geologia da RMSP*

A explosiva expansão da Região Metropolitana de São Paulo vem acompanhada de conflitos relacionados à mineração, ao abastecimento público de águas (quantidade e qualidade), às áreas de riscos geológicos e/ou geotécnicos, à precária ocupação habitacional de favelas, aos colapsos de terrenos cársticos, à disposição de resíduos sólidos, à vulnerabilidade por contaminação de aquíferos subterrâneos, entre outros (RODRIGUEZ, 1998).

Na RMSP é expressiva a presença do Aquífero Cristalino, especialmente na Região Metropolitana de São Paulo, além do restante da porção leste do estado. Este aquífero é classificado como fraturado, formado há mais de 500 milhões de anos por rochas metamórficas e ígneas. A consolidação da deposição de sedimentos sobre estas unidades mais antigas deu origem a aquíferos sedimentares, como o Aquífero São Paulo.

Segundo Iritani e Ezaki (2009), o Aquífero São Paulo é um aquífero sedimentar limitado ao sul pela Serra do Mar e ao norte pela Serra da Cantareira. Ocupa uma área de aproximadamente 1.000 km² no leste do Estado de São Paulo, abrangendo municípios como Osasco, São Paulo, São Bernardo do Campo, Guarulhos, Itaquaquecetuba, Suzano e Mogi das Cruzes.

As mesmas autoras descrevem este aquífero como heterogêneo do ponto de vista litológico, sendo caracterizado por intercalações de sedimentos, ora mais arenosos, ora mais argilosos. A espessura deste aquífero é bastante variável, com valor médio de 100 metros, podendo chegar a mais de 250 metros em algumas regiões. As maiores espessuras deste aquífero são encontradas na porção limitada entre a margem esquerda do Rio Tietê e a margem direita do Rio Tamanduateí e na região próxima ao Aeroporto de Cumbica, no município de Guarulhos.

Campos *et al.* (2002) descrevem o pacote sedimentar da Bacia de São Paulo. Na visão geral, este é composto pelas formações Resende, Tremembé e São Paulo (Grupo Taubaté) e pela Formação Itaquaquecetuba. Na sequência, encontram-se as coberturas aluvionares e coluvionares quaternárias, que ocupam as planícies dos principais rios da Bacia do Alto Tietê.

Takiya (1997), Riccomini e Coimbra (1992) e Campos *et al.* (2002) detalham cada uma das formações:

- Formação Resende: ocupa maior área e se caracteriza pela presença de depósitos de sistema de leques aluviais predominando conglomerados polimíticos, brechas e diamictitos, lamitos por vezes associados a arenitos e conglomerados do sistema fluvial;
- Formação Tremembé: camadas tabulares de argilas siltosas de coloração preta a cinza esverdeadas e de localização restrita na bacia. Em locais como nas proximidades da estação Barra Funda do Metrô (Zona Oeste), atingem espessuras de até 60 m;
- Formação São Paulo: constituída por depósitos de sistema fluvial, composta por conglomerados, arenitos com estratificação plano-paralela, passando a acanaladas e cruzadas, gradando para siltitos laminados e argilitos. Caracterizam depósitos de canal, barra de pontal e planície de inundação comumente associados a couraças ferruginosas. Sustentam altas colinas (cotas 750-760 m), como verificado no espigão central situado na região da Avenida Paulista;
- Formação Itaquaquecetuba: sequência de arenitos grossos arcoseanos, contendo estratificações cruzadas tabulares e acanaladas, de sistema fluvial entrelaçado, associado a leques aluviais. Encontram-se principalmente em cotas abaixo de 710 m, sob os sedimentos aluviais dos rios Tietê, Tamanduateí e Pinheiros. Podem conter níveis argilo-siltosos, eventualmente arenosos, de coloração castanho-escura, ricos em matéria orgânica e com elevada porcentagem de areia, variando em espessuras de 20 a 130 m, encontrados sob as aluviões dos rios Tietê, próximo ao Parque São Jorge e em Pinheiros.

Iritani e Ezaki (2009) descrevem o Aquífero São Paulo em relação à produtividade como média a baixa. Segundo as autoras, as vazões sustentáveis recomendadas pelo DAEE estão entre 10 e 40 m³/h por poço nas regiões mais arenosas e com maiores espessuras de sedimento. Nas regiões dos municípios de Mogi das Cruzes, Suzano, São Caetano do Sul, Embu Guaçu e Osasco, as vazões sustentáveis recomendadas são inferiores a 10 m³/h por poço.

A estimativa do número de poços em operação realizada em 2009 para fins de execução do Plano da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê estimou a existência de 12 mil poços profundos naquele ano, retirando uma vazão de cerca de 10 m³/s. Do total de poços, apenas 4.931 encontravam-se cadastrados no DAEE, ou seja, pouco mais de 40%. O número total de poços pode ter se elevado nos dias atuais em função da estiagem dos anos entre 2013 e 2014 (BERTOLO et al, 2014).

O Aquífero São Paulo é livre, o que facilita sua recarga pela infiltração da água de chuva. Entretanto, sobre este aquífero encontra-se a maior parte dos municípios da RMSP, onde há alta concentração populacional e de atividades industriais e comerciais, implicando um elevado risco de poluição deste aquífero (IRITANI e EZAKI, 2009).

A qualidade natural da água do Aquífero São Paulo é considerada, no geral, adequada ao consumo humano e para diversos usos. A concentração de sólidos totais dissolvidos se mantém abaixo de 500 mg/L. Há, contudo, ocorrências de poços com problemas de concentrações de fluoretos, ferro e manganês na água, os quais excedem o padrão de potabilidade. Pode haver também poluentes que se relacionam com vazamentos de tubulações de esgoto (carga orgânica) e de tanques de combustíveis em postos de serviços (hidrocarbonetos) (CAMPOS *et al.*, 2002; IRITANI e EZAKI, 2009; BERTOLO et al, 2014).

Campos *et al.* (2002) comentam que as águas subterrâneas da RMSP são classificadas como predominantemente bicarbonatadas cálcicas, com íons predominantes de HCO₃⁻ e Ca²⁺ em toda a extensão do aquífero e a presença de Na⁺ e SO₄²⁻ em pontos isolados.

De acordo com CETESB (2018), desde 1990 existe uma malha de monitoramento de águas subterrâneas no estado de São Paulo, que compreende poços tubulares utilizados principalmente para o abastecimento público de água, poços de produção de água mineral e nascentes. O monitoramento era de responsabilidade exclusiva da CETESB e, no ano de 2009, o DAEE complementou esta rede, instalando poços dedicados ao monitoramento da qualidade e da profundidade do nível da água na porção mais superficial do aquífero livre.

A publicação da avaliação dos resultados destes monitoramentos é realizada pela CETESB por meio de relatórios trienais denominados “Qualidade das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo”, sendo o último relatório publicado no ano de 2016,

com referência aos monitoramentos realizados de 2013 a 2015. A próxima publicação será, portanto, em 2019, com referência aos anos de 2016 a 2018.

A CETESB realizou ainda no ano de 2018 a publicação do primeiro Boletim de Qualidade de Águas Subterrâneas, com base no monitoramento realizado durante o ano de 2017, o qual traz em seu conteúdo resultados anuais das análises de qualidade da água bruta, sintetizados por meio do Indicador de Potabilidade das Águas subterrâneas - IPAS, e a evolução da alteração de qualidade da água por Nitrato.

Segundo a própria CETESB, os objetivos do monitoramento são:

- caracterizar a qualidade natural das águas subterrâneas;
- estabelecer Valores de Referência de Qualidade – VRQ para cada substância de interesse, por Aquífero;
- avaliar as tendências das concentrações das substâncias monitoradas; identificar áreas com alterações de qualidade;
- subsidiar as ações da CETESB para prevenção e controle da poluição do solo e da água subterrânea; avaliar a eficácia dessas ações a longo termo;
- subsidiar a formulação de ações de gestão da qualidade do recurso hídrico subterrâneo, no âmbito dos Comitês de Bacias Hidrográficas; e
- subsidiar a classificação das águas subterrâneas para o enquadramento e a cobrança pelo uso, a fim de efetuar sua proteção.

3.2.3. Legislação aplicável às águas subterrâneas brasileiras

Em 9 de maio de 1997, o Conselho Federal de Engenheiros e Arquitetos – CONFEA publicou a Decisão Normativa n. 59, a qual dispõe sobre o registro de pessoas jurídicas que atuam nas atividades de planejamento, pesquisa, locação, perfuração, limpeza e manutenção de poços tubulares para captação de água subterrânea.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH publicou em 11 de janeiro de 2001 a Resolução n. 15, que estabelece as diretrizes gerais para a gestão das águas subterrâneas. Logo em seguida, publicou a Resolução CNRH n. 22, de 24 de maio de 2002, que estabelece diretrizes para a inserção das águas subterrâneas nos Planos de Recursos Hídricos.

Quanto à questão do uso de águas subterrâneas, em 2008 foi sancionada a Resolução CONAMA n. 396, dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento de águas subterrâneas. Esta Resolução definiu seis classes para enquadramento das águas subterrâneas segundo os usos: Classe Especial; e Classe 1 até Classe 5, de forma que a Classe Especial possui o uso mais restritivo e a Classe 5 o menos restritivo. Para cada classe foram estabelecidos valores máximos permitidos para as substâncias de interesse de forma a garantir água com qualidade adequada a cada uso específico. (BRASIL, 2008; CETESB, 2016).

Sobre o mesmo assunto, a Resolução CNRH n. 91, de 5 de novembro de 2008, dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos. A Resolução CNRH n. 92, também de 5 de novembro de 2008, por sua vez, estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro.

Em 2009, a Resolução CONAMA n° 420 de 28/12/2009 publicou uma lista de valores orientadores para proteção da qualidade dos solos e águas subterrâneas visando o gerenciamento de áreas contaminadas em todo o Território Nacional (BRASIL, 2009).

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH n. 107, de 13 de abril de 2010, estabelece diretrizes e critérios a serem adotados para o planejamento, a implantação e a operação de Rede Nacional de Monitoramento Integrado Qualitativo e Quantitativo de Águas Subterrâneas.

Vale lembrar que, para consumo humano, as águas subterrâneas têm que atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria do Ministério da Saúde n. 05/2017.

No Artigo 206 da Constituição do Estado de São Paulo, as águas subterrâneas são consideradas como reservas estratégicas para o desenvolvimento econômico-social e valiosas para o suprimento de água às populações.

A Lei Estadual n. 6.134 de 2 de junho de 1988 é pioneira em relação à implementação de leis relativas a recursos hídricos subterrâneos. Essa Lei dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado e, dentre outros dispositivos, estabelece a necessidade de elaboração de programas permanentes de conservação, a obrigatoriedade de cadastramento de todo poço perfurado.

Posteriormente, a Lei Estadual n. 7.663, de 30 de dezembro de 1991 instituiu o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos e atribuiu a responsabilidade do estabelecimento dos procedimentos de licenciamento e outorga do uso de águas subterrâneas e superficiais ao DAEE. Tendo essa responsabilidade, em 12 de agosto de 2013 o DAEE emitiu a Instrução Técnica DPO n. 006, que estabelece os procedimentos para a elaboração e apresentação da documentação para o Licenciamento da Perfuração dos Poços, Outorga de Uso da água e outras atividades inerentes aos recursos hídricos subterrâneos e poços tubulares.

No âmbito do estado de São Paulo, a CETESB publicou pela primeira vez em 2001 a Lista de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas, que objetiva estabelecer critérios para proteção da qualidade dos solos e águas subterrâneas. A revisão publicada em 2014 é a terceira edição da série, sendo utilizada no gerenciamento de áreas contaminadas (CETESB, 2016).

Em 2017, a CETESB publicou a Decisão de Diretoria n. 38, que dispõe sobre a aprovação do Procedimento para a Proteção da Qualidade do Solo e das Águas Subterrâneas, a revisão do Procedimento para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas e estabelece diretrizes para o Gerenciamento de Áreas Contaminadas no Âmbito do Licenciamento Ambiental. Esta legislação traz um enfoque de prevenção da poluição e contaminação do solo e das águas subterrâneas.

3.3. Recarga de aquíferos

A recarga de aquíferos é um fenômeno natural, conforme explicado no item 3.2. Este fenômeno acontece normalmente na natureza por meio dos rios, lagos, pela infiltração de água das chuvas, e pode ser feita de maneira contínua ou descontinuada de acordo com a dinâmica da natureza.

As águas que recarregam os aquíferos infiltram nas áreas aflorantes das formações geológicas, onde o aquífero é livre. Estas regiões são denominadas de áreas de recarga (IRITANI e EZAKI, 2009).

Entretanto, existem tecnologias que possibilitam a realização da recarga de aquíferos por meios artificiais. No Brasil, os critérios e diretrizes para a recarga artificial de aquíferos são estabelecidas pela Resolução CNRH n. 153, de 17 de dezembro de 2013.

Esta norma define em seu Artigo 3º que a recarga artificial pode ser implantada a partir da superfície, com infiltração de água através de barragens, espalhamento de água, canais, valas, ou a combinação destes; ou em profundidade, com a injeção direta de água no aquífero através de poços. Entretanto, esta atividade é proibida em áreas com histórico de contaminação de solo, mesmo que reabilitadas.

No Artigo 4º, a referida Resolução define por objetivos da Recarga Artificial de Aquíferos o armazenamento de água para garantia da segurança hídrica; a estabilização ou elevação dos níveis de água em aquíferos regularizando variações sazonais; a compensação dos efeitos de superexploração de aquíferos; o controle da intrusão salina e da subsidência do solo.

Não são definidos no texto da norma padrões de qualidade da água para a recarga. Entretanto, o Artigo 8º menciona que a recarga artificial não poderá causar alteração da qualidade das águas subterrâneas que provoque restrição aos usos preponderantes.

A Resolução exige que o responsável pela implantação do sistema de recarga deve realizar estudos que contenham, no mínimo, a caracterização hidrogeológica da área de abrangência do projeto e a caracterização e dimensionamento das obras propostas. A norma deixa a critério do órgão licenciador ou gestor de recursos hídricos a exigência da caracterização da qualidade físico-química e bacteriológica da água a ser utilizada na recarga artificial e das águas dos aquíferos e da avaliação dos possíveis impactos qualitativos nos aquíferos.

Serão conceituados os métodos de recarga artificial nos itens a seguir.

3.3.1. Métodos de recarga artificial de aquíferos

Existem diversas maneiras de realizar recarga artificial de aquíferos. No caso de reservatórios menos profundos – como os aquíferos freáticos – utiliza-se recarga direta, onde a infiltração da água ocorre por meio de uma grande área de contato entre a água e o solo; em reservatórios mais profundos, a infiltração é feita por recargas indiretas, utilizando métodos de perfuração do solo (DIAMANTINO, 2005).

De acordo com Hespanhol (2003), normalmente as recargas artificiais de aquíferos são feitas por meio de poços de injeção ou por infiltração superficial utilizando bacias ou canais de infiltração. No caso de recarga por poços de injeção, há necessidade

de se projetar a construção de poços específicos para este fim, que deve se estender através da camada insaturada até o aquífero. Porém, o custo atribuído a esse método é muito elevado, tanto para construção do poço, como para a proteção da qualidade de água.

Barbosa e Mattos (2008) descrevem as formas de recarga de aquíferos existentes, conforme segue.

- **Recarga artificial à superfície**

Os métodos de recarga artificial à superfície implementados fora do leito dos rios são os seguintes:

- **Bacias de infiltração ou de recarga:** consistem em descargas de água em bacias escavadas no solo. Para maior eficácia, recomenda-se a disponibilidade de uma área de solo permeável, a presença de uma zona não saturada sem camadas impermeáveis, a presença de um aquífero freático, a ausência de zonas contaminadas na zona não saturada e no aquífero e a manutenção de um nível de água sob estes solos;

- **Represas perenes:** coletam grandes quantidades de água e possuem grandes profundidades, podendo ser utilizadas quer como fonte de água para irrigação direta quer como sistemas para aumentar a recarga de aquíferos;

- **Valas e canais:** consistem em trincheiras longas e estreitas, sendo a largura inferior à profundidade;

- **Alagamento:** método utilizado em locais de topografia plana, no qual a água pode ser desviada a partir de um rio e descarregada numa área maior. As maiores taxas de infiltração são observadas em áreas com vegetação e solo não perturbados;

- **Irrigação:** realiza frequentemente a recarga não intencional de aquíferos, como em zonas áridas e semiáridas onde a percolação profunda se baseia essencialmente na lixiviação de sais a partir da zona das raízes das plantas.

Os métodos de recarga artificial à superfície realizados no leito dos rios são estes:

- **Represas de armazenamento de areia:** são normalmente construídas de areia em rios efêmeros em vales bem definidos, de modo que a parede da represa é construída seguindo a largura do leito do rio, reduzindo as águas de cheias ou de eventos de escoamento temporários e permitindo a deposição do material mais grosseiro e a acumulação por detrás da parede da represa. Com o tempo, as sucessivas cheias originam

um aquífero artificial que permite a infiltração da água em vez do seu escoamento natural pelo rio;

- Mudança no canal de um rio: consiste na construção de barreiras no leito do rio, utilizando como material os sedimentos aluvionares dele próprio. Estas barreiras retardam o escoamento da água no rio, possibilitando a água se infiltrar no solo.

- **Recarga artificial na zona não saturada**

Os métodos de recarga de aquíferos na zona saturada são os seguintes:

- Poços: são perfurações com cerca de 10 a 50 metros de profundidade e com 1 a 2 metros de diâmetro, indicadas para recarga em aquíferos de profundidade elevada, quando a utilização deste tipo de furos é mais econômica do que a utilização de furos de recarga. São normalmente perfurados em zonas permeáveis da zona não saturada;

- Trincheiras de infiltração: são escavações com 1 metro de largura e cerca de 10 metros de profundidade, preenchidas com areia grosseira ou cascalho fino. Este método é adequado quando os solos à superfície do terreno não estão disponíveis, mas existem níveis permeáveis em profundidade, sendo esta profundidade compreendida entre 5 a 15 m, pois esta solução se torna mais econômica;

- Aquíferos artificiais: são basicamente filtros de areia que se destinam à recarga do aquífero ou ao tratamento de águas de má qualidade, construídos pela escavação de um poço, com cerca de 2 metros de profundidade, cujo revestimento lateralmente é feito com material plástico e o fundo coberto com cascalho ou de tubos drenantes. A recarga ou o tratamento se dá através da descarga do efluente no aquífero por curtos períodos de tempo.

- **Métodos de recarga artificial em profundidade**

Os métodos de recarga em profundidade recorrem normalmente à construção de furos, sendo usualmente, portanto, mais caros do que os sistemas de infiltração à superfície do solo. Por outro lado, estes métodos são tecnicamente mais simples em relação aos métodos de recarga em profundidade e podem possuir eficiência semelhante em algumas situações. São os seguintes:

- Poços de injeção: são normalmente utilizados quando o aquífero se encontra em maiores profundidades, nos casos em que os terrenos possuem custo elevado ou utilização restrita, quando não estão disponíveis zonas permeáveis na zona não saturada, quando a zona não saturada apresenta camadas impermeáveis e/ou quando os aquíferos são confinados. Estes furos permitem uma elevada taxa de recarga do aquífero e constituem uma técnica de recarga artificial onde a água é bombeada diretamente nos poços. A tecnologia para implantação e os requisitos de qualidade da água de recarga são mais exigentes do que nos sistemas de recarga à superfície. Exigem água de melhor qualidade, portanto utiliza-se água pluvial coletada nos telhados devido sua melhor qualidade em comparação à de escoamento superficial. Os poços projetados estendem-se através da camada insaturada até o aquífero. Os custos envolvidos são significativamente elevados tanto no que se refere à construção do poço quanto em relação aos níveis de tratamento necessários para a proteção da qualidade de água do aquífero;

- Poços de armazenamento subterrâneo e de extração: são variantes dos poços de injeção, constituindo uma técnica de recarga artificial recente que requer a utilização de poços combinados de recarga e de extração de água;

- Poços conjuntivos: a água é extraída do aquífero profundo rebaixando-se a sua superfície potenciométrica para valores abaixo do nível da água no aquífero superior, induzindo a sucção direta da água do aquífero mais superficial para o mais profundo por meio de ralos abertos no aquífero confinado e no profundo artesianos. Possui a vantagem de utilizar como água de recarga a água subterrânea que não contém sólidos suspensos, reduzindo significativamente o risco de colmatação dos ralos;

- Barreira infiltração: consiste geralmente numa galeria ou linha de furos pouco distantes e paralelos ao leito do rio. A extração neste conjunto de furos rebaixa o nível piezométrico e conseqüentemente o nível da água no rio ou no lago, induzindo a água do rio a infiltrar-se no aquífero subjacente. Para garantir uma purificação satisfatória da água do rio pelo solo, o tempo de infiltração deverá exceder entre 30 a 60 dias;

- Grandes cavidades profundas no solo: é aproveitamento de cavidades características de terrenos calcários carsificados para a introdução de água no aquífero;

- Drenos e galerias: são construídos no fundo de um poço através dos quais se introduz a água para recarga;

- Valas e sondagens: sistema formado por uma grande vala de infiltração pouco profunda, com areia calibrada, dentro da qual se colocam sondagens de recarga.

- **Sistema TSA – Tratamento Solo Aquífero**

O sistema de Tratamento Solo Aquífero (TSA) é um método que vem sendo empregado em diferentes locais do mundo, e que tem obtido bons resultados. Trata-se de uma técnica empregada para recarga de aquífero em instalações superficiais de infiltração como bacias ou canais de infiltração, proporcionando o tratamento do efluente enquanto percola através do solo, da camada insaturada e no aquífero (HESPANHOL, 2003).

Esta metodologia proporciona níveis de tratamento elevado em relação a compostos orgânicos como remoção de DBO, DQO, bem como de organismos patogênicos como coliformes fecais, *Cryptosporidium sp*, *Giardia lamblia* e vírus, e também de compostos inorgânicos como nitrogênio e metais pesados (HESPANHOL, 2003).

Para que essa metodologia tenha resultados favoráveis, se faz necessário o respeito aos seguintes requisitos:

- solo permeáveis com taxas de infiltração razoáveis;
- solos permeáveis com taxas de infiltração favoráveis;
- camada insaturada com espessura suficiente para estocar o volume de recarga necessário;
- ausência de camadas impermeáveis que causem excessiva acumulação da água infiltrada em aquíferos suspensos, situados acima dos aquíferos principais;
- distribuição granulométrica na camada insaturada superior que suporte a prática do sistema TSA, isto é, que permita remoção de contaminantes sem prejudicar significante a percolação vertical;
- coeficientes de transmissividade que não causem retenção excessiva de água nos aquíferos;
- aquíferos não confinados (HESPANHOL, 2003, p. 55).

Além disso, o autor ainda menciona que, os custos associados à implantação dos sistemas TSA, são em média 40% mais baratos do que o próprio sistema convencional de tratamento de esgoto.

3.4. Reúso de água para recarga de aquíferos

A recarga dos aquíferos pode ser feita de maneira artificial por meio da infiltração de água de reúso. De acordo com Crook (1993) e Hespanhol (2003), essa prática é realizada com objetivo de evitar a intrusão de água salina em aquíferos de água doce, armazenar água de qualidade para uso futuro, controlar ou prevenir a ocorrência de recalques no solo e evitar o rebaixamento dos níveis de reservatórios subterrâneos.

A Agência de Proteção Ambiental Australiana (2005) destaca, além dos usos já citados, o incremento da disponibilidade de água para irrigação ou mesmo como reservatório água para usos potáveis e não potáveis como aplicações potenciais desta técnica.

Hespanhol (2003) descreve que o processo de infiltração e percolação de efluentes tratados favorece a biodegradação e depuração dos solos, ocasionando um processo de tratamento *in situ*, e que, em função das características de cada local e do tipo de uso previsto, pode excluir a necessidade de sistemas de tratamento avançados. Crook (1993) complementa, afirmando que nas camadas superiores do solo, altos níveis de micro-organismos e até mesmo algumas substâncias químicas e elementos metálicos traço podem ser removidos.

Entretanto, Crook (1993) lembra que o tratamento complementar realizado durante a infiltração do efluente do solo depende das características hidrogeológicas do mesmo. A recarga por injeção direta requer uma alta qualidade do efluente para que não ocorram obstruções por partículas, precipitações químicas ou proliferações biológicas.

Hespanhol (2002) afirma que aquíferos subterrâneos se comportam como reservatórios naturais e operam como sistemas de transporte de efluentes tratados, eliminando custos relativos às implantações de sistemas transportadores de efluentes tratados.

De forma geral, pode-se dizer que no âmbito dos problemas enfrentados na Região Metropolitana de São Paulo, os aquíferos podem ter contribuição relevante atuando como

reservatórios de água para suprimento de necessidades de água de uso potável ou não potável. Moura (2004) considera esta uma possível alternativa para aumentar o nível de água dos aquíferos, por se tratar de uma alternativa rápida e eficiente para manter ou elevar o volume desses reservatórios.

3.4.1. Principais limitações

A recarga de aquíferos com efluentes tratados possui limitações e riscos em comum com os tratamentos para obtenção de água de reúso em geral: alta complexidade do tratamento, custo elevado e riscos à saúde pública relacionados à presença substâncias químicas perigosas e/ou de patógenos.

A Agência de Proteção Ambiental da Austrália (2005) reconhece que não é possível implementar a recarga gerenciada de aquíferos utilizando águas residuárias tratadas sem algum grau de risco, porém estes riscos devem ser avaliados em função dos potenciais benefícios ambientais e de sustentabilidade destes sistemas em relação aos riscos associados a não tomada de medidas. Este órgão espera que em uma série de situações, os riscos associados a esta técnica possam ser gerenciados a níveis insignificantes ou baixos para fornecer, em equilíbrio, uma série de benefícios para os recursos hídricos e a gestão sustentável do meio ambiente.

A seguir, destacam-se as limitações particulares a esta técnica.

3.4.1.1. Aspectos técnicos

Os aspectos técnicos referem-se principalmente a complexidade do tratamento do efluente necessária para a realização da recarga, como:

- a probabilidade de que partes significativas da água infiltrada não sejam recuperadas é muito grande;
- dependendo das taxas de infiltração e características locais do solo, poderão ser necessárias áreas muito grandes para as bacias de infiltração;
- a área necessária para as atividades de operação e manutenção de um sistema de abastecimento desenvolvido através de água subterrânea (sistema de tratamento, sistema de infiltração ou injeção e poços de recuperação) é, geralmente, superior à área necessária para um sistema de abastecimento convencional;

- demandas de emergência não podem ser atendidas em razão das características de suprimentos dos aquíferos subterrâneos, caracterizados por capacidade de escoamento bastante baixa (OAKSFORD, 1985 apud HESPANHOL, 2003, p. 56-57).

3.4.1.2. *Aspectos econômicos*

A complexidade técnica do tratamento do efluente pode influir no custo da implantação da tecnologia da seguinte forma:

- os custos de recarga por poços de injeção, incluindo os relativos a tratamento de efluentes, energia elétrica e construtivos, podem ser excessivamente altos.
- estruturas institucionais inadequadas e ausência de legislação específica podem ser insuficientes para proteger os direitos sobre a água e levar a problemas de responsabilidade legal, particularmente nos aspectos concernentes à outorga e à cobrança pelo uso da água subterrânea (OAKSFORD, 1985 apud HESPANHOL, 2003, p. 56-57).

3.4.1.3. *Riscos de saúde pública e impactos ambientais*

De acordo com orientações da SABESP (2010), considerando-se as aplicações potenciais para a água de reúso, o risco mais relevante a ser considerado é a contaminação microbiológica da água, principalmente se a origem da água de reúso forem os esgotos domésticos, tendo-se como principais grupos de risco os operadores dos sistemas de produção e distribuição da água de reúso e usuários finais, além das pessoas expostas direta ou indiretamente expostas à água de reúso.

Nem sempre o tratamento é suficiente para remover contaminantes, por exemplo, organismos patogênicos, que podem causar riscos à saúde da população. Outros compostos que podem oferecer riscos, são os interferentes endócrinos e fármacos, que podem representar não só efeitos à saúde, mas também ao meio ambiente.

A recarga de aquíferos com efluente tratado realizada sem gerenciamento pode aumentar a possibilidade de contaminação dos aquíferos, afetando a qualidade da água subterrânea. Para realizar a recarga com menor risco, muitas vezes é necessário limitar a

vazão de recarga e realizar a mistura prévia (*blend*) com água potável ou do próprio aquífero.

Em relação às tecnologias de recarga, os riscos da execução por poços de injeção são maiores do que os associados à recarga através de bacias de infiltração, uma vez que a ocorrência de deficiências, mesmo de curto prazo, nos sistemas de tratamento pode levar a contaminação nos aquíferos (OAKSFORD, 1985 *apud* HESPANHOL, 2003, p. 56-57).

3.4.2. Experiência brasileira: Aeroporto Internacional Governador André Franco Montoro, Guarulhos/SP

Okpala (2011) realizou um estudo piloto sobre a recarga gerenciada de aquíferos no Aeroporto Internacional Governador André Franco Montoro, em Guarulhos, São Paulo, aplicando um sistema solo-aquífero.

De acordo com o autor, o uso de água pelo aeroporto depende totalmente de água subterrânea para suprir as suas necessidades diárias. Com o aumento do fluxo de usuários e o problema relacionado com a escassez hídrica no Estado de São Paulo, a Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroportuária (INFRAERO) buscou outras fontes de abastecimento, optando pela recarga artificial do aquífero, técnica mais econômica do que a compra de água das concessionárias. O modelo experimental escolhido para pesquisa foi o sistema TSA, já utilizado por vários países do mundo.

Consistiu em infiltrar nas colunas de recarga com esgotos secundários produzidos no aeroporto, após passagem por duas lagoas de retenção, a infiltração do mesmo efluente tratado por processo físico-químico de coagulação/floculação/sedimentação, e pelo mesmo efluente das lagoas de retenção após o tratamento por um sistema de membrana de ultrafiltração.

Em análise realizada pelo autor quanto ao tipo de solo do aeroporto, pode-se constatar que solo era composto por uma camada impermeável, dificultando o processo de infiltração. Uma alternativa levantada pela pesquisa seria a remoção do solo impermeável e inserção de areia no lugar. Porém, além de a areia não possuir capacidade de retenção de compostos solúveis, os custos com transporte e instalação, também tornariam inviáveis a sua aplicação. A alternativa mais viável seria efetuar a recarga em níveis mais profundos do aquífero, onde o solo possui melhores características para remoção de poluentes.

Os resultados demonstraram que, todas as etapas da pesquisa atenderam parcialmente a legislação de potabilidade vigente no momento do estudo. Outro ponto também verificado é a questão da lixiviação de alumínio e ferro, problema que deverá ser enfrentado futuramente pelo sistema. O autor também enfatiza o pouco tempo para a realização do trabalho e a limitação na infiltração do aquífero em somente 4 metros de profundidade do solo. Segundo o pesquisador, é possível obter resultados mais satisfatórios em maiores profundidades, uma vez que o aquífero possui 150 metros de profundidade, o que proporcionaria a remoção de poluente de maneira significativa, indicando então a continuidade do estudo.

Por fim, o autor também destaca que, a falta de experiências brasileiras sobre a recarga de aquífero com água de reúso, restringe a tomada de decisão para adoção dessa prática no Brasil.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização da área de estudo

4.1.1. A Região Metropolitana de São Paulo – RMSP

Notadamente a maior e mais importante aglomeração urbana do Brasil e da América do Sul, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) concentra 39 municípios e é o maior polo de riqueza nacional. Criada em 1973, foi reorganizada em 2011. (EMPLASA, 2016).

Seu Produto Interno Bruto (PIB) corresponde a cerca de 18% do total brasileiro e a mais da metade do PIB paulista (55,47%), representando o maior polo econômico do estado de São Paulo e do país.

A metrópole centraliza importantes complexos industriais (São Paulo, ABC, Guarulhos e Osasco), comerciais e, principalmente, financeiros (Bolsa de Valores), que controlam as atividades econômicas no país. O sistema principal de tratamento de esgotos da RMSP, composto por cinco ETEs, atende 24 destes 39 municípios (ainda que alguns de forma parcial).

A população total estimada na RMSP e sua projeção, realizadas pelo PDE (2010), é apresentada a seguir, na Tabela 4:

Tabela 4: Projeção do crescimento populacional estimado na RMSP.

Ano	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030
População Estimada (hab.)	17.852.637	18.889.360	19.975.328	20.927.493	21.748.867	22.471.705	23.045.317

Fonte: PDE (2010).

O estudo do plano diretor considera para a projeção de vazões de esgoto e população atendida, dois cenários para os próximos 30 anos, de acordo com premissas e desenvolvimento conforme levantado pelo próprio estudo. Ambos cenários contam com a suposta universalização do sistema de esgotamento sanitário, sendo que no primeiro ela ocorrerá em 2018 e no segundo em 2023.

4.1.2. A Bacia Hidrográfica do Alto Tietê – UGRHI 06

A área de estudo está 99% instalada no território da Bacia do Alto Tietê. Esta bacia corresponde à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHI de número 6 (seis). A população é essencialmente urbana, com 20.114.410 habitantes no ano de 2014 e a área territorial é de 6.570 km².

Os principais rios da UGRHI são: Tietê, Pinheiros, Tamanduateí, Claro, Paraitinga, Jundiaí, Biritiba-Mirim, Taiaçupeba-Açu, Guaió, Baquirivú-Guaçu, Cabuçu de Cima, Cabuçu de Baixo, Juqueri, Itaquera, Jacu e Aricanduva. Os ribeirões são dos Meninos e Couros e o Córrego Pirajussara. Com base no Plano Diretor de Abastecimento de Água da Região Metropolitana de São Paulo, realizado pelo Consórcio Hydroconsult/Encibra em 2004, vazão média é de 84 m³/s e a reserva explotável dos aquíferos corresponde a 11 m³/s (FABHAT, 2015).

4.2. Etapas da pesquisa

A metodologia utilizada neste estudo para avaliar a viabilidade da aplicação da tecnologia de recarga de aquíferos com efluente tratado nas ETEs da RMSP recorreu à pesquisa exploratória, com levantamento de revisão bibliográfica e de estudos de caso. Para o alcance dos resultados desejados, serão utilizados dados secundários obtidos através das pesquisas realizadas.

Ainda que o objetivo do trabalho seja verificar o potencial de adoção desta tecnologia, são necessários estudos mais aprofundados para análise de uma possível execução. Cabe ressaltar que, embora este trabalho avalie apenas o aspecto qualitativo do efluente ou da água de reúso, a recarga de aquíferos sempre deve ocorrer em solo geologicamente conhecido.

Neste momento do trabalho, também é importante lembrar que serão analisados casos de diversos países, o que naturalmente traz as distintas realidades de cada um deles. Portanto, nem sempre a realização de comparativos pode ser viável, o que é uma limitação deste estudo.

O trabalho foi desenvolvido em etapas, conforme descrição a seguir.

4.2.1. Etapa 1: Pesquisa e adoção de requisitos mínimos de qualidade do efluente tratado para recarga em aquíferos

4.2.1.1. Estudos de caso

A tecnologia de recarga de aquíferos com efluentes tratados é aplicada em diversos locais do mundo. Durante esta etapa foi realizado o levantamento da literatura internacional em livros, artigos científicos, periódicos, revistas técnicas e bancos de dados técnicos, com objetivo de selecionar plantas de tratamento de esgotos nas quais se aplica a recarga de aquíferos para realizar estudos de caso.

Buscando tornar esta pesquisa representativa, foram selecionadas plantas de tratamento de esgotos em países diferentes entre si e, quando possível, também localizados em continentes distintos, contemplando realidades culturais e econômicas heterogêneas.

A finalidade do reúso de água (potável ou não potável) não foi utilizada como critério de escolha dos casos a serem estudados. Desta forma, foi possível analisar a aplicabilidade da tecnologia da recarga de aquíferos para reúso de água com variados objetivos.

Foram então eleitas as seguintes plantas: Shafdan (Israel), Sabadell (Espanha), Adelaide (Austrália)¹ e Atlantis (África do Sul).

Para estas plantas foram realizados estudos sobre os processos de tratamento vigentes e levantamento das características qualitativas dos efluentes tratados nas plantas selecionadas para estudo, considerando as seguintes variáveis: vazão de recarga (m³/ano), sólidos suspensos (mg/L), carbono orgânico dissolvido (mg/L), DBO (mg/L), fósforo total (mg/L), nitrato (mg/L), *Escherichia coli* (UFC/100 mL), coliformes totais (UFC/100 mL), manganês (mg/L) e condutividade (µS/cm), pois estavam disponíveis na literatura consultada.

Especificamente com relação ao nitrato, deve-se alertar que este foi o parâmetro encontrado em literatura, porém é imprescindível a análise de todo o ciclo do nitrogênio para garantir que não haja potencial para formação de nitrato ao longo do tempo. De acordo com Varnier e Hirata (2002), este composto é potencialmente causador de metahemoglobinemia e câncer, quando em concentrações elevadas.

¹ Estação de tratamento de águas pluviais.

O objetivo deste passo é conhecer as práticas internacionais para adotar referências ao presente estudo em relação às tecnologias de tratamento de efluentes empregadas em sistemas de recarga de aquíferos.

4.2.1.2. *Levantamento de legislações pertinentes*

Primeiramente foram observadas as legislações brasileiras sobre o assunto. No Brasil, os critérios e diretrizes para a recarga artificial de aquíferos são estabelecidas pela Resolução CNRH n. 153, de 17 de dezembro de 2013. Esta norma define métodos permitidos para recarga, proíbe a recarga em áreas com histórico de contaminação de solo e define os objetivos da recarga artificial de aquíferos, todavia não define padrões de qualidade da água para a recarga, mencionando que esta atividade não poderá causar alteração da qualidade das águas subterrâneas restringindo seus usos preponderantes.

Com o objetivo de adotar limites de qualidade numéricos para o efluente a se recarregar em um aquífero, foram também levantados os requisitos de qualidade da água exigidos por legislações e regulamentações internacionais publicadas pela *United States Environmental Protection Agency* – USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) e pela Espanha.

O manual técnico da USEPA (2012) intitulado *Guidelines for Water Reuse* estabelece em seu Capítulo 4 uma coletânea das regulamentações estaduais sobre o reúso de água. O Estado da Flórida apresenta maior quantidade de parâmetros abrangidos, por isso foi escolhido nessa análise. Cabe ressaltar que neste caso estão sendo utilizados dados para recarga de aquíferos com finalidade de uso não potável.

A legislação espanhola, com o Decreto Real 1620/2007, estabelece requisitos mínimos para recarga em duas diferentes condições: para infiltração localizada através do solo ou para injeção direta no aquífero. Como nos casos estudados o método de recarga utilizado é a infiltração do efluente no solo, optou-se por utilizar os requisitos da primeira condição exposta. Para os valores de carbono orgânico total e DBO, a pesquisa foi complementada com requisitos para efluentes tratados estabelecidos pelo Decreto Real 509/1996.

Os dados levantados das legislações consideraram as seguintes variáveis: sólidos suspensos (mg/L), carbono orgânico dissolvido (mg/L), DBO (mg/L), nitrato (mg/L), *Escherichia coli* (UFC/100 mL), pois estão disponíveis nestas legislações.

Com base nessas informações, serão adotados os requisitos mínimos necessários para a recarga de aquíferos com efluente tratado que, de acordo com os critérios adotados no presente estudo, serão equivalentes aos valores menos restritivos encontrados para cada parâmetro avaliado.

4.2.2. Etapa 2: Análise da replicabilidade da tecnologia de recarga de aquíferos com água de reúso

Após a adoção dos requisitos para recarga, foi realizada uma avaliação comparativa destes requisitos em quatro cenários distintos.

O primeiro deles é com base na legislação que seguem as ETEs da RMSP. Foram selecionadas para o estudo as cinco Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs localizadas na área de abrangência da pesquisa, a Região Metropolitana de São Paulo e que tratam as maiores vazões. As ETEs estudadas compõem o sistema principal de tratamento de esgotos na RMSP e foram escolhidas por esse motivo.

O efluente tratado deve obedecer aos padrões estabelecidos no Decreto Estadual n. 8.468/76. Foram utilizados os requisitos preconizados nesta legislação como base de comparação com os padrões de recarga definidos neste trabalho.

Na sequência, será feito o mesmo processo utilizando as características do efluente secundário de uma das ETEs da RMSP. Esses dados foram obtidos a partir de uma apresentação de Gomes (2016) disponível em meio eletrônico.

O terceiro cenário trata das características da água de reúso produzida para fins urbanos em algumas das ETEs da RMSP. Para tanto, foi caracterizado o tratamento realizado pela concessionária local em suas ETEs para produzir a água de reúso. Para realizar o comparativo, foram utilizadas informações disponibilizadas em meio eletrônico por esta concessionária sobre os requisitos de qualidade da água de reúso disponibilizada nas ETEs da RMSP.

O último cenário comparativo será feito utilizando dados da água de reúso produzida em uma EPAR localizada na RMSP, denominada Aquapolo, a qual representa a melhor tecnologia de produção de água de reúso disponível na área de estudo. Será também feita uma breve descrição das etapas do tratamento.

Analisando cada um dos parâmetros individualmente, quando os valores observados para o efluente tratado e para a água de reúso produzida nas ETEs da RMSP atenderem aos requisitos mínimos para recarga de aquíferos, o parâmetro será classificado como “ATENDE”, ou seja, está em conformidade com o limite adotado. Caso contrário, será dada a classificação “NÃO ATENDE”.

O efluente tratado e a água de reúso produzida serão considerados adequados para a utilização em recarga de aquíferos quando obtiverem a classificação “ATENDE” para todos os parâmetros avaliados e quando obedecerem aos requisitos mínimos do nível de tratamento adequado para realização da recarga.

4.2.3. Etapa 3: Levantamento de custos

Para a obtenção dos custos da operação de um sistema de tratamento e recarga de aquíferos, foram primeiramente levantados os custos de produção de água de reúso na RMSP publicados no Plano Diretor de Esgotos no ano de 2010.

Este estudo realiza uma estimativa de custos, resultando em valores indicativos de custos para produção de água de reúso, considerando-se níveis de tratamento diferenciados.

O estudo verificou que os requisitos de qualidade da água de reúso em função da sua aplicação exigem uma sequência básica de tratamento comum, com exceção da necessidade de implantar, no caso do reúso para fins industriais, um sistema de desnitrificação nas estações. Foram consideradas no estudo, por estas razões, duas condições básicas para obtenção dos custos: a implantação de um sistema de desnitrificação, ou de um sistema de clarificação seguido de desinfecção para produção de água de reúso.

Considerou-se importante avaliar os custos a implantação do tratamento do efluente adequado para a prática da recarga de aquíferos, por ser o objeto deste trabalho. Portanto, o valor em dólar por metro cúbico (US\$/m³) de água de reúso produzida com desnitrificação foi o dado utilizado para a análise. Este valor representa o custo do tratamento para obtenção de um efluente com qualidade suficiente para se recarregar em um aquífero, de acordo com os requisitos adotados neste trabalho.

Com objetivo de estimar um valor global para o sistema de tratamento e recarga de aquíferos, buscou-se os valores de recarga, em US\$/m³ de água infiltrada no aquífero, para a planta de Shafdan. Optou-se por essa planta por ser a maior e possuir mais estudos que dão consistência ao valor utilizado. Os custos obtidos para esta planta representam os custos de armazenamento, transporte, operação e manutenção deste sistema de recarga de aquíferos.

O valor em US\$ por metro cúbico de água de reúso produzida e infiltrada foi obtido pela soma dos dois valores obtidos anteriormente.

5. RESULTADOS

5.1. Estudos de casos internacionais

5.1.1. Tel-Aviv (Israel)

Israel é um país de clima semiárido, com insuficiência de recursos hídricos. Segundo o Consórcio PCJ (2015), a Mekorot, companhia responsável por 70% do abastecimento de água em Israel e se destaca pelo alto investimento em tratamento de efluentes e reúso de água. Com a realidade da escassez hídrica, a região já é abastecida por água potável proveniente de processos de dessalinização e o reúso de água é prática consolidada no local.

A cidade de Tel-Aviv, por exemplo, possui atualmente 100% da água reaproveitada através do tratamento de esgotos, infiltração no solo e posterior reaproveitamento para usos urbanos, domésticos, industriais e, principalmente, na agricultura.

A recarga de aquíferos começou a ser planejada na região na década de 1960 com o projeto de tratamento de esgotos e reúso de água para a região de Dan, mais conhecida pelo nome Hebreu Shafdan. O sistema Shafdan foi construído por Igudan Infraestruturas Ambientais, a fim de tratar as águas residuais da região e reciclá-las em água que pode ser usada para irrigação agrícola para todos os tipos de culturas em Israel, como laranjas, cenouras, batatas, alface e flores, por exemplo, sem qualquer limitação (COSTA e ARAÚJO, 2015).

A planta de Shafdan é a maior do país, onde são tratados 3,47 m³/s de esgotos por um sistema avançado de tratamento de efluentes. Ela atende toda a região metropolitana de Tel-Aviv e algumas regiões vizinhas, o que corresponde a cerca de 2 milhões de pessoas, tornando-se o maior produtor de água em Israel a partir de uma única fonte.

O processo de tratamento contempla as etapas de tratamento secundário e terciário, nos quais ocorrem a remoção de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo através de processo biológico de lodos ativados, seguido de ultrafiltração por membranas.

O tratamento produz um efluente de alta qualidade e, após a conclusão do processo, o efluente tratado é infiltrado no aquífero a 120 metros de profundidade abaixo da estação de tratamento, quando o efluente sofre novamente oxidação e filtração, garantindo a turbidez máxima de 0,5 NTU. O aquífero é não confinado e o solo é

predominantemente formado por areia e arenito, ou seja, muito poroso, facilitando a infiltração.

A água permanece armazenada no aquífero de 180 a 360 dias, quando é captada novamente e submetida a desinfecção por cloração. O efluente tratado é enviado para o Deserto Negev (sul do país), onde atualmente cerca de 70% da atividade agrícola é irrigada através destes efluentes, economizando milhões de metros cúbicos de água potável em Israel (COSTA e ARAÚJO, 2015).

O deserto se localiza a quase 100 km de distância da planta e a água é conduzida até seu local de utilização por meio de uma adutora, denominada “Terceira Linha” (*Third Line*).

5.1.2. Atlantis (África do Sul)

Atlantis é um município litorâneo de cerca de 60 mil habitantes que faz parte da região metropolitana da Cidade do Cabo. Inicialmente, a ideia de se fazer a recarga de aquíferos na região era obter uma alternativa à disposição de efluentes no mar. Porém, verificou-se que o aquífero era pequeno para este uso, o que impulsionou a ideia do reúso de água utilizando a recarga do aquífero, considerando também a possibilidade de evitar a salinização por se tratar de um aquífero costeiro.

No município, o tratamento dos esgotos domésticos e industriais é feito separadamente e apenas o doméstico é tratado para reúso. O esgoto doméstico é misturado com a água de escoamento pluvial captada. Este é submetido a um tratamento biológico com etapas de nitrificação e desnitrificação (anaeróbio-anóxico-aeróbio) para remoção de nitrogênio.

Posteriormente é encaminhado para a etapa de polimento em lagoas de maturação e por fim faz-se a recarga do aquífero por meio de bacias de infiltração. O aquífero é não confinado e o solo é predominantemente arenoso, armazenando a água de 150 a 210 dias.

A água captada do aquífero é submetida ao pós-tratamento, com troca iônica e cloração. A água de reúso é então distribuída à população para uso potável.

5.1.3. *Sabadell (Espanha)*

Sabadell é um município que se localiza a pouco mais de 20 km ao norte de Barcelona, na Catalunha, Espanha. Possui uma população de cerca de 200 mil habitantes e dois sistemas de tratamento de esgotos que atendem metade da população cada. O sistema a ser estudado no presente item é a Planta de Tratamento de Esgotos do Rio Ripoll.

A capacidade máxima de tratamento é de 30.000 metros cúbicos por dia, porém a operação gira em torno de 16.000 metros cúbicos por dia. O processo de tratamento consiste na coleta dos esgotos por gravidade até uma estação elevatória, onde se realiza também o pré-tratamento para remoção de sólidos grosseiros e após esta etapa ocorre o bombeamento até a ETE. Na ETE existe uma nova etapa de pré-tratamento (que concluíram ser desnecessária e atualmente está desativada), o tratamento físico-químico (que a operadora considera opcional), tanques de sedimentação e, por fim, a remoção de nutrientes.

A recarga do aquífero, o qual se classifica como não confinado, é possível graças ao processo de filtração no leito do rio, quando parte da água se infiltra no solo formado basicamente por areia e cascalho. Para tanto, foram construídos três emissários que fazem a descarga do efluente tratado no rio em pontos diferentes. Esta água fica armazenada no aquífero por tempo indeterminado e é recuperada na área de Torrella Mill, onde sofre processo de desinfecção com ultravioleta e cloro, sendo posteriormente utilizada para irrigação, paisagismo e limpeza de ruas (Figura 6).

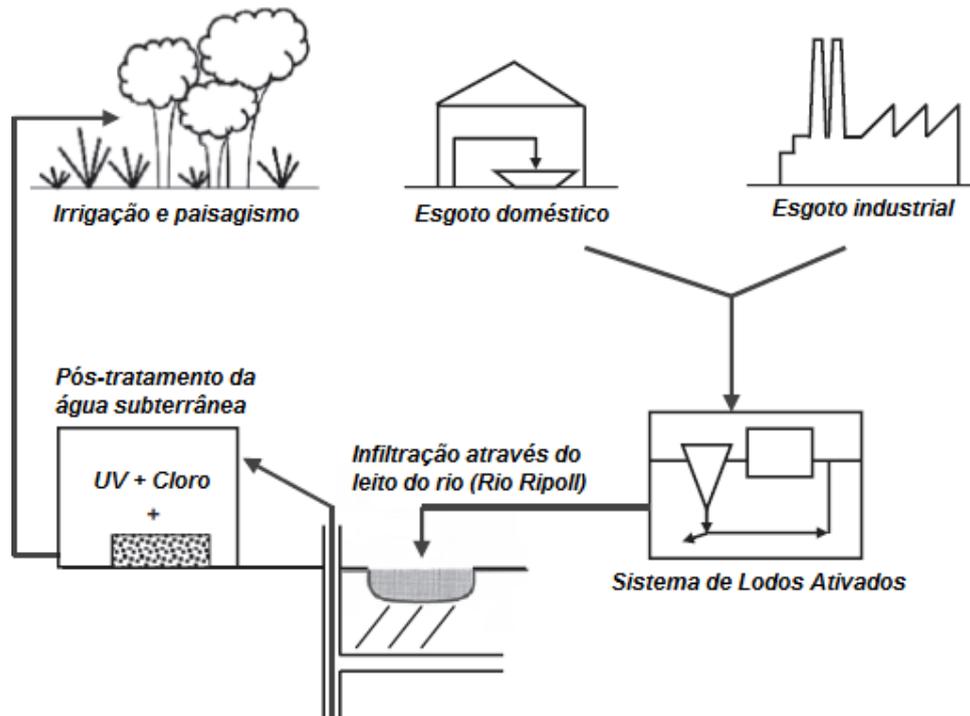


Figura 6: Esquema do sistema de água de reúso na planta do Rio Ripoll, Sabadell (adaptado de AYUSO-GABELLA e SALGOT, 2012).

Além da questão do reúso de água, a Espanha utiliza esta técnica para controle dos níveis de aquíferos, pois muitos se encontram em rebaixamento devido à superexploração.

5.1.4. Adelaide (Austrália)

Adelaide é a capital do sul da Austrália. É um município que apresenta um clima seco e, pelo motivo da baixa disponibilidade hídrica, realiza o uso racional da água através da aplicação de diversas tecnologias há vários anos.

A planta de tratamento de Adelaide, localizada na região de Sailsbury, trata água de chuva captada por um tratamento de Wetlands, removendo principalmente fósforo e nitrogênio.

Faz-se a recarga do aquífero com a água de chuva tratada por bacias de infiltração através do método *Aquifer Storage Transfer and Recovery* (ASTR), que consiste na infiltração de água em um campo de infiltração e captação em outro com objetivo de

aumentar o tempo de residência da água no aquífero devido à distância percorrida. Neste caso, o tempo de detenção é de cerca de 200 dias.

A água captada do aquífero não passa por pós tratamento e seus usos preponderantes são em indústrias, irrigação e produção de água potável. Porém, o principal fator motivador para a recarga foi a alta capacidade de armazenamento de água do aquífero local e, em contrapartida, seus problemas de salinização e condutividade elétrica alta.

Este é, portanto, um exemplo de aplicação desta técnica não com objetivo de aumentar a disponibilidade de água para a população com a recarga do aquífero, mas também promover a melhoria da qualidade da água nele existente.

5.2. Características qualitativas dos efluentes tratados para recarga artificial de aquíferos a partir dos estudos de caso

A partir dos estudos das plantas de Shafdan (Israel), Atlantis (África do Sul), Sabadell (Espanha) e Adelaide (Austrália), realizados no item 5.1, foram levantados os dados qualitativos do efluente final de todos eles, quando disponíveis na literatura consultada.

Os parâmetros avaliados foram: Sólidos suspensos totais, Carbono orgânico dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, Fósforo total, Nitrato, Escherichia coli, Coliformes totais, Manganês e Condutividade. Estes parâmetros não foram analisados simplesmente do ponto de vista qualitativo. Foi traçado um paralelo com o processo de tratamento em operação em cada uma das plantas estudadas. Estas informações estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5: Dados qualitativos dos efluentes tratados para recarga de aquíferos conforme estudos de caso.

Planta de tratamento	Características do tratamento		Características do efluente para recarga								
	Processo pré-recarga	Vazão de recarga (m³/ano)	Sólidos suspensos (mg/L)	Carbono Orgânico Dissolvido (mg/L)	DBO (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Nitrato (mg/L)	E. Coli (UFC/100 mL)	Colif. totais (UFC/100 mL)	Manganês (µg/L)	Condutividade (µS/cm)
Shafdan	Tratamento biológico (remoção de matéria orgânica, N e P) + UF por membranas	120 x 10 ⁶	5	40	5,2	1,8	3	8,6 x 10 ⁴	9,8 x 10 ⁵	25	1800
Atlantis	Tratamento biológico (remoção de N)	-	5,7	26	-	2,5	3,7	2,2 x 10 ³	5,0 x 10 ³	50	590
Sabadell	Físico-químico + sedimentação + remoção de nutrientes	6,9 x 10 ⁶	11,4	67	6	-	5	9,9 x 10 ⁴	-	40	2200
Adelaide⁽¹⁾	Wetlands (remoção de N e P)	2,0 x 10 ⁶	13	85	6	< 1,0	< 1,0	4,6 x 10 ²	4,6 x 10 ²	70	1100

(1) Estação de Tratamento de Águas Pluviais.

A realização da recarga deve observar, além da qualidade do efluente a se infiltrar, as características do solo, do aquífero e as vazões permitidas em cada um dos casos. Estas características podem também restringir o método de recarga: parâmetros de qualidade devem ser mais rigorosos para injeção direta e menos rigorosos para infiltração no solo.

Observa-se que, em todos os estudos de caso realizados, o processo comum obrigatório para a recarga é a remoção de nitrogênio, independentemente da técnica utilizada para tal.

5.3. Requisitos mínimos de qualidade adotados para recarga de aquíferos com efluente tratado

Para determinar os requisitos mínimos de qualidade do efluente para recarga de aquíferos foram utilizadas legislações nacionais e internacionais sobre o assunto.

Primeiramente, verificou-se que a legislação brasileira sobre o assunto – Resolução CNRH n. 153/13 – conforme cita o item 3.3 deste trabalho, define métodos de recarga e seus objetivos, restringe a execução em áreas com histórico de contaminação de solo, proíbe a alteração da qualidade das águas subterrâneas que afete seus principais usos e exige a execução de caracterização hidrogeológica da área de recarga. Todavia, a norma não determina nenhum requisito de qualidade do efluente para recarga em aquíferos.

Partindo para a esfera internacional, a legislação da EPA Americana é dividida por estados para tratar deste assunto. A maioria dos estados onde se realiza a prática da recarga de aquíferos não padronizam requisitos de qualidade do efluente para este fim. Em suas legislações, guias e manuais de boas práticas, ricas em informações para água de reúso e para a recarga de aquíferos, recomenda-se a análise caso a caso durante as fases de concepção do projeto, de forma a analisar o tratamento, uso, qualidade da água do aquífero, características regionais do solo, dentre outros fatores relevantes na aplicação desta tecnologia.

Ainda assim, nos Estados Unidos, alguns estados determinam requisitos mínimos de qualidade do efluente para recarga de aquíferos, a exemplo do estado da Flórida. Serão, portanto, utilizados os parâmetros deste estado para análise dos requisitos mínimos do efluente para recarga.

A legislação europeia, neste trabalho representada pela legislação espanhola, estabelece no Decreto Real 1620/2007 alguns requisitos qualitativos para recarga de aquíferos com efluentes

tratados pelo método de infiltração localizada através do solo. Estes parâmetros foram complementados com requisitos para efluentes tratados estabelecidos pelo Decreto Real 509/1996.

Embora para fins deste estudo tenham sido considerados apenas parâmetros qualitativos dos efluentes, é importante ressaltar que as legislações e manuais técnicos internacionais estudados regulamentam não somente os padrões de qualidade, mas também as vazões de recarga, área de recarga, tempo de detenção do efluente em bacias de infiltração e até mesmo a distância entre elas.

Para definição dos requisitos mínimos de qualidade do efluente para recarga de aquíferos, foram avaliados os limites estabelecidos pelas legislações americana e espanhola citadas. Os requisitos necessários para a recarga de aquíferos com efluente tratado consideraram o limite menos restritivo observado nas legislações para cada um dos parâmetros estudados, a partir do comparativo realizado utilizando a Tabela 6.

Tabela 6: Dados qualitativos adotados do efluente tratado para recarga de aquíferos.

PARÂMETROS	LEGISLAÇÃO INTERNACIONAL		REQUISITOS ADOTADOS
	USEPA	Spain ⁽¹⁾	
Sólidos suspensos (mg/L)	20,0	35,0	35,0
Carbono orgânico dissolvido (mg/L)	-	125,0	125,0
DBO (mg/L)	20,0	25,0	25,0
Nitrato (mg/L)	12,0	25,0	25,0
E. Coli (UFC/100 mL)	2,0 x 10 ²	1,0 x 10 ³	1,0 x 10 ³

(1) Para os parâmetros Carbono Orgânico Dissolvido e DBO, foram complementadas as informações com o Decreto Real 509/1996.

Os números obtidos não são só uma exigência de qualidade do efluente, mas também servem como premissa para definir requisitos de níveis de tratamento.

Em relação aos parâmetros Sólidos suspensos, Carbono orgânico dissolvido e DBO, percebe-se que existe a exigência de tratamento secundário que remova a carga orgânica com elevada eficiência. A baixíssima concentração de Nitrato demonstra a existência de tratamento com etapas de remoção de nutrientes.

O nível de E. Coli, de acordo com os exemplos comentados, se compara com a legislação brasileira. Como exemplo, o Decreto Estadual n. 8.468/76 estabelece o mesmo limite ($1,0 \times 10^3$ NMP/100 mL) para despejo de efluentes tratados ou não em corpos hídricos Classe II.

A concentração de Nitrato é limitada provavelmente devido ao potencial carcinogênico. A remoção de Nitrato a níveis extremamente baixos em todos os tratamentos analisados, retrata a existência de processos eficazes de nitrificação e desnitrificação, retornando o nitrogênio gasoso à atmosfera. Observa-se que o processo de remoção de nitrogênio é necessário e indispensável para a recarga de aquíferos.

5.4. Parâmetros de qualidade dos efluentes tratados nas ETEs da RMSP

As cinco ETEs do sistema principal de esgotos da Região Metropolitana de São Paulo operam utilizando a tecnologia de lodos ativados na etapa de tratamento secundário. Este tipo de tratamento, segundo Von Sperling (2005), possui como uma das principais características a alta eficiência na remoção de DBO.

Todas as estações de tratamento de esgotos instaladas no estado de São Paulo devem seguir o que estabelece o Artigo n. 18 do Decreto Estadual n. 8.468 de 1976, que fixa critérios para lançamento de efluentes em corpos hídricos provenientes de qualquer fonte poluidora, apresentados na Tabela 7.

Primeiramente, comparou-se a legislação mencionada com os requisitos definidos no item anterior em relação à concentração de $DBO_{5,20}$. Apesar de o tratamento por lodos ativados apresentar boa eficiência de sua remoção, o limite de 60 mg/L preconizado pelo Decreto não é suficiente para alcançar o requisito mínimo definido neste trabalho de DBO para recarga de aquíferos (25,0 mg/L).

Tabela 7: Padrões de qualidade do efluente tratado segundo o Decreto n. 8.468/76, Art. 18.

Parâmetro	Valor máximo permitido	Unidade
pH	5,0 a 9,0	-
Temperatura	40,0	°C
Sólidos sedimentáveis ⁽¹⁾	1,0	mL/L
Substâncias solúveis em hexano	100,0	mg/L
DBO _{5,20} ⁽²⁾	60,0	mg/L
Arsênico	0,2	mg/L
Bário	5,0	mg/L
Boro	5,0	mg/L
Cádmio	0,2	mg/L
Chumbo	0,5	mg/L
Cianeto	0,2	mg/L
Cobre	1,0	mg/L
Cromo hexavalente	0,1	mg/L
Cromo total	5,0	mg/L
Estanho	4,0	mg/L
Fenol	0,5	mg/L
Ferro solúvel	15,0	mg/L
Fluoreto	10,0	mg/L
Manganês	1,0	mg/L
Mercúrio	0,01	mg/L
Níquel	2,0	mg/L
Prata	0,02	mg/L
Selênio	0,02	mg/L
Zinco	5,0	mg/L

(1) Em teste de uma hora em cone Imhoff;

(2) Este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento de águas residuárias que reduza a carga poluidora em termos de DBO 5 dias, 20°C do despejo em no mínimo 80% (oitenta por cento).

Realizou-se então a comparação entre o efluente de uma das ETEs da RMSP, com os requisitos mínimos para recarga de aquíferos definidos anteriormente na Tabela 6. Utilizou-se

como valor amostral o efluente na saída do tratamento secundário de uma das ETEs sem qualquer pós-tratamento, conforme apresenta a Tabela 8.

Tabela 8: Padrões de qualidade do efluente na saída do tratamento secundário de uma das ETEs da RMSP (GOMES, 2016).

Parâmetro	Efluente secundário	Unidade
Alumínio	0,2	mg/L
Cobre	0,1	mg/L
Ferro	1,5	mg/L
Manganês	0,2	mg/L
DBO _{5,20}	30,0	mg/L
DQO	100	mg/L
Nitrogênio amoniacal	20,0	mg/L
Fósforo	5,0	mg/L
Sólidos em suspensão	40	mg/L
Fenóis	0,13	mg/L
Surfactantes	5,1	mg/L
Óleos e graxas	10,0	mg/L
Dureza	100	mg/L
Sílica	20	mg/L
Sulfetos	0,9	mg/L
Turbidez	15	NTU
Condutividade	650	µs/cm
pH	5,0 a 9,0	mg/L

Traçando um comparativo do efluente tratado em nível secundário com os requisitos mínimos definidos para recarga de aquíferos, tem-se o resultado apresentado na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9: Classificação do efluente na saída do tratamento secundário de uma das ETEs da RMSP frente aos requisitos mínimos adotados para recarga.

Parâmetro	ETE RMSP	Requisito mínimo para recarga	
		Legislações	Classificação
Sólidos suspensos (mg/L)	40,0	≤ 35,0	NÃO ATENDE
Carbono orgânico dissolvido (mg/L)	ND ⁽¹⁾	≤ 125,0	-
DBO (mg/L)	30,0	≤ 25,0	NÃO ATENDE
Nitrato (mg/L)	ND	≤ 25,0	-
E. Coli (UFC/100 mL)	ND	≤ 1,0 x 10 ³	-

(1) Não disponível.

Embora não tenha sido possível comparar todos os parâmetros adotados como limite, verifica-se que os parâmetros Sólidos Suspensos e DBO estão acima do limite estabelecido pelas legislações internacionais e adotados como requisito neste trabalho. Sendo assim, mesmo dispondo dos dados de Carbono Orgânico Dissolvido, Nitrato e E. Coli e estes atendam aos requisitos mínimos para recarga de aquíferos, é possível afirmar que o efluente tratado a nível secundário sem pós-tratamento “NÃO ATENDE” aos limites adotados neste trabalho, necessitando de tratamentos complementares para se enquadrar no padrão requerido.

Além das análises numéricas, deve-se observar também o nível de tratamento. Em nenhuma das ETEs da RMSP se trata efluente a nível terciário. Conforme observado na Tabela 8, a concentração de Nitrogênio Amoniacal na saída do tratamento secundário na ETE estudada é de 20,0 mg/L e, é provável que não ocorra a redução da concentração deste nutriente no efluente final, devido à ausência de tratamento terciário.

Anteriormente determinou-se como premissa básica da recarga de aquíferos que esta seja executada com efluente tratado minimamente a nível terciário. Ou seja, o efluente tratado nas ETEs da RMSP “NÃO ATENDE” não só aos limites numéricos para os parâmetros DBO e Sólidos Suspensos, mas também ao requisito mínimo de tratamento.

5.5. Parâmetros de qualidade da água de reúso produzida nas ETEs da RMSP

Atualmente, a água de reúso da RMSP é produzida com dois objetivos fins. A água de reúso produzida na RMSP pode ser utilizada para fins urbanos, tais como lavagem de ruas, pátios

e veículos, irrigação de áreas verdes, desobstrução de galerias de águas pluviais e de rede de esgotos, dentre outros usos, sempre que em ambientes abertos. Ou, quando tratada a níveis mais restritivos, ela é comercializada para uso industrial e segue requisitos de qualidade estabelecidos pelo cliente.

Para a água de reúso produzida para fins urbanos na RMSP, a Companhia de Saneamento local definiu padrões próprios de qualidade, com base na legislação espanhola, pois não havia legislação no país sobre o assunto, ressaltando que apenas em 2017, foi publicada no Estado de São Paulo, a Resolução Conjunta SES/SMA/SSRH nº 01 de 28 de junho de 2017, que disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário e dá providências correlatas.

Para produção desta água, o efluente final do tratamento é encaminhado para um filtro cesto, seguido de outro filtro de areia e antracito e encaminhado para um reservatório de água de selagem. Deste reservatório, a água já é utilizada dentro da própria ETE, entretanto para uso do consumidor ainda existe uma etapa complementar compreendida por um filtro cartucho. Por fim, a água é submetida a um processo de desinfecção com cloro e encaminhada para um reservatório. A água de reúso é distribuída ao consumidor por meio de caminhões-pipa.

A água de reúso produzida na RMSP para fins urbanos possui as seguintes características qualitativas (Tabela 10):

Tabela 10: Padrões de qualidade da Água de Reúso produzida em nível secundário na RMSP (SABESP, 2010, p. 571).

Parâmetro	Valor	Unidade
Cloro residual total	2,0 a 10,0	mg/L
DBO ⁽¹⁾	≤ 25,0	mg/L
SST ⁽¹⁾	≤ 35,0	mg/L
Coliformes fecais	≤ 200	NMP/100 mL
Turbidez	≤ 20	NTU
pH	6,0 a 9,0	-
Óleos e graxas	visualmente ausente	

(1) Em 95% das amostras.

Novamente traçando um comparativo com os requisitos de qualidade para recarga de aquíferos, obteve-se o resultado apresentado na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11: Classificação da Água de Reúso produzida em nível secundário na RMSP frente aos requisitos para recarga de aquíferos.

Parâmetro	Água de Reúso RMSP	Requisito mínimo para recarga	
		Legislações	Classificação
Sólidos suspensos (mg/L)	≤ 35,0	≤ 35,0	ATENDE
Carbono orgânico dissolvido (mg/L)	ND ⁽¹⁾	≤ 125,0	-
DBO (mg/L)	≤ 25,0	≤ 25,0	ATENDE
Nitrato (mg/L)	ND	≤ 25,0	-
E. Coli (UFC/100 mL)	≤ 200	≤ 1,0 x 10 ³	ATENDE

(1) Não disponível.

De acordo com o comparativo efetuado na Tabela 11, a água de reúso para fins urbanos “ATENDE” aos requisitos para os parâmetros DBO, Sólidos Suspensos e Coliformes Termotolerantes adotados neste trabalho para recarga de aquíferos. Embora estes parâmetros estejam atendendo aos requisitos mencionados, não se recomenda, neste caso, o reúso para recarga de aquíferos. Os parâmetros Carbono Orgânico Dissolvido e Nitrato são mandatórios para a recarga de aquíferos e, não havendo informações a respeito destes, não é possível recomendar a recarga sem o detalhamento dos mesmos.

Deve-se também ter como ressalva a ausência de referências para parâmetros como o nitrogênio amoniacal nas avaliações desenvolvidas nesta pesquisa, devido à falta de dados nas bibliografias consultadas. O tratamento terciário, necessário para remoção do nitrogênio do efluente e premissa mínima adotada para recarga de aquíferos, não é realizado para produção de água de reúso para fins urbanos. Então, o tratamento em nível secundário de água de reúso para fins urbanos “NÃO ATENDE” aos requisitos mínimos para recarga.

Por sua vez, a água de reúso para fins industriais é produzida na planta denominada Aquapolo, a qual é a melhor e mais consolidada tecnologia para tratamento de água de reúso existente na RMSP. A partir de parte do efluente secundário com as características apresentadas na Tabela 8, é realizada a produção da água de reúso através do processo descrito a seguir.

Segundo vídeo institucional da BRK Ambiental (2017), operadora da planta do Aquapolo, parte do efluente tratado na ETE em nível secundário é captado de forma individual em seis decantadores e, por gravidade, é conduzido à estação elevatória de baixa carga, de onde o efluente é bombeado para a unidade de tratamento preliminar.

Esta unidade conta com filtros-disco, com capacidade de remoção de sólidos de 400 microns, ou maiores. O efluente filtrado é direcionado ao Biorreator Terciário de Membranas, ou *Tertiary Membrane Bio Reactor* (TMBR), que consiste no tratamento por um reator biológico terciário seguido de ultra filtração. Na fase de tratamento biológico, ocorre a remoção de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica através de processos anóxicos e aeróbios. Em seguida, o efluente é bombeado para os módulos de membranas de ultra filtração. Essas membranas, com poros de 0,05 microns, são responsáveis por reter sólidos.

Em seguida, o processo de osmose reversa é utilizado quando o efluente oriundo das membranas ultra filtrantes não estiver adequado aos padrões exigidos pelo cliente. Por fim, é realizada a desinfecção com aplicação de dióxido de cloro e a água de reúso é distribuída para os clientes através de uma adutora.

Os parâmetros de qualidade da água de reúso foram definidos em contrato entre o cliente (indústrias do Pólo Petroquímico Capuava, em Mauá) e estão apresentados na Tabela 12. Cabe ressaltar que os parâmetros de qualidade da água de reúso do Aquapolo representam o mínimo exigido de acordo com os requisitos do cliente e para atender requisitos do cliente quanto à qualidade e volume constante, o Aquapolo conta com tanques de armazenamento com capacidade de 70 mil metros cúbicos, possibilitando eventuais ajustes de qualidade da água de reúso e equalização das vazões.

Tabela 12: Limites da Água de Reúso produzida no Aquapolo (GOMES, 2016).

Parâmetro	Concentração	Unidade
Alumínio	0,2	mg/L
Cobre	0,1	mg/L
Ferro	0,3	mg/L
Manganês	0,2	mg/L
DBO _{5,20}	10,0	mg/L
DQO	20	mg/L
Nitrogênio amoniacal	1,0	mg/L
Fósforo	0,5	mg/L
Sólidos em suspensão	< 5	mg/L
Fenóis	0,13	mg/L
Surfactantes	1	mg/L
Óleos e graxas	< 5	mg/L
Dureza	100	mg/L
Sílica	20	mg/L
Sulfetos	0,1	mg/L
Turbidez	1	NTU
Condutividade	500	µs/cm
pH	6,5 a 7,5	mg/L
Cloro residual	> 0,2	mg/L

Considerando a possibilidade de realizar a recarga de aquíferos com esta água, novamente é feita uma comparação com os requisitos de qualidade para recarga (Tabela 13).

Tabela 13: Classificação da Água de Reúso produzida no Aquapolo frente à possibilidade de recarga de aquíferos.

Parâmetro	Água de Reúso Aquapolo	Requisito mínimo para recarga	
		Legislações	Classificação
Sólidos suspensos (mg/L)	< 5,0	≤ 35,0	ATENDE
Carbono orgânico dissolvido (mg/L)	ND ⁽¹⁾	≤ 125,0	-
DBO (mg/L)	10,0	≤ 25,0	ATENDE
Nitrato (mg/L)	ND	≤ 25,0	-
E. Coli (UFC/100 mL)	ND	≤ 1,0 x 10 ³	-

(1) Não disponível.

De acordo com o comparativo efetuado na Tabela 13, a água de reúso produzida no Aquapolo “ATENDE” aos requisitos para os parâmetros DBO e Sólidos Suspensos adotados neste trabalho para recarga de aquíferos. Novamente, embora estes parâmetros estejam atendendo aos requisitos mencionados, não se recomenda, neste caso, o reúso para recarga de aquíferos devido à ausência de dados de Carbono Orgânico Dissolvido, Nitrato e E. Coli, os quais são mandatórios para a recarga de aquíferos.

É provável que, no Aquapolo, devido ao baixo valor de Sólidos Suspensos da água de reúso produzida (< 5,0 mg/L), à existência de tecnologias avançadas para produção de água de reúso e de tratamento em nível terciário – mandatório para recarga de aquíferos – os parâmetros Carbono Orgânico Dissolvido, Nitrato e E. Coli atendam aos requisitos adotados para recarga de aquíferos. Entretanto, não havendo informações a respeito destes, não é possível recomendar a recarga sem o detalhamento dos mesmos, pois esta inferência se tornaria de risco.

A partir dos quatro cenários analisados, foi realizada uma análise comparativa entre eles, a qual deu origem à Tabela 14 a seguir.

Tabela 14: Comparativo entre os quatro cenários estudados e os requisitos adotados para recarga de aquíferos.

Parâmetro	Requisito mínimo para recarga	Cenário 1: Decreto 8.468/76		Cenário 2: Efluente secundário ETE		Cenário 3: Água de reúso em nível secundário		Cenário 4: Água de Reúso Aquapolo	
		Resultados	Classificação	Resultados	Classificação	Resultados	Classificação	Resultados	Classificação
Sólidos suspensos (mg/L)	≤ 35,0	ND ⁽¹⁾	Não é possível analisar	40,0	NÃO ATENDE	≤ 35,0	ATENDE	< 5,0	ATENDE
Carbono orgânico dissolvido (mg/L)	≤ 125,0	ND	Não é possível analisar	ND	Não é possível analisar	ND	Não é possível analisar	ND	Não é possível analisar
DBO (mg/L)	≤ 25,0	< 60,0	NÃO ATENDE	30,0	NÃO ATENDE	≤ 25,0	ATENDE	10,0	ATENDE
Nitrato (mg/L)	≤ 25,0	ND	Não é possível analisar	ND	Não é possível analisar	ND	Não é possível analisar	ND	Não é possível analisar
E. Coli (UFC/100 mL)	≤ 1,0 x 10 ³	ND	Não é possível analisar	ND	Não é possível analisar	≤ 200	ATENDE	ND	Não é possível analisar
Tratamento	No mínimo terciário com remoção de nutrientes	Não especifica níveis de tratamento	Não é possível analisar	Secundário	NÃO ATENDE	Secundário	NÃO ATENDE	Terciário com remoção de nutrientes e osmose reversa	ATENDE
Avaliação geral		Não atende ao requisito adotado para DBO. Quanto ao tratamento, não estabelece nenhum nível e não define limites para presença de nutrientes.		Não atende aos requisitos adotados para Sólidos Suspensos e DBO. Quanto ao tratamento, não atende ao requisito mínimo do tratamento em nível terciário.		Atende aos requisitos adotados para Sólidos Suspensos, DBO e E. Coli. Quanto ao tratamento, não atende ao requisito mínimo do tratamento em nível terciário.		Atende aos requisitos adotados para Sólidos Suspensos e DBO. Quanto ao tratamento, atende ao requisito mínimo do tratamento em nível terciário.	

(1) Não disponível.

5.6. Estimativa de custos para viabilização da tecnologia de recarga de aquíferos com água de reúso na RMSP

O Plano Diretor de Esgotos da RMSP (SABESP, 2010) realizou um estudo completo dos custos da água de reúso produzida considerando diversas tecnologias, em dólar por metro cúbico. Os resultados obtidos a partir deste estudo são apresentados na Tabela 15 a seguir.

Tabela 15: Custo de produção de água de reúso em função das tecnologias de tratamento empregadas e da qualidade final (adaptado de SABESP, 2010).

Tipo de Água de Reúso	Custo por Tecnologia de Tratamento (US\$/m ³)						Custo Total de Produção (US\$/m ³)
	Desnitrificação ⁽¹⁾	Filtração direta e desinfecção com cloro	Clarificação pelo sistema convencional e desinfecção com cloro	Clarificação por MBR e desinfecção com cloro ⁽¹⁾	Clarificação por Microfiltração	Desinfecção prévia com Radiação UV	
Água de reúso clarificada sem desnitrificação prévia	--x--	0,28	--x--	--x--	--x--	--x--	0,28
		0,28	--x--	--x--	--x--	0,01	0,29
		--x--	0,35	--x--	--x--	--x--	0,35
		--x--	0,35	--x--	--x--	0,01	0,36
		--x--	--x--	0,49	--x--	--x--	0,49
		--x--	--x--	--x--	0,28	--x--	0,28
Água de reúso clarificada com desnitrificação prévia	0,44	0,28	--x--	--x--	--x--	--x--	0,72
		0,28	--x--	--x--	--x--	0,01	0,73
		--x--	0,35	--x--	--x--	--x--	0,79
		--x--	0,35	--x--	--x--	0,01	0,80
		--x--	--x--	0,49	--x--	--x--	0,93
		--x--	--x--	--x--	0,28	--x--	0,72

(1) Foi considerado o custo resultante em um período de cinco anos para a amortização do investimento.

Logo, os valores de produção de água de reúso, considerando o menor e o maior padrão de qualidade, variam entre US\$ 0,28/m³ a US\$ 0,93/m³.

O valor de cobrança de água de reúso para fins urbanos praticado atualmente na RMSP², dado obtido junto a um representante do corpo técnico da Companhia de Saneamento, é de US\$ 0,27/m³ para empresas públicas e US\$ 0,46/m³ para empresas privadas, os quais estão próximos aos valores mais baixos de custo de produção de água de reúso apresentados anteriormente. Esta água de reúso não é tratada a nível terciário.

Verificam-se dois cenários disponíveis na tabela de custos, com e sem desnitrificação. Ambas as situações são aplicáveis à água de reúso produzida na RMSP, conforme tecnologias para produção de água de reúso para fins urbanos (sem desnitrificação) e para fins industriais (com desnitrificação). Como a realização do tratamento terciário (desnitrificação) é requisito para recarga de aquíferos, será avaliado o custo contemplando esta etapa de tratamento.

Outro critério utilizado, foi considerar que a desinfecção será por cloro, por ser a forma utilizada na RMSP.

A partir destas premissas adotadas e dentro das opções de tecnologias disponíveis na Tabela 15 estão incluídas: filtração direta, clarificação pelo sistema convencional e clarificação por MBR.

Para a água de reúso produzida na planta do Aquapolo, que produz água de reúso de acordo com as exigências para a recarga de aquíferos, será utilizado o valor para clarificação por MBR, tratamento em operação no local.

Sendo assim, o valor adotado para o custo de produção da água de reúso a se recarregar no aquífero será de US\$ 0,93/m³.

Em relação aos valores de recarga, baseado na experiência de Shafdan, descrita por Kazner *et al.* (2012), os custos típicos de um sistema de recarga de aquíferos³ realizado por sistema de tratamento solo-aquífero (SAT), excluindo os custos de armazenamento e transporte giram em torno de US\$ 0,28/m³ a US\$ 0,30/m³ de água com a qual se recarrega o aquífero.

² Valores obtidos em Real, convertidos para Dólar de acordo com a cotação do dia 5 de janeiro de 2018 (US\$ 1 = R\$ 3,23)

³ Valores obtidos em Euro, convertidos para Dólar de acordo com a cotação do dia 5 de janeiro de 2018 (US\$ 1 = 0,83 €).

Segundo a mesma fonte, os custos correspondentes de operação e manutenção ficam entre US\$ 0,12/m³ e US\$ 0,18/m³. O custo total do sistema de recarga, considerando o sistema de bombeamento, armazenamento e tubulações para os campos de infiltração é estimado entre US\$ 0,54/m³ a US\$ 0,60/m³.

Além destes custos, ainda podem haver custos adicionais para realização de pós-tratamento, dependendo do uso pretendido para a água captada do aquífero.

No caso de Shafdan, a água de reúso a ser infiltrada no aquífero é bombeada por cerca de 100 km. Para fins deste trabalho, considera-se que o efluente tratado nas estações da RMSP será recarregado no aquífero sem necessidade de bombeamento por longas distâncias.

Também não está sendo levado em consideração o custo de implantação do sistema de recarga, que deve ser confirmado após projetos e orçamentos, considerando a estrutura a ser implantada de acordo com a tecnologia de recarga a ser adotada, logística e características geológicas do local de recarga.

Adota-se como premissa que o valor de operação do sistema de recarga serão os maiores valores pesquisados para os custos de armazenamento e transporte, operação e manutenção. Portanto, o custo da recarga será o maior valor de armazenamento e transporte com base na experiência de Shafdan (US\$ 0,30/m³), associado ao maior custo de operação e manutenção da mesma planta (US\$ 0,18/m³), totalizando US\$ 0,48/m³.

Sendo assim, o valor estimado para a água de reúso após a recarga será equivalente ao custo de produção da água de reúso, adotado com base nos valores obtidos para a RMSP na Tabela 15 (US\$ 0,93/m³), somado ao custo de operação do sistema de recarga baseado nos valores praticados na planta de Shafdan (US\$ 0,48/m³).

Logo, o custo total estimado para operação desta tecnologia, abrangendo armazenamento, transporte, operação, manutenção e tratamento com etapa de desnitrificação será de US\$ 1,41/m³.

Para fins de comparação, a tarifa de água potável comercializada para residências pela Companhia que realiza o serviço de tratamento e abastecimento de água para a população da RMSP, definida em novembro de 2017 através do Comunicado 03/17, é de US\$ 0,75/m³ para a faixa de menor consumo, aumentando o valor do metro cúbico quanto maior for o volume mensal

consumido.⁴ Ressalta-se que a este valor está incorporado ao lucro da concessionária, portanto o custo do tratamento é mais baixo do que o valor praticado para o consumidor. Ainda assim, o valor da água potável praticada ao consumidor representa pouco mais de 50% do valor estimado para operação de sistemas de produção de água de reúso para fins de recarga de aquíferos.

⁴ Valor para tarifa normal residencial, para consumo até 10 m³/mês igual a R\$ 24,15/mês. Considerando um consumo de 10 m³/mês, o valor do m³ seria R\$ 2,42. Valor obtido em Real, convertido para Dólar de acordo com a cotação do dia 5 de janeiro de 2018 (US\$ 1 = R\$ 3,23).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir do estudo realizado, com relação à tecnologia de recarga de aquíferos com água de reúso, percebeu-se o potencial desta técnica para contribuir com a resolução de problemas tanto de estoque de água para épocas de seca, como para reposição de volumes de aquíferos superexplorados.

Como requisitos mínimos de qualidade do efluente tratado para recarga de aquíferos, foram adotados, a partir das legislações nos Estados Unidos e da Espanha pertinentes ao assunto, os seguintes limites de 35,0 mg/L para Sólidos Suspensos, 125,0 mg/L para Carbono Orgânico Dissolvido, 25,0 mg/L de DBO_{5,20}, 25,0 mg/L de Nitrato e $1,0 \times 10^3$ UFC/100mL de *E. Coli*.

Com relação aos requisitos de tratamento, foi determinado com base nos estudos de caso das plantas de Shafdan (Israel), Atlantis (África do Sul), Sabadell (Espanha) e Adelaide (Austrália), que a etapa de remoção de nitrogênio deve ser exigida para recarga de aquíferos e, portanto, este é o requisito mínimo para possibilitar a recarga. Deve-se dar a devida atenção às concentrações de nitrogênio e suas formas durante todo o seu ciclo, dado o potencial de formação de nitrato, elemento potencialmente causador de doenças como o câncer quando em concentrações elevadas.

Além de minimamente remover o nitrogênio do efluente realizando a etapa de tratamento terciário e respeitar os padrões qualitativos determinados, para realizar a recarga de um aquífero, recomenda-se avaliar outras características de qualidade da água deste e a hidrogeologia local, para minimizar os riscos de contaminação do aquífero a ser recarregado, conforme preconiza a legislação brasileira.

Ressalta-se, portanto, que este trabalho não estabeleceu limites fixos, mas sim propõe diretrizes para realização do reúso de água para recarga de aquíferos de maneira segura. Este estudo pode servir como base para avaliações mais aprofundadas sobre o assunto, envolvendo estudos em campo, com coletas de dados primários sobre as características do solo, da água do aquífero e da água de reúso a se recarregar no aquífero. Desta forma, pode ser possível obter resultados práticos e, por fim, definir parâmetros mais concretos para a água de reúso para recarga de aquíferos, considerando as mais diversas variáveis que esse assunto compreende.

Deve-se ter como ressalva também a pouca disponibilidade de dados, tanto das ETES dos casos internacionais, como das ETES da RMSP, o que impossibilitou a comparação de uma maior quantidade de parâmetros e a adoção de um maior número de valores limite para recarga de aquíferos, o que daria maior robustez à análise realizada ao longo do estudo.

Pode-se concluir que o efluente tratado nas ETES estudadas da RMSP, não cumpre os requisitos mínimos de qualidade do efluente com finalidade de recarga de aquíferos e realizam tratamento em nível secundário. Por esses motivos, não se deve realizar recarga de aquíferos com o efluente destas ETES. A legislação vigente e aplicável a estas ETES também não exige tratamento do efluente em nível terciário, nem mesmo limita a concentração de nutrientes presentes no efluente final.

A água de reúso tratada em nível secundário nas ETES da RMSP para usos urbanos, atendeu aos requisitos para os parâmetros DBO, Sólidos Suspensos e Coliformes Termotolerantes adotados neste trabalho para recarga de aquíferos. Na ausência dos dados de Carbono Orgânico Dissolvido e Nitrato, não é possível recomendar, neste caso, o reúso para recarga de aquíferos. Além disso, conforme mencionado, esta água de reúso não é submetida a tratamento terciário, requisito adotado como mandatório para que se realize a recarga de aquíferos.

Na RMSP, a planta do Aquapolo possui tratamento terciário, suficiente para a realização da recarga de aquíferos, principalmente por cumprir a etapa mandatória de remoção de nitrogênio através dos processos de nitrificação e desnitrificação. A água de reúso produzida nesta planta atende aos requisitos para os parâmetros DBO e Sólidos Suspensos adotados neste trabalho para recarga de aquíferos. Apesar de ser provável o atendimento a todos os requisitos adotados como premissa para recarga, novamente, não é possível recomendar a recarga de aquíferos com esta água de reúso sem o detalhamento dos dados de Carbono Orgânico Dissolvido, Nitrato e E. Coli.

Em relação a custos, percebe-se que o valor da água potável vigente representa pouco mais de 50% do valor obtido para a tecnologia proposta nesse trabalho. Conforme apresentado e tratado como um fator limitador desta técnica, o custo da produção de água de reúso e da recarga de aquíferos é de fato mais alto em comparação à produção de água potável utilizando tratamentos convencionais.

A abordagem utilizada para obtenção de valores comparativos pode ser utilizada em outros países, sempre com a ressalva mencionada anteriormente sobre as diferenças entre eles. Por

exemplo, o custo de mão-de-obra em um país pode ser extremamente maior que em outro, a energia elétrica para operar o sistema também possui grandes variações de valores entre países, dentre outras inúmeras peculiaridades.

Mesmo que o reúso de água para recarga de aquíferos apresente um valor consideravelmente maior com relação a água potável produzida por tratamentos convencionais, este trabalho procura trazer o questionamento do verdadeiro valor da água em situações de extrema seca. Em diversas regiões do mundo há tempos se adotam técnicas como a recarga de aquíferos, justamente por conta da escassez d'água. Nesses locais se paga valores extremamente altos pela água por conta da baixa disponibilidade.

Situações de escassez hídrica são cada vez mais frequentes frente às mudanças climáticas e o aumento da população. Conforme visto, na RMSP a tecnologia para produção de água de reúso está disponível e em operação no Aquapolo, que trata o efluente da ETE ABC com tecnologia suficiente para alcançar padrões exigidos para a recarga de aquíferos.

É importante o planejamento e a adoção de técnicas de reaproveitamento de um recurso natural frente à baixa disponibilidade deste. A recarga de aquíferos com efluentes tratados se mostra uma oportunidade diante do cenário de escassez hídrica e, mesmo à primeira vista mais onerosa, representa uma tecnologia viável para obtenção de água para diversos usos em situações em que o valor da água transcende às questões de custo e viabilidade técnica.

7. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. G.. Aspectos legais para a água de reúso. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 13, n. 2, p.31-43, maio 2011. Quadrimestral. Disponível em: <<http://essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.20110012>>. Acesso em: 20 maio. 2016.

AQUAPOLO, 2017. Disponível em: <<http://www.aquapolo.com.br/comunicacao/noticia/>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

ASANO, T.; LEVINE, A. D. **Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse: Past, Present and Future**. Water Science Tech, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. Águas subterrâneas, o que são?. Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php>>. Acesso em: 21 dez. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969**: Tanques sépticos - unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 60 p.

BARBOSA, C. M. de S.; MATTOS, A.. Conceitos e diretrizes para recarga Artificial de aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Natal. **Anais...** . Natal: ABAS, 2008. p. 1 - 12. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23657/15733>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

BLUM, J. R. C. **Critérios e padrões de qualidade da água**. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reúso de Água. São Paulo: Manole, 2003, pg. 125 a 172.

BRASIL. **Câmara dos Deputados**. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado, 1988.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Brasília – DF, janeiro de 1997.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas - ANA. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 18 jul. 2000. p.1.

BRASIL. **Resolução Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 54**, de 28 de novembro de 2005 – Estabelece critérios gerais para reúso de água potável. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direito não potável de água, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília – DF, março de 2006.

BRASIL. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Agência Nacional de Águas (Org.). **Conjuntura dos Recursos Hídricas no Brasil: Encarte Especial sobre a Crise Hídrica - Informe 2014**. Brasília: Spr, 2014. 31 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente. **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília, 2005. 134 p. (Caderno de Recursos Hídricos). Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/planos/pnrh/VFDisponibilidadeDemanda.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. Ministério do Meio Ambiente. Encarte Especial sobre a Crise Hídrica. Brasília, 2015. 31 p. (Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil – Informe 2015). Disponível em: <<http://conjuntura.ana.gov.br/docs/crisehidrica.pdf>>. Acesso em: 30 set. 2016.

BRK Ambiental, 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Iz4LQJRRquM/>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

CALCAGNO, A. Identificação de áreas para execução de programas e ações piloto e definição de termos de referência. Atividade 9 do projeto Aquífero Guarani. Brasil: Agência Nacional de Águas, 2001.

CETESB (São Paulo). Valores da condição da qualidade dos solos da bacia hidrográfica do Alto Tietê – UGRHI 6 e Região Metropolitana de São Paulo – RMSP / CETESB; Elaboração técnica Mara Magalhães Gaeta Lemos... [et al.]. São Paulo: CETESB, 2008. 70 p. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

CETESB. Reuso de água. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/informacoes-basicas/tpos-de-agua/reuso-de-agua/>> Acesso em: 8 de janeiro de 2018

CETESB. Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo. [recurso eletrônico] : boletim 2017 / CETESB ; Equipe técnica Rosângela Pacini Modesto ... [et al.]. – São Paulo : CETESB, 2018. Disponível em: <<http://aguassubterraneas.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-e-relatorios/>> Acesso em: 8 de janeiro de 2018

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP. **Plano Diretor de Esgotos da Região Metropolitana de São Paulo**. Consórcio Cobrape – Concremat. São Paulo: Sabesp, 2010. 9v.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP. <http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalle.aspx?secaoId=65&id=7261>

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução n. 357, de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. CONAMA, mar. 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução n. 396, de 03 de abril de 2008.** Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução n. 430, de 2011.** Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, mai. 2011.

CPRM. Recursos Hídricos. Disponível em:
<http://www.cprm.gov.br/publique/media/informacao_publica/rechid1.pdf> Acesso em: 8 de janeiro de 2018.

CROOK, J.. Critérios de qualidade da água para reúso. **DAE-SABESP**, São Paulo, n. 174, p.10-18, nov. 1993.

CUNHA, A.H.N.; OLIVEIRA, T.H.O.; FERREIRA, R.B.; MILHARDES, A.L.M.; SILVA, S.M.C. **O Reúso de água no Brasil:** a importância da reutilização de água no país. Enciclopédia Biosfera, v. 7, n.13, p. 1225-1248, 2011.

CUTOLO, S. A.; ROCHA, A. A.. Reflexões sobre o uso de águas residuárias na cidade de São Paulo. **Saúde e Sociedade**, São Paulo, v. 2, n. 11, p.89-105, abr. 2002.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **DPO 007:** Instrução Técnica. São Paulo: DAEE, 2015.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AUTHORITY (Austrália). Government of West Australia. Strategic Advice on Managed Aquifer Recharge using Treated Wastewater on the Swan Coastal Plain. Perth, 2005. 132 p. Disponível em: <<http://edit.epa.wa.gov.au/EPADocLib/B1199-archived-280115.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2016.

FERNANDES, V. M. C.. **Padrões para reúso de águas residuárias em ambientes urbanos.** Universidade de Passo Fundo – UPF. Passo Fundo, 2006.

FUSP. PLANO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO TIETÊ RELATÓRIO FINAL Volume 1/4. Disponível em:
<http://www.fabhat.org.br/site/images/docs/volume_1_pat_dez09.pdf> Acesso em: 10 de janeiro de 2018.

GLOBO, 2012. Disponível em: <<http://g1.globo.com/natureza/rio20/noticia/2012/06/cidade-de-tel-aviv-em-israel-tem-100-da-agua-reaproveitada.html>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

HESPANHOL, I.. Normas anormais. **Revista DAE**, São Paulo, v. 1, n. 194, p.1-18, 01 jan. 2004. Quadrimestral. Disponível em: <<http://doi.editoracubo.com.br/10.4322/dae.2014.001>>. Acesso em: 04 mai. 2016.

HESPANHOL, Ivanildo. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 7, n. 4, p.75-95, 01 out. 2002.

HESPANHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. **Revista Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 131-158, 2008. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010340142008000200009&lng=pt&rm=iso> . Acesso em 04 mai. 2016.

IBGE. Estimativas populacionais para os municípios brasileiros em 01.07.2014. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2014/default.shtm>> Acesso em: 10 de janeiro de 2018.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S.. As águas subterrâneas do estado de São Paulo. 2. ed. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente - SMA, 2009. 104p.

KAZNER, C.; WINTGENS, T.; DILLON, P. (Ed.). **Water reclamation technologies for safe managed aquifer recharge**. Londres: IWA Publishing, 2012. 455 p.

MACHADO, J. L. F. **Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul: Relatório Final**. Porto Alegre. CPRM. 2005. 65p.

MANCUSO, P.C.S. & SANTOS, H.F. ed. Reuso de água. São Paulo: Manole, 2003. 579p.

MARTIRANI, Laura Alves; PERES, Isabela Kojin. Crise hídrica em São Paulo: cobertura jornalística, percepção pública e o direito à informação. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 1-20, Mar. 2016.

MENDONÇA, Pedro de A. Ornelas. Reuso de água em edifícios públicos o caso da escola politécnica. 2004. 171f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia.

METCALF, L; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Tradução: Ivanildo Hespanhol; José Carlos Mierzwa . 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 1980 p.

MORUZZI, Rodrigo Braga. Reúso de água no contexto da gestão de recursos hídricos: impacto, tecnologias e desafios. **OLAM - Ciência & Tecnologia**. Rio Claro - SP, v. 8, n.3, p. 271- 294 , Jul – Dez 2008.

MOURA, A. N.. Recarga artificial de aquíferos: os desafios e riscos para garantir o suprimento futuro de água subterrânea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13., 2004, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: ABAS, 2004. p. 1 - 19. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23608/15688>>. Acesso em: 20 set. 2016.

OKPALA, Walter Onyebuchi. Recarga gerenciada do aquífero do Aeroporto Internacional Governador André Franco Montoro, Guarulhos/SP: estudo piloto do sistema solo-aquífero. 2011.

268 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) Escola Politécnica Universidade de São Paulo.

PHILIPPI JR., A. Reúso de água: uma tendência que se afirma. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de Água**. São Paulo, Manole, 2003.

PITERMAN, A.; GRECO, R. M.. A água e seus caminhos e descaminhos entre os povos. **Revista APS**, Juiz de Fora, v. 8, n. 2, p.151-164, 01 jul. 2005.

PORTAL BRASIL. Governo busca regulamentação de norma nacional para água de reúso. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2015/04/governo-busca-regulamentacao-de-norma-nacional-para-agua-de-reuso>>. Acesso em: 13 maio 2016.

QUEVEDO, Claudia Maria Gomes de. Avaliação da presença de fósforo nos esgotos sanitários e da atual contribuição dos detergentes. 2015. 250 f. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) Faculdade de Saúde Pública - Universidade de São Paulo.

RICCOMINI, C.; COIMBRA, A. M. Geologia da bacia sedimentar de São Paulo. **Solos da cidade de São Paulo**, ABMS & ABEF. São Paulo, 1992 . p. 37-94.

SALGOT, M.; ANGELAKIS, A. N. **Guidelines and regulations on wastewater reuse**. In: Decentralized Sanitation and Reuse, Integrated Environmental Technology Series. IWA Publishing, 2001.

SANEPAR. Relatório de Administração e de Sustentabilidade 2016. Disponível em: < https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores_rel_ian_dfp_itr/ian-dfp-itr/rel_Relat%C3%B3rios%20Trimestrais2016-12-31_0.pdf> Acesso em: 10 de janeiro de 2018.

SÃO PAULO. Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo. Comitê da Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (Org.). **Plano da bacia hidrográfica do Alto Tietê**. São Paulo: FUSP, 2009. 60 p. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7111/pat_sumario_executivo.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2016.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE (Estado). Resolução nº 3, de 21 de junho de 2006. **Resolução Conjunta SMA/SEHRS/SES**. São Paulo, SP.

TAKIYA, H. **Estudo da sedimentação Neogênico-Quaternário no município de São Paulo**: caracterização dos depósitos e suas implicações na geologia urbana. 1997. 175 p. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997

TOMASONI, M. A.; PINTO, J. E. de S.; SILVA, H. P. da. A questão dos recursos hídricos e a perspectiva para o Brasil. **Geotextos**, Salvador, v. 5, n. 2, p.107-127, dez. 2009.

TUNDISI, José Galizia. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Aquifer recharge and aquifer storage and recovery wells: the class V underground injection control study.** Washington: USEPA, 1999. v. 23.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for water reuse.** Washington: USEPA, 2012.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Instituto de Geociências. Departamento de Águas e Energia Elétrica (Org.). **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo:** Escala 1:1.000.000. São Paulo: DAEE, 2005. 119 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3ª. Edição. Universidade Federal de Minas Gerais (Belo Horizonte/MG): DESA – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. (Vol 1).

WHO – World Health Organization. **Reuse of effluents: methods of wastewater treatment and health safeguards, Of a WHO meeting of experts.** Technical report series, Genebra: n. 517, 1973.