

Qualidade da Água do Rio Piracicaba: estudo de caso do efeito da Estação de Tratamento de Esgoto Piracicamirim, município de Piracicaba (SP)

Water Quality of the Piracicaba River Basin: study case of the effect of Piracicamirim

Wastewater Treatment Plant, Piracicaba (SP)

Rodrigo Santos Sousa¹ e Décio Semensatto²

^{1,2} Setor de Ciências Ambientais, Departamento de Ciências Biológicas, Universidade Federal de São Paulo, Campus Diadema, SP, Brasil

rodrigossousa50@gmail.com; semensattojr@gmail.com

Recebido: 22/10/14 - Revisado: 22/12/14 - Aceito: 13/02/15

RESUMO

O crescimento da urbanização, numa escala global, tem intensificado os conflitos pelo uso dos recursos hídricos, não somente devido à ampliação da demanda, mas também em razão da redução da oferta, fruto de um desenvolvimento não planejado que deteriora a qualidade da água. Diante disso, nesse trabalho procurou-se estudar o impacto da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Piracicamirim, inaugurada em 1998, sobre a qualidade das águas da Bacia do Rio Piracicaba, onde a urbanização na década de 1960 foi estimulada pela descentralização industrial da Região Metropolitana de São Paulo. Por meio das informações disponibilizadas nos relatórios anuais da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), foi possível explorar as séries anuais das variáveis oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio e coliformes termotolerantes, além do Índice de Qualidade da Água, entre os anos de 1980 e 2012. Os resultados indicaram que no período anterior à implantação da ETE houve uma degradação significativa na qualidade das águas do Rio Piracicaba entre o final da década de 1980 e início da década de 1990. A estação, portanto, tem impedido que a deterioração se intensifique no que parece sinalizar uma corrida entre o crescimento desenfreado e a própria capacidade do sistema de esgotamento sanitário. Este trabalho destaca a importância do planejamento e da integração entre as políticas públicas de saneamento e de urbanização.

Palavras Chave: Rio Piracicaba. Qualidade da Água. Ribeirão Piracicamirim. Estação de Tratamento de Esgoto. Urbanização.

ABSTRACT

The urbanization growth on a global scale has intensified conflicts over the use of water resources, not only because the increased demand, but also because of supply reduction, which is the result of an unplanned development that deteriorates water quality. Thus, in this work we assessed the impact of Piracicamirim Wastewater Treatment Plant (WTP), inaugurated in 1998, over the water quality of the Piracicaba River Hydrographical Basin, where urbanization in the 1960's was stimulated by industrial decentralization in the Metropolitan Region of São Paulo. Through the information provided by the State Environmental Company of São Paulo (CETESB) it was possible to explore the annual series of the variables dissolved oxygen, biochemical oxygen demand and fecal coliform, besides the Water Quality Index, for a period between 1980 and 2012. The results indicated that in the period before the implementation of the WTP there was a significant deterioration in the water quality of the Piracicaba River between the late 1980's and early 1990's. The WTP has prevented the deterioration to intensify in what seems to indicate a run between unbridled growth and the capacity of the sewage system. This work highlights the importance of planning and integration between sanitation and urbanization policies.

Keywords: Piracicaba River. Water Quality. Ribeirão Piracicamirim. Wastewater Treatment Plant. urbanization

INTRODUÇÃO

A expansão da urbanização e a industrialização, conseqüências da Revolução Industrial, aumentaram progressivamente as pressões sobre os recursos hídricos, tanto em termos de demanda quanto de degradação. A Humanidade, por meio de suas organizações políticas, sociais, econômicas e científicas enfrenta um intrincado dilema com raízes no seguinte conflito histórico: crescimento econômico versus conservação dos recursos naturais. Se por um lado, a industrialização degradou a qualidade dos recursos hídricos, por outro, a água é fator crítico para o desenvolvimento econômico e para a redução das mazelas sociais (Tundisi, 2008).

Diante desse embate e da disputa pelo uso foi sancionada no Brasília Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), por meio da Lei Federal nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. A lei visa ordenar a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, e, ainda, introduz instrumentos respaldados pela comunidade científica, tais como a cobrança pelos recursos hídricos e a abordagem de serviços ecossistêmicos (TUNDISI, 2008; ENGEL; SCHAEFER, 2013). Contudo, o gerenciamento da água urbana necessita da articulação entre os diferentes setores da sociedade, sendo impreterível disponibilizar serviços como abastecimento, esgotamento e tratamento de esgoto, drenagem e coleta de resíduos sólidos (TUCCI, 2010), além da adoção de ferramentas integradas de diagnóstico, monitoramento e gestão (ZHOU et al., 2012; CAMPOS et al., 2014; FREIRE; CASTRO, 2014). Neste último aspecto, embora diversos avanços tenham se concretizado nas diversas áreas de conhecimento, ainda há a carência de integração efetiva das diferentes perspectivas de abordagens técnicas (SOMLYÓDY, 1995).

No Estado de São Paulo, segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2013), as bacias hidrográficas mais populosas e industrializadas são a Bacia Hidrográfica do Alto Tietê e a Bacia Hidrográfica dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. De modo geral, a qualidade da água no Estado é pior em bacias com este perfil, principalmente nos seus rios (CUNHA et al., 2013). Desde o início de 2014, ambas têm sido noticiadas diante da crise hídrica no Sistema Cantareira, fruto da conjunção de uma série de fatores ambientais, econômicos e políticos. Todavia, esse cenário, como outrem, não advém somente do conflito em relação à disponibilidade quantitativa, mas também, da disponibilidade qualitativa (LANNA, 2012).

Sob essa perspectiva, o presente trabalho teve como objetivo realizar estudo de caso e avaliar o impacto da instalação da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Piracicamirim sobre a qualidade da água do Rio Piracicaba, em conjunto com a análise do crescimento demográfico na bacia hidrográfica. Para tanto, foram utilizadas séries históricas de indicadores de qualidade de água monitorados pela CETESB, abrangendo períodos anteriores e posteriores à operação da ETE, iniciada em junho de 1998, localizada no município de Piracicaba (SP).

ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Rio Piracicaba abrange uma área de 11.402 km².

Ela é formada por cinco sub-bacias, representadas pelos seus rios primários: Piracicaba, Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia. Destas, as três últimas sub-bacias situam-se nos estados de São Paulo e Minas Gerais. O Rio Piracicaba, principal da bacia, nasce em Americana (SP) através da junção dos rios Jaguari e Atibaia e percorre cerca de 115 km, passando pelo município de Piracicaba, até desaguar na margem direita do Rio Tietê, na altura do reservatório da Usina de Barra Bonita (COMITEPCJ, 2011).

A Bacia do Rio Piracicaba, em conjunto com as Bacias dos Rios Capivari e Jundiá, faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 05 (UGRHI-05) do Estado de São Paulo. O processo de urbanização na região intensificou-se na década de 1960, efeito da desconcentração industrial na Região Metropolitana de São Paulo (CBHPCJ, 2002).

O índice de urbanização na bacia é igual a 94% e a disponibilidade de água é reconhecida como crítica, agravada pelos impactos causados por erosão urbana e rural, lançamento de esgoto urbano, e atividades de mineração (SÃO PAULO, 2005). Projeções futuras indicam rápida e intensa degradação da qualidade da água, caso não sejam implementadas medidas mais contundentes de recuperação no curto prazo, sendo que em 2050 o cenário será de total insustentabilidade de seu uso (SÁNCHEZ-ROMÁN et al., 2009).

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A ETE Piracicamirim, construída para atender 100 mil habitantes, está localizada sobre a margem esquerda do Ribeirão Piracicamirim. Sua sub-bacia abrange os municípios de Saltinho, Rio das Pedras e Piracicaba, onde o ribeirão desemboca no Rio Piracicaba. A descrição a seguir da ETE é baseada em Camolese et al. (1999).

O sistema é constituído por uma Estação Elevatória de Esgoto (EEE), linha de recalque e uma estação de tratamento que utiliza o modelo de lagoa aerada de mistura completa, ou lagoa de decantação, em combinação com reatores anaeróbicos para o tratamento em nível secundário (Figura 1). O projeto da ETE é considerado inovador, pois teve que se adaptar a algumas limitações, como, controle de odores, redução no consumo de



Figura 1 - Vista aérea das estruturas da Estação de Tratamento de Esgoto Piracicamirim (Foto: SEMAE Piracicaba) Modificado de ANA, disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/a-n-a.pdf

energia, e a restrição de área (30.000 m² localizados na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, da Universidade de São Paulo). Na EEE ocorre o gradeamento grosseiro não mecanizado. A vazão é mensurada através de um medidor tipo calha Parshall e quatro conjuntos moto-bombas com capacidade unitária de 544 m³/h impulsionam o esgoto para a fase de tratamento preliminar. Tal etapa inclui o gradeamento mecanizado e uma caixa de areia, a qual exerce conjuntamente a função de unidade distribuidora de vazão para os reatores anaeróbicos.

A caixa de areia possui dimensões cilíndricas, com o fundo em aspecto de pirâmide invertida. Nesse ponto, ar é injetado por meio de um soprador para facilitar a remoção, pela gravidade, da areia sedimentada que é desprezada posteriormente em um leito de drenagem. Da caixa partem três tubulações, cada uma responsável por abastecer um reator anaeróbico de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB).

Os reatores UASB são segmentados em quatro compartimentos com: 14,0 m de comprimento, 9,0 m de largura e 5,5 m de altura. Os gases emitidos pela digestão anaeróbica são extraídos pelos separadores de fases e queimados. O projeto da ETE proporciona uma relevante redução no consumo energético ao implantar a digestão anaeróbica antecedendo a digestão aeróbica.

A etapa aeróbia é constituída por uma lagoa aerada seguida de três unidades de decantação. Na lagoa são utilizados aeradores flutuantes de alta eficiência com pouco mais de 11 kW de potência. Os decantadores são do tipo laminar com um sistema de drenagem para recolher e recircular o lodo depositado. Dos decantadores, o efluente passa pela aeração final e, novamente, por medidores de vazão do tipo calha Parshall antes de ser lançado no Ribeirão Piracicamirim.

Segundo comunicação pessoal com o Serviço Municipal de Água e Esgoto (SEMAE) de Piracicaba, a ETE Piracicamirim

atende uma ampla parcela dos bairros do município, tratando mais de 30% do esgoto gerado, e com capacidade de 462 L/s. Ainda segundo o contato pessoal com a companhia, a estação tem passado por melhorias desde 2013, de modo que alcançou uma taxa de 91% de remoção da DQO em seus afluentes, contra 72% nos anos anteriores.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas subsequentes: (i) obtenção e consolidação dos dados de qualidade da água, de crescimento demográfico e das vazões médias mensais; e (ii) tratamento estatístico, análise e interpretação das informações.

Os indicadores de qualidade da água foram extraídos dos Relatórios de Qualidade das Águas Superficiais do Estado de São Paulo, publicados anualmente pela CETESB. Foram escolhidos 3 pontos de monitoramento na bacia do Rio Piracicaba (Figura 2): PCAB 02192, a montante da ETE, no Rio Piracicaba e a 6 km da foz do Ribeirão Piracicamirim; PCAB 02220, a jusante da ETE, no Rio Piracicaba e a 2,5 km da foz do Ribeirão Piracicamirim; e PIMI 02900 a jusante da ETE, no Ribeirão Piracicamirim e a pouco mais de 3 km da estação de tratamento.

Para cada ponto utilizou-se os dados referentes às concentrações de oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio (DBO_{5,20}) e coliformes termotolerantes, além do Índice de Qualidade da Água (IQA) – o índice é obtido através do produto ponderado entre os valores de nove parâmetros, sendo eles: a temperatura, o pH, o oxigênio dissolvido, a demanda bioquímica de oxigênio, os coliformes termotolerantes, o nitrogênio total, o fósforo total, os sólidos totais e a turbidez.

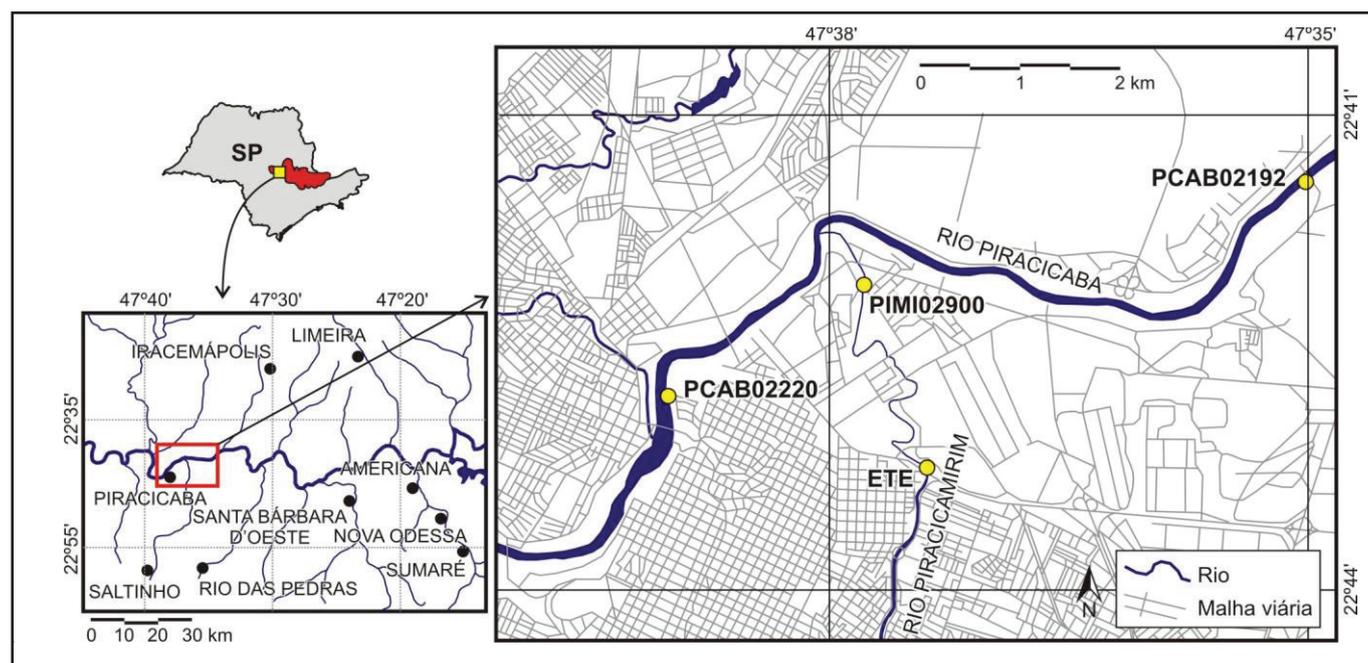


Figura 2 - Localização da área de estudo e dos pontos de monitoramento da qualidade da água na bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (em vermelho no mapa referência do Estado de São Paulo)

O IQA, portanto, pode assumir valores entre 0 e 100, sendo que é atribuída uma classe de qualidade para cada faixa de intervalo: Péssima ($IQA \leq 19$), Ruim ($19 < IQA \leq 36$), Regular ($36 < IQA \leq 51$), Boa ($51 < IQA \leq 79$) e Ótima ($79 < IQA \leq 100$) (CETESB, 2013).

De modo geral, essas variáveis representam a contribuição de efluentes domésticos (CUNHA et al., 2013), além do que a escolha de poucas variáveis, porém abrangentes, auxilia na definição de programas mais eficientes de manejo dos recursos hídricos (ENDERLEIN et al., 1997). Os dados compreendem o período de 1980 a 2012 para os pontos PCAB 02192 e PCAB 02220, e de 2000 a 2012 para o ponto PIMI 02900.

No tratamento estatístico, as séries de dados foram agrupadas em quinquênios, sendo eles: 1980-1986, 1990-1994, 1995-1998, 1999-2003, 2004-2008 e 2009-2012, todos apresentando medidas bimestrais nos meses ímpares, de acordo com o monitoramento padrão da CETESB. Os anos de 1987, 1988 e 1989 foram excluídos por não apresentarem dados para os meses de interesse. O comportamento da série de dados das variáveis foi comparado com os padrões de qualidade das águas determinados na Resolução CONAMA 357/2005 para a Classe 2, na qual estão enquadrados o Rio Piracicaba e o Ribeirão Piracicamirim. Foi analisada a evolução da porcentagem de valores em não-conformidade com a legislação ao longo do tempo. Esta abordagem é bastante útil para a compreensão da dinâmica do corpo aquático e auxilia no planejamento do manejo e conservação dos recursos hídricos (CUNHA et al., 2013).

Foi realizado o teste de Análise de Variância (ANOVA – fator duplo sem repetição) para as médias do ponto PCAB 02220, entre os quinquênios e os meses ímpares. Optou-se por fazer a análise apenas nesse ponto, uma vez que o mesmo é mais informativo a respeito das possíveis flutuações na qualidade ocasionadas pela ETE por estar a sua jusante. Antecedendo o teste, foi confirmado se as variáveis IQA, oxigênio dissolvido, $DBO_{5,20}$ e coliformes termotolerantes apresentavam normalidade e homocedasticidade, através da elaboração de histogramas e da realização do Teste de Cochran. Em todas as circunstâncias o nível de significância utilizado foi de 5%.

Por meio do portal eletrônico Hidroweb, gerenciado pela Agência Nacional de Águas (ANA), foram obtidas as vazões médias mensais para o Rio Piracicaba. Selecionou-se um ponto situado a jusante da ETE, a cerca de 30 km da foz do Ribeirão Piracicamirim, por ser o mais próximo da área de estudo dispondo de dados no período de 1980 a 2012. As vazões médias mensais também foram agrupadas em quinquênios e suas médias quinquenais, com os respectivos desvios-padrão, foram adicionadas nos gráficos dos pontos localizados no Rio Piracicaba.

Os dados demográficos são referentes aos municípios de Piracicaba, Santa Bárbara D’oeste, Americana, Limeira, Saltinho e Rio das Pedras, todos localizados a montante da estação de tratamento, inclusive o município de Piracicaba, onde a ETE está instalada, visto que alguns de seus bairros estão situados na área de drenagem do Ribeirão Piracicamirim. As informações correspondentes aos censos dos anos 1991, 1996, 2000, 2007 e 2010 foram retiradas do portal eletrônico Cidades, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Tomando-se os valores dos censos, foi elaborado um

gráfico do crescimento relativo dos municípios. O ano de 1991 foi estabelecido como referência, exceto para o município de Saltinho, em razão de não possuir dados para esse ano – nesse caso, foi julgado como parâmetro o ano de 1996. O crescimento relativo das cidades foi, então, comparado com o crescimento do Estado de São Paulo e do Brasil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises primárias dos dados sobre a qualidade da água (IQA) revelam um panorama preocupante. Seja nos pontos a montante ou a jusante da ETE no Rio Piracicaba, a qualidade deteriorou notavelmente da década de 1980 para a década de 1990 (Figuras 3 e 4). Do período de 1980 a 1986, onde cerca de 75% dos valores estavam acima do patamar ruim ($IQA > 36$), regrediu-se, entre 1990 e 1994, para pouco mais de 50% dos valores. As piores médias obtidas foram dentro dos quinquênios 1995-1998 e 1999-2003. Desde então, as médias tem melhorado mais lentamente ou mantiveram-se constantes, tanto a montante quanto a jusante, mas sem alcançar os níveis do início da década de 1980.

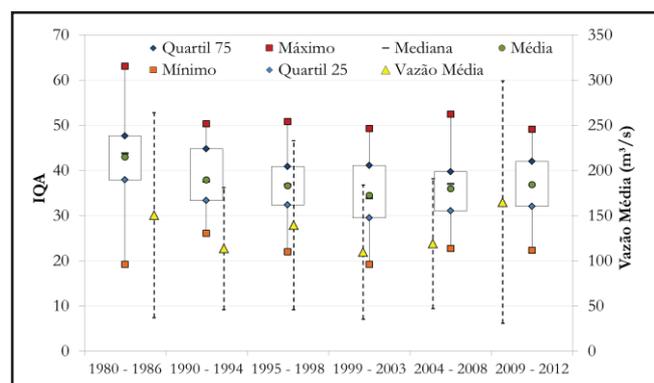


Figura 3 - Boxplot da série histórica (quinquênios) do IQA do ponto PCAB 02192

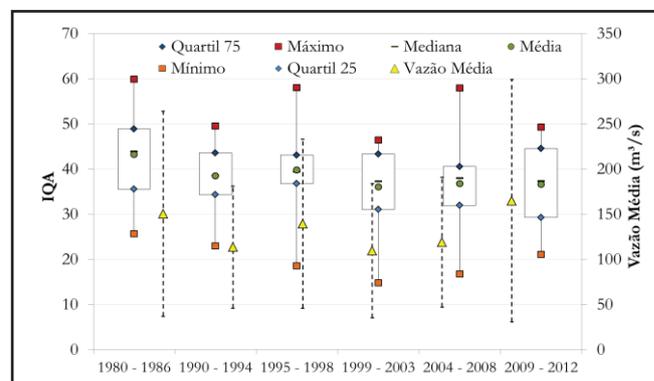


Figura 4 - Boxplot da série histórica (quinquênios) do IQA do ponto PCAB 02220

No ponto localizado sobre o Ribeirão Piracicamirim (Figura 5), verifica-se que desde 2009, quando o IQA começou a ser calculado, houve uma tendência de aumento progressivo da qualidade até 2012, momento em que o índice permaneceu dentro do intervalo razoável ($36 < IQA \leq 51$).

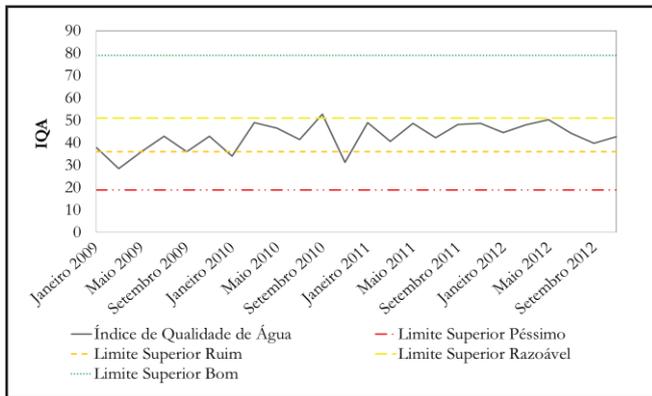


Figura 5 – Série histórica do IQA no ponto PIMI 02900

A concentração do oxigênio dissolvido aparentou exercer algum efeito sobre o comportamento do IQA; por certo, destaca-se que essa variável é a de maior peso para o cálculo do IQA. Nas figuras 6 e 7 constata-se uma redução significativa na concentração de oxigênio dissolvido no Rio Piracicaba entre a década de 1980 e 1990. As médias então permaneceram reduzidas até o começo do ano 2000, quando houve uma lenta recuperação. Curiosamente, essa recuperação se mostrou maior no ponto a jusante do que no ponto a montante.

Alguns autores, como Ballester et al. (1999), demonstraram o efeito do Salto de Piracicaba na oxigenação das águas do Rio Piracicaba. Contudo, destaca-se que o ponto a jusante – PCAB 02220 – está situado bem no início das quedas; ademais, se fosse esperada alguma relação do salto com o aumento da concentração de oxigênio dissolvido neste ponto, tal fato precisaria ser observado ao longo de toda a série histórica. Nas figuras 6 e 7, entretanto, se verifica que a média da concentração de oxigênio dissolvido a montante foi maior do que a média a jusante nos primeiros quinquênios (1980-1986 e 1990-1994).

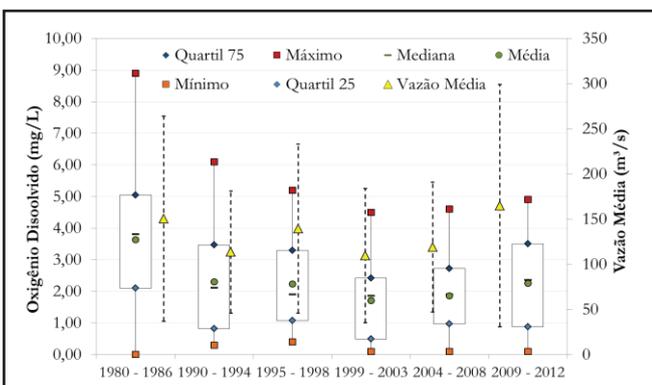


Figura 6 - Boxplot da série histórica (quinquênios) da concentração de oxigênio dissolvido no ponto PCAB 02192

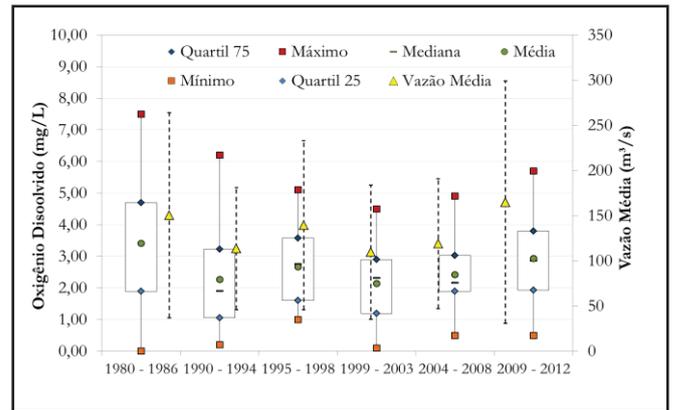


Figura 7 - Boxplot da série histórica (quinquênios) da concentração de oxigênio dissolvido no ponto PCAB 02220

No Ribeirão Piracicamirim, a concentração de oxigênio dissolvido foi historicamente maior que no Rio Piracicaba (Figura 8). No mesmo intervalo de tempo, os valores do Rio Piracicaba variaram entre 0 e 6 mg/L, enquanto que no ribeirão a faixa foi de 2 a 8 mg/L. Ademais, a melhora na qualidade foi notável, sendo plausível supor alguma influência positiva na recuperação do oxigênio dissolvido do ponto PCAB 02220, a jusante da ETE.

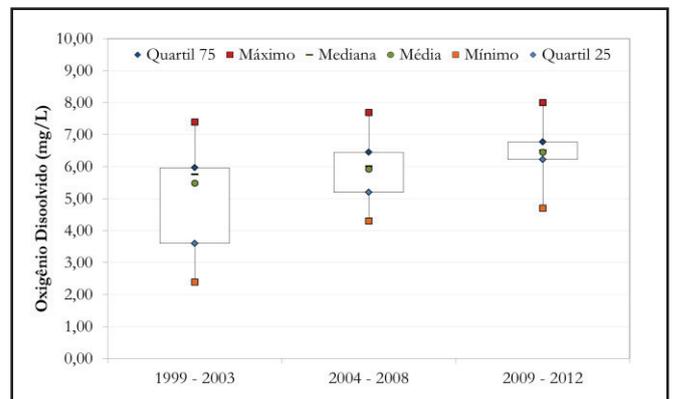


Figura 8 - Boxplot da série histórica (quinquênios) da concentração de oxigênio dissolvido no ponto PIMI 02900

Os resultados da Tabela 1 ajudam a complementar as observações prévias, em que a análise da porcentagem de casos em não-conformidade com os padrões estabelecidos pela legislação indica que 100% dos valores da concentração de oxigênio dissolvido dos pontos no Rio Piracicaba estão abaixo do limite desejável desde o quinquênio 1999-2003. Há uma relativa melhora apenas no último período no ponto a jusante da ETE, com redução para 92% dos valores em não-conformidade. Mesmo assim, esses resultados são piores que os casos para os rios monitorados pela CETESB entre 2005 e 2009, em que o número médio de não-conformidades é de 39% para essa variável (CUNHA et al., 2013). No caso dos pontos PCAB 02192 e PCAB 02220, a concentração média esteve sempre abaixo da média do estado entre 2005 e 2009, que foi de 5,0 mg/L (CUNHA et al., 2013).

Tabela 1 - Porcentagem de casos de não-conformidade das variáveis em relação aos limites da Resolução CONAMA 357/2005. Valores de referência: oxigênio dissolvido (mínimo de 5 mg/L); DBO_{5,20} (máximo de 5 mg/L); coliformes termotolerantes (máximo de 1000 UFC/100 mL). O ponto PIMI 02900 começou a ser monitorado a partir de 2000

Pontos de Monitoramento	Variável	1980-1986	1990-1994	1995-1998	1999-2003	2004-2008	2009-2012
PCAB 02192	Oxigênio Dissolvido	74 <i>n</i> = 73	93 <i>n</i> = 28	96 <i>n</i> = 24	100 <i>n</i> = 30	100 <i>n</i> = 30	100 <i>n</i> = 24
	DBO _{5,20}	10 <i>n</i> = 73	18 <i>n</i> = 28	33 <i>n</i> = 24	50 <i>n</i> = 30	27 <i>n</i> = 30	33 <i>n</i> = 24
	Coliformes Termotolerantes	97 <i>n</i> = 73	100 <i>n</i> = 28	100 <i>n</i> = 24	97 <i>n</i> = 30	93 <i>n</i> = 30	96 <i>n</i> = 24
	Oxigênio Dissolvido	78 <i>n</i> = 73	93 <i>n</i> = 28	96 <i>n</i> = 24	100 <i>n</i> = 30	100 <i>n</i> = 30	92 <i>n</i> = 24
PCAB 02220	DBO _{5,20}	12 <i>n</i> = 73	29 <i>n</i> = 28	33 <i>n</i> = 24	37 <i>n</i> = 30	27 <i>n</i> = 30	50 <i>n</i> = 24
	Coliformes Termotolerantes	100 <i>n</i> = 73	100 <i>n</i> = 28	100 <i>n</i> = 24	100 <i>n</i> = 30	97 <i>n</i> = 30	100 <i>n</i> = 23
	Oxigênio Dissolvido	* <i>n</i> = 73	* <i>n</i> = 28	* <i>n</i> = 24	19 <i>n</i> = 16	13 <i>n</i> = 30	4 <i>n</i> = 24
	DBO _{5,20}	* <i>n</i> = 73	* <i>n</i> = 28	* <i>n</i> = 24	100 <i>n</i> = 15	90 <i>n</i> = 30	83 <i>n</i> = 24
PIMI 02900	Coliformes Termotolerantes	* <i>n</i> = 73	* <i>n</i> = 28	* <i>n</i> = 24	100 <i>n</i> = 9	100 <i>n</i> = 24	96 <i>n</i> = 24

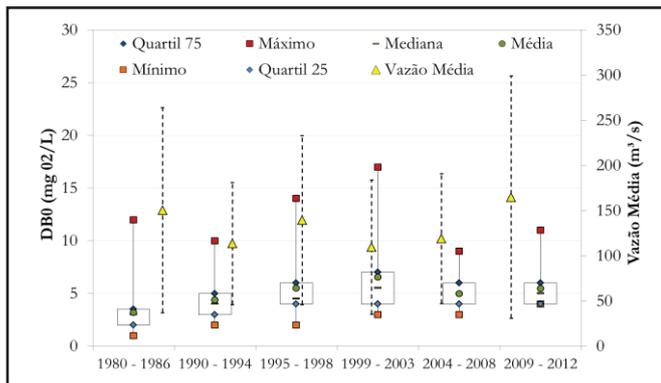


Figura 9 - Boxplot da série histórica (quinquênios) da DBO_{5,20} no ponto PCAB 02192

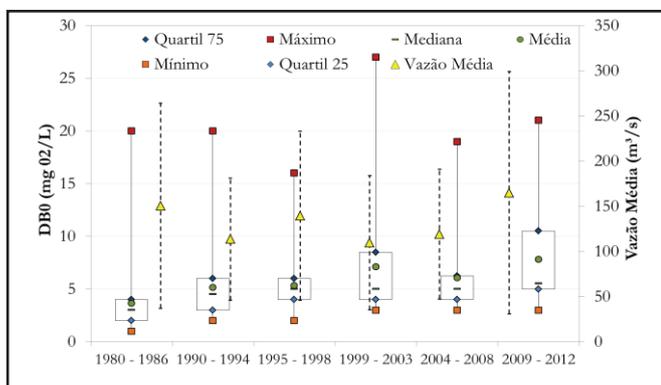


Figura 10 - Boxplot da série histórica (quinquênios) da DBO_{5,20} no ponto PCAB 02220

Ao que diz respeito à DBO_{5,20}, tanto a montante (Figura 9) quanto a jusante (Figura 10), ocorreu um aumento contínuo das médias com uma consequente deterioração da qualidade da água no Rio Piracicaba. No Ribeirão Piracicamirim o efeito constatado foi o oposto, ou seja, as médias tenderam a diminuir (Figura 11).

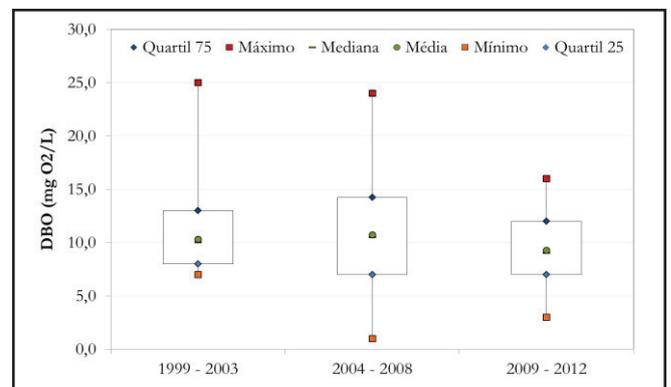


Figura 11 - Boxplot da série histórica (quinquênios) da DBO_{5,20} no ponto PIMI 02900

Apesar da melhora, os valores de DBO_{5,20} continuaram muito elevados, sendo que do quinquênio 1999-2003 até 2009-2012, a porcentagem de valores em não-conformidade reduziu de 100% para 86% no Ribeirão Piracicamirim (Tabela 1). Esta redução é sensível, mas ainda destoante quando esse último valor é comparado com o ponto PCAB 02220: 50% de casos em não-conformidade. Seguindo essa linha de raciocínio, é razoável pressupor que as altas concentrações da DBO_{5,20} no Ribeirão Piracicamirim possam ter influenciado a não observação de algum efeito positivo da ETE sobre o Rio Piracicaba neste parâmetro. Como base de comparação, Cunha et al. (2013) observaram uma média de 21% de não-conformidades para todos

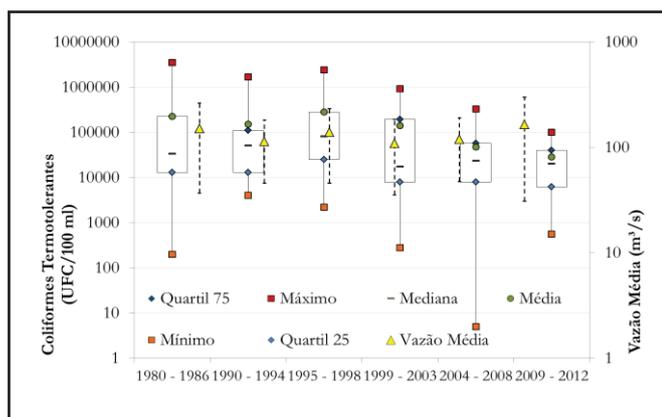


Figura 12 – Boxplot da série histórica (quinquênios) da concentração de coliformes termotolerantes no ponto PCAB 02192

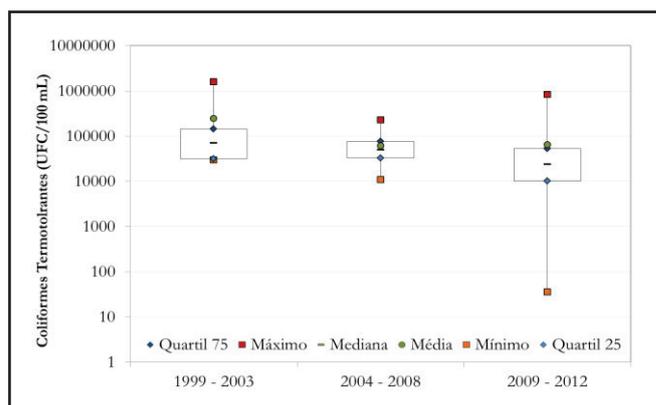


Figura 14 - Boxplot da série histórica (quinquênios) da concentração de coliformes termotolerantes no ponto PIMI 02900

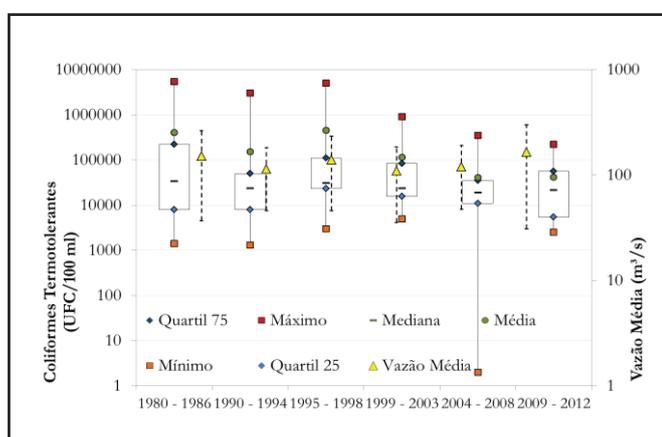


Figura 13 - Boxplot da série histórica (quinquênios) da concentração de coliformes termotolerantes no ponto PCAB 02220

os rios monitorados pela CETESB entre 2005 e 2009, de forma que os três pontos encontram-se muito acima da média. Apesar disso, a média da $DBO_{5,20}$ para estes pontos manteve-se abaixo da média de $9 \text{ mg O}_2/\text{L}$, calculada por Cunha et al. (2013) para os todos os rios monitorados no Estado entre 2005 e 2009.

Por fim, a variável coliformes termotolerantes foi a que apresentou o comportamento mais peculiar (Figuras 12, 13 e 14). Não houve grande variação das médias ao longo das séries históricas para todos os pontos de monitoramento, exceto por uma tendência muito leve de melhora na última década, mas que demandaria, seguramente, de monitoramento mais detalhado desta variável (e não apenas o da CETESB), a fim de concluir

se a mesma está ou não está relacionada com fatores naturais, externos e/ou sazonais.

Ao mesmo tempo, a concentração de coliformes termotolerantes mostrou-se elevada, uma vez que ao longo de todas as séries anuais a porcentagem de casos em não-conformidade sempre foi maior do que 90%, tanto no Rio Piracicaba quanto no Ribeirão Piracicamirim (Tabela 1). Tais resultados sinalizam que a existência de descarte de esgoto doméstico não tratado é uma realidade contínua no espaço e no tempo, requerendo a ação das autoridades responsáveis na bacia hidrográfica.

Apesar de o teste de análise de variância não detectar uma diferença significativa entre as médias quinquenais das variáveis $DBO_{5,20}$ e coliformes termotolerantes ($p > 0,05$), ela permite que se façam duas observações relevantes envolvendo o oxigênio dissolvido e o IQA (Tabela 2). Através do teste de Tukey verificou-se que as médias, para o oxigênio dissolvido, dos períodos de 1980-1986 e 2009-2012, divergiram da média do quinquênio entre 1990-1994, demonstrando uma piora acompanhada de uma melhora. Para o IQA, o período de 1980-1986 divergiu dos quinquênios de 1995-1998 e 1999-2003, mas não dos períodos que compreendem a última década, indicando assim uma recuperação na qualidade.

A tendência de melhora geral na qualidade das águas do Rio Piracicaba e Ribeirão Piracicamirim indica que a ETE tem realizado um papel importante para o saneamento da região. De fato, esse cenário torna-se mais evidente quando examinado concomitantemente ao aumento populacional e ao uso da terra. Todos os municípios localizados a montante da

Tabela 2 - Resultado do teste de análise de variância e da comparação múltipla entre as médias para o ponto PCAB 02220

Variável	Valor-p	Teste de Tukey					
		1980-1986	1990-1994	1995-1998	1999-2003	2004-2008	2009-2012
Oxigênio Dissolvido	0,0008	3,29 a,b,c <i>n</i> = 6	2,10 a,d <i>n</i> = 6	2,70 <i>n</i> = 6	2,14 b <i>n</i> = 6	2,42 c <i>n</i> = 6	2,93 d <i>n</i> = 6
$DBO_{5,20}$	0,0639	*	*	*	*	*	*
Coliformes Termotolerantes	0,2015	*	*	*	*	*	*
IQA	0,0035	43,41 e,f <i>n</i> = 6	32,65 e <i>n</i> = 6	36,82 <i>n</i> = 6	36,06 f <i>n</i> = 6	36,79 <i>n</i> = 6	37,91 <i>n</i> = 6

ETE acompanharam o crescimento relativo do Estado de São Paulo e do Brasil (Figura 15), com destaque para os municípios de Rio das Pedras e Saltinho, ambos localizados na sub-bacia do Ribeirão Piracicamirim. Rio das Pedras, por exemplo, teve um crescimento na ordem de 50% num período de apenas 20 anos.

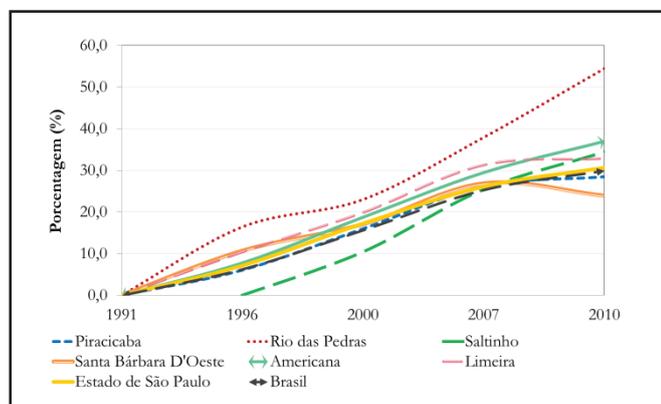


Figura 15 - Crescimento relativo (%) da população dos municípios a montante da ETE Piracicamirim

O crescimento populacional, além de aumentar a demanda por recursos hídricos, também gera um aumento na produção de efluentes domésticos e, como resultado, na degradação da água dos rios que recebem esses efluentes quando não são devidamente tratados. A ETE figura num confronto marcado de um lado por sua capacidade operacional e, de outro, pelo constante crescimento urbano. O produto disso é a manutenção do IQA em índices inferiores aos obtidos na década de 1980. Destarte, a ETE não foi capaz de reverter o quadro de qualidade da água, mas desacelerou a sua degradação. Cunha et al. (2013) reconhecem uma evolução em termos de número de unidades de ETEs no estado entre 2005 e 2009, mas ressaltam que a insuficiência desses sistemas pode ser considerada uma das principais causas do comprometimento dos usos múltiplos dos recursos hídricos no Estado, em que os rios degradam para a Classe 4 de modo praticamente irreversível.

Resultados semelhantes foram obtidos por Saad et al. (2015) em seu trabalho sobre a qualidade das águas do alto curso do Rio Baquirivu-Guaçu (Alto Tietê), concluindo que desde o início da operação da ETE Arujá, em 2004, a degradação da água sofreu uma desaceleração e a qualidade manteve-se constante até pelo menos o ano de 2010. Novamente, esta condição de degradação relaciona-se com um crescimento urbano sem planejamento, por isso a importância de aplicar corretamente os instrumentos políticos a fim de alcançar a universalidade de acesso aos recursos hídricos. Nesta mesma linha, Cunha et al. (2013) sugerem a definição de metas de melhoria com cronograma e estratégias específicas para cada UGRHI. Neste contexto é necessário contemplar a vocação regional da bacia hidrográfica e a dinâmica de interações entre os elementos tensores e agentes decisores (KANDULU et al., 2014). Aliado a isso, deve-se considerar a tendência de urbanização para o adequado planejamento das metas, incluindo a construção de modelos de serviços ecossistêmicos, mesmo que sem a estimativa de valoração ambiental (ENGEL; SCHAEFER, 2013). Ometo

et al. (2000) demonstraram que na bacia do Rio Piracicaba, em pontos à montante da nossa área de análise, a urbanização é o principal tensor sobre a qualidade da água e, por consequência, sobre as comunidades de macroinvertebrados aquáticos, seguida da cultura de cana-de-açúcar e das pastagens. No presente caso, observa-se que a alta taxa de crescimento populacional nas cidades a montante da ETE sinaliza à necessidade de ampliação da capacidade de operação do sistema, além da adoção de medidas técnicas, políticas e educacionais que auxiliem na redução da emissão de efluentes domésticos e melhor enquadramento dos rios (MACEDO et al., 2011; SOUZA et al., 2012; GOMES; SIMÕES, 2014; SOUZA et al., 2014). Dentre elas, está a recuperação das matas ciliares e de fragmentos florestais, que contribuem significativamente para a manutenção das condições da água em patamares mais elevados de qualidade (GYAWALI et al., 2013; PINHEIRO et al., 2014a, b; ZUCCO et al., 2014). Outra ação recomendável especificamente para a ETE do Rio Piracicamirim é a sua adequação para remoção de nutrientes dos efluentes, tal como sugerido por Daniel et al. (2002). Caso o planejamento integrado e sua execução não sejam executados, a tendência é de piora dos casos de não-conformidades das variáveis da qualidade da água, uma vez que as cargas não removidas pelos sistemas de tratamento contribuem para a ampliação da degradação dos recursos hídricos (CUNHA et al., 2013).

CONCLUSÃO

A metodologia utilizada nesse trabalho expôs a conveniência de se incorporar diferentes ferramentas estatísticas para a análise de séries históricas de indicadores de qualidade da água. Ressalta-se que as variáveis monitoradas pela CETESB exigem um estudo integrado, considerando o contexto espacial e temporal, para se gerar uma visão robusta dos impactos ocasionados na qualidade dos recursos hídricos e, por conseguinte, ser capaz de orientar adequadamente os tomadores de decisão.

Os resultados obtidos indicam que houve uma redução significativa na qualidade das águas da bacia do Rio Piracicaba entre o final da década de 1980 e início da década de 1990. Não restam dúvidas de que a degradação seria menos intensa se os aparatos legais e institucionais fossem aplicados eficientemente face ao crescimento urbano durante o período. Diante da crise hídrica instaurada no Estado de São Paulo, torna-se necessário a aplicação de recursos para se atingir um cenário de qualidade desejado, i.e., onde as variáveis e os corpos d'água estejam de acordo com os padrões estabelecidos para cada classe de uso. Todavia, adverte-se que a aplicação de recursos deve ser feita com planejamento adequado, considerando a variabilidade da oferta e demanda pelos recursos hídricos.

A estação de tratamento de esgoto Piracicamirim, a qual iniciou suas atividades no final do primeiro semestre de 1998, auxiliou a manter a qualidade da água (IQA) aproximadamente constante a partir da década de 2000, ainda que os valores da $DBO_{5,20}$ tenham aumentado no Rio Piracicaba e o índice não tenha retomado aos valores alcançados na década de 1980.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos aos revisores anônimos, que contribuíram para a melhora da qualidade deste artigo.

REFERÊNCIAS

ANA – Agência Nacional de Águas (Ministério do Meio Ambiente). *Banco de Dados: Hidroweb*. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acessado em: 14 de setembro de 2013.

ANA – Agência Nacional de Águas (Ministério do Meio Ambiente). *PRODES: programa despoluição de bacias hidrográficas*. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/a-n-a.pdf. Acessado em 05 de janeiro de 2015.

BALLESTER, M. V.; MARTINELLI, L. A.; KRUSCHE, A. V.; VICTORIA, R. L.; BERNARDES, M.; CAMARGO, P. B. Effects of increasing organic matter loading on the dissolved O₂, free dissolved CO₂ and respiration rates in the Piracicaba river basin, southeast Brazil. *Water Research*, v. 33, n. 9, p. 2119-2129, 1999.

BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. *Diário Oficial da União*, 9 de janeiro de 1997.

BRASIL. *Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005*. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*, 18 de março de 2005.

CAMOLESE, J. E.; LEME, H. M. P.; MERLI, G. L. ETE - Piracicamirim – proposta alternativa para tratamento de esgoto de 100.000 habitantes (licitação, construção e operação). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 20. 1999, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABES; 1999, p.710-718.

CAMPOS, M.V.C.V.; RIBEIRO, M.M.R.; VIEIRA, Z.M.C.L. A Gestão de Recursos Hídricos Subsidiada pelo Uso de Indicadores de Sustentabilidade. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p. 209-222, 2014.

CBHPCJ – Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Conselho Estadual de Recursos Hídricos). *Situação dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá UGRHI 5*. Piracicaba, 2002. Relatório zero

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Secretaria do Meio Ambiente) *Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo*. São Paulo, 1981-2013.

COMITEPCJ – Comitês PCJ (Conselho Nacional de Recursos Hídricos). *Relatório da Situação dos Recursos Hídricos 2011: ano base 2010*. Piracicaba, 2011.

CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M.C.; LAMPARELLI, M.C.; MENEGON JR., N. Resolução CONAMA 357/2005: análise espacial e temporal de não conformidades em rios e reservatórios do estado de São Paulo de acordo com seus enquadramentos (2005-2009). *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 159-168, 2013.

DANIEL, M.H.B.; MONTEBELO, A.A.; BERNARDES, M.C.; OMETO, J.P.H.B.; CAMARGO, P.B.; KRUSCHE, A.V.; BALLESTER, M.V.; VICTORIA, R.L.; MARTINELLI, L.A. Effects of urban sewage on dissolved oxygen, dissolved inorganic carbon, and electrical conductivity of small streams along a gradient of urbanization in the Piracicaba River basin. *Water, Air and Soil Pollution*, v. 136, p. 189-206, 2002.

ENDERLEIN, U.S.; ENDERLEIN, R.E.; WILLIAMS, W.P. Water quality requirements. In: HELMER, R.; HESPANHOL, I. (eds.) *Water Pollution Control: a guide to the use of water quality management principles*. Londres: E. & F. Spon. 1997, 526p.

ENGEL, S.; SCHAEFER, M. Ecosystem services: a useful concept for addressing water challenges? *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 5, n. 6, p. 696-807, 2013.

FREIRE, A.P.; CASTRO, E.C. Análise da Correlação do uso e Ocupação do Solo e da Qualidade da Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 41-49, 2014.

GOMES, F.C.; SIMÕES, S.J.C. Simulação de Modelagem Qualitativa para Avaliação Preliminar da Qualidade da Água na Bacia do Ribeirão das Perdizes em Campos do Jordão/SP, como Subsídio ao Enquadramento. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 309-326, 2014.

GYAWALI, S.; TECHATO, K.; YUANGYAI, C.; MUSIKAVONG, C. Assessment of Relationship between Land uses of Riparian Zone and Water Quality of River for Sustainable Development of River Basin, A Case Study of U-Tapao River Basin, Thailand. *Procedia Environmental Sciences*, v. 17, p. 291-297, 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de Dados: cidades. Disponível em: (<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>, acessado em: 14 de setembro de 2013).

KANDULU, J.M.; CONNOR, J.D.; MACDONALD, D.H. Ecosystem services in urban water investment. *Journal of Environmental Management*, v. 145, p.43-53, 2014.

LANNA, A.E. Gestão dos Recursos Hídricos. In: TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH; 2012, p.727-768.

- MACEDO, D.R.; CALLISTO, M.; MAGALHÃES-JR., A.P. Restauração de Cursos d'água em Áreas Urbanizadas: Perspectivas para a Realidade Brasileira. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 3, p. 127-139, 2011.
- OMETO, J.P.H.B.; MARTINELLI, L.A.; BALLESTER, M.V.; GESSNER, A.; KRUSCHE, A.V.; VICTORIA, R.L.; WILLIAMS, M. Effects of land use on water chemistry and macroinvertebrates in two streams of the Piracicaba river basin, south-east Brazil. *Fresh water Biology*, v. 40, n. 2, p. 327-337, 2000.
- PINHEIRO, A.; PIAZZA, G.A.; ALVES, T.C.; AGUIDA, L.M.; KAUFMANN, V.; GOTARDO, R. Qualidade das Águas de uma Bacia Protegida por Floresta Ombrófila Densa. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 101-117, 2014a.
- PINHEIRO, A.; SCHOEN, C.; SCHULTZ, J.; HEINZ, K.G.H.; PINHEIRO, I.G.; DESCHAMPS, F.C. Relação Entre o Uso do Solo e a Qualidade da Água em Bacia Hidrográfica Rural no Bioma Mata Atlântica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p.127-139, 2014b.
- SAAD, A.R.; MARTINEZ, S.S.; GOULART, M.E.; SEMENSATTO, D.; VARGAS, R.R.; ANDRADE, M.R.M. Efeitos do uso do solo e da implantação da estação de tratamento de esgoto sobre a qualidade das águas do rio Baquirivu-Guaçu, região metropolitana de São Paulo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 1, p. 147-156, 2015.
- SÁNCHEZ-ROMÁN, R.M.; FOLEGATTI, M.V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A.M.G. Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá utilizando modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas. *Engenharia Agrícola*, v. 29, n.4, p.578-590, 2009.
- SÃO PAULO. Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos: seu Programa de Investimentos e a Regulamentação da Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos, do Estado de São Paulo. 2005, 146p.
- SOMLYÓDY, L. Water quality management: Can we improve integration to face future problems? *Integrated Water Resources Management*, v. 31, n. 8, p. 249-259, 1995.
- SOUZA, C.F.; CRUZ, M.A.S.; TUCCI, C.E.M. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 2, p. 9-18, 2012.
- SOUZA, J.C.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F. Subsídios para o Enquadramento dos Cursos de Água da Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim Considerando Aportes de Esgotos Sanitários. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 255-270, 2014.
- TUCCI, C.E.M. Urbanização e Recursos Hídricos. In: BICUDO, C.E.M; TUNDISI, J.G; SCHEUENSTUHL, M.C.B. *Águas do Brasil: análises estratégicas*. São Paulo: Instituto de Botânica; 2010, p.111-128.
- TUNDISI, J.G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. *Estudos Avançados*, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.
- ZHOU, T.; WU, J.; PENG, S. Assessing the effects of landscape pattern on river water quality at multiple scales: A case study of the Dongjiang River watershed, China. *Ecological Indicators*, v. 23, p. 166-175, 2012.
- ZUCCO, E.; PINHEIRO, A.; SOARES, P.A. Influência do Uso do Solo no Transporte de Cargas Anuais de Poluentes em uma Bacia Agrícola. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p. 19-28, 2014.