

Índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) aplicado em afluente da Represa Bortolan em Poços de Caldas (MG)

Total phosphorus trophic state index (TP-TSI) applied for Bortolan Dam tributary in the Poços de Caldas (MG)

- **Data de entrada:**
14/07/2017
- **Data de aprovação:**
20/02/2018

Diego de Souza Sardinha*/Antonio Donizetti Goncalves de Souza/Antonio Marciano da Silva/
Cochise Ricci Libanio/Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes/Rafael de Oliveira Tiezzi

DOI: 10.4322/dae.2019.018

Resumo

O exutório da bacia do Córrego da Ariranha situa-se na represa Bortolan, importante reservatório para geração de energia e atividades de recreação em Poços de Caldas (MG). Como a eutrofização pode levar à alteração da qualidade da água, este trabalho avaliou o índice de estado trófico para fósforo total nas águas pluviais e fluviais durante um ano hidrológico. Os valores indicam que as águas fluviais apresentaram qualidade de boa a intermediária, oligotróficas ($47 < IET \leq 52$) a mesotróficas ($52 < IET \leq 59$) com potencial de desenvolvimento do processo de eutrofização. Para as águas pluviais, os valores indicam água limpa, ultraoligotróficas ($IET \leq 47$) e oligotróficas ($47 < IET \leq 52$), com concentrações insignificantes e/ou baixas de nutrientes que não acarretam em prejuízos aos usos da água de chuva. Este trabalho reúne informações importantes para subsidiar o monitoramento das águas e permitir o emprego de ações preventivas de manejo neste importante reservatório.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica. Águas fluviais. Águas pluviais. Eutrofização.

Abstract

The Ariranha Stream basin mouth is located at the Bortolan dam, an important reservoir for power generation and recreation activities at Poços de Caldas (MG). As eutrophication can lead to water quality changes, this work evaluated rainwater and river waters trophic state index for total phosphorus during a hydrological year. The river waters presented a good to intermediate quality, oligotrophic ($47 < IET \leq 52$) to mesotrophic ($52 < IET \leq 59$), with potential eutrophication process development. Data indicate clean water for rainwater, ultraoligotrophic ($IET \leq 47$) to oligotrophic ($47 < IET \leq 52$), with insignificant and/or low nutrients concentrations that do not cause damages to the rainwater uses. This work gathers important information in order to support water monitoring and allows preventive management actions in this important reservoir.

Keywords: Watershed. River waters. Rainwater. Eutrophication.

Diego de Souza Sardinha – Engenheiro Ambiental. Mestre e Doutor em Geologia Regional. Professor-adjunto do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal).

Antonio Donizetti Goncalves de Souza – Biólogo. Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental. Doutor em Ecologia e Recursos Naturais. Professor Associado do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal).

Antonio Marciano da Silva – Engenheiro Agrônomo. Mestre em Hidrologia Aplicada. Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento. Professor Visitante Sênior Nacional do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal) com bolsa CAPES.

Cochise Ricci Libanio – Geógrafo. Mestrando em Ciências Ambientais. Técnico do Laboratório de Ecossistemas Aquáticos de Solos do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal).

Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes – Engenheiro Ambiental, Mestre e Doutor em Geociências Aplicadas. Professor-adjunto do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal).

Rafael de Oliveira Tiezzi – Engenheiro Ambiental. Mestre em Planejamento Energético. Doutor em Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais. Professor-adjunto do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal).

***Endereço para correspondência:** Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999 (BR 267 - Km 533) Cidade Universitária - CEP 37715-400 - Poços de Caldas (MG). E-mail: diego.sardinha@unifal-mg.edu.br.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação, que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, o exutório. Seus limites são estabelecidos topograficamente pela linha que une os pontos de maior altitude e que definem os divisores de água. A área de uma bacia hidrográfica contempla atividades agrícolas, industriais, formações vegetais, nascentes, córregos e riachos, lagoas e represas, rochas e solos, ou seja, todos os habitats e unidades da paisagem antrópica e natural.

Em condições naturais, a qualidade da água em uma bacia hidrográfica é afetada pelo escoamento superficial, infiltração e interação água-rocha/solo, resultantes da precipitação atmosférica. Em condições antrópicas, a qualidade da água pode ser afetada pelos despejos domésticos, industriais e/ou agrícolas, por meio da aplicação de fertilizantes, defensivos agrícolas e materiais particulados presentes na atmosfera. Assim, segundo Sardinha et al. (2015), o estudo da qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos em uma bacia hidrográfica é primordial para a compreensão das alterações causadas por fenômenos naturais e/ou antrópicos.

A mudança provocada no sistema aquático por meio de ações antrópicas domésticas, industriais e/ou agrícolas interfere diretamente na eutrofização do sistema aquático (CARLSON, 1977; KRATZER & BREZONIK, 1981; OSGOOD, 1982; WHITMORE, 1989; SALAS & MARTINO, 1991; DODDS et al., 1991; DICENZO et al., 1996; MATTHEWS et al., 2002; SMITH et al., 2006; ZANINI et al., 2010; ANDRIETTI et al., 2016, ALVES et al., 2017). A eutrofização é o aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio nos ecossistemas aquáticos, que tem como consequência o aumento de suas produtividades e pode levar a alteração no sabor, odor, turbidez, redução de oxigênio dissolvido e contaminação da água (ESTEVES, 1998; LAMPARELLI, 2004; TUNDISI,

2005). A produção de energia hidroelétrica também pode ser afetada pela presença excessiva de macrófitas aquáticas.

O estado trófico é uma propriedade importante dos ecossistemas aquáticos, pois reflete a influência antropogênica na qualidade da água e o funcionamento ecológico de rios, lagos e reservatórios (CUNHA et al., 2013). De forma a se poder caracterizar o estágio de eutrofização em que se encontra um corpo d'água, possibilitando a tomada de medidas preventivas e/ou corretivas, é interessante a adoção de um sistema classificatório (VON SPERLING, 2014). Segundo Fia et al. (2009), um índice de estado trófico funciona como um registro das atividades humanas em bacias hidrográficas, oferecendo subsídios para a formulação de planos de manejo e gestão de ecossistemas aquáticos. Nesse sentido, o índice de estado trófico classifica os corpos d'água em diferentes graus de trofia, avaliando a qualidade das águas quanto ao enriquecimento por nutrientes e seus efeitos relacionados ao crescimento de cianobactérias, algas e macrófitas aquáticas.

O exutório da bacia do Córrego da Ariranha situa-se na represa Bortolan, que movimenta as turbinas da Central Geradora Hidrelétricas (CGH de Bortolan) e é frequentada por praticantes de esportes náuticos e turistas em geral. A alteração na qualidade de água deste importante sistema pode promover vários efeitos em níveis biológicos, econômicos, sociais e de saúde pública. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) das águas pluviais e fluviais da bacia do Córrego da Ariranha, Poços de Caldas (MG). O fósforo total é um dos nutrientes que atuam como agente causador de interferências para os usos desejáveis da água. Além disso, são poucos os estudos, como o de Garcia & Cardoso (2015), que relacionam o índice de estado trófico para fósforo total nas águas superficiais em relação à deposição atmosférica em uma bacia hidrográfica.

2 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Córrego da Ariranha possui uma área de 6,3 km² e situa-se entre os paralelos 21°47'55" e 21°49'07" S e meridianos 46°38'27" e 46°40'17" W, na região noroeste do município de Poços de Caldas (Figura 1), região de expansão comercial e imobiliária, segundo a revisão do Plano Diretor Municipal (PMPC, 2006). O Córrego da Ariranha possui um uso do solo diversificado com culturas anuais como a batata, o milho e o café, antigas áreas de mineração de bauxita reflorestadas com silvicultura de eucaliptos, pastos para a criação de gado de corte e leite, matas nativas e pequenos aglomerados, áreas consolidadas para empreendimentos imobiliários (Figura 1). Quanto à cobertura vegetal, a região possui uma diversidade variada, e caracteriza-se por contatos transicionais da floresta estacional semidecidual à floresta ombrófila mista, com a ocorrência de cerrado gramíneo lenhoso e, em áreas restritas, florestas estacionais (IBAMA, 1990).

O contexto geomorfológico de Poços de Caldas com relevos e declividades contrastantes, reflete-se na área da bacia do Córrego da Ariranha. A região Oeste da bacia é acompanhada em toda a

sua extensão pela cadeia de montanhas de maior declividade (dique anelar que possui estrutura circular e compreende as montanhas com topos restritos), de onde drenam oito das nove nascentes que contribuem com suas águas para a bacia do Córrego da Ariranha. A região Leste da bacia é formada pelo maciço alcalino interno, com morros e morrotes de topos arredondados e colinas.

Quanto à geologia, na área da bacia afloram tinguaitos de coloração acinzentada; são rochas equigranulares, porfíricas, mais grossas do que os fonólitos vulcânicos. Os tufos vulcânicos e/ou brechas de tinguaito afloram como brechas caóticas maciças, com fragmentos angulosos e acessórios de tamanhos variados, rodeados por material muito fino de coloração cinza. Na bacia afloram latossolos profundos, com pouca diferenciação entre horizontes, e cambissolos com sequência de horizontes A, Bi e C. Solos indiferenciados de várzea, pouco profundos, com características orgânicas e arenosas, e solos de brecha vulcânica, com pedogênese controlada pelo material de origem, também fazem parte da paisagem.

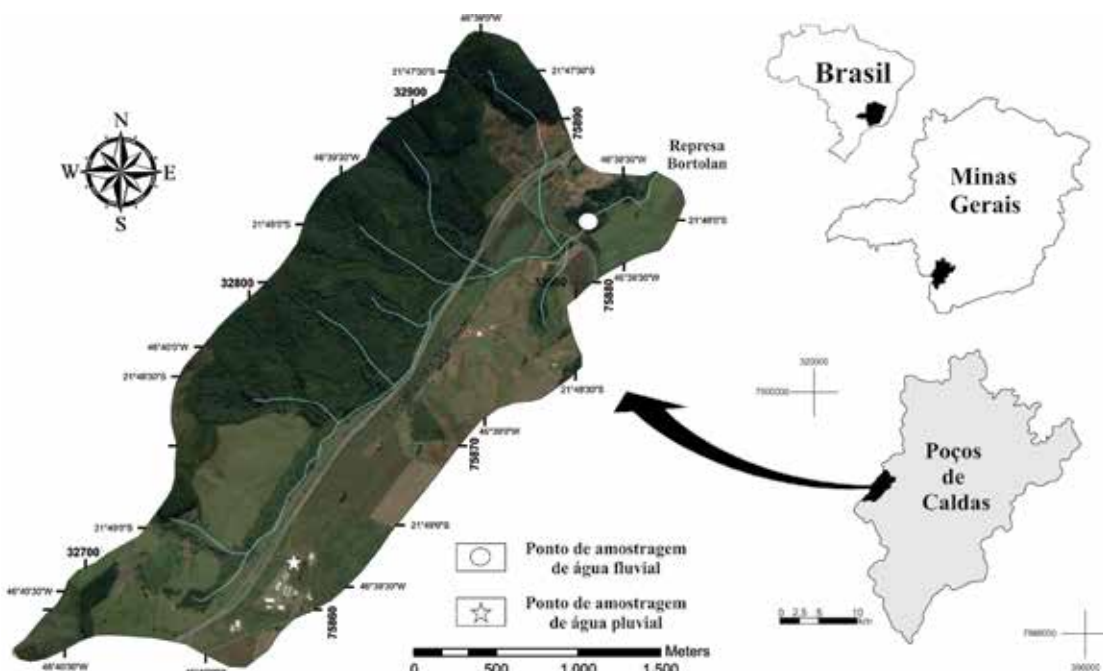


Figura 1. Localização e imagem do uso e ocupação do solo na bacia do Córrego da Ariranha em Poços de Caldas (MG).

Fonte: Imagem Google Earth Pro, 2015.

O clima da região da bacia é do tipo Cwb, de acordo com a classificação de Koppen, ou seja, mesotérmico com invernos secos e verões brandos. A estação seca ocorre de abril a setembro, com temperatura média de 15°C e total médio de chuvas de 315 mm; já a estação chuvosa, de outubro a março, tem temperatura média de 21°C e precipitações médias de 1430 mm (PMPC, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A fim de avaliar o índice de estado trófico para fósforo total, realizaram-se coletas de águas fluviais e pluviais na bacia do Córrego da Ariranha (Figura 1) durante um ano hidrológico. As águas pluviais foram coletadas entre 27/07/14 e 11/05/2015, totalizando 18 amostras. Para as águas fluviais foram realizadas amostragens mensalmente entre 04/06/2014 e 11/05/2015, sendo o ponto de amostragem localizado próximo ao exutório, onde se localiza a Represa Bortolan.

Para a amostragem das águas pluviais, foi utilizado coletor do tipo bulk (deposição seca e úmida), sendo composto por um recipiente de polietileno cilíndrico de 2600 mL, acoplado a um funil de aproximadamente 14 cm de diâmetro coberto por uma malha de 0,075 mm de abertura, ambos fixados a 1,50 metros do solo e próximo ao pluviômetro semiautomático Delta OHM 2013-DB. Para as águas fluviais foram coletadas amostras em três pontos na calha do Córrego Ariranha, margens direita e esquerda e no eixo principal da corrente, que foram compostas em uma única alíquota ainda em campo.

As amostras de águas foram analisadas em relação a temperatura (-10 a 55°C ± 0,3°C), pH (0 a 14 ± 0,1) e condutividade elétrica (0 a 100 µS/cm ± 0,1%). Para isso, foi utilizado o equipamento com eletrodos de leitura direta, medidor portátil U-50 Multiparameter Water Quality Checkers (Horiba), previamente calibrado em laboratório

para pH 4,00 (4,01 ± 0,01 a 25 ± 0,2°C) e 7,00 (7,01 ± 0,01 a 25 ± 0,2°C). A condutividade elétrica foi calibrada usando solução padrão de KCl (1.0 mmol/L) de condutividade elétrica conhecida, 147 µS/cm a 25°C.

Amostras também foram coletadas e armazenadas em garrafas de polietileno, previamente lavadas, e encaminhadas ao laboratório IV da Universidade Federal de Alfenas (Unifal), para análise de alcalinidade e fósforo total. A alcalinidade foi realizada por titulação em triplicata segundo metodologia APHA (2012). As concentrações de fósforo total também foram determinadas em triplicata por meio de espectrofotometria pela metodologia de Strickland & Parsons (1960) e Valderama (1981), por meio da curva de calibração com solução padrão de fosfato monobásico de potássio.

A vazão foi determinada utilizando-se uma régua limnométrica graduada para medida de nível da água, trena de aço graduada para largura e micromolinete Flow Rate Sensor Vernier para velocidade (0,00 a 4,00 m/s ± 0,01 m/s). A vazão foi estimada de acordo com a Equação (1).

$$Q = H.L.V \quad (1)$$

Onde: Q = vazão (m³/s); H = profundidade do canal (m); L = largura do canal (m); V = velocidade de escoamento no canal (m/s).

Neste trabalho, os resultados correspondentes ao fósforo total (IET-PT) devem ser entendidos como uma medida do potencial de eutrofização, já que esse nutriente atua como o agente causador do processo. Com isso, o índice do estado trófico será composto pelas concentrações de fósforo total (IET-PT), modificados por Lamparelli (2004), sendo estabelecidos para ambientes lóticos, segundo a Equação (2).

$$IET_{PT} = 10 \times \left[6 - \left(\frac{0,42 - 0,36 \times \ln PT}{\ln 2} \right) \right] - 20 \quad (2)$$

Onde: PT = concentração de fósforo total medida à superfície da água, em µg/L; ln = logaritmo natural.

Os limites estabelecidos para as diferentes classes de trofia para a bacia do Córrego da Ariranha encontram-se na Tabela 1. A partir do cálculo do IET-PT, os rios de uma bacia hidrográfica podem ser classificados como (LAMPARELLI, 2004; CE-TESEB 2016):

(a) ultraoligotrófico, corpos d'água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam em prejuízos aos usos da água;

(b) oligotrófico, corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes;

(c) mesotrófico, corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos;

(d) eutrófico, corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos;

(e) supereutrófico, corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios florações de algas, e interferências nos seus múltiplos usos;

(f) hipereutrófico, corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios de florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos, inclusive sobre as atividades pecuárias nas regiões ribeirinhas.

Tabela 1. Classificação do estado trófico para rios segundo índice de Carlson (1977). Adaptado de Lamparelli (2004).

Estado trófico	Critério	PT (µg/L)
Ultraoligotrófico	IET ≤ 47	P ≤ 13
Oligotrófico	47 < IET ≤ 52	13 < P ≤ 35
Mesotrófico	52 < IET ≤ 59	35 < P ≤ 137
Eutrófico	59 < IET ≤ 63	137 < P ≤ 296
Supereutrófico	63 < IET ≤ 67	296 < P ≤ 640
Hipereutrófico	IET > 67	640 < P

A fim de comparar os resultados obtidos nas águas fluviais e pluviais neste trabalho, foi calculado o transporte específico (t/ano) para o elemento fósforo. Para conhecer o transporte específico de fósforo total nas águas fluviais da bacia do Córrego da Ariranha, foi necessário relacionar a concentração média ponderada para cada parâmetro com a vazão média do rio durante o período de amostragem, ou seja, estimou-se a quantidade total evacuada pelo rio em t/ano. A concentração média ponderada do parâmetro (CEF) foi obtida pela Equação 3.

$$C_{EF} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (3)$$

Onde: C_{EF} = média ponderada do parâmetro nas águas fluviais (mg/L); C_i = concentração do parâmetro na i-ésima amostra (mg/L); Q_i = vazão do rio durante a coleta da i-ésima amostra (m³/s).

No caso da água pluvial, pode-se obter a deposição atmosférica de fósforo total (t/ano), considerando a concentração média ponderada pelo volume de precipitação (CEP), dada pela Equação 4, a área da bacia e a quantidade de precipitação durante o período de amostragem.

$$C_{EP} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (4)$$

Onde: C_{EP} = concentração média ponderada pelo volume de precipitação; C_i = concentração do constituinte (mg/L) medida no evento i ; P_i = volume de precipitação (mm) medido no evento i .

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Águas fluviais

As águas fluviais de pequenas bacias hidrográficas localizadas em áreas rurais, importantes produtoras de água, como o Córrego da Ariranha, estão sendo modificadas devido ao mau uso e ocupação do solo por atividades agrícolas, expansão urbana e atividades de mineração sem planejamento. Com isso, a fim de verificar aportes de fósforo total que possam resultar na deterioração dessa importante fonte de água, a Tabela 2 e a Figura 2 apresentam os resultados obtidos para as águas superficiais da bacia do Córrego da Ariranha.

Tabela 2. Vazão e parâmetros físicos e químicos analisados nas águas fluviais da bacia do Córrego Ariranha.

Amostragem	Vazão (m³/s)	T°C	pH	Cond ¹ (µS/cm)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	P ² (µg/L)
04/06/2014	0,07	17,60	6,20	30,00	7,00	30,00
23/07/2014	0,07	15,90	5,90	30,00	7,70	20,00
22/08/2014	0,05	16,70	6,80	50,00	7,80	60,00
23/09/2014	0,04	19,90	6,60	60,00	14,20	60,00
14/10/2014	0,05	18,50	6,30	50,00	28,30	40,00
11/11/2014	0,12	22,40	5,90	40,00	7,50	20,00
17/12/2014	0,30	21,10	6,10	33,00	6,80	70,00
15/01/2015	0,29	21,80	6,20	33,00	7,50	120,00
11/02/2015	0,20	23,20	7,00	35,00	12,50	80,00
17/03/2015	0,12	21,60	7,10	38,00	15,00	40,00
27/04/2015	0,10	20,60	7,10	35,00	14,50	20,00
11/05/2015	0,08	19,10	5,90	78,00	12,50	20,00
Média	0,12	19,80	6,40	42,60	11,70	48,30
Desvio Padrão	0,09	2,23	0,45	13,88	5,88	29,67
Média ponderada (C_{EP})	--	--	--	--	10,2	62,7

¹Condutividade elétrica ²Fósforo Total.

A média de vazão de Córrego Ariranha foi de 0,12 m³/s, com os menores e maiores valores de vazão registrados nos meses de setembro (0,04 m³/s) e dezembro (0,30 m³/s) respectivamente, mostrando que esse parâmetro possui influência sazonal (figura 2a). Os períodos hidrológicos podem ser estimados tendo como limite os tempos distintos de potamofase (período de cheia ou acima da vazão média) e limnofase (período de estiagem ou abaixo da vazão média). Nesse sentido, observa-se que agosto é

o mês de menor vazão, com início dos períodos de chuva entre novembro e dezembro, fim do período de estiagem e/ou limnofase e predominância de dias acima da vazão média e/ou potamofase.

A temperatura é um fator determinante no direcionamento das reações que afetam os processos químicos, físicos e biológicos. Além disso, aumentos na temperatura da água podem estar relacionados com a sua origem natural ou antrópica, radiação, condução, convecção e despejos de

efluentes. Os menores valores para a temperatura da água foram observados em julho (15,9°C), e os maiores, em fevereiro (23,2°C), podendo assim observar uma variação de aproximadamente 7°C de temperatura da água entre o verão e o inverno (Figura 2b). A temperatura média da água foi 20,8°C, indicando uma região de temperatura amena.

Os valores de pH situaram-se próximos à neutralidade (6,4), com valor mínimo de 5,9 e máximo de 7,1 (Figura 2c). A resolução Conama 357/05 (Brasil 2005) estipula uma faixa entre 6,0 e 8,0 para cursos de água doce de Classe II. Segundo Von Sperling (2014), a diminuição do pH pode ocorrer de forma natural, como, por exemplo, pela dissolução de rochas que compõem a bacia hidro-

gráfica, ou de forma antropogênica, tendo como exemplo a oxidação da matéria orgânica.

Houve uma variação de 48 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nos valores de condutividade elétrica ao longo ao ano hidrológico (Figura 2d). Os valores entre 30 e 78 $\mu\text{S}/\text{cm}$ estão abaixo do esperado para águas naturais, 100 S/cm, segundo Hermes & Silva (2004). A variação dos valores de condutividade elétrica pode ter sido ocasionada por fontes naturais, como a litologia da bacia de drenagem; no entanto, águas de drenagem de sistemas de irrigação e escoamento superficial de áreas agrícolas podem ter contribuído para o aumento dos valores nos meses de agosto, setembro, outubro e maio.

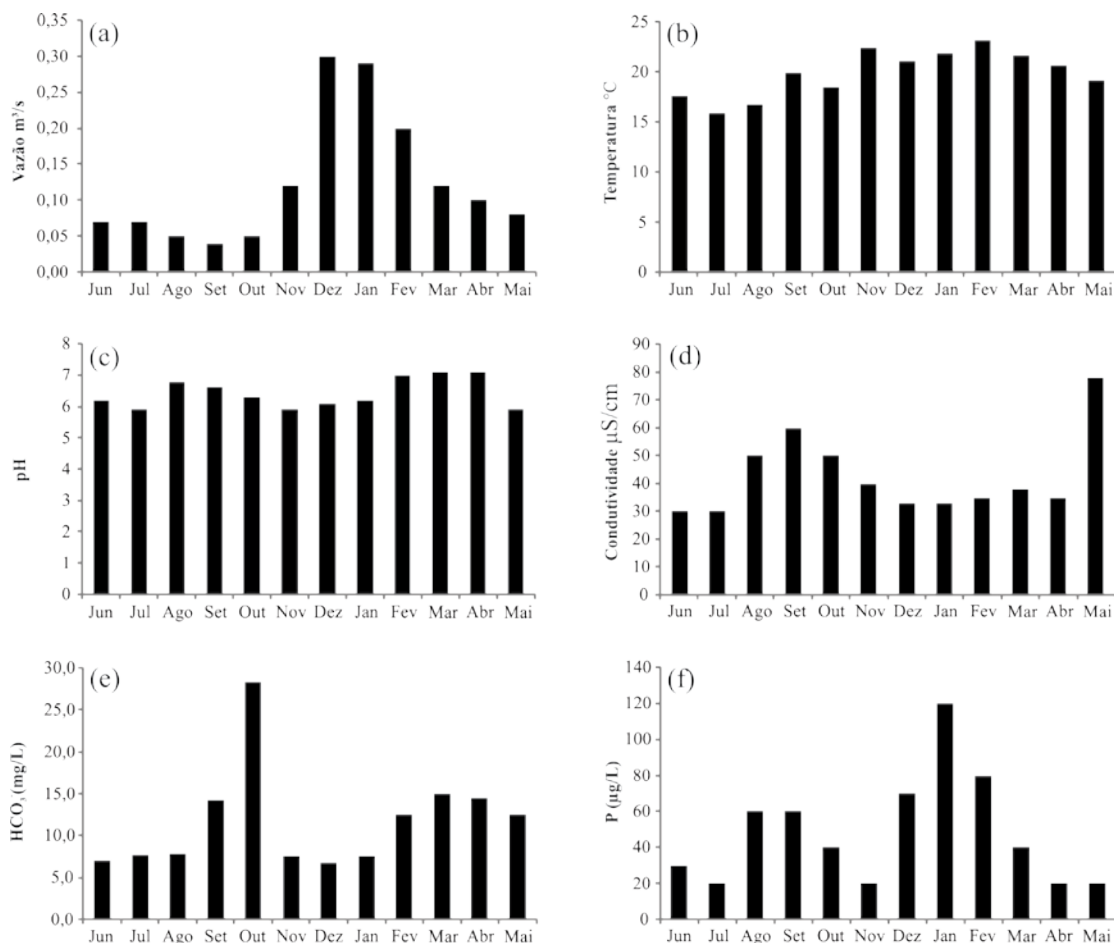


Figura 2. Parâmetros físico-químicos e químicos quantificados nas águas fluviais da bacia do Córrego Ariranha: (a) vazão (m³/s); (b) temperatura (°C); (c) potencial hidrogeniônico (pH); (d) condutividade elétrica (µS/cm); (e) alcalinidade (mg/L); (f) fósforo total (µg/L).

A alcalinidade variou entre 6,8 e 28,3 mg/L com uma média ponderada de 10,2 mg/L durante o período de estudo (Figura 2e). A alcalinidade pode ser entendida como a quantidade de íons presentes em um determinado corpo hídrico que reagem para neutralizar os íons hidrogênio ou ácidos (capacidade de resistir a mudanças de pH: capacidade tampão) (VON SPERLING, 2007). As variações encontradas na bacia (21,5 mg/L) podem estar associadas com a dissolução de rochas ou reações do CO₂, advindo da atmosfera ou da decomposição da matéria orgânica, com a água.

Em águas naturais que não foram submetidas a processos de poluição, a quantidade de fósforo varia de 0,005 mg/L a 0,020 mg/L (HERMES & SILVA 2004). Geralmente, a presença de fósforo nos mananciais, em concentrações superiores a 0,01 mg/l, determina proliferações de algas, o que pode causar problemas quanto à utilização desses locais (USEPA 2016). Os valores de fósforo variam

entre 0,02 e 0,12 mg/L (Figura 2f), sendo que o limite de fósforo para o Córrego da Ariranha, tributário direto de ambiente lântico, pode ser de até 0,05 mg/L, segundo Resolução Conama 357/05 para rios de Classe 2 (BRASIL, 2005).

4.2 Águas pluviais

A precipitação média anual entre os anos de 2003 e 2016 foi de 1.627 mm (CBA 2016), sendo janeiro o mês mais chuvoso (média de 339 mm) e agosto o mês mais seco (média de 25 mm) (Figura 3). O ano mais chuvoso durante esse período foi 2009 (2.373 mm), e o menos chuvoso, 2014 (1.300 mm). A precipitação total observada no período de estudo, de junho de 2014 a maio de 2015, foi de 1.494 mm, valor inferior em somente 8% da média histórica anual. Apesar das variações observadas, a precipitação total no período de estudo pode ser considerada próxima à média histórica da região (Figura 3).

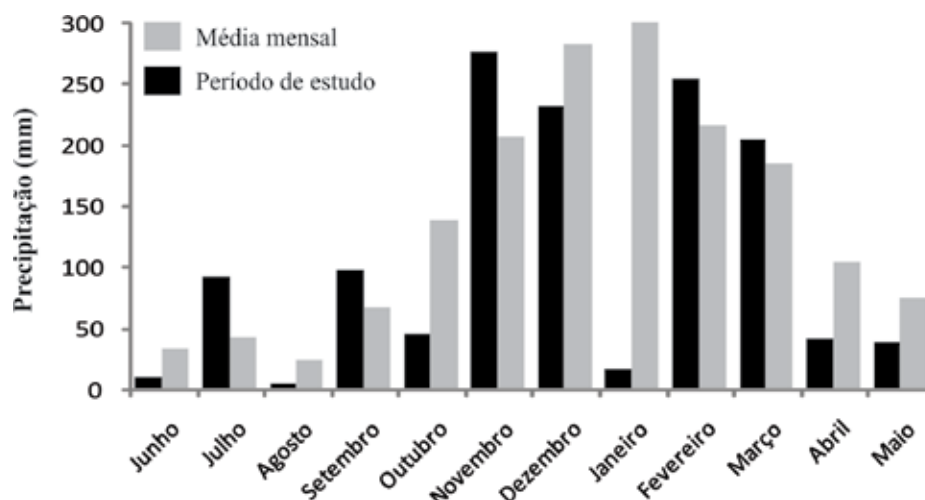


Figura 3. Precipitação média mensal entre 2003 e 2016 na região da bacia do Córrego da Ariranha (CBA, 2016) e precipitação mensal durante o período de estudo, de junho de 2014 a maio de 2015 (Autores). Fontes: CBA 2016 e autores.

Os gases e materiais particulados presentes na atmosfera durante a condensação (processo chamado “rainout”) e precipitação (lavagem da atmosfera, denominada de “washout”), dissolvem-se nas gotas de chuva e acabam sendo depositados nas reservas de água doce explorável

(BERNER & BERNER, 1996). As espécies dissolvidas contidas nas águas pluviais podem ser divididas em três grupos: derivados de aerossóis marinhos; derivados de aerossóis terrestres (poeira de solo e emissões biológicas) e derivados de fontes antrópicas (NEGREL & ROY, 1998).

Várias atividades humanas são significantes fontes de emissões de elementos e compostos para a atmosfera, tais como queima de combustíveis fósseis, emissões industriais, incineração de resíduos, agropecuária e minerações, podendo depositá-los no próprio local ou transportá-los por grandes distâncias (MOLINAROLI et al., 1999). Com o intuito de verificar aportes de fósforo total via precipitação, a Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para as águas de chuva da bacia do Córrego da Ariranha durante o período de estudo.

Os valores de pH das amostras coletadas variam entre 4,70 e 6,90, com média de 5,80. O valor de pH de 5,6 em águas de chuva “limpas” ocorre em função da solubilização parcial do dióxido de carbono (CO₂) e pelo equilíbrio de dissolução parcial do ácido carbônico (H₂CO₃) formado (GALLOWAY et al., 1982). Contudo, águas pluviais com valores de pH inferiores a 5,0 podem ser consideradas

chuva ácida (GALLOWAY et al., 1982). Algumas amostras apresentam valores de pH acima e/ou muito próximos aos valores das águas de chuva ácidas (Tabela 3 e Figura 4a).

Os resultados de condutividade elétrica mantiveram-se praticamente constantes e baixos por todo o ano de estudo, com média de 9,7 µS/cm (Tabela 3 e Figura 4b). No entanto, há uma variação de 29 µS/cm nas amostras de dezembro, fator que pode estar relacionado com a temperatura e a quantidade de íons presentes na precipitação. Em relação a HCO₃⁻, a bacia apresenta uma média ponderada de 2,59 mg/L (Tabela 3 e Figura 4c). As deposições de HCO₃⁻ podem estar relacionadas com a dissolução de CaCO₃ emitido para a atmosfera pelas atividades de mineração de rochas que contêm carbonato de cálcio e à poeira de solos derivados da alteração de rochas alcalinas presentes na região da Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas.

Tabela 3. Precipitação e parâmetros físicos e químicos quantificados nas águas pluviais da bacia do Córrego Ariranha.

Amostragem	Precipitação (mm)	pH	Cond ¹ (µS/cm)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	P ² (µg/L)
27/07/2014	45,0	5,3	4,0	2,5	12,0
26/10/2014	26,0	6,3	18,0	1,5	0,0
03/11/2014	40,0	5,8	10,0	1,4	9,0
08/11/2014	58,0	5,7	6,0	1,5	0,0
24/11/2014	27,0	5,5	4,0	1,0	22,0
25/11/2014	44,0	4,7	4,0	1,5	24,0
26/11/2014	22,0	4,9	8,0	1,0	22,0
30/11/2014	41,0	6,3	7,0	1,5	26,0
11/12/2014	28,0	5,6	3,0	1,5	18,0
13/12/2014	49,0	4,9	10,0	1,0	16,0
22/12/2014	58,0	5,2	32,0	1,5	0,0
02/02/2015	27,0	5,8	15,0	5,0	32,0
05/02/2015	40,0	6,9	10,0	3,0	27,0
19/02/2015	87,0	6,5	6,0	5,0	31,0
09/03/2015	31,0	6,3	15,0	4,0	9,0
15/03/2015	68,0	6,6	7,0	4,5	0,0
17/03/2015	33,0	6,6	4,0	2,5	0,0
11/05/2015	30,0	4,7	12,0	3,5	8,0
Média	41,9	5,8	9,7	2,4	14,2
Desvio Padrão	17,0	0,7	7,1	1,4	11,5
C_{EP}	--	--	--	2,6	13,9

¹ Condutividade elétrica ² Fósforo Total.

Em relação a fósforo total, os valores obtidos neste trabalho, média ponderada de 13,9 $\mu\text{g/L}$ (Tabela 3), podem ser atribuídos à queima de combustível fóssil por veículos, carvoarias e queimadas que ocorrem na região. Outros fatores que podem contribuir para a concentração de fósforo total

nas águas pluviais são a volatilização derivada da aplicação de fertilizantes fosfatados em águas de cultivo, poeiras de solos agrícolas e de solos derivados da alteração de rochas alcalinas, dispersas como material particulado no revolvimento da terra (Figura 4d).

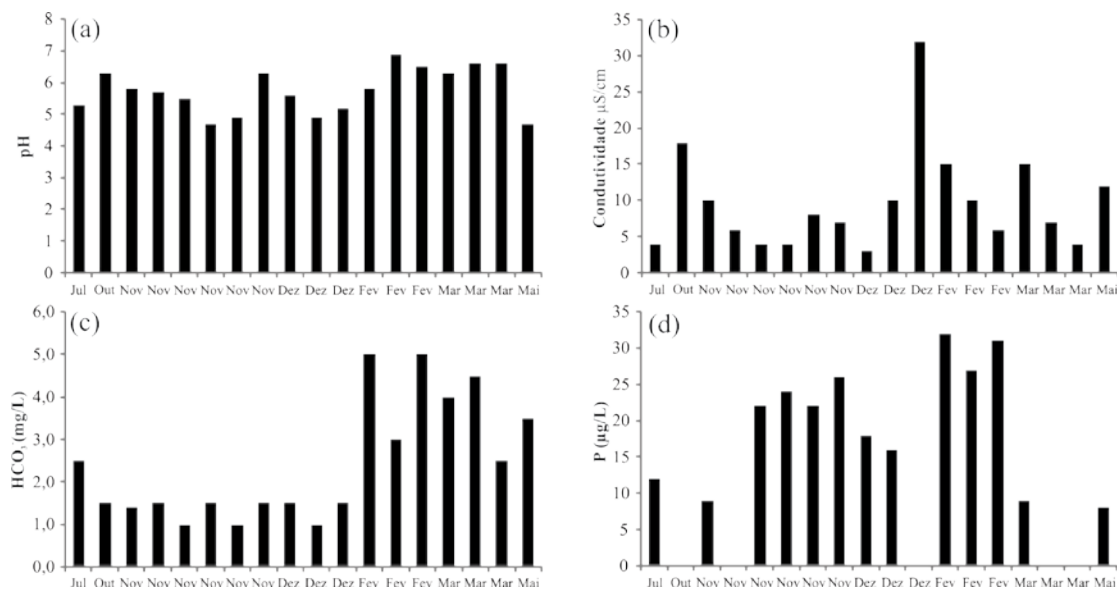


Figura 4. Parâmetros físico-químicos e químicos quantificados nas águas pluviais da bacia do Córrego Ariranha: (a) potencial hidrogeniônico (pH); (b) condutividade elétrica ($\mu\text{S/cm}$); (c) alcalinidade (mg/L); (d) fósforo total ($\mu\text{g/L}$).

4.3 Índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT)

Os valores do índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) indicam que as águas fluviais da bacia do Córrego da Ariranha apresentaram qualidade da água entre boa e intermediária, com potencial de desenvolvimento de processo de eutrofização, conforme resultados apresentados na

Figura 5. As diferenças identificadas nas amostras durante o período de estudo podem, segundo Soares & Schröder (2015), estar relacionadas com o início da primavera e o aumento da temperatura da água; nesse período ocorre uma maior disponibilidade de nutrientes e condições propícias de penetração de luz na água.

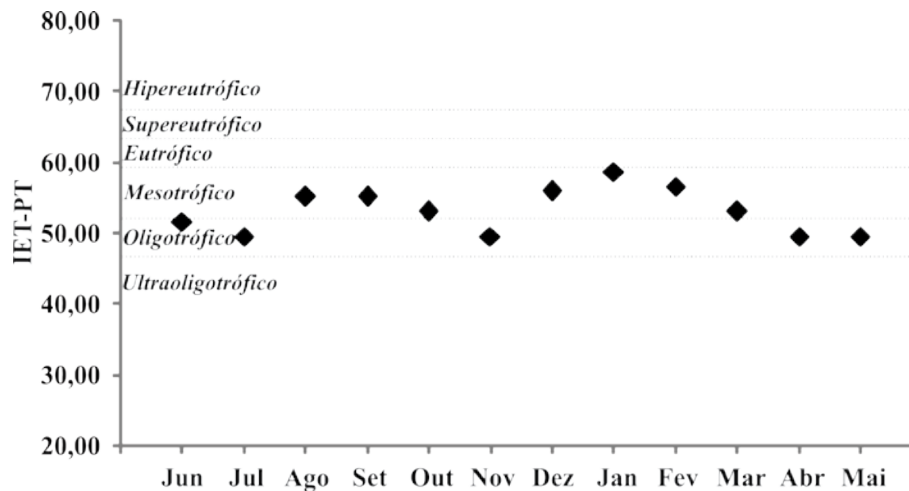


Figura 5. Índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) aplicada nas águas fluviais da bacia do Córrego da Ariranha.

Em termos gerais, verificou-se pelos valores de IET-PT que o nível trófico das águas do Córrego da Ariranha entre junho (51,61), julho (49,50), novembro (49,50), abril (49,50) e maio (49,50) apresenta um índice oligotrófico entre $47 < IET \leq 52$, ou seja, ambiente de baixa produtividade. Isso se deve muito provavelmente às características relacionadas ao período de ano, turbilhonamento e baixo tempo de residência da água na bacia hidrográfica.

Para os meses de agosto (55,21), setembro (55,21), outubro (53,10), dezembro (56,01), janeiro (58,81), fevereiro (56,70) e março (53,10), os valores de IET-PT apresentaram um índice mesotrófico entre $52 < IET \leq 59$, indicando uma produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água. Os maiores valores de IET (Figura 6) podem coincidir com a estação do ano e o período de práticas agrícolas, como preparo do solo e aplicações de fertilizan-

tes NPK nas lavouras de batata, milho e café, situação favorável ao carregamento de fósforo para as águas da bacia.

Os valores dos índices de estado trófico para fósforo total (IET-PT) para as águas pluviais da bacia do Córrego da Ariranha indicam uma qualidade da água limpa, com concentrações insignificantes e/ou baixas de nutrientes, que não acarretam prejuízos aos usos da água de chuva (Figura 6). As águas de precipitação são classificadas como ultraoligotróficas ($IET \leq 47$) e oligotróficas ($47 < IET \leq 52$), provavelmente em virtude da variabilidade sazonal (estações do ano e intensidade de precipitação) e dos processos que têm influência sobre o grau de eutrofização (práticas agrícolas e movimentação de solo). Esses processos podem apresentar variações no decorrer do ano, havendo épocas em que se desenvolve de forma mais intensa e outras em que pode ser mais limitado (Figura 6).

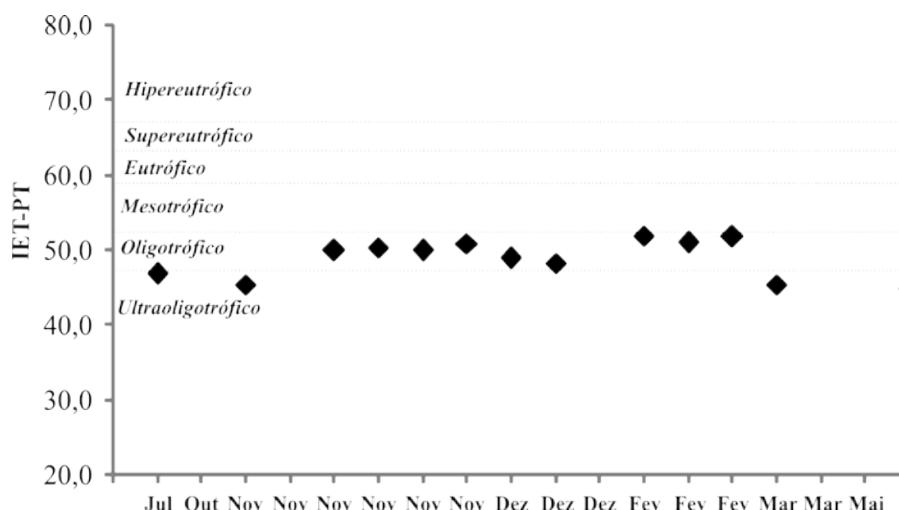


Figura 6. Índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT) aplicada nas águas pluviais da bacia do Córrego da Ariranha.

A concentração média ponderada de fósforo total nas águas fluviais e pluviais (Tabelas 2 e 3) foi calculada em função da vazão direta (m³/s) e do volume total de chuva para o período estudado (mm). A média ponderada de fósforo total (67,2 µg/L) nas águas fluviais foi multiplicada pela vazão média durante o período de amostragem (124,7 L/s) e pelo tempo (s) do período de amostragem (1 ano hidrológico), obtendo assim a massa de fósforo total evacuada no exutório da bacia (0,25 t/ano – Tabela 4). A média ponderada de fósforo total (13,9 µg/L) nas águas pluviais foi multiplicada pela precipitação ocorrida durante o período de estudo, entre os meses de junho de 2014 a maio de 2015 (1.494 mm L/m², 1 mm = 1 L/m²) e pela área de 6300000 m², obtendo a massa de fósforo precipitada anualmente na área da bacia (0,13 t/ano Tabela 4).

O valor da diferença (0,12 t/ano) entre a massa de fósforo total evacuada anualmente no exutório da bacia pelas águas fluviais (0,25 t/ano) e a massa de fósforo total precipitada anualmente na área da bacia (0,13 t/ano) pode indicar que a presença desse parâmetro nas águas superficiais também pode ser proveniente das águas de chuva. Assim, apesar dos índices de estado trófico para fósforo

total (IET-PT) para as águas pluviais indicarem uma qualidade da água limpa, as entradas atmosféricas de fósforo total também podem contribuir, em longo prazo, para o processo de eutrofização do Reservatório Bortolan, visto que esse reservatório é o exutório da bacia do Córrego da Ariranha.

Tabela 4. Carga de fósforo total (t/ano) avaliada nas águas pluviais e fluviais da bacia do Córrego da Ariranha.

	Água fluvial	Água pluvial	Água fluvial - Água pluvial
Fósforo total (t/ano)	0,25	0,13	0,12

Com isso, algumas medidas de manejo poderiam ser adotadas visando à manutenção desse importante ecossistema aquático: cumprimento legal e conservação de APPs; recuperação de áreas degradadas; aplicar técnicas de uso e conservação do solo com o controle e planejamento da expansão urbana e da produção agrícola; fomentar atividades florestais sustentáveis. Além dessas sugestões, um programa de monitoramento deveria ser realizado, visando a um melhor entendimento desse importante sistema hídrico utilizado para recreação e geração de energia elétrica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho reporta as variações no índice de estado trófico para fósforo total nas águas fluviais e pluviais durante um ano hidrológico na bacia do Córrego da Ariranha, afluente do Reservatório Bortolan em Poços de Caldas (MG). De acordo com os parâmetros analisados, a bacia ainda não foi fortemente afetada pelos tipos de uso e ocupação do solo, no entanto, concentrações desse elemento indicam valores maiores e/ou muito próximos ao máximo permitido pela legislação vigente. As características geológicas e pedológicas da área de estudo podem causar alterações naturais na qualidade da água, no entanto, essas características não são favoráveis para as alterações da qualidade da água em relação a fósforo total. Quanto ao índice de estado trófico para fósforo total (IET-PT), os resultados indicam que a bacia possui águas limpas, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes que não acarretam em prejuízos aos usos da água em determinados períodos/estações do ano. Em outros períodos/estações do ano, os resultados indicam corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água. Além disso, constata-se que os materiais sólidos, líquidos e gasosos presentes na atmosfera podem modificar quimicamente as águas de chuva e, por consequência, alterar a concentração de fósforo total nas águas superficiais da bacia, podendo contribuir com o processo de eutrofização do Reservatório Bortolan em Poços de Caldas (MG).

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eng^a Lara Chao e aos revisores anônimos que contribuíram com a melhora deste manuscrito. Os autores também gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, processo CAG - APQ-02933-14.

7 REFERÊNCIAS

- ALVES, W. S.; SANTOS, L.N.S.; MEDEIROS, V.S.; AQUINO, D.S.; MORAIS, W. A.; SALEH, B.B.; PEREIRA, V.C.; MOURA, D.M.B. Avaliação da qualidade da água e estado trófico do Ribeirão das Abóboras, em Rio Verde - GO, Brasil. **Geociências**. 36 (1): 13-29, 2017.
- ANDRIETTI, G.; FREIRE, R.; AMARAL, A.G.; ALMEIDA, F.T.; BONGIOVANI, M.C.; SCHNEIDER, R.M. Índices de qualidade da água e de estado trófico do rio Caiabi, MT. **Rev. Ambient. Água**. 11 (1): 163-175, 2016.
- APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22^oed., Washington, American Public Health Association Pub., 1935 p, 2012.
- BERNER, E.K.; BERNER, R.A. **Global environment: water, air and geochemical cycles**. Prentice Hall, North Haven, Connecticut, 367p., 1996.
- BRASIL Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA, Resolução n^o 357, de 17 de março de 2005. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 27p, 2005.
- CARLSON, R.E. A trophic state index for lakes. **Limnol. Oceanogr.** 22 (2): 361-369, 1977.
- CBA. Companhia Brasileira de Alumínio. **Relatório interno: dados pluviométricos da estação bauxita**. Poços de Caldas, 13p, 2016.
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo IET – Índice do Estado Trófico. Disponível em: <http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/04.pdf/>. Acesso em: 28 de novembro 2016.
- CUNHA, D.G.F.; CALIJURI, M.C.; LAMPARELLI, M.C. **Ecological Engineering**. 60: 126-134, 2013.
- DICENZO, V.J.; MACEINA, M.J.; STIMPERT, M.C. Relations between Reservoir Trophic State and Gizzard Shad Population Characteristics in Alabama Reservoirs. **North American Journal of Fisheries Management**. 16 (4): 888-895, 1996.
- DODDS, W.K.; JONES, J.R.; WELCH, E.B. Suggested classification of stream trophic state: distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. **Wat. Res.** 32 (5): 1455-1462, 1998.
- ESTEVEZ, F.A. Fundamentos de Limnologia. **Interciência**, 2 ed. Rio de Janeiro, 602p, 1998.
- FIA, R.; MATOS, A.T.; CORADI, P.C.; PEREIRA-RAMIREZ, O Estado trófico da água na bacia hidrográfica da Lagoa Mirim, RS, Brasil. **Rev. Ambient. Água**. 4 (1): 132-141, 2009.
- GALLOWAY, J.N.; LIKENS, G.E.; KEENE, W.C.; MILLER, J.M. The composition of precipitation in remote areas of the world. **Journal of Geophysical Research**. 87 (1): 8771-8786, 1982.
- GARCIA, G.; CARDOSO, A.A. A importância da deposição atmosférica seca como fonte de Nitrogênio e fósforo para ecossistemas lacustres. In: **Ecologia de reservatórios e interfaces**. Organização:

Marcelo Pompêo; Viviane Moschini-Carlos; Paula Yuri Nishimura; Sheila Cardoso da Silva; Julio Cesar López Doval. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015, 460 p.

GOOGLE EARTH. Imagens de satélite. Disponível em <https://earth.google.com/>. Acesso em: 16 de setembro de 2015.

HERMES, L.C.; SILVA, A.S. **Avaliação da qualidade das águas: manual prático**. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 55p, 2004.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Manual de Recuperação pelas Áreas Degradadas pela Mineração: técnicas de revegetação**. Brasília: Ibama, 96p, 1990.

KRATZER, C.R.; BREZONIK, P.L. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. **JAWRA**. **17** (4): 713-715, 1981.

LAMPARELLI, M.C. **Graus de trofia em corpos d'água do Estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 235p, 2004.

MATTHEWS, R.; HILLES, M.; PELLETIER, G. Determining trophic state in Lake Whatcom, Washington (USA), a soft water lake exhibiting seasonal nitrogen limitation. **Hydrobiologia**. 468 (1): 107-121, 2002.

MOLINAROLI, E.; PISTOLATO, M.; RAMPAZZO, G.; GUERZONI, S. Geochemistry of natural and anthropogenic fall-out (aerosol and precipitation) collected from the N W Mediterranean: two different multivariate statistical approaches. **Applied Geochemistry**. 14(1): 423-432, 1999.

NÉGREL, P.; ROY, S. Chemistry of rainwater in the Massif Central (France): a strontium isotope and major element study. **Applied Geochemistry**. 13(1): 941-952, 1998.

OSGOOD, R.A. Using differences among Carlson's trophic state index values in regional water quality assessment. **Water Resources Bulletin**. American Water Resources association. 18 (1): 67-74, 1982.

PMPC. Prefeitura Municipal de Poços de Caldas. Revisão do Plano Diretor. Poços de Caldas: Secretaria de Planejamento e Coordenação, 178 p, 2006.

PMPC. Prefeitura Municipal de Poços de Caldas. **Zoneamento Ambiental do Município de Poços de Caldas (MG): subsídios**

ao planejamento territorial. Relatório técnico. Poços de Caldas, 41p, 2007.

SALAS, H.J.; MATINO, P. A simplified phosphorus trophic state model for warm-water tropical lakes. **Yat. Res.** **25** (3): 341-350, 1991.

SARDINHA, D.S.; GODOY, L.H.; CONCEIÇÃO, F.T. **Modelagem hidrogeoquímica aplicada a bacias hidrográficas**. Editora Novas Edições Acadêmicas, 165p., 2015.

SMITH, V.H.; JOYE, S.B.; HOWARTH, R.W. Eutrophication of freshwater and marine ecosystems. **Limnol. Oceanogr.** **51**(1) 351-355, 2006.

SOARES, G.; SCHRÖDER, N.T. Análise do estado trófico de uma bacia de acumulação em um complexo industrial. **Revista de Iniciação Científica da Ulbra**. 13(1): 218-231, 2015.

STRICKLAND, J.D.; PARSONS, T.R. A manual of seawater analysis. **Bull. Fih. Res. Bel. Can.**, 125 (1): 1-185, 1960.

TUNDISI, J.G. **Água no Século XXI - Enfrentando a Escassez**. Rima, 2ª edição, São Carlos, 247 p, 2005.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **National Strategy for the Development of Regional Nutrient Criteria Factsheet**. Disponível em: <https://www.epa.gov/nutrient-policy-data/national-strategy-development-regional-nutrient-criteria-factsheet>. Acesso em: 30 de novembro 2016.

VALDERRAMA, J.C. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. **Marine Chemistry**, 10 (1): 109-122, 1981.

VON SPERLING, M. **Estudo e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: UFMG, 588 p, 2007.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4ª ed. UFMG, Belo Horizonte, 470p, 2014.

WHITMORE, T.J. Florida diatom assemblages as indicators of trophic state and pH. **Limnol. Oceanogr.** 34 (5): 882-895, 1989.

ZANINI, H.L.H.T.; AMARAL, L.A.; ZANINI, J.R.; TAVARES, L.H.S. Caracterização da água da microbacia do Córrego Rico avaliada pelo índice de qualidade de água e de estado trófico. **Eng. Agríc.** **30** (4): 732-741, 2010.